



T.C.

BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ DOKTORA PROGRAMI

**DÜŞÜK PLASTİSİTELİ KİL ZEMİNLERİN DİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN
DENEYSEL BELİRLENMESİ VE ZEMİN BÜYÜTME ANALİZLERİ**

DOKTORA TEZİ

AHMET NEİM KAHVECİ

TEZ DANIŞMANI

PROF. DR. NAZİLE URAL

BİLECİK, 2025

10730101

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ DOKTORA PROGRAMI

**DÜŞÜK PLASTİSİTELİ KİL ZEMİNLERİN DİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN
DENEYSEL BELİRLENMESİ VE ZEMİN BÜYÜTME ANALİZLERİ**

DOKTORA TEZİ

AHMET NEİM KAHVECİ

TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. NAZİLE URAL

BİLECİK, 2025

10730101

BEYAN

Düşük Plastisiteli Kil Zeminlerin Dinamik Özelliklerinin Deneysel Belirlenmesi ve Zemin Büyütme Analizleri başlıklı doktora tezinin hazırlık ve yazım aşamasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, [Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde Üretken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehberine](#) uygun olarak tez/dönem projemi hazırladığımı, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel etik kurallarına uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, çalışmamın herhangi bir kısmının başka bir tez/dönem projesi olarak sunulmadığını, aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Ahmet Neim Kahveci

.../.../2025

İmza:

ÖN SÖZ

Bu doktora tezi, akademik bilgi birikimimi artırmak ve bilimsel araştırma yetkinliğimi geliştirmek amacıyla yürüttüğüm uzun soluklu bir çalışmanın ürünüdür. Araştırma süreci boyunca karşılaştığım zorluklar, edindiğim deneyimler ve elde ettiğim bulgular, yalnızca akademik gelişimime değil, aynı zamanda kişisel gelişimime de katkı sağlamıştır.

Çalışmamın her aşamasında bilgi ve tecrübesiyle bana rehberlik eden, sabrı ve özverisiyle yolumu aydınlatan değerli danışmanım Prof. Dr. Nazile URAL'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Onun akademik birikimi ve yönlendirmeleri, araştırmamın bilimsel derinliğini artırmıştır.

Bu çalışmamın her aşamasında bilgi ve deneyimiyle bana yol gösteren, akademik rehberliğiyle bana ilham veren ve daima yapıcı desteğini gördüğüm tez izleme komitemde bulunan Doç. Dr. Kamil Bekir AFACAN'a en içten şükranlarımı sunarım. Gerek akademik titizliği gerekse araştırma sürecine kattığı vizyon sayesinde bu tezin ortaya çıkmasında bana yardımcı olmuştur.

Tez izleme komitemde yer alarak yapıcı eleştirileri ve değerli katkılarıyla çalışmamın gelişimine destek olan Dr. Öğr. Üyesi Burak GÖRGÜN'e şükranlarımı sunarım.

Akademik hayatıma başladığım ilk günden beri yanımda olan, bilgisi ve desteği ile beni her zaman doğru yönlendiren abim Prof. Dr. Kamil KAHVECİ'ye teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan, sevgisi ve anlayışıyla bana güç veren annem, çocuklarım Neva, İbrahim Arda ve değerli eşim Doç. Dr. Hilal Kahveci'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Onların manevi desteği, bu zorlu süreci başarıyla tamamlamamda en büyük motivasyon kaynağım olmuştur.

Bu çalışmayı, hayatım boyunca hep yanımda olacağına inandığım, dürüstlüğü, çalışkanlığı ve sevgisiyle her zaman örnek aldığım, ancak bu sürecin tamamlanmasına tanıklık edemeyen sevgili Babamın aziz hatırasına ithaf ediyorum. Onu saygı, sevgi, özlem ve rahmetle anıyorum...

Ahmet Neim KAHVECİ

2025

ÖZET

Deprem yer hareketinin büyüklüğü ve karakteristikleri, yalnızca kaynak parametrelerine değil, aynı zamanda dalgaların geçtiği yerel zemin koşullarına da bağlıdır. Deprem dalgaları yüzeye doğru ilerlerken, tabaka kalınlığı, ana kayanın derinliği, zemin tipi ve zeminlerin dinamik özellikleri gibi birçok parametre bu hareketin genlik ve frekans içeriğinde değişikliklere neden olmaktadır. Bu durum, özellikle aktif deprem bölgelerindeki mühendislik yapılarının güvenli tasarımı açısından, sahaya özel zemin davranışlarının belirlenmesini zorunlu kılmaktadır.

Bu çalışmada, Kuzey Anadolu Fay Zonu üzerinde yer alan Sakarya ili sınırlarında gerçekleştirilen sondajlardan temin edilen örselenmemiş numuneler üzerinde yapılan deney ve analizler ile düşük plastisiteli kil zeminlerin dinamik davranışları değerlendirilmiştir. Çalışmada, iki farklı sondaj noktasında yürütülen arazi çalışmaları sonucunda elde edilen örselenmemiş zemin numuneleri, laboratuvar ortamında rezonant kolon ve burulmalı kesme deney sistemleri ile test edilmiştir. Bu sayede, birim kayma deformasyonuna bağlı olarak değişen kayma modülü ve sönüm oranı eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen veriler, zemine özel dinamik parametrelerin belirlenmesinde ve sayısal modelleme sürecinde girdi olarak kullanılmıştır. Sayısal analizlerde hem orijinal deprem kayıtları hem de 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) kapsamında tanımlanan iki farklı ölçeklendirme yöntemi ile elde edilen veriler kullanılmıştır. Analizlerde bir boyutlu eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemler uygulanmıştır. Bu amaçla, 17 farklı deprem kaydı, TBDY 2018’de tanımlandığı şekilde iki ayrı yöntem kullanılarak ölçeklendirilmiş, DEEPSOIL programı ve OPENSEES yazılımı aracılığıyla zemin büyütme analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen spektral parametrelerin TBDY 2018 tarafından önerilen spektrum zarfı ile uyumu analiz edilmiştir.

Sonuç olarak, bu tez çalışması hem deneysel hem de sayısal analizlerin birlikte kullanıldığı bütüncül bir yaklaşım sunmakta; düşük plastisiteli kil zeminlerin deprem davranışlarının güvenilir şekilde belirlenmesine olanak tanımaktadır. Sahaya özel zemin analizleri sismik davranışın doğru bir şekilde değerlendirilmesi için daha fazla veri sağlayarak daha güvenli mühendislik tasarımlarına olanak tanımakta ve özellikle aktif fay zonları üzerindeki yerleşim alanlarında yapılacak mühendislik tasarımlarında dikkate alınması gereken temel parametreleri kapsamlı şekilde sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Düşük Plastisiteli Kil, Sahaya Özel Analiz, Zemin Büyütme, Eşdeğer Doğrusal Analiz, Doğrusal Olmayan Analiz, Sakarya.

ABSTRACT

The magnitude and characteristics of earthquake ground motion depend not only on source parameters but also on the conditions of local soil through which the seismic waves propagate. As seismic waves travel towards the surface, many parameters such as layer thickness, depth of the bedrock, soil type, and the dynamic properties of the soil cause changes in the amplitude and frequency content of the motion. This makes it essential to determine the site-specific soil behavior for the safe design of engineering structures, particularly in active seismic regions.

This study evaluates the dynamic behavior of low-plasticity clay soils based on laboratory tests and analyses performed on undisturbed samples obtained from drilling operations within the boundaries of Sakarya province, located along the North Anatolian Fault Zone. The undisturbed soil samples collected from two different drilling locations were tested in laboratory conditions with the resonant column and torsional shear testing systems. As a result, shear modulus and damping ratio curves, which vary with the shear strain, were obtained. These data were used as input for the determination of site-specific dynamic parameters and in the numerical modeling.

In the numerical analyses, both the original earthquake records and the data scaled using two different scaling methods defined in the 2018 Turkish Building Earthquake Code (TBDY 2018) were utilized. One-dimensional equivalent linear and nonlinear methods were applied in the analyses. For this purpose, 17 different earthquake records were scaled according to the two scaling methods outlined in TBDY 2018 as expressed before, and site amplification analyses were performed using DEEPSOIL and OPENSEES software. The spectral parameters obtained from the analyses were compared with the spectrum envelope proposed in TBDY 2018.

In conclusion, this Ph.D. thesis presents a comprehensive approach that combines both experimental and numerical analyses, enabling reliable determination of the seismic behavior of low-plasticity clay soils. Site-specific soil analyses provide more comprehensive data for accurate evaluation of seismic behavior, enabling safer engineering designs and presenting fundamental parameters that must be considered especially in engineering projects located in settlement areas above active fault zones.

Keywords: Low Plasticity Clay, Site specific analysis, Soil amplification, Equivalent Linear Analysis, Nonlinear Analysis, Sakarya.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER	iv
TABLolar LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ	xvii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amacı.....	2
1.2. Tezin Kapsamı	5
2. ZEMİNLERİN DİNAMİK ÖZELLİKLERİ.....	8
2.1. Yer Hareketi Parametreleri	8
2.2. Genlik Parametreleri.....	8
2.2.1.1. Pik İvme	9
2.2.1.2. Pik Hız	10
2.2.1.3. Pik Yer Değiştirme.....	11
2.2.2. Frekans İçeriği Parametreleri	11
2.2.2.1. Fourier Spektrumu.....	11
2.2.2.2. Tepki Spektrumları	12
2.2.2.3. Spektral Parametreler	13
2.2.2.4. Kuvvetli Yer Hareketi Süresi.....	13
3. ZEMİNLERE ETKİYEN DİNAMİK YÜKLER	14
3.1. Tekrarlı Yükler	17
3.1.1. Deprem Titreşimi.....	18

3.1.2. Makine Temellerinin Titreşimi.....	18
3.1.3. Geçici Titreşimler	19
3.1.4. Su Dalgalarının Meydana Getirdiği Titreşimler	19
3.2. Dinamik Etkiler Altında Zemin Özelliklerinin Belirlenmesi.....	19
3.3. Zeminlerin Dinamik Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanılan Parametreler	23
3.3.1. Kayma Modülü	23
3.3.2. Sönüm Oranı.....	28
3.3.3. Kayma Dalgası Hızı.....	29
3.4. Dinamik Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanılan Yöntemler.....	32
3.4.1. Laboratuvar Yöntemleri	33
3.4.1.1. Ultrasonik Darbe Deneyi	33
3.4.1.2. Rezonant Kolon Deneyi	34
3.4.1.3. Dinamik Üç Eksenli Deneyi.....	36
3.4.1.4. Dinamik Basit Kesme Deneyi	38
3.4.1.5. Dinamik Burulmalı Kesme Deneyi	38
3.4.2. Arazi Deneyleri.....	40
3.4.2.1. Kuyu İçi Yöntemler	41
3.4.2.2. Yüzey Yöntemleri	42
4. SAHAYA ÖZEL DİNAMİK ANALİZ	44
4.1. Sahaya Özel Zemin Davranışı ve TBDY 2018	44
4.2. Sismik Tasarımda Kullanılacak Depremlerin Seçimi	46
4.3. Tektonik Yapı ve Kaynak Özellikleri.....	48
4.3.1. Yerel Zemin Özellikleri	49
4.3.2. Yerel Zemin Sınıfı ve Sınıflandırma Sistemleri	49
4.3.3. Kuvvetli Yer Hareketinin Süresi ve İvme-Hız Oranı (a/v).....	50
4.4. Kuvvetli Yer Hareketi Kaydı Kaynakları	50

4.4.1. Yapay Deprem Kayıtları	50
4.4.2. Benzeştirilmiş Deprem Kayıtları.....	51
4.4.3. Gerçek Depremlerden Elde Edilen Yer Hareketi Kayıtları.....	51
4.5. Kuvvetli Yer Hareketlerinin Seçimi	52
4.6. Yönetmelik Hükümleriyle Tasarım Spektrumlarının Belirlenmesi	52
4.6.1. Sahaya Özel Dinamik Analizlerle Tasarım Spektrumlarının Hesaplanması..	53
4.6.2. Sahaya Özel Analizler İçin Hedef Spektruma Uygun Depremlerin Seçilmesi Süreci	54
4.7. Zemin Büyütmesi ve Etkileyen Faktörler	55
4.8. Zemin Davranış Analizleri.....	57
4.8.1. Bir Boyutlu Eşdeğer Doğrusal Yaklaşım	57
4.8.1.1. Bir Transfer Fonksiyonun Değerlendirilmesi	58
4.8.2. Bir Boyutlu Doğrusal Olmayan Yaklaşım	59
5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	62
6. MATERYAL VE METOT	72
6.1. Giriş	72
6.2. Çalışma Bölgesinin Tanıtılması	72
6.3. Bölgenin Depremselliği ve Jeolojisi.....	74
6.4. Saha Çalışması.....	78
6.5. Laboratuvar Çalışması	79
6.6. Örselenmemiş Numuneler Üzerinde RC ve TS Deneylerinin Yapılması.....	80
6.7. Sahaya Özel Zemin Büyütme Analizlerinin Yapılması	84
6.7.1. Bölgeye Uygun Depremlerin Seçimi	86
6.7.2. Analizlerde Kullanılacak Olan Depremlerin Ölçeklendirilmesi.....	92
6.7.3. DEEPSOIL V7.1 ile 1D Zemin Büyütme Analizlerinin Gerçekleştirilmesi ..	106
6.7.4. OPENSEES Yazılımı ile Zemin Büyütme Analizlerinin Gerçekleştirilmesi .	107

7. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	114
7.1. Dinamik Deney Sonuçları.....	114
7.2. Eşdeğer Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Analiz Sonuçları	115
7.2.1. Sahaya Özel Analizlerde Zemin Yüzeyinde Oluşan İvme Değerleri	116
7.2.2. Sahaya Özel Analiz Sonuçlarına Göre Oluşan Tepki Spektrumları.....	171
7.2.2.1. Orijinal İvme Kayıtlarına Göre Tepki Spektrumları	171
7.2.2.2. Zaman Tanım Alanında Yapılan Ölçeklendirme ile Tepki Spektrumları	172
7.2.2.3. Frekans Tanım Alanında Yapılan Ölçeklendirme ile Tepki Spektrumları...	173
7.2.3. Sahaya Özel Zemin Büyütme Değerleri (Amplifikasyon Faktörü)	175
7.2.3.1. Orijinal İvme Kayıtlarına Göre Amplifikasyon Faktörü	177
7.2.3.2. Zaman Tanım Alanında Yapılan Ölçeklendirmeye Göre Amplifikasyon Faktörü	179
7.2.3.3. Frekans Tanım Alanında Yapılan Ölçeklendirmeye Göre Amplifikasyon Faktörü	180
7.2.4. EL ve NL Analizlerin Zemin Büyütme Faktörü Değerlerinin Karşılaştırılması	181
7.2.5. Ölçeklendirme Yöntemlerine Göre Zemin Büyütme Faktörlerinin Karşılaştırılması	185
7.2.6. Sahaya Özel Analizlerden Elde Edilen PGA ve Şekil Değiştirme Değerleri	186
7.2.7. Spektral Parametrelerin TBDY 2018'e Göre Performansının Değerlendirilmesi	204
8. SONUÇLAR	211
KAYNAKÇA.....	214

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1. Dinamik yüklerden dolayı meydana gelen kayma deformasyonları	14
Tablo 3.2. Tarihsel depremler	16
Tablo 3.3. Laboratuvar deneylerinde ölçülebilen parametreler	22
Tablo 3.4. Laboratuvar deneyleri ve göreceli performans değerlendirmesi	22
Tablo 3.5. Farklı zemin türlerine ait kayma modülü değerleri	25
Tablo 3.6 Kayma modülü hesabı için eşitlikler	26
Tablo 3.7. Kayma modülü hesaplamaları için doygunluk derecesini içeren eşitlikler	26
Tablo 3.8. Kohezyonlu zeminler için kayma modülü eşitlikleri.....	28
Tablo 3.9. Zeminlerin ortalama kayma dalgası hızları	31
Tablo 3.10. Kayma dalgası hızı için eşitlikler	32
Tablo 3.11. Laboratuvar deney sistemlerinin deformasyon genliği aralıkları	39
Tablo 3.12. Dinamik parametrelerin belirlenmesinde kullanılan deney sistemleri	40
Tablo 4.1. Yerel zemin sınıfları.....	53
Tablo 4.2. Tabakalanma koşullarına bağlı olarak önerilen transfer fonksiyonlar.....	58
Tablo 6.1. Deneyleri yapılan sondaj kuyuları	79
Tablo 6.2. Seçilen depremler	87
Tablo 6.3. Ölçeklendirme işlemleri sonucu PGA değişimi.....	106
Tablo 7.1. Orijinal ve PGA ölçeklendirmesi ile elde edilen deprem kayıtları ile yapılan analizlerden elde edilen maksimum ivme değerleri	152
Tablo 7.2. Orijinal ve spektral ölçeklendirme ile elde edilen deprem kayıtları ile yapılan analizlerden elde edilen maksimum ivme değerleri	170

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Tezin amaç ve kapsamının şematik olarak gösterimi.....	7
Şekil 2.1. Parkfield depremine ait ivme, hız, yer değiştirme zaman grafikleri.....	9
Şekil 2.2. Parkfield ve Imperial Valley-2 deprem kayıtlarına ait PGA değerleri gösterimi.....	10
Şekil 2.3. Yer hareketinin yumuşak zemin ve ana kaya içinde davranışının gösterimi	10
Şekil 2.4. Parkfield depremi pik hız değeri gösterimi.....	11
Şekil 2.5. Parkfield depremi pik yer değiştirme değeri gösterimi.....	11
Şekil 2.6. Tepki Spektrumları.....	12
Şekil 3.1. Dünya deprem kuşakları	15
Şekil 3.2. Dinamik zemin parametrelerinin belirlenmesi	20
Şekil 3.3. Laboratuvar ve arazi deneyleri uygulama şeması.....	20
Şekil 3.4. Histerisis ilmeği ve omurga eğrisi	24
Şekil 3.5. Yeni nesil kayma modülü grafikleri.....	27
Şekil 3.6. Kayma modülü ve sönüm oranı ilişkisi	29
Şekil 3.7. S dalgası hareketi	30
Şekil 3.8. Yeni nesil kayma dalgası hızı grafikleri.....	31
Şekil 3.9. Rezonant kolon deneyi.....	34
Şekil 3.10. Rezonans frekansının değişiminin gösterimi	35
Şekil 3.11. Dinamik üç eksenli deney sistemi.....	36
Şekil 3.12. Dinamik üç eksenli deney numunesinin gerilme durumu	37
Şekil 3.13. Dinamik burulmalı kesme deneyi	39
Şekil 3.14. Kuyu içi yöntemler	42
Şekil 4.1. Türkiye Deprem Tehlike Haritası	46
Şekil 4.2. Anakayadan yüzeye doğru deprem ivme kaydındaki değişim	55
Şekil 4.3. Dinamik harekete zemin tabakalarının etkisi.....	57
Şekil 4.4. Doğrusal ve doğrusal olmayan zeminin elastik ve plastik davranış bölgeleri	59

Şekil 4.5. Örnek histerisis eğrisi	59
Şekil 4.6. Omurga eğrisinden elde edilen kayma modülleri	60
Şekil 6.1. 2023 yılı içerisinde Türkiye ve çevresinde meydana gelen depremler ve büyüklükleri	73
Şekil 6.2. Çalışma bölgesi.....	73
Şekil 6.3. Adapazarı bölgesinin diri fay haritası	75
Şekil 6.4. Bölgenin genelleştirilmiş dikme kesiti	76
Şekil 6.5. Bölgenin genelleştirilmiş dikme kesiti	77
Şekil 6.6. Sakarya ili jeoloji haritası	78
Şekil 6.7. Rezonant kolon cihazı.....	81
Şekil 6.8. RC-TS cihazı.....	82
Şekil 6.9. DEEPSOIL programına verilerin tanıtılması.....	85
Şekil 6.10. Analizlerde kullanılacak olan 17 adet depreme ait ivme-zaman grafikleri	88
Şekil 6.11. Analizlerde kullanılacak olan deprem kayıtlarının spektral ivme-periyot grafikleri	92
Şekil 6.12. AFAD interaktif web uygulaması	94
Şekil 6.13. Hedef tasarım spektrumu	94
Şekil 6.14. Basit ölçeklendirme işlemi sonucunda ivme kaydında oluşan değişim.....	95
Şekil 6.15. Basit ölçeklendirme (PGA) sonucu oluşan ivme kayıtları.....	96
Şekil 6.16. Basit ölçeklendirme (PGA) sonucu oluşan spektral ivme değerleri	99
Şekil 6.17. Spektral ölçeklendirme işlemi sonucunda ivme kaydında oluşan değişim.....	100
Şekil 6.18. Spektral ölçeklendirme sonucu oluşan ivme kayıtları	101
Şekil 6.19. Spektral ölçeklendirme sonucu oluşan spektral ivme değerleri.....	104
Şekil 6.20. RSN30 deprem kaydı orijinal ve iki farklı ölçeklendirme sonuçlarının karşılaştırılması	105
Şekil 6.21. DEEPSOIL programı uygulama şeması	107
Şekil 6.22. OPENSEES yazılımı kod oluşturma şeması.....	108

Şekil 6.23. Rayleigh sönüm grafiği.....	110
Şekil 6.24. PIMY modeli kesme gerilmesi-kesme birim şekil değiştirme grafiği	112
Şekil 7.1. SK1'e ait RC ve TS deney sonuçları	114
Şekil 7.2. SK2'ye ait RC ve TS deney sonuçları	115
Şekil 7.3. RSN6 orijinal deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	117
Şekil 7.4. RSN20 orijinal deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	118
Şekil 7.5. RSN30 orijinal deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	119
Şekil 7.6. RSN95 orijinal deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	120
Şekil 7.7. RSN160 orijinal deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	121
Şekil 7.8. RSN266 orijinal deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	122
Şekil 7.9. RSN461 orijinal deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	123
Şekil 7.10. RSN729 orijinal deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	124
Şekil 7.11. RSN1101 orijinal deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	125
Şekil 7.12. RSN1176 orijinal deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	126
Şekil 7.13. RSN1605 orijinal deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	127
Şekil 7.14. RSN2752 orijinal deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	128

Şekil 7.15. RSN3754 orijinal deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	129
Şekil 7.16. RSN3965 orijinal deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	130
Şekil 7.17. RSN4107 orijinal deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	131
Şekil 7.18. RSN5827 orijinal deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	132
Şekil 7.19. RSN6927 orijinal deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	133
Şekil 7.20. RSN6 PGA ölçeklendirmesiyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	134
Şekil 7.21. RSN20 PGA ölçeklendirmesiyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	135
Şekil 7.22. RSN30 PGA ölçeklendirmesiyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	136
Şekil 7.23. RSN95 PGA ölçeklendirmesiyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	137
Şekil 7.24. RSN160 PGA ölçeklendirmesiyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	138
Şekil 7.25. RSN266 PGA ölçeklendirmesiyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	139
Şekil 7.26. RSN461 PGA ölçeklendirmesiyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	140
Şekil 7.27. RSN729 PGA ölçeklendirmesiyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	141
Şekil 7.28. RSN1101 PGA ölçeklendirmesiyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri	142

Şekil 7.29. RSN1176 PGA ölçeklendirmesiyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri	143
Şekil 7.30. RSN1605 PGA ölçeklendirmesiyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri	144
Şekil 7.31. RSN2752 PGA ölçeklendirmesiyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri	145
Şekil 7.32. RSN3754 PGA ölçeklendirmesiyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri	146
Şekil 7.33. RSN3965 PGA ölçeklendirmesiyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri	147
Şekil 7.34. RSN4107 PGA ölçeklendirmesiyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri	148
Şekil 7.35. RSN5827 PGA ölçeklendirmesiyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri	149
Şekil 7.36. RSN6927 PGA ölçeklendirmesiyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri	150
Şekil 7.37. RSN6 Spektral ölçeklendirmeyeyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	153
Şekil 7.38. RSN20 Spektral ölçeklendirmeyeyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri	154
Şekil 7.39. RSN30 Spektral ölçeklendirmeyeyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri	155
Şekil 7.40. RSN95 Spektral ölçeklendirmeyeyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri	156
Şekil 7.41. RSN160 Spektral ölçeklendirmeyeyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri	157
Şekil 7.42. RSN266 Spektral ölçeklendirmeyeyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri	158

Şekil 7.43. RSN461 Spektral ölçeklendirmeyeyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri	159
Şekil 7.44. RSN729 Spektral ölçeklendirmeyeyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri	160
Şekil 7.45. RSN1101 Spektral ölçeklendirmeyeyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri	161
Şekil 7.46. RSN1176 Spektral ölçeklendirmeyeyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri	162
Şekil 7.47. RSN1605 Spektral ölçeklendirmeyeyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri	163
Şekil 7.48. RSN2752 Spektral ölçeklendirmeyeyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri	164
Şekil 7.49. RSN3754 Spektral ölçeklendirmeyeyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri	165
Şekil 7.50. RSN3965 Spektral ölçeklendirmeyeyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri	166
Şekil 7.51. RSN4107 Spektral ölçeklendirmeyeyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri	167
Şekil 7.52. RSN5827 Spektral ölçeklendirmeyeyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri	168
Şekil 7.53. RSN6927 Spektral ölçeklendirmeyeyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri	169
Şekil 7.54. SK1 ve SK2 için 17 adet orijinal deprem kaydı kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerden elde edilen spektral ivme-periyot değerleri	171
Şekil 7.55. SK1 ve SK2 için 17 adet zaman tanım alanında ölçeklendirilmiş deprem kaydı kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerden elde edilen spektral ivme-periyot değerleri.....	173
Şekil 7.56. SK1 ve SK2 için 17 adet frekans tanım alanında ölçeklendirilmiş deprem kaydı kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerden elde edilen spektral ivme-periyot değerleri.....	174

Şekil 7.57. SK1 ve SK2 için 17 adet orijinal deprem kaydı kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerden hesaplanan amplifikasyon faktörü değerleri	177
Şekil 7.58. SK1 ve SK2 için 17 adet zaman tanım alanında ölçeklendirmiş deprem kaydı kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerden hesaplanan amplifikasyon faktörü değerleri	179
Şekil 7.59. SK1 ve SK2 için 17 adet frekans tanım alanında ölçeklendirmiş deprem kaydı kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerden hesaplanan amplifikasyon faktörü değerleri	181
Şekil 7.60. EL analizlerde farklı periyot değerlerinde iki farklı ölçeklendirme ile büyütme faktörünün karşılaştırılması.....	182
Şekil 7.61. NL analizlerde farklı periyot değerlerinde iki farklı ölçeklendirme ile büyütme faktörünün karşılaştırılması.....	184
Şekil 7.62. Zaman tanım alanında yapılan NL ve EL analizlerin amplifikasyon faktörü değerlerinin karşılaştırılması	185
Şekil 7.63. Frekans tanım alanında yapılan NL ve EL analizlerin amplifikasyon faktörü değerlerinin karşılaştırılması	186
Şekil 7.64. SK1’de orijinal deprem kayıtları kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerde maksimum ivmenin derinliğe bağlı değişimi	187
Şekil 7.65. SK1’de orijinal deprem kayıtları kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerde şekil değiştirmenin derinliğe bağlı değişimi	189
Şekil 7.66. SK2’de orijinal deprem kayıtları kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerde maksimum ivmenin derinliğe bağlı değişimi	190
Şekil 7.67. SK2’de orijinal deprem kayıtları kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerde şekil değiştirmenin derinliğe bağlı değişimi	191
Şekil 7.68. SK1 ve SK2’de orijinal deprem kayıtları kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerde şekil değiştirmenin derinliğe bağlı değişimi	192
Şekil 7.69. SK1’de PGA ölçeklendirme ile elde edilen deprem kayıtları kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerde maksimum ivmenin derinliğe bağlı değişimi.....	194
Şekil 7.70. SK1’de PGA ölçeklendirme ile elde edilen deprem kayıtları kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerde şekil değiştirmenin derinliğe bağlı değişimi	195

Şekil 7.71. SK2’de PGA ölçeklendirme ile elde edilen deprem kayıtları kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerde maksimum ivmenin derinliğe bağlı değişimi.....	196
Şekil 7.72. SK2’de PGA ölçeklendirme ile elde edilen deprem kayıtları kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerde şekil değiştirmenin derinliğe bağlı değişimi	197
Şekil 7.73. SK1 ve SK2 sondajlarında PGA ölçeklendirme ile elde edilen deprem kayıtları kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerde şekil değiştirmenin derinliğe bağlı değişimi	198
Şekil 7.74. SK1’de spektral ölçeklendirme ile elde edilen deprem kayıtları kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerde maksimum ivmenin derinliğe bağlı değişimi.....	199
Şekil 7.75. SK1’de spektral ölçeklendirme ile elde edilen deprem kayıtları kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerde şekil değiştirmenin derinliğe bağlı değişimi	200
Şekil 7.76. SK2’de spektral ölçeklendirme ile elde edilen deprem kayıtları kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerde maksimum ivmenin derinliğe bağlı değişimi.....	201
Şekil 7.77. SK2’de spektral ölçeklendirme ile elde edilen deprem kayıtları kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerde şekil değiştirmenin derinliğe bağlı değişimi	202
Şekil 7.78. SK1 ve SK2 sondajlarında spektral ölçeklendirme ile elde edilen deprem kayıtları kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerde şekil değiştirmenin derinliğe bağlı değişimi	203
Şekil 7.79. SK1 ve SK2’de orijinal deprem verileri kullanılarak EL ve NL analizleri spektrum parametrelerinin TBDY 2018’le karşılaştırılması	206
Şekil 7.80. SK1 ve SK2 sondajlarında PGA ölçeklendirme ile elde edilen deprem verileri kullanılarak EL ve NL analizleri spektrum parametrelerinin TBDY 2018’le karşılaştırılması	207
Şekil 7.81. SK1 ve SK2’de spektral ölçeklendirme ile elde edilen deprem verileri kullanılarak EL ve NL analizleri spektrum parametrelerinin TBDY 2018’le karşılaştırılması.....	209

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

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
PGA	: Pik yer ivmesi
PGV	: Pik yer hızı
V_s	: Kayma dalgası hızı
G	: Kayma modülü
G_0	: Başlangıç kayma modülü
G/G_{max}	: Normalize kayma modülü
G_{max}	: Maksimum kayma modülü
G_{sek}	: Sekant kayma modülü
ρ	: Yoğunluk
D	: Sönüm oranı
$1D$	: Bir boyutlu
RC	: Rezonant kolon
TS	: Burulmalı kesme
EL	: Eşdeğer doğrusal
NL	: Doğrusal olmayan
LL	: Likit Limit
PL	: Plastik Limit
PI	: Plastisite İndisi
kN	: Kilonewton
MPa	: Megapaskal
sn	: Saniye
P	: Periyot

TBDY : Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği

KAFZ : Kuzey Anadolu Fay Zonu

TDS : Tek dereceli serbestlikli



1. GİRİŞ

Mühendislik yapılarının tamamı, kullanım ömrü boyunca hem statik hem de dinamik yüklemelere karşı dayanıklı olacak şekilde tasarlanıp inşa edilmektedir. Günümüzde yaşanan teknolojik gelişmeler enerji gereksinimlerini artırmış ve son dönemlerde önemli yapısal zorlukları beraberinde getirmiştir. Büyük ölçekli depremlerin yaşanması ve gelecekte meydana gelmesi muhtemel sismik olaylar, uygun olmayan zemin koşullarına rağmen, özellikle yumuşak kil tabakaları üzerine yapı inşa edilmesi yönündeki eğilimle birlikte değerlendirildiğinde, önemli mühendislik risklerini gündeme getirmektedir. Bu durum, yapı güvenliğinin yalnızca statik yükler temelinde değil, aynı zamanda tekrarlayan dinamik yüklemeler göz önünde bulundurularak değerlendirilmesi gerektiğini açıkça ortaya koymuştur. Bu çerçevede, zemin dinamiği, mühendislik uygulamalarında giderek daha önemli bir role sahip olmaktadır.

Geoteknik mühendisliğinin bilimsel alan olarak şekillenmesi Karl Terzaghi'nin İstanbul Teknik Üniversitesi bünyesinde gerçekleştirdiği çalışmalarla gerçekleşmiştir. Yirminci yüzyılda hızla gelişen bu disiplin üzerine çeşitli akademik araştırmalar yapılmıştır. Geoteknik mühendisliği, zeminin fiziksel özellikleri ile üzerine inşa edilen yapıların statik davranışlarını inceleyen bir alandır. Ancak, bunun yanında dinamik yükler zemin ve yapı üzerinde çok etkilidir. Bu nedenle, 20. yüzyılın sonlarına doğru geoteknik mühendisliği gibi yeni alt disiplinler ortaya çıkmıştır. Bu alan, zeminin dinamik özelliklerini incelemeye yönelik çalışmalar yapmaktadır. Her ne kadar bu konularda kapsamlı araştırmalar gerçekleştirilse de hâlâ birçok bilinmeyen unsur bulunduğu gerçeği göz önünde bulundurulmalıdır. Dinamik etkilerin zeminlerde yol açabileceği deformasyon ve diğer problemlerle başa çıkabilmek için hem dinamik etkilerin hem de zemin özelliklerinin ayrıntılı bir şekilde anlaşılması gerekmektedir.

Geoteknik mühendisliği birçok konuyu içerisinde barındıran bir bilim dalıdır. Bunlar dalga enerjisinin zemin içinde yayılımı, titreşim teorisi, tekrarlı yükler altında zeminin göstermiş olduğu tepki, dinamik yükler altında temel sistemlerinin performansı ve çeşitli zemin yapılarının dinamik koşullar altındaki davranışlarını inceleyen bir disiplin olarak değerlendirilmektedir.

Geoteknik mühendisliği, deprem sırasında ve sonrasında meydana gelebilecek etkileri analiz ederek, depreme dayanıklı yapıların tasarımını hedefleyen bir disiplindir. Bu alandaki araştırmalarda, dinamik yükler altındaki zemin tepkisinin incelenmesi ve özellikle zemin-yapı

etkileşimi göz önünde bulundurularak üst yapı tasarımının değerlendirilmesi büyük bir öneme sahiptir.

Yerel zemin özelliklerindeki farklılıklar, deprem esnasında oluşan tekrarlı yükleme davranışları üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Deprem sırasında meydana gelen yer ivmesi genlikleri, frekans içerikleri ve bu dinamik parametrelerin oluşturduğu tepki kuvvetleri, zemin-yapı etkileşimi yoluyla yapı sistemlerinin performansı üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, temel zemin tabakalarının deprem yüklemeleri altındaki ve sonrasındaki dinamik tepkilerinin ayrıntılı biçimde incelenmesi, güvenli ve performans odaklı yapı tasarımı açısından kritik öneme sahiptir.

1.1. Tezin Amacı

Tekrarlı yüklemeler sırasında zemin tabakalarının sergileyeceği davranışın önceden öngörülmesi, bu zeminlere ilişkin gerekli önlemlerin alınmasını ve üzerindeki yapılarda meydana gelebilecek hasarların en aza indirilmesini sağlar. Türkiye'nin sismik açıdan aktif bir bölgede konumlanması, bu alandaki araştırmaların gerekliliğini ve önemini daha da artırmaktadır. Deprem nedeniyle zeminlerde meydana gelebilecek hasarların incelenmesinde, araştırmalar genellikle kum zeminlerde sıvılaşma problemine odaklanmıştır. Ancak, kil zeminler, kumlara kıyasla daha istikrarlı kabul edilmesine rağmen (Lee ve Fitton, 1969), bazı durumlarda ciddi yapı hasarlarına neden olabilmektedir (Seed, 1987; Mendoza ve Auvinet, 1988).

Yapılan araştırmalar, deprem meydana geldiği anda sismik hareketlerin şiddetinin artması ile birlikte kil zeminlerde önemli deformasyonların meydana geldiğini göstermektedir. Yumuşak zemin tabakalarından deprem dalgalarının yüzeye yakın bir şekilde geçerken genliklerinin artması, yapısal hasarların oluşmasında belirleyici bir etken olmaktadır. Örneğin, 1964 Niigata depremi ile 1978 Miyagiken-Okı depremi sırasında Japonya'nın farklı bölgelerinde zeminde yaşanan çökme olaylarının gözlemlendiği bildirilmiştir (Brady, 1980). Bu durum, kil zeminlerin gerçekten kum zeminlerden daha istikrarlı olup olmadığına dair soruları gündeme getirmiştir. Deprem gibi kısa süreli yüklemelerde kil zeminlerin nispeten daha dayanıklı olduğu kabul edilse de uzun süreli çevrimsel yüklemelere maruz kalındığında farklı sonuçlar ortaya çıkmaktadır (Yasuhara vd., 1992).

Yatay tabakalı ve kilden oluşan zeminlerde, çevrimsel kayma dayanımı genellikle büyük bir stabilite sorunu oluşturmazsa da boşluk suyu basıncının artması nedeniyle oturma problemleri yaşanabilir. Kil zeminlerde tekrarlı dinamik yüklemeler sonucu gelişen oturma

davranışları, depremin hemen ardından gözlemlenebileceği gibi, zemin profilinin fiziksel ve mekanik özelliklerine bağlı olarak daha uzun vadede de ortaya çıkabilmektedir (Kramer, 1996). Bu tür oturmalar genellikle 'sekonder konsolidasyon' ya da 'deprem kaynaklı konsolidasyon oturması' olarak adlandırılmakta olup, deprem sırasında tekrarlı kayma gerilmeleri ile oluşan boşluk suyu basıncındaki artışın, zamanla drenaj yoluyla azalması sonucu gelişmektedir. Özellikle düşük geçirgenliğe sahip kil tabakalarında, suyun hareketinin sınırlı olması nedeniyle boşluk suyu basıncının tamamen dağılması uzun sürmekte, bu da oturma sürecinin gecikmesine neden olmaktadır. Bu nedenle, sismik etkinin ardından meydana gelen gecikmeli oturma potansiyelinin doğru tahmin edilmesi, altyapı ve üstyapı sistemlerinin güvenli tasarımı açısından kritik bir önem taşımaktadır (Ansal ve Tuncan, 1989). Bu nedenle, kil zeminlerin dinamik davranışlarının ayrıntılı bir şekilde incelenmesi, deprem etkileriyle mücadelede büyük önem taşımaktadır.

Avrupa’da oluşan depremlerde önemli bir yere sahip olan Türkiye, Arabistan ve Afrika levhalarının ilerlemesi sonucu Anadolu Levhası’nın sıkışması ve Avrasya Levhası’na doğru hareket etmesi nedeniyle aktif bir deprem kuşağında yer almaktadır. Bölgede bulunan Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ), Türkiye’de bulunan aktif fay hatlarından en önemlisidir ve bu fay hattı üzerinde veya yakınında meydana gelen depremler, ciddi yıkımlar ve can kayıplarıyla sonuçlanmıştır. Örneğin, 6.9 büyüklüğünde 1992 Erzincan’da meydana gelen deprem, 7.4 büyüklüğünde 1999 yılında yaşanan Kocaeli depremi, yine 1999 yılında yaşanan 7.2 büyüklüğündeki Düzce depremi, 7.2 büyüklüğünde oluşan 2011 yılı Van depremi, 2020 yılında yaşanan 6.8 büyüklüğündeki Elazığ ve yine 2020 yılında gerçekleşen 6.9 büyüklüğündeki Seferihisar depremleri, bölgenin depremselliğini ve bu tür olayların sonuçlarını açıkça ortaya koymaktadır.

KAFZ üzerinde yer alan birçok sanayi kenti ve hızla artan kentleşme, Türkiye nüfusunun önemli bir bölümünü yüksek derecede deprem riski altına sokmaktadır. Bu durum, özellikle aktif fay zonlarına yakın yerleşim alanlarında yapı güvenliğini ön plana çıkarmaktadır. Dolayısıyla, mühendislik yapılarının sismik güvenliğinin artırılması amacıyla, tasarım sürecine sahaya özel zemin davranışlarının ve yapı-zemin etkileşim mekanizmalarının entegre edilmesi kritik bir gereklilik haline gelmiştir. Sahaya özel zemin davranışının dikkate alınması, sadece yapıların performansını artırmakla kalmaz, aynı zamanda olası can ve mal kayıplarının azaltılmasına da önemli katkı sağlar. Deprem bölgelerinde oluşabilecek hasarların en aza indirilebilmesi ve depreme dayanıklı yapıların etkin bir şekilde tasarlanabilmesi için, zemin tabakalarının sismik yükler altındaki davranışlarının doğru bir şekilde belirlenmesi önem

taşımaktadır. Bu nedenle sahaya özel zemin davranış analizleri yapılması gerekmektedir. Zemin özelliklerinin ve dinamik yükler altında göstereceği davranışın farklılaşması, yapılara etkiyen deprem kuvvetlerinin değişmesine neden olmaktadır.

Geoteknik mühendisliği, sismik etkiler öncesinde ve sonrasında oluşabilecek olumsuzlukların belirlenmesini ve bu doğrultuda dayanıklı yapı tasarımının gerçekleştirilmesini hedefleyen mühendislik disiplini. Bu kapsamda, zeminlerin dinamik yükler altındaki davranışlarının detaylı şekilde analiz edilmesi ve özellikle zemin-yapı etkileşiminin dikkate alınarak üstyapı tasarımının gerçekleştirilmesi, güvenli ve performans odaklı mühendislik çözümlerinin geliştirilmesi açısından temel bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır. Yapıların, bulundukları zemin koşullarıyla birlikte değerlendirilmesi; deprem anındaki rijitlik, sönümleme ve rezonans etkilerinin doğru şekilde modellenmesini ve bu doğrultuda optimum tasarım kararlarının alınmasını mümkün kılmaktadır. Yerel zemin koşullarında meydana gelen farklılıklar, sismik yüklerin zamana bağlı tekrarlı etkilerini değiştirmekte ve bu durum yapı sistemlerinin davranışını doğrudan etkilemektedir. Ayrıca, deprem anında yapıya etkiyen yer ivmesinin büyüklüğü, frekans içeriği ve bu etkilerden doğan yapısal tepkiler, mühendislik tasarımında belirleyici unsurlar arasında yer almaktadır. Bu nedenle, bir yapının temelini oluşturan zemin tabakalarının olası bir deprem sürecindeki davranışlarının doğru bir şekilde tanımlanması, yapı güvenliğinin değerlendirilmesi açısından kritik önem taşımaktadır.

Sahaya özel zemin davranış analizleri, sismik dalgaların anakayadan başlayarak zemin profili boyunca ilerlerken uğradığı değişimleri ortaya koymayı ve bu süreçte yüzeyde oluşan spektral yanıtın nicel olarak belirlenmesini amaçlamaktadır. Bu analizler, farklı derinliklerdeki zemin tabakalarının dinamik özelliklerinin dikkate alınarak, bölgeye özgü ivme-zaman geçmişleri ve tepki spektrumlarının hesaplanmasını sağlar. Böylece, yerel zemin koşullarının etkisi ile oluşan zemin büyütmesi, rezonans riski ve yapı-zemin etkileşimi gibi mühendislik açısından kritik parametreler doğru şekilde değerlendirilmektedir. Bu analizlerin doğruluğu, sahada gerçekleştirilen arazi deneyleri ve sahadan alınan örnekler üzerinde yapılan laboratuvar deneyleriyle sağlanmaktadır. Zeminlerin dinamik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla çeşitli laboratuvar deneyleri kullanılmaktadır. En yaygın olarak kullanılan ikisi Rezonant Kolon (RC) ve Dinamik Burulmalı Kesme (TS) deneyleridir. RC deney sistemi, %0.01 değerinin altında kalan deformasyon seviyeleri için uygunken, TS deney sistemi bu değer üstündeki deformasyon seviyelerinde zemin davranışını incelemek için kullanılmaktadır. Bu yöntemler, zeminlerin dinamik yükler altındaki davranışını anlamada kritik bir rol oynamaktadır.

Dinamik laboratuvar deney sistemlerinin sağladığı veriler, zeminlerin yükleme altındaki davranışlarının belirlenmesinde önemli bir yer tutarken; sahaya özel zemin davranış analizlerinde kullanılacak uygun deprem ivme kayıtlarının seçimi de en az bu kadar kritik bir rol oynamaktadır. Bu ivme kayıtları, analizlerin doğruluğunu ve bölgesel gerçekçiliğini doğrudan etkileyen parametreler olup, yerel deprem tehlikesini yansıtan, spektral içeriği zengin ve çeşitli kaynak-taban-zemin koşullarını temsil edebilecek nitelikte olmalıdır. Bu sayede, zemin profilinin sismik dalgalar karşısındaki tepkisi daha gerçekçi biçimde modellenerek, güvenli ve ekonomik mühendislik çözümlerinin temeli oluşturulur. Bu kayıtların, ilgili yönetmeliklerde belirtilen kriterlere uygun olarak seçilmesi gerektiği vurgulanmalıdır. Analizlerin doğru sonuçlar vermesi için bölgedeki fay türü, bölgenin sahip olduğu yerel zemin koşulları ve diğer geoteknik özellikler dikkate alınarak uygun deprem kayıtları seçilmektedir.

Sahaya özel zemin davranış analizlerinde kullanılacak deprem ivme kayıtları, analiz amacına uygun olarak zaman tanım alanında veya frekans tanım alanında ölçeklendirilerek modele dâhil edilmektedir. Her iki yöntem de sahaya özel analizlerde sonuçları önemli ölçüde etkilemektedir. Zaman tanım alanında ölçeklendirme, ivme kayıtlarının süre ve genlik özelliklerini muhafaza ederek yerel zemin koşullarına uygun hale getirilmesini sağlar. Frekans tanım alanında ölçeklendirme ise deprem kayıtlarının belirli bir frekans aralığında enerji yoğunluğunu hedeflenen koşullara uyarlamayı amaçlar. Her iki yaklaşımın da analizlerde etkin bir şekilde kullanılması, tasarım sonuçlarının güvenilirliğini artırır. Bu nedenle, sahaya özel analizlerde hem doğru deprem kayıtlarının seçimi hem de ölçeklendirme yöntemlerinin dikkatli uygulanması gerekmektedir.

Bu çalışmanın temel hedefi, Sakarya iline ait düşük plastisiteli kil zeminin dinamik özelliklerini belirleyerek sismik yükler altındaki davranışını hem eşdeğer doğrusal hem de doğrusal olmayan analiz yöntemleri aracılığıyla incelemek ve elde edilen bulgular üzerinden karşılaştırmalı bir değerlendirme sunmaktır. Bu kapsamda, farklı analiz yaklaşımlarının zemin tepkisi üzerindeki etkileri ortaya konularak mühendislik açısından yorumlanması amaçlanmaktadır.

1.2. Tezin Kapsamı

Bu tez, zemin dinamiği konusunun önemini ve bu konularda çalışmanın amacını ele almayı hedeflemektedir. Çalışmada, zeminlere etki eden dinamik yükler, deprem gibi etkilerin zemin üzerinde oluşturduğu dalga tipleri, bu dalgaların zemin üzerindeki etkileri ve deformasyonlar ayrıntılı bir şekilde incelenecektir. İlk olarak, dinamik yüklemelere maruz

kalan zeminlerin davranışları literatür verileri ışığında analiz edilerek, zemin dinamiğini etkileyen parametreler araştırılacaktır. İleri aşamalarda ise, dinamik etkiler altında zemin davranışını belirlemek için kullanılan arazi ve laboratuvar deneyleri detaylandırılacak, bu deney sistemlerinin avantaj ve dezavantajları ele alınacaktır.

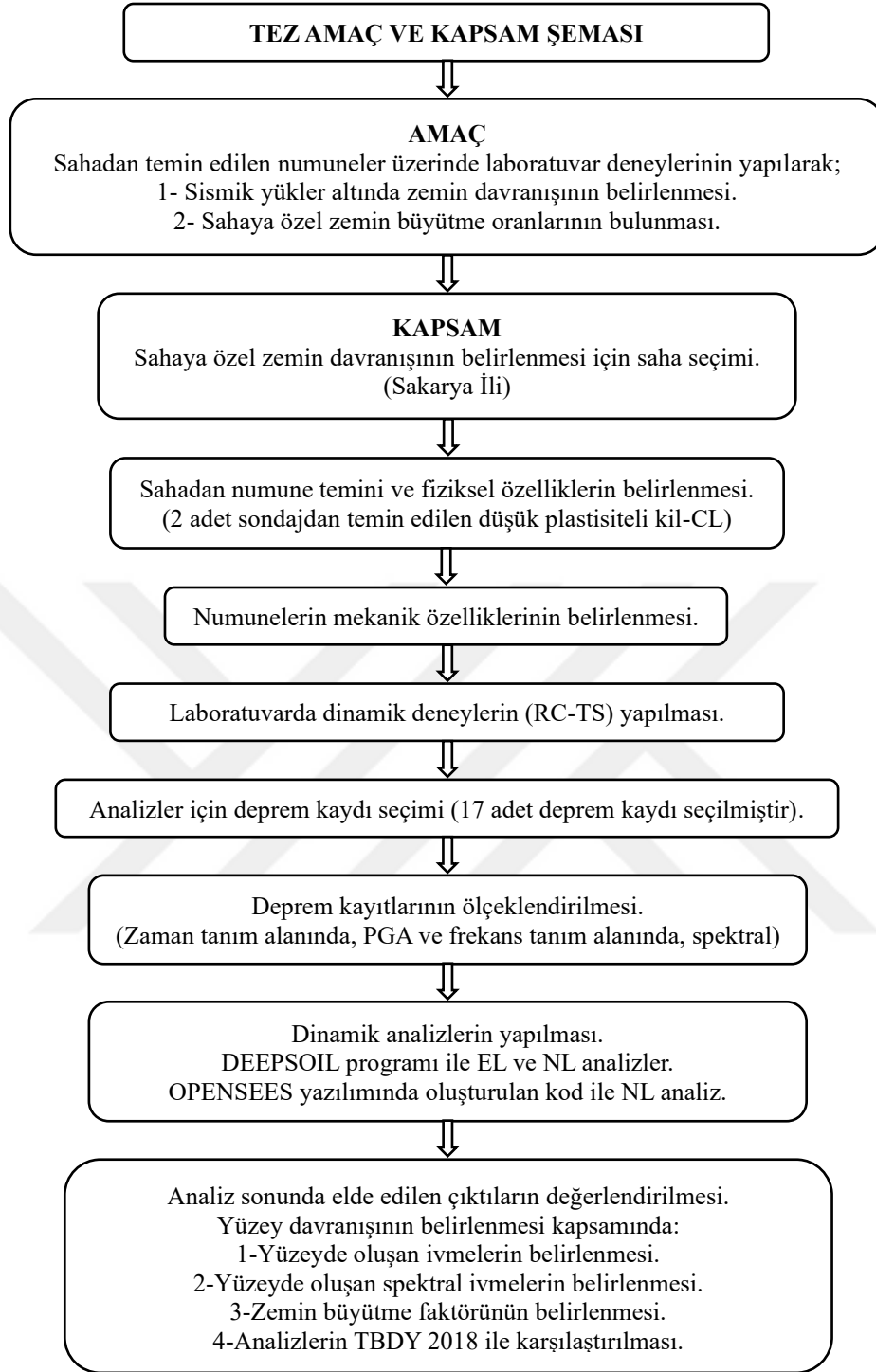
Bu çalışma kapsamında, Türkiye'nin aktif deprem bölgelerinden biri olan Sakarya ilinde yapılan sondajlardan örselenmemiş düşük plastisiteli kil zemin numuneleri temin edilmiştir. Sahaya özel dinamik parametrelerin belirlenmesi amacıyla, RC ve TS deneyleri laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında, bölgenin sismik karakteristiklerini yansıtan deprem ivme kayıtları titizlikle seçilmiş ve bu kayıtlar iki farklı ölçeklendirme yöntemiyle düzenlenerek hem eşdeğer doğrusal (Equivalent Linear-EL) hem de doğrusal olmayan (Nonlinear-NL) zemin büyütme analizleri DEEPSOIL programı ve OPENSEES'te geliştirilen kod yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, yüzeyde oluşan ivme değerleri, spektral ivme dağılımları ve zemin büyütme faktörleri, kullanılan farklı ölçeklendirme yöntemleri ve analiz yöntemleri kapsamında karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu karşılaştırmalar, ölçeklendirme yönteminin ve analiz yaklaşımının, zemin davranışının dinamik koşullar altındaki davranışına olan etkisini açık bir şekilde ortaya koymuş ve bölgeye özel sismik tasarım parametrelerinin belirlenmesi açısından önemli bulgular sağlamıştır.

Çalışma, saha çalışmaları, arazi ve laboratuvar deneyleri, model oluşturulması, analizlerin gerçekleştirilmesi ve elde edilen sonuçların değerlendirilmesi aşamalarını kapsamaktadır. Elde edilen sonuçlar, bölgenin dinamik zemin davranışına ilişkin önemli veriler sunmakta ve deprem yükleri altında zeminlerin davranışını anlamak için faydalı bilgiler sağlamaktadır.

Son olarak, çalışmadan elde edilen sonuçlar özetlenerek zemin dinamiği alanında gelecekte yapılacak çalışmalara yönelik öneriler sunulacaktır. Bu tez, zemin dinamiğinin anlaşılmasına katkı sağlamayı ve zeminlerin dinamik yükler altındaki davranışlarının daha iyi anlaşılmasını hedeflemektedir.

Tezin amaç ve kapsamının özet olarak gösterildiği şema Şekil 1.1'de verilmiştir.



Şekil 1.1. Tezin amaç ve kapsamının şematik olarak gösterimi

2. ZEMİNLERİN DİNAMİK ÖZELLİKLERİ

Zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışları, depremlerin yapılarda yol açtığı hasar seviyelerini doğrudan etkileyen önemli bir faktördür. Bu nedenle, zemin davranışının sahaya özel olarak belirlenmesi ve elde edilen dinamik zemin parametrelerinin yapı tasarım süreçlerine entegre edilmesi, deprem etkilerine karşı güvenli yapıların inşası açısından büyük önem arz etmektedir. Bir bölgede depremlerin oluşturacağı potansiyel etkilerin doğru biçimde değerlendirilebilmesi yer hareketinin ayrıntılı ve gerçeğe uygun şekilde tanımlanmasını zorunlu kılmaktadır. Yer hareketi, çevresindeki insanları ve yapıları etkileme potansiyeline sahip bir güç olarak tanımlanmaktadır. Mühendislik perspektifinden, yer hareketinin özelliklerini doğru bir şekilde tanımlamak ve bu özelliklere uygun parametrelerin belirlenmesi, yapıların güvenliği ve dayanıklılığı açısından kritik bir adımdır.

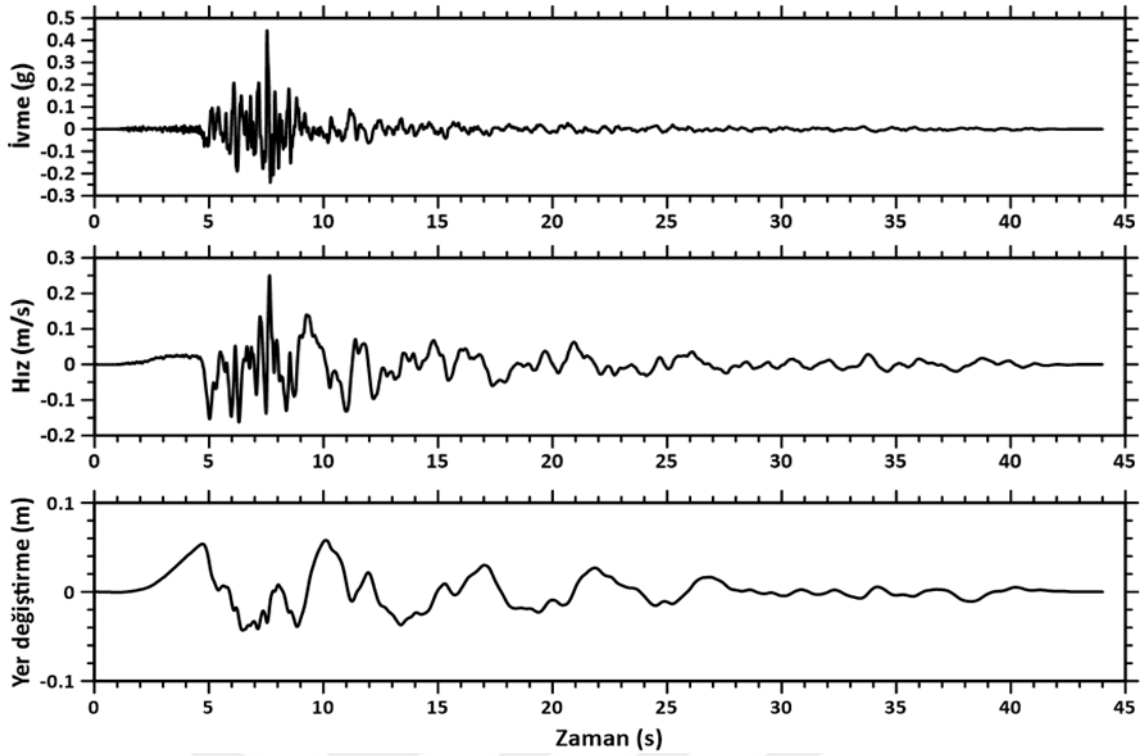
2.1. Yer Hareketi Parametreleri

Yer hareketinin karakteristik özelliklerinin belirlenmesi, zemin davranışının doğru bir şekilde değerlendirilebilmesi açısından önemli bir ilk adımdır. Bu hareket, genlik, frekans içeriği ve süre olmak üzere üç temel parametreye dayanarak incelenmektedir. Bu parametreler, deprem hareketinin önemli özelliklerini temsil eder ve her biri zemin davranışının dinamik analizinde kritik rol oynamaktadır. Genlik, yer hareketinin şiddetini; frekans içeriği, hareketin farklı frekans bileşenlerini; süre ise deprem olayının ne kadar sürdüğünü ifade eder (Kramer, 1996). Bu parametrelerin birlikte değerlendirilmesi, zemin ve yapı etkileşimini doğru bir şekilde anlamak için gereklidir.

2.2. Genlik Parametreleri

Periyodik olarak gerçekleşen bir harekette, maksimum düzeye ulaşan değere "genlik" denir. Meydana gelen yer hareketinin tanımlanması, zaman tanım alanında yapılmaktadır. Bu hareketin temel parametreleri ivme, hız ve yer değiştirmedir. Ancak yer hareketi sırasında genellikle sadece ivme kaydı alınarak ölçüm yapılır. Hız ve yer değiştirme parametrelerine ise ivme verisi üzerinden integral ve/veya türev olarak ulaşılmaktadır (Kramer, 1996).

Deprem kayıt istasyonlarında elde edilen ivme-zaman grafiklerinin yanı sıra, bu grafiklere bağlı olarak elde edilen hız ve yer değiştirme-zaman grafiklerinin de önemli veriler sunmaktadır. Bu veriler, yer hareketlerinin dinamik özelliklerinin incelenmesinde kritik rol oynamaktadır. Örneğin, bu çalışmada da kullanılan Parkfield depremine ait ivme, hız ve yer değiştirme-zaman grafikleri Şekil 2.1’de gösterilmektedir. Bu tür grafikler, yer hareketlerinin dinamik özelliklerini anlamak için oldukça faydalıdır.



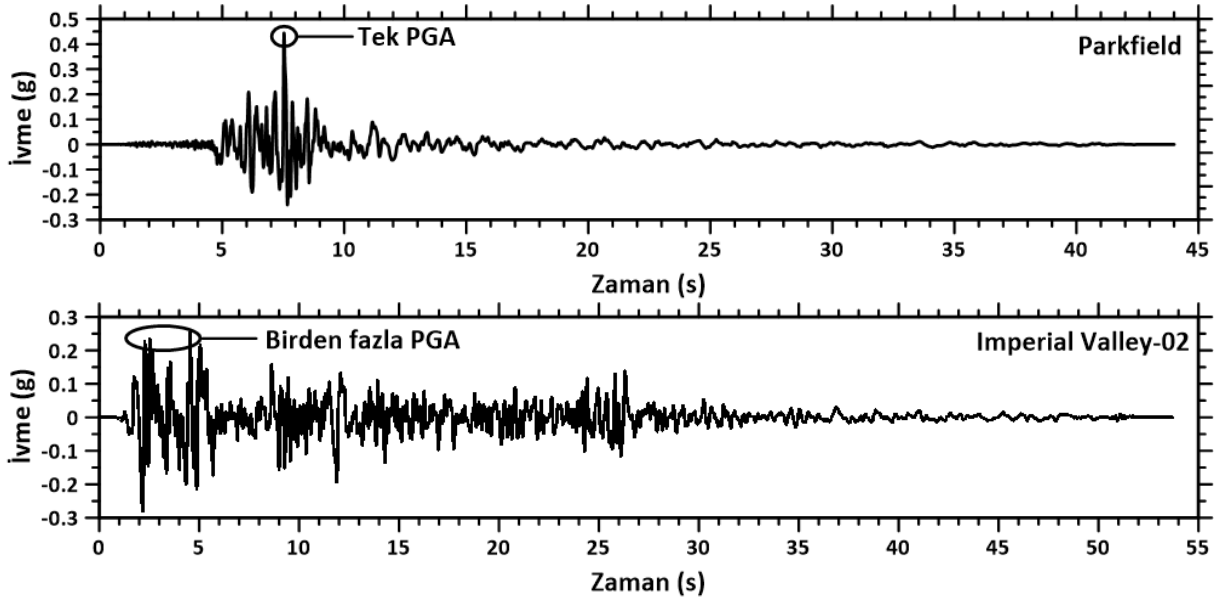
Şekil 2.1. Parkfield depremine ait ivme, hız, yer değiştirme zaman grafikleri

2.2.1.1. Pik İvme

Depremlerden dolayı meydana gelen yer hareketinin genliğini belirlemede kullanılan temel parametrelerden biri, maksimum yatay yer ivmesi (Peak Ground Acceleration-PGA) olarak tanımlanmaktadır. Yer hareketinin tanımlanmasında genellikle yatay hareket dikkate alınmaktadır. Buna karşın, düşey ivmeler yatay ivmelere kıyasla daha az ilgi görmüştür. Bunun temel nedeni, yer çekiminin etkisiyle oluşan statik düşey kuvvetlerin, deprem sırasında genellikle daha yüksek bir emniyet düzeyine sahip olmasıdır. PGA, akselerogramdaki yatay ivmenin mutlak değer olarak en büyüğüdür. Pik ivme değerleri, depremin süresi ve frekans içeriği hakkında bilgi vermez.

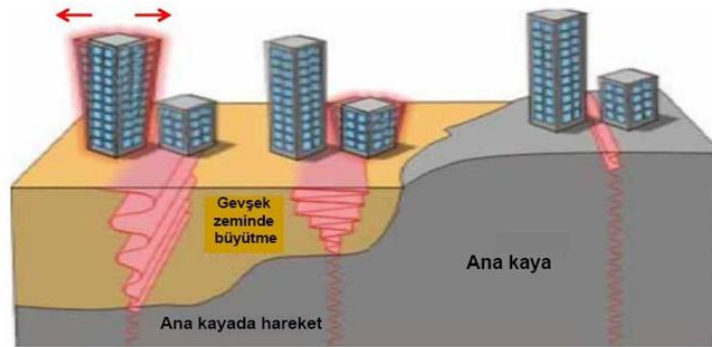
Deprem kayıtları incelendiğinde bazı depremlerin sadece tek bir pik değere sahipken, bazılarında ise birden fazla pik değeri olduğu görülmektedir. Bu duruma örnek olarak, tez kapsamında incelenen yer hareketlerinden Parkfield deprem kaydında yalnızca bir pik değeri bulunurken, Imperial Valley-02 depreminde ise birden fazla pik değeri gözlemlenmiştir (Şekil 2.2). Bir adet pik değerinin gözlemlendiği depremlerde, genel olarak düşük periyotlarda meydana gelen yükleme çevrimlerinin genlikleri, hâkim periyodu yüksek olan yapılar üzerinde önemli bir etkiye sahip olmamaktadır. Buna karşın, birden fazla pik değerinin bulunduğu deprem kayıtlarında, farklı frekanslarda benzer genliğe sahip çok sayıda çevrim oluşmaktadır. Bu nedenle, kuvvetli yer hareketlerinde PGA değerleri aynı olsa bile tekrarlı yüklemeler sonucunda

birden fazla pik ivmeye sahip depremler, daha fazla yıkıcı etkiye neden olmaktadır. Bu bağlamda, pik ivme değerleri aynı olan depremlerin diğer karakteristik özelliklerinde meydana gelen değişiklikler, yapılar üzerindeki etkilerin tamamen farklılaşmasına neden olmaktadır (Kramer, 1996).



Şekil 2.2. Parkfield ve Imperial Valley-2 deprem kayıtlarına ait PGA değerleri gösterimi

Zemin davranış analizlerinde, kuvvetli yer hareketinin genellikle anakayadan başladığı varsayılmakla birlikte, bazı zemin türlerinde anakaya ile benzer davranış sergilediği, bazılarında ise önemli ölçüde farklılık gösterdiği bilinmektedir (Şekil 2.3).

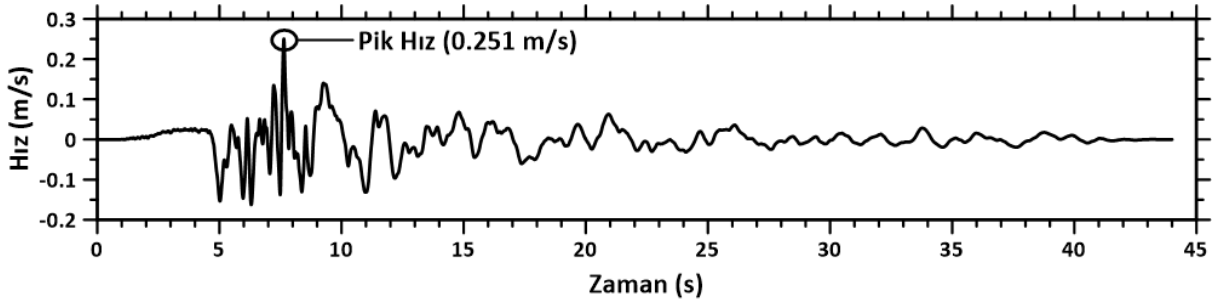


Şekil 2.3. Yer hareketinin yumuşak zemin ve ana kaya içinde davranışının gösterimi (TMMOB JMO, 2025)

2.2.1.2. Pik Hız

Yer hareketinin tanımlanmasında dikkate alınan diğer önemli parametrelerden biri de pik yatay hızdır. Orta frekanslardaki yer hareketinin genliğini doğru bir şekilde tanımlamak açısından pik hız değeri genellikle pik ivme değerine kıyasla daha iyi bir göstergedir. Orta frekans aralığında yüklemeye tabi tutulan yüksek ve esnek yapılar, köprüler gibi tesislerde

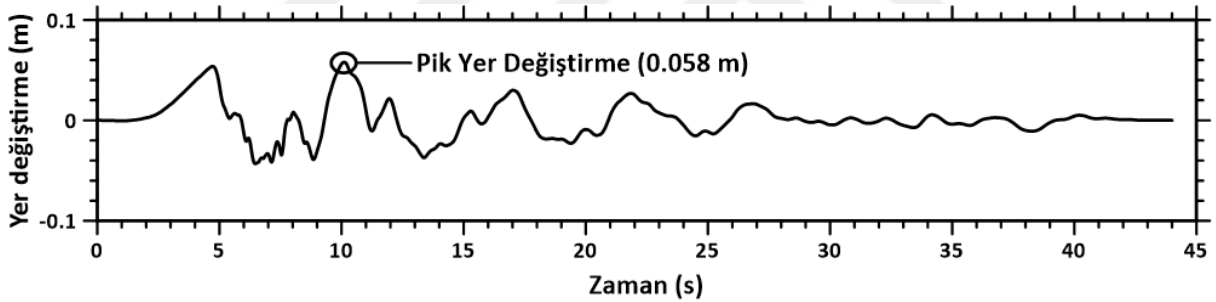
meydana gelebilecek hasarların belirlenmesinde, pik hız değerlerinin daha etkili sonuçlar sağladığı görülmektedir (Kramer, 1996). Parkfield depremine ait pik hız değeri, Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4. Parkfield depremi pik hız değeri gösterimi

2.2.1.3. Pik Yer Değiştirme

Yer hareketinin düşük frekansa sahip bileşenleri, pik yer değiştirme değerleri ile ilişkilidir. Ancak, pik yer değiştirme parametresi, pik ivme ve pik hız gibi diğer yer hareketi parametrelerine kıyasla daha az kullanılmaktadır (Kramer, 1996). Parkfield depremine ait pik yer değiştirme değeri, Şekil 2.5'te sunulmuştur.



Şekil 2.5. Parkfield depremi pik yer değiştirme değeri gösterimi

2.2.2. Frekans İçeriği Parametreleri

Sismik bir olay için frekans içeriğinin ifade edilmesi $f(1/T)$ şeklinde olup, kuvvetli yer hareketinin genliğinin farklı frekanslar arasındaki dağılımını temsil eder. Kuvvetli yer hareketinin frekans içeriğini doğru bir şekilde belirleyebilmek için hareketin özelliklerinin doğru şekilde tanımlanması önemlidir. Bu doğrultuda, farklı türde spektrumlar kullanılmaktadır (Ohsaki, 1976).

2.2.2.1. Fourier Spektrumu

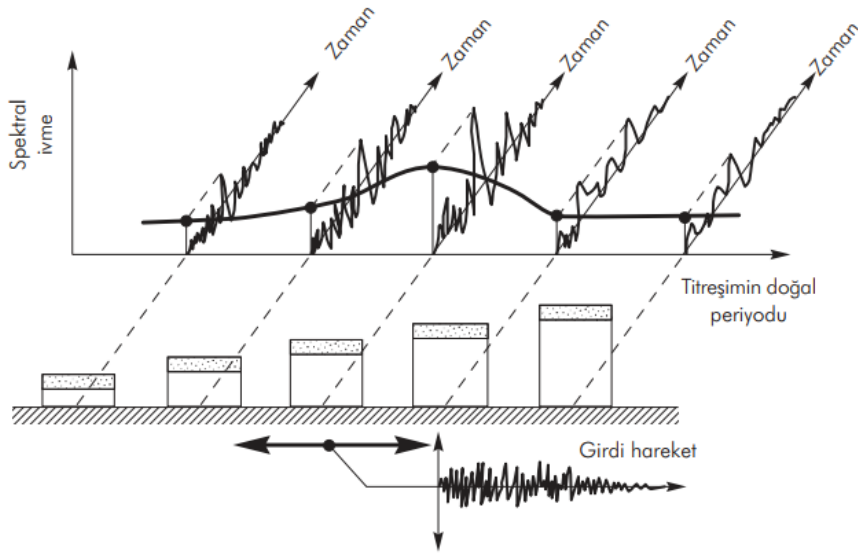
Herhangi bir periyodik fonksiyon farklı frekans, genlik ve faz özelliklerine sahip basit harmonik bileşenlerin toplamı şeklinde Fourier analiziyle temsil edilebilir. Bir $x(t)$ periyodik fonksiyonu, Fourier serisi kullanılarak denklem (2.1) ile ifade edilir:

$$x(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(w_n t + \phi_n) \quad (2.1)$$

Fourier genliği ile frekans arasındaki ilişkiyi gösteren grafik, Fourier genlik spektrumu olarak adlandırılır. Benzer şekilde, Fourier faz açısının grafiği de Fourier faz spektrumu olarak tanımlanır. Bir kuvvetli yer hareketine ait Fourier genlik spektrumu, hareketin genliğinin frekans ya da periyot açısından nasıl dağıldığını ortaya koyar. Bu spektrum, dar ya da geniş bir yapıya sahip olabilir. Dar bir spektrum, yer hareketinin düzgün ve neredeyse sinüzoidal bir yapıya sahip olduğunu, yani belirgin bir baskın frekans ya da periyoda sahip olduğunu ifade eder. Geniş bir spektrum ise, farklı frekansları içeren, daha karmaşık ve düzensiz zaman değişimleri gösteren hareketlere karşılık gelir (Kramer, 1996).

2.2.2.2. Tepki Spektrumları

Tepki spektrumu, tek dereceli serbestlikli (TDS) bir sistemin belirli bir girdi hareketine karşı, doğal frekansı/doğal periyodu ve sönümlenme oranına bağlı olarak gösterdiği maksimum tepkiyi tanımlar (Şekil 2.6). Bu tepki, ivme, hız veya yer değiştirme olarak ifade edilir. Verilen bir girdi hareketi için, her bir parametre yalnızca TDS sisteminin doğal frekansı ile sönümlenme oranına bağlıdır. İvme, hız ve yer değiştirme için maksimum değerler sırasıyla spektral ivme (S_a), spektral hız (S_v) ve spektral yer değiştirme (S_d) terimleriyle tanımlanır (Kramer, 1996).



Şekil 2.6. Tepki Spektrumları (Kramer, 1996)

Tepki spektrumları, Fourier spektrumları ile karşılaştırıldığında yapı tasarımı için daha doğru bir tercih olarak kullanılmaktadır. S_a değeri, kuvvetli yer hareketi esnasında zeminden yapıya iletilen kuvveti temsil eder. Yapıya etki eden maksimum mutlak ivmenin yapının kütlesiyle çarpılması, deprem esnasında meydana gelen ve yapıya etki eden maksimum kesme

kuvvetinin hesaplanmasını sağlar ($F = m.a$). S_v , kuvvetli yer hareketi sırasında yapıya iletilen maksimum enerjiyi, S_d ise yer değiştirme ve şekil değiştirme değerlerinin en yüksek seviyesini ifade ederek yapıdaki olası gerilmeleri yansıtır. Bu nedenle spektral parametreler, kuvvetli yer hareketinin yapı üzerindeki maksimum etkisini tanımlamada kritik öneme sahiptir (Ohsaki, 1976).

2.2.2.3. Spektral Parametreler

Yer hareketlerinin yapılar üzerindeki etkilerini anlamada, tepki spektrumlarının yanı sıra ek verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda, spektrumların içerdiği bilgilerin analiz edilip yorumlanabilmesi için spektral parametreler kullanılır. Spektrumların karmaşık birer fonksiyon olması, bu parametrelerin kullanımını önemli hale getirmektedir. Bu parametrelerden biri, yer hareketlerinin frekans özelliklerini tanımlamada önemli bir rol oynayan baskın periyottur.

Baskın periyot, bir yer hareketinin frekansına ilişkin bilgi sağlayan temel parametredir ve Fourier genlik spektrumu için maksimum değerine karşılık gelen titreşim periyodu olarak tanımlanır. Bu değer genellikle, düzleştirilmiş bir spektrum üzerinden elde edilir ve bu sayede istenmeyen piklerin etkisi minimize edilir. Farklı frekans içeriklerine sahip yer hareketlerinin, aynı baskın periyoda sahip olabileceği de yapılan analizlerle ortaya konulmuştur (Kramer, 1996).

2.2.2.4. Kuvvetli Yer Hareketi Süresi

Deprem sırasında oluşan hasarları etkileyen önemli parametrelerden biri kuvvetli yer hareketi süresidir. Bu süre, yer hareketinin eşik ivme değeri olan $0.05g$ 'yi ilk kez aştığı an ile tekrar bu seviyenin altına düştüğü an arasındaki zaman aralığı olarak tanımlanır. Kuvvetli yer hareketleri sırasında, rijitlik ve dayanım kaybı gibi yapısal değişiklikler tekrarlayan gerilmeler ve yüklemeler sonucunda yıkıcı hasarlara neden olur (Naeim, 2001).

Faylardaki yırtılmanın uzunluğu veya alanı arttıkça, yer hareketinin süresi de buna paralel olarak uzamaktadır. Depremlerin frekans özellikleri incelendiğinde, kısa süreli fakat yüksek genlikli depremler her zaman yıkıcı etkiler yaratmazken, düşük genlikli ancak uzun süreli depremler ciddi hasarlara yol açmaktadır. Bu durum, depremin süresinin hasar üzerindeki etkisinin önemli bir faktör olduğunu açıkça göstermektedir. Ayrıca deprem bölgelerinde zemin yapısı, yer altı suyu seviyesi ve yapı kalitesi gibi faktörler, bu tür uzun süreli yüklemelerden etkilenecek hasar seviyesinin artmasına neden olmaktadır (Kramer, 1996). Bu nedenle, yapı tasarımı ve risk değerlendirme süreçlerinde, depremin süresi ve zemin-yapı etkileşimleri dikkate alınması gereken kritik unsurlar olarak öne çıkmaktadır.

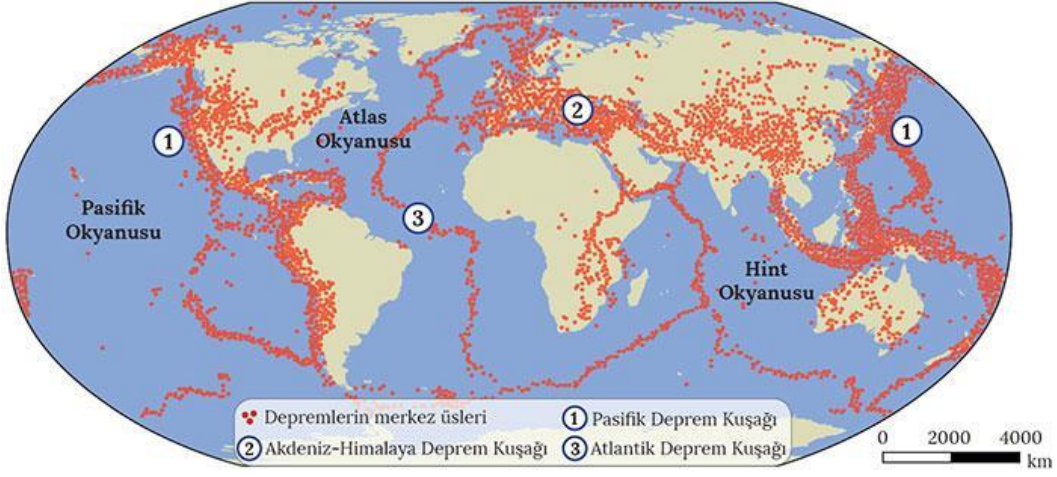
3. ZEMİNLERE ETKİYEN DİNAMİK YÜKLER

Zeminler, temel olarak iki tür yüklemeye maruz kalır: statik ve dinamik yükler. Statik yükler zamanla değişmeyen sabit etkiler iken, dinamik yükler zamana bağlı olarak değişiklik gösteren ve zemin üzerinde farklı deformasyonlara neden olan yüklerdir. Zemin üzerinde etkili olan başlıca dinamik yükler arasında depremler, açık deniz dalgaları, makinelerin yarattığı titreşimler, trafik yükleri, patlatmalar, kazık çakma işlemleri, kompaksiyon çalışmaları ve rüzgâr kaynaklı yükler yer alır. Bu dinamik yükler, dört ana başlık altında incelenmektedir: harmonik hareketler, periyodik hareketler, gelişigüzel titreşimler ve geçici titreşimler (Özaydın, 2016). Makinelerin yarattığı titreşimler genellikle harmonik veya periyodik hareketler şeklinde zemin üzerinde etkili olurken, patlatmalar, ağırlık düşürme işlemleri ya da darbe oluşturan makineler (örneğin kazık çakma veya dinamik kompaksiyon) zeminde geçici titreşimlere neden olmaktadır. Doğal olaylar, örneğin depremler, rüzgârlar ve dalgalar ise zeminde gelişigüzel titreşimler meydana getirir. Ayrıca, patlamalar ve darbeler gibi etkiler, zeminde geçici titreşimlere yol açar. Bu dinamik yükler, zeminlerde farklı seviyelerde kayma deformasyonları meydana getirmektedir. (Tablo 3.1). Bu yüklerin türü ve etkisi, zemin davranışını anlamada ve mühendislik tasarımlarında önemli bir rol oynamaktadır.

Tablo 3.1. Dinamik yüklerden dolayı meydana gelen kayma deformasyonları (Kramer, 1996)

Kayma Birim Deformasyonu, γ (%)	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	10^0	10^1
Olay	Dalgalar, Makine titreşimleri	Depremler, Oturmalar	Heyelanlar, Sıvılaşma	Nükleer patlamalar				
Zeminin dinamik özelliği	Elastik	Elasto-plastik	Plastik	Göçme				
Kayma gerilmesi türü	Çok küçük gerilmeler	Küçük gerilmeler	Büyük gerilmeler	Çok büyük gerilmeler				

Depremler, zemin üzerinde önemli dinamik yükler oluşturan doğal olaylardır. Deprem, yer kabuğunda meydana gelen kırılmalar sonucu ani bir şekilde ortaya çıkan titreşimlerin dalgalar halinde yayılmasını ve bu titreşimlerin geçtiği ortamı ile yer yüzeyini sarsmasını tanımlar. Bu sarsıntılar, katı-rijit litosfer bloklarının kırılma ve kayma süreçleri sonucunda biriken elastik deformasyon enerjisinin deprem dalgaları şeklinde yayılarak titreşim hareketleri oluşturmalarıdır. Dünya genelinde meydana gelen depremler, özellikle iki ana kuşakta yoğunlaşmaktadır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Dünya deprem kuşakları

Pasifik Okyanusu'nu çevreleyen Pasifik Kuşağı ve Türkiye'yi kapsayan Alp-Himalaya kuşağı, dünyadaki en belirgin deprem kuşaklarından. Ülkemizde bulunan topraklarının yaklaşık olarak %42'si birinci derece Alp-Himalaya kuşağı üzerinde yer almaktadır.

Depremler dünya genelinde neredeyse sürekli olarak meydana gelmektedir. Neyse ki, bu olayların büyük bir çoğunluğu o kadar küçüktür ki hissedilmezler. Sadece çok az bir kısmı fark edilebilir düzeyde hasar verebilecek büyüklüğe ulaşır ve bu hasar verebilecek depremlerin de yalnızca küçük bir bölümü, büyük deprem olarak nitelendirilebilecek düzeye erişir. Tarih boyunca kayıtlı bazı büyük depremler; ya büyüklükleri ve neden oldukları yıkım nedeniyle ya da bilim insanlarının ve mühendislerin bu olaylardan elde ettikleri bilgiler sayesinde, özellikle önemli olarak değerlendirilmektedir. Bu tür depremlerin bazılarının listesi deprem mühendisliği açısından anlamlı etkiler yaratmış depremleri içermektedir (Tablo 3.2) (Kramer ve Stewart, 2025).

Tablo 3.2. Tarihsel depremler (Kramer ve Stewart, 2025)

Tarih	Yer	Büyükölük	Can Kaybı	Açıklamalar
780 M.Ö.	Çin	-	-	Xian'ın batısında geniş çaplı hasar; güvenilir ilk yazılı deprem kaydı.
M.S. 79	İtalya	-	-	Pompeii'yi yok eden Vezüv Yanardağı'nın patlamasına zemin hazırlayan çok sayıda deprem.
893	Hindistan	-	180.000	Geniş çaplı hasar; kerpiç evlerin çökmesiyle büyük can kaybı.
1556	Çin	8.1 (tahmini)	530.000	Xian yakınlarında nüfus yoğunluğu yüksek bölgede gerçekleşti; birçok toprak mağaranın çökmesiyle büyük kayıplar yaşandı.
1755	Portekiz	8.6	60.000	Lizbon depremi; deprem etkilerinin bilimsel olarak ilk kez tanımlandığı olay.
1783	İtalya	-	50.000	Calabria depremi; ilk bilimsel deprem araştırma komisyonu kuruldu.
1811–1812	Missouri, ABD	7.5, 7.3, 7.8	Birkaç	New Madrid bölgesinde iki ay içinde üç büyük deprem; ABD'nin geniş kesimlerinde hissedildi.
1819	Hindistan	-	1.500	Cutch depremi; faylanmanın ilk iyi belgelenmiş gözlemleri.
1857	Kaliforniya, ABD	8.3	1	San Andreas Fayı üzerinde 400 km yüzey kırığı; 9 m'ye kadar yer değiştirme.
1872	Kaliforniya, ABD	8.5	27	Owens Valley depremi; ABD'deki en güçlü depremlerden biri.
1886	Güney Karolina, ABD	7.0	110	ABD doğu kıyısında kaydedilen en güçlü deprem; Charleston'da sivilaşma görüldü.
1906	Kaliforniya, ABD	7.9	700	San Andreas Fayı boyunca 430 km kırık; büyük hasar yangın kaynaklı.
1908	İtalya	7.5	83.000	Messina bölgesi harap oldu; mühendislik komisyonu sismik tasarımı önerdi.
1923	Japonya	7.9	99.000	Kanto depremi; Tokyo-Yokohama'da büyük yangın ve tsunami hasarı.
1925	Kaliforniya, ABD	6.3	13	Santa Barbara depremi; ilk sismik tasarım kuralları getirildi.
1933	Kaliforniya, ABD	6.3	120	Okullarda ciddi hasar ve can kaybı; kamu yapıları için yeni kodlar geliştirildi.
1940	Kaliforniya, ABD	7.1	9	İlk mühendislik açısından önemli ivme kaydı El Centro'da elde edildi.
1959	Montana, ABD	7.1	28	Hebgen Gölü'nde faylanma sonucu oluşan büyük seiche barajı aştı.
1960	Şili	9.5	2.230	Şimdiye kadar kaydedilen en büyük deprem.
1964	Alaska, ABD	9.2	131	Likifaksiyon ve heyelanlardan büyük hasar; Good Friday depremi.
1964	Japonya	7.5	26	Niigata'da yaygın sivilaşma; büyük altyapı hasarı.
1967	Venezuela	6.5	266	Yeni yapılarda çökme; zemin koşullarının etkisini gösterdi.
1971	Kaliforniya, ABD	6.6	65	San Fernando depremi; baraj ve köprü hasarları, kolonlar için yeni detaylar geliştirildi.
1975	Çin	7.3	1.300	Başarılı tahmin sonrası tahliye ile binlerce can kurtarıldı.
1976	Çin	7.8	700.000	Tangshan şehrinde büyük yıkım; muhtemelen en ölümcül deprem.
1985	Meksika	8.1	9.500	Meksiko'da uzakta olmasına rağmen büyük hasar; yerel zemin koşullarının etkisi gözlemlendi.

Tablo 3.2'nin devamı

Tarih	Yer	Büyükölük	Can Kaybı	Açıklamalar
1989	Kaliforniya, ABD	6.9	63	Loma Prieta depremi; SF Körfezi'nde sivilaşma ve büyütme hasarı.
1994	Kaliforniya, ABD	6.7	61	Northridge depremi; bilinmeyen fayda, çok güçlü sarsıntılar ve büyük hasar.
1995	Japonya	6.9	5.300	Kobe depremi; sivilaşma, yer kaymaları ve büyük yapı hasarları.
1999	Türkiye	7.6, 7.2	18.000	İzmit ve Düzce depremleri; yüzey faylanması ve sivilaşma ile büyük yıkım.
1999	Tayvan	7.6	2.400	Chi-Chi depremi; yüzey kırığı, büyük düşey yer değıştirme, sivilaşma ve heyelanlar.
2004	Sumatra	9.1	228.000	Büyük megasplay fay depremi; Güneydoğu Asya'da yıkıcı tsunamiye neden oldu.
2008	Çin	7.9	88.000	Wenchuan depremi; büyük yamaç heyelanları ve bina çökmeleri.
2010	Haiti	7.0	160.000	Port-au-Prince yakınında; hastaneler dahil çok sayıda bina çöktü.
2010	Şili	8.8	600	Uzun süreli sarsıntılar, kıyılarda sivilaşma ve tsunami hasarı.
2010-2011	Yeni Zelanda	7.0, 6.3	400	Canterbury ve Christchurch depremleri; büyük sivilaşma ve ağır yapısal hasarlar.
2011	Japonya	9.0	16.000	Tohoku depremi; yıkıcı tsunami, Tokyo'da sivilaşma, uzun süreli sarsıntı kayıtları.
2023	Türkiye	7.8, 7.7	51.000	Kahramanmaraş depremleri; büyük yapısal yıkımlar ve sivilaşma hasarları.

3.1. Tekrarlı Yüklemler

Hardin ve Black (1968), dinamik problemleri, zeminin tepkisi ve bu tepkilerin davranış biçimlerine dayanarak iki ana kategoride sınıflandırmışlardır. İlk kategori, yüklemenin ve boşaltmanın tekil bir şekilde, yani yalnızca bir kez uygulandığı ve ardından bu yüklemelerin zemin üzerinde oluşturduğu gerilme-birim deformasyonu ilişkilerinin incelendiği durumlardır. Bu tür durumlar genellikle aşırı yüklemelerle ilgili olup, özellikle nükleer patlamalar, güçlü patlamalar ya da çok yakın mesafelerdeki deprem kaynakları gibi yüksek enerjili olaylarla ilişkilendirilir. Bu tür yüklemeler, zeminlerin elastik ve doğrusal olmayan davranışlarını tetikler ve zemin yapısında önemli deformasyonlara yol açar. İkinci kategori ise daha düşük genlikli ancak tekrarlanan yüklemeler ve boşaltmalar sonucu meydana gelen zemin tepkilerini kapsar. Bu tür durumlar, zeminlerin belirli bir çevrimdeki (örneğin, birden fazla yükleme ve boşaltma döngüsüne maruz kalan) davranışlarını inceler ve genellikle daha düşük genlikli titreşimler ile karakterize edilir. Tekrarlı yüklemeler, zeminlerin yorgunluk, elastik olmayan davranışlar ve ileri seviyelerde plastik deformasyonlar gibi uzun süreli etkilere karşı verdikleri tepkilerin anlaşılmasında önemlidir. Bu tür zemin titreşimleri, deprem hareketleri, patlamalar, makine temelleri, trafik yükleri ve gelgit dalgaları gibi sürekli veya döngüsel olaylar nedeniyle ortaya

çıkar. Bu tür titreşimler, zeminlerin uzun vadede dayanıklılığını ve yapısal bütünlüğünü etkiler, bu nedenle dinamik zemin mühendisliğinde büyük bir öneme sahiptir (Park, 1998).

3.1.1. Deprem Titreşimi

Yer kabuğundaki çeşitli etkenler veya soğuma nedeniyle biriken gerilme enerjisinin aniden serbest kalması ve bu süreçte oluşan titreşimlerin dalgalar halinde yayılıp çevresindeki ortamları sarsması, deprem olarak tanımlanmaktadır. Deprem esnasında yer kabuğunu oluşturan levhalar, sınırlarını belirleyen fay hatları boyunca ani kaymalar gerçekleştirir ve meydana gelen yer değiştirme dalgaları sönümlenerek çevreye yayılır (Celep, 2004).

Yer kabuğunu oluşturan levhaların birbirlerine göre hareket ettiği sınır bölgelerinde, fay adı verilen kırıklar meydana gelmektedir. Deprem enerjisinin ilk noktası odak noktası veya iç merkez olarak tanımlanırken, yüzeye en yakın bölgesi dış merkez olarak adlandırılır. Deprem en yoğun hissedildiği alan merkez üstü olarak bilinir. Odak derinliği, enerjinin yüzeyden olan mesafesini ifade eder ve aynı şiddetteki sarsıntılarla eş şiddet haritaları oluşturulmaktadır. Bir depremin yeryüzünde hissedilen etkileri, yapıların, doğal çevrenin ve insanlar üzerindeki sonuçları deprem şiddetini ifade ederken, açığa çıkan enerjinin büyüklüğü ise depremin büyüklüğü olarak tanımlanmaktadır (Kramer, 1996).

Deprem sırasında meydana gelen dalgalar iki gruba ayrılır, bunlardan ilki cisim dalgaları ikincisi ise yüzey dalgalarıdır. Cisim dalgalarından P dalgaları, hacimsel değişikliklere yol açarken, S dalgaları kayma deformasyonlarına neden olur (Celep, 2004). Yüzey dalgaları ise iki dalga olarak (Love ve Rayleigh dalgaları) yer yüzeyine yakın bölgelerde yayılır. Depremler, farklı frekans, periyot, sönümleme ve genliklere sahip titreşimlerin bir arada bulunmasıyla tanımlanır. Periyot tanımı iki tepe noktası arasında geçen zaman aralığı olarak tanımlanırken, frekans tanımı ise birim zamanda meydana gelen periyodik hareket sayısı olarak tanımlanır. Sönümleme ise titreşimlerin zamanla azalmasını açıklar. Deprem yol açtığı titreşimler, zemin dinamiği açısından kritik olup, yer kaymaları, yapısal çökmeler ve zemin kırılmaları gibi olumsuz etkiler yaratır (Hwang, 1997; Luh, 1980).

3.1.2. Makine Temellerinin Titreşimi

Makine temelleri üzerinde oluşan titreşimler, makinelerin çalışması esnasında ortaya çıkan merkezkaç kuvvetleri veya delme çakma gibi etkilerle ortaya çıkar ve zemin dinamiği alanındaki yaygın problemlerdendir. Zemin, temele yeterli destek sağlamadığında, temel bloklarında aşırı salınımlar meydana gelir. Bu salınımlar çalışan personeli rahatsız ederken makine ve tesisat sistemleri üzerinde istenmeyen durumların oluşmasına ve oturma gibi yapısal

sorunlara yol açar. Ayrıca, hassas cihazların güvenli ve doğru çalışabilmesi için titreşimsiz temeller gereklidir (Luh, 1980).

3.1.3. Geçici Titreşimler

Nükleer, atomik veya kimyasal patlamalar gibi geçici titreşimler, geniş bir etki alanına sahip olup, sürekli olmayan hareketlere neden olur. Bu titreşimlere maruz kalan yapılar, güçlü hareketlere karşı dayanıklı olmalıdır. Ayrıca, yeraltı yapıları, kazık çakma ve sıkıştırma gibi inşaat işlemleri de geçici gerilme dalgalarına yol açmaktadır (Luh, 1980).

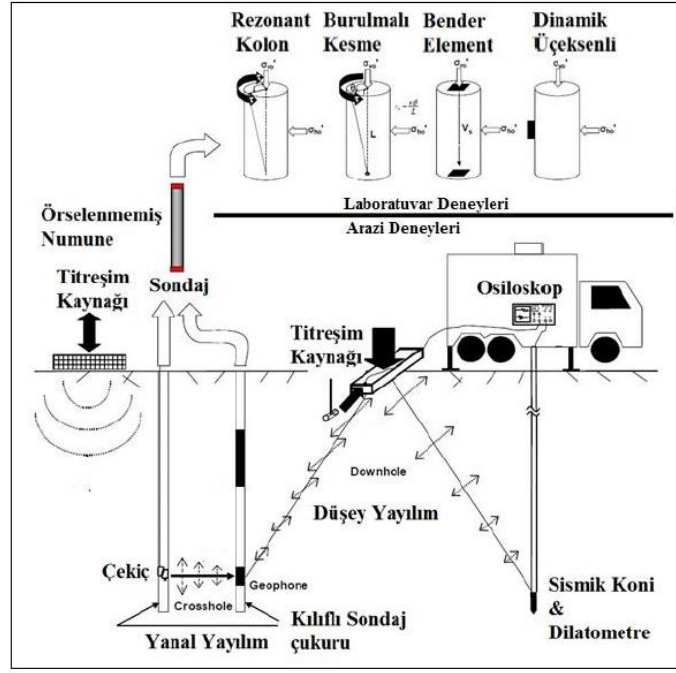
3.1.4. Su Dalgalarının Meydana Getirdiği Titreşimler

Deniz üzerine veya içerisine inşa edilen yapılar ve kıyılarda meydana gelen erozyonlar, su dalgalarının oluşturduğu periyodik etkilerle ilişkilidir. Özellikle deniz yapıları, büyük dalgalar ve güçlü rüzgarlar gibi titreşimleri göz önünde bulundurmalıdır.

Yapıların ömrü boyunca karşılaştığı en önemli yüklerden biri de depremler nedeniyle meydana gelen tekrarlı yüklerdir. Depremler, zemin tabakalarında hacimsel ve şekilsel değişikliklere neden olarak kayma dalgalarıyla yayılarak temel zeminine ulaşır. Bu etkiler, kayma gerilmeleri, şekil değiştirmeler, sıvılaşma, oturmalar ve göçmelere yol açar. Deprem yüklerinin zemin üzerindeki etkileri, güvenli tasarımlar için önemli bir rol oynar ve deprem karakteristiklerinin iyi anlaşılması gereklidir.

3.2. Dinamik Etkiler Altında Zemin Özelliklerinin Belirlenmesi

Dinamik yüklerin etkisi altındaki zemin davranışlarını önceden tahmin edebilmek amacıyla çeşitli arazi, laboratuvar ve model deneyleri geliştirilmiştir (Şekil 3.2). Bu tür deneylerle zeminlerin sahip olduğu kayma modülü ve sönüm oranının belirlenmesinin yanında sıvılaşma direnci gibi önemli parametrelerin belirlenmesini sağlar, böylece dinamik yüklemeler altında zeminlerin mukavemet özellikleri analiz edilir (Terauchi, 1998).



Şekil 3.2. Dinamik zemin parametrelerinin belirlenmesi (Terauchi, 1998)

Arazi ve laboratuvar deneyleri deformasyon aralıklarına bağlı olarak kullanım alanları, farklılık göstermektedir. Deney numunesinde oluşan birim deformasyon seviyesine göre, zeminlerde meydana gelen deformasyon miktarını karşılaştıran şema Şekil 3.3'te sunulmaktadır (Das, 2010). Arazi deneyleri, zemin özelliklerinin yerinde belirlenmesine olanak tanırken, daha büyük hacimli örneklerde düşük düzeyde örselenme avantajı sağlar. Öte yandan, laboratuvar deneylerinde küçük ölçekli numuneler kullanılarak arazi koşullarının tam anlamıyla en yakın şekilde temsil edilmesi gerekmektedir. Bununla birlikte, laboratuvar deneyleri zaman açısından daha pratik ve ekonomik bir alternatif sunmaktadır.

Dinamik Arazi Deneyleri			Dinamik Üç Eksenli ve Dinamik Kesme Deneyleri			
Rezonant Kolon Deneyi						
			Sarsma Tablası Deneyi			
			Statik Plaka Yükleme Deneyi			
Depremler						
10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
Kayma Deformasyon Seviyesi, γ (%)						

Şekil 3.3. Laboratuvar ve arazi deneyleri uygulama şeması (Das, 2010)

Arazi deneyleri, deformasyon seviyelerine bağlı olarak düşük ve yüksek deformasyon seviyeleri olmak üzere iki ana grupta incelenmektedir. Düşük deformasyon seviyelerindeki

deneyler, zeminlerin deformasyon modülleri ile cisim dalgası hızı arasındaki ilişkiyi belirlemeye yönelik yapılır. Bu tür deneylerde, sismik kırılma ve yansıma, askıda loglama, Rayleigh dalgası ile kuyudan-kuyuya gibi yöntemler kullanılır. Sismik kırılma deneyi, küçük genlikli dalgaların geniş yüzey alanlarında yayılmasını ve bu dalgaların zemin yüzeyindeki jeofonlara ulaşma süresini ölçmeyi amaçlar. Bu sayede, zemin özellikleri hakkında önemli bilgiler elde edilir. Kuyudan-kuyuya sismik deneyinde ise, dalga iletimi yöntemi ile zemin özellikleri ölçülür. Bu yöntem, bir kuyudan diğerine dalga iletimiyle yapılan ölçümlere dayanır ve zemin katmanlarının dinamik özelliklerini belirlemek için kullanılır.

Sismik kuyu aşağı/yukarı deneyinde ise, yalnızca tek bir kuyu kullanılır ve bu yöntem, özellikle düşük hızların ölçülmesine olanak tanır. Bu tür bir deneyde, kuyunun içine yerleştirilen bir kaynak ve yüzeyde bulunan alıcılar aracılığıyla dalga iletimi sağlanır. Kuyu yukarı sisteminde kaynak yüzeyde bulunurken, alıcı kuyuda yer alır; kuyu aşağı sisteminde ise kaynak kuyuda, alıcı ise yüzeyde yer alır. Her iki sistem de farklı derinliklerde oluşturulan dalgalar kullanılarak hız ölçümleri yapmayı mümkün kılar.

Yüksek deformasyon seviyelerine sahip deneyler arasında ise, geoteknik mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan standart penetrasyon deneyi (SPT) önemli bir yer tutmaktadır. Bu deney, özellikle zeminlerin mukavemet özelliklerini ve yer değiştirme davranışlarını değerlendirmek için kullanılır ve yerel zemin koşullarına göre yapıların tasarımında kritik veriler sunar (Kramer, 1996).

Laboratuvar deneyleri üç ana grupta incelenmektedir: düşük deformasyon, yüksek deformasyon ve model deneyleri. Düşük deformasyon deneylerinde RC, ultrasonik pals ve bender eleman deneyleri yer almaktadır. Tablo 3.3'te, bu tür deneylerle ölçülen parametreler sunulmuştur. Bu deneylerde zemin rijitliği, sönümleme özellikleri ve dalga yayılma hızları ölçülür. RC deneyinde, elektromanyetik yükleme sistemiyle burulma veya eksenel yük uygulandığında, rezonans frekansı üzerinden kayma modülü ve kayma dalgası hızı hesaplanır. Ultrasonik pals ve bender eleman deneylerinde, gerilme dalgaları aracılığıyla dalga hızı ölçülür (Kramer, 1996). RC deneyinde birim deformasyon seviyeleri 10^{-6} ile 10^{-3} aralığındadır ve zemin analizi, doğrusal ve elastik yaklaşımlar çerçevesinde yapılır. Yüksek deformasyon seviyelerine sahip olan deneyler ise dinamik üç eksenli, dinamik basit kesme ve TS deneylerinden oluşur (Kramer, 1996). Bu deneyler, kayma modülü, sönüm oranı, sıvılaşma direnci gibi parametreleri belirlemek için kullanılır. Dinamik üç eksenli deneyde, zemin numunesine gerilme ve deformasyonlar uygulanarak kayma modülü hesaplanırken, sıvılaşma direnci de ölçülür. Dinamik basit kesme ve TS deneylerinde ise, zemin numunelerine kayma gerilmeleri

uygulanarak rijitlik ve sönümlenme özellikleri belirlenir. Tablo 3.4'te, laboratuvar deneyleri ve bu deneylerin sahip olduğu göreceli performans değerlendirilmesi sunulmaktadır.

Tablo 3.3. Laboratuvar deneylerinde ölçülebilen parametreler (Das, 2010)

		Rezonant Kolon Deneyi	Çevrimsel Üç Eksenli Deneyi	Çevrimsel Basit Kesme Deneyi	Burulmalı Kesme Deneyi
	Yük	Rezonans Frekansı	Eksenel Yük	Yatay Yük	Burulma
Deformasyon	Eksenel	Düşey Deformasyon	Düşey Deformasyon	Düşey Deformasyon	Düşey Deformasyon
	Kesme	İvme	Ölçülmez	Yatay Deformasyon	Dönme
	Yatay	Genellikle Ölçülmez	Genellikle Ölçülmez	Genellikle Kontrol Edilir	Genellikle Ölçülmez
	Hacimsel	Drenajsız testlerde ölçülmez. (Drenajlı testlerde numuneden çıkan ve giren sıvı hacmi ölçülür)			
	Boşluk Suyu Basıncı	Genellikle Ölçülmez	Sınır Koşullarında Ölçülür	Sınır Koşullarında Ölçülür	Sınır Koşullarında Ölçülür

Model deneylerinde, arazi koşullarını simüle etmek için prototipler üzerinde tekrarlı yüklemeler uygulanarak zemin davranışı ölçülür. Bu deneyler arasında, sarsma tablası ve santrifüj deneyleri yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir (Celep, 2004). Sarsma tablası deneyinde, farklı boyutlardaki tablalar üzerinde büyük ölçekli zemin örnekleri hazırlanarak dinamik yükler uygulanmakta ve zeminlerin bu yüklemelere karşı verdiği tepkiler incelenmektedir.

Tablo 3.4. Laboratuvar deneyleri ve göreceli performans değerlendirmesi (Das, 2010)

	Kayma Modülü	Young Modülü	Malzeme Sönümü	Çevrim Sayısı Etkisi
Rezonant Kolon Deneyi	İyi	İyi	İyi	İyi
Ultrasonik Darbe Deneyi	Orta	Orta	-	-
Çevrimsel Üç Eksenli Deneyi	-	İyi	İyi	İyi
Çevrimsel Basit Kesme Deneyi	İyi	-	İyi	İyi
Çevrimsel Burulmalı Kesme Deneyi	İyi	-	İyi	İyi

3.3. Zeminlerin Dinamik Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanılan Parametreler

Zeminlerin dinamik özelliklerinin belirlenmesi, geoteknik mühendisliği açısından oldukça önemlidir. Depremler sırasında, zeminlerin gerilme-deformasyon ve mukavemet özelliklerinde değişiklikler meydana gelmektedir. Bu değişiklikler, yapılarda ciddi hasarlara yol açmaktadır. Deprem bölgelerinde inşa edilecek yapıların tasarımında, zemin dinamik özelliklerinin doğru tespiti kritik bir rol oynamaktadır. Bu parametrelerin doğru şekilde belirlenmesi ve tasarımlarda kullanılması, deprem sırasında oluşabilecek zararın azaltılmasına yardımcı olmaktadır. Zeminlerin saha koşullarına özgü analizlerinde, kayma modülü ve sönümleme eğrisi değerlerinin belirlenmesi, zemin davranışını doğru bir biçimde öngörebilmek için gereklidir. Ayrıca, saha koşullarına özel olarak belirlenen tasarım davranış spektrumu ile yer yüzeyi hareketlerinin ve tekrarlı yükler altındaki zeminlerin gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin hesaplanması da önemlidir.

Zeminlerin dinamik yükler altındaki tepkilerini belirlemek amacıyla yapılan araştırmalar, kayma modülü (G), birim şekil değiştirme (γ) ve sönüm oranı (D) gibi temel parametrelerin önemini ortaya koymuştur. Buna ek olarak, kayma dalgası hızı (V_s) ve basınç dalgası hızı (V_p) gibi parametrelerde, zeminlerin dinamik davranışlarını açıklamak için kullanılmaktadır.

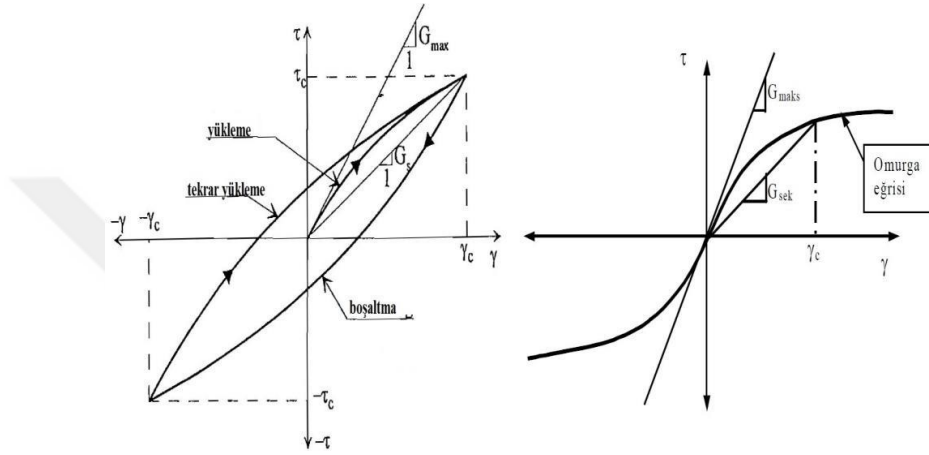
3.3.1. Kayma Modülü

Deprem dalgalarının yayılım sürecinde, düşük gerilme seviyelerinde zeminler elastik davranış özellikleri gösterirken, yüksek gerilme seviyelerinde elastik olmayan özellikler göstermektedir (Akın, 2009). EL modellerde zemin, doğrusal bir malzeme olarak kabul edilirken, NL modellerde rijitlik ve sönümleme parametreleri birim deformasyona bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Okur ve Ansal, 2009). Zeminlerin dinamik özellikleri genellikle tekrarlı yüklemeler altında zeminin sahip olduğu rijitlik ve sönümleme parametreleri ile tanımlanmakta olup, bu parametreler V_s , G , D ve kayma modülü oranı (G/G_{maks}) şeklinde ifade edilmektedir (Brandes, 2003).

Zeminlerin dinamik yükler altında ortaya koyduğu gerilme-şekil değiştirme özelliklerini, yani dinamik direnç davranışlarını incelemek için yapılan deneyler sonucunda ortaya çıkan eğri, "histerisis ilmeği" olarak adlandırılmaktadır (Şekil 3.4). Bu grafikte dikey eksen kayma gerilmesini, yatay eksen ise birim deformasyonu temsil etmektedir. Histerisis ilmeğinin eğimi, G olarak ifade edilir. Bu parametre, matematiksel olarak denklem (3.1) ile gösterilebilmektedir.

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (3.1)$$

Literatürde, G 'ye ilaveten başlangıç kayma modülü (G_0), maksimum kayma modülü ($G_{\max}$) ve sekant kayma modülü (G_{sek}) gibi çeşitli parametreler bulunmaktadır. Histerisis eğrisinin uç noktalarından geçen eğri omurga eğrisi olarak tanımlanır ve bu eğriye teğet olan doğrunun eğimi $G_{\max}$ olarak ifade edilir. G_{sek} de omurga eğrisinden hesaplanabilir. Gerilme kontrollü deneylerde histerisis ilmeği daha yatık ve genişken, deformasyon kontrollü deneylerde birim deformasyon sınırına ulaştıktan sonra sabit kalır. (Tipi, 2010).



Şekil 3.4. Histerisis ilmeği ve omurga eğrisi (Lanzo ve Delia)

Kayma modülünün belirlenmesine yönelik gerçekleştirilen çeşitli laboratuvar ve arazi araştırmaları, kayma modülünün birçok faktörden etkilendiğini ortaya koymuştur (Onur vd., 2014). Genel olarak, denklem (3.2)'de ifade edildiği üzere, bu faktörler; efektif çevre gerilmesi, doygunluk derecesi, boşluk oranı, gerilme geçmişi, dane karakteristikleri, başlangıç kayma gerilmesi, titreşim genliği ve frekansı, zamanın etkisi, zemin yapısı ve sıcaklık şeklinde sıralanmaktadır (Tipi, 2010).

$$G = f(\sigma', e, S, H, \tau_0, C_g, A_p, F, T, O, T_k) \quad (3.2)$$

Son yıllarda yapılan araştırmalar, kayma modülü üzerinde etkili olan başlıca parametrelerin efektif çevre gerilmesi, boşluk oranı, doygunluk derecesi ve kayma deformasyon genliği olduğunu ortaya koymuştur. Ancak, bu faktörlerin kayma modülü üzerindeki ortak etkisi henüz tam olarak belirlenmemiştir (Cascante ve Santamarina, 1998). Kohezyonlu zeminlerde, kayma modülünü etkileyen en önemli faktörler arasında aşırı konsolidasyon oranı ve plastisite indisi yer almaktadır. Kayma modülünün çeşitli parametrelerle değişimi şu şekilde sıralanabilir:

- Çevre basıncındaki artış, kayma modülünün yükselmesine neden olur.
- Boşluk oranının artması, kayma modülünde azalmaya yol açar.
- Doygunluk derecesinin yükselmesi, kayma modülünü düşürür.
- Aşırı konsolidasyon oranındaki artış, kayma modülünü artırır.
- Plastisite indisinin yükselmesi, aşırı konsolide killerde kayma modülünü artırır.
- Çimentolanma seviyesinin artması, kayma modülünün yükselmesine katkı sağlar.
- Rölatif sıkılığın artışı, kayma modülünde yükselmeye neden olur.
- Kayma gerilmesindeki artış, kayma modülünün azalmasına yol açar.

Dinamik kayma modülüyle ilgili gerçekleştirilen deneyler, farklı zemin türlerine bağlı olarak bu parametrenin değişiminin genellikle grafikler ve tablolar ile ifade edildiğini ortaya koymaktadır. Aşağıda sunulan Tablo 3.5'te, AASHTO (1996) tarafından yayımlanan kayma modülü değerleri yer almaktadır.

Tablo 3.5. Farklı zemin türlerine ait kayma modülü değerleri (AASHTO, 1996)

Zemin Tipi	Kayma Modülü (kPa)
Sıkı Kum & Çakıl	69000 – 345000
Siltli Kum	27600 – 138000
Orta Katı Kil	6900 – 34500
Yumuşak Kil	2750 – 13750

Kayma modülünün belirlenmesine yönelik bir takım ampirik bağıntılar geliştirilmiştir. Bu bağıntılar, zemindeki kohezyon durumuna göre farklılık göstermektedir. Özellikle kohezyonsuz zeminler için efektif çevre gerilmesi ve boşluk oranı gibi parametrelere dayalı eşitlikler yaygın olarak kullanılmaktadır. Söz konusu bağıntılar, genellikle denklem (3.3)'te sunulan genel form temel alınarak oluşturulmuştur (Ishihara, 2003).

$$G_0 = AF(e)(\sigma')^n \quad (3.3)$$

1963 ile 1984 yılları arasında araştırmacılarca önerilen eşitlikler, uzun yıllar boyunca hesaplamalarda kullanılmıştır. Bu bağıntılar, Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.6 Kayma modülü hesabı için eşitlikler (Isihara, 2003)

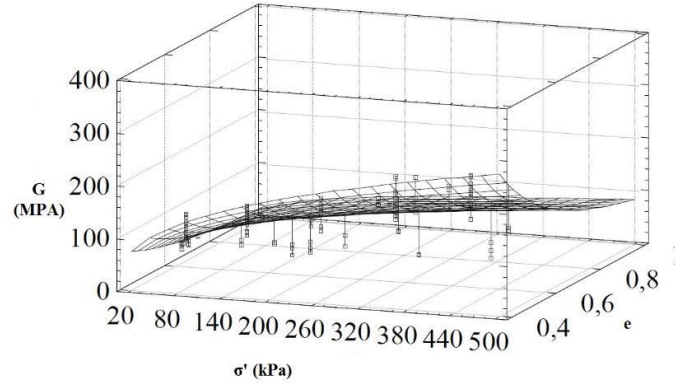
Kullanılan Yöntem	Kullanılan Malzeme	Önerilen Eşitlik	Çalışma Tarihi, Araştırmacı
Rezonant Kolon Deneyi	Yuvarlak Taneli Kum	$G = 7000 \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)} \sigma^{0.5}$	1963, Hardin & Richart
	Köşeli Taneli Quartz	$G = 3300 \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)} \sigma^{0.5}$	1963, Hardin & Richart
	Yuvarlak Taneli Quartz	$G = 6908 \frac{(2.97 - e)^2}{(1 + e)} \sigma^{0.5}$	1968, Hardin & Black
	Köşeli Taneli Quartz	$G = 3230 \frac{(2.97 - e)^2}{(1 + e)} \sigma^{0.5}$	1968, Hardin & Black
	Temiz Kum	$G = 850 \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)} \sigma^{0.44}$	1978, Iwasaki
	Temiz Kum	$G = 9000 \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)} \sigma^{0.38}$	1978, Iwasaki
	Temiz Kum	$G = 7000 \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)} \sigma^{0.5}$	1984, Yu & Richart
Dinamik Üç Eksenli Deneyi	Temiz Kum	$G = 8400 \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)} \sigma^{0.5}$	1980, Kokusho
Ultrasonik Pars Deneyi	Temiz Kum	$G = 8400 \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)} \sigma^{0.5}$	1975, Shibata & Soelarno

Daha sonraki yıllarda, kayma modülünü etkileyen doygunluk derecesinin dikkate alındığı yeni ampirik formüller geliştirilmiş ve öncekiler sınıflandırılmıştır. Bu ampirik formüller, Tablo 3.7’de sunulmaktadır.

Tablo 3.7. Kayma modülü hesaplamaları için doygunluk derecesini içeren eşitlikler (Bartake ve Singh, 2007)

Doygunluk Durumu	Kullanılan Yöntem	Kullanılan Malzeme	Önerilen Eşitlik	Çalışma Tarihi, Araştırmacı
Kuru	Rezonant Kolon Deneyi	Ottowa Kumu	$G = 7000 \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)} \sigma^{0.5}$	1963, Hardin & Richart
		Temiz Kum	$G = 800 \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)} \sigma^{0.44}$	1978, Iwasaki
		İnce-Orta Kum	$G = 2.75 \frac{(1.46 - e)^2}{(1 + e)} \sigma^{0.21} 100^{0.58}$	1996, Cascante & Santamarina
Doygun	Bender Element Deneyi	Ottowa Kumu	$G = \frac{612(100^{0.56})(2.17 - e)^2 \sigma^{0.44}}{(1 + e)}$	2000, Salgado vd.
		Toyoura Kumu	$G = 1255 e^{-0.18} \sigma^{0.56}$	2004, Sahaphol & Miura
		İnce Kum	$G = 2.121 \frac{(2.973 - e)^2}{(1 + e)} \sigma^{0.505}$	2005, Zhou & Chen

Son dönemlerde gerçekleştirilen araştırmalarda, kayma modülünü etkileyen verilerin aynı anda nasıl etki ettiği incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarla edilen sonuçlar, yeni yöntemlerle analiz edilmiş ve Şekil 3.5'te gösterildiği üzere üç boyutlu grafikler oluşturulmuştur. Gösterilen bu grafiklerin idealize edilmesiyle oluşan ve %83 doğruluk oranına sahip yeni formül, denklem (3.4) ile gösterilmektedir (Markowska-Lech, 2008).



Şekil 3.5. Yeni nesil kayma modülü grafikleri (Markowska-Lech, 2008).

$$G = 2.16\sigma^{0.4}e^{-1.26} \quad (3.4)$$

Dinamik kayma modülü ile kayma dalgası hızı arasındaki bağlantı, gerçekleştirilen çeşitli deneyler ile elde edilen ve zemin yoğunluğuna bağlı olarak, denklem (3.5) ile ifade edilmiştir. (Das, 2010).

$$G_{maks} = \rho V_s^2 \quad (3.5)$$

Dinamik kayma modülünde SPT'ye dayalı olarak ortaya çıkan değişim denklem (3.6) ile ifade edilmiştir (Das, 2010). Arazi ortamında gerçekleştirilen incelemeler ile laboratuvar deneylerinin karşılaştırılması sonucunda, arazi deneylerinden elde edilen değerlerin genellikle daha yüksek olduğu pek çok çalışmada belirtilmiştir. Denklem (3.7) ise, arazi ve laboratuvar verileri arasındaki ilişkiyi açıklamaktadır. (Okur ve Ansal, 2009).

$$G_{maks} = 5652.5N^{0.34}\sigma^{0.4} \quad (3.6)$$

$$(G_{maks})_{arazi} = 2.67(G_{maks})_{lab}^{0.95} \quad (3.7)$$

Kohezyonlu zeminler üzerinde kayma modülüne ilişkin yapılan araştırmalar neticesinde, plastisite indisi ve aşırı konsolidasyon oranının en etkili parametreler olduğu belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen eşitlikler ise Tablo 3.8'de sunulmuştur.

Tablo 3.8. Kohezyonlu zeminler için kayma modülü eşitlikleri (Kallıoglou ve Tika, 2008)

Kullanılan Yöntem	Kullanılan Malzeme	Önerilen Eşitlik	Çalışma Tarihi, Araştırmacı
Rezonant Kolon Deneyi	Kaolin	$G = 3231 \frac{(2.97 - e)^2}{(1 + e)} \sigma^{0.5}$	1968, Hardin & Black
	Bentonit	$G = 445 \frac{(4.4 - e)^2}{(1 + e)}$	1972, Marcuson & Whals
	Kil	$G = 3230 \frac{(2.97 - e)^2}{(1 + e)} \sigma^{0.5} OCR^K$	1972, Hardin & Dmievich
	Kil	$G = 9600 \frac{1}{(1 + 1.2e)^2} \sigma^{0.5}$	1999, Vrettos & Savidis
	Siltli Kum	$G = 358 \frac{1}{(e)^{1.21}} \sigma^{0.5} P^{(1-0.5)}$	1996, Delia & LAnzo
	Siltli Kil	$G = 370 \frac{1}{(0.3 + 0.7e)^2} \sigma^{0.54} P^{(1-0.54)}$	1995, Stokoe vd.
	Kaolin	$G = 677 \frac{1}{(0.3 + 0.7e)^2} \sigma^{0.487} P^{(1-0.419)}$	1981, Athanaspoulos
	Kil	$G = \frac{1}{(0.4 + 0.7e)} \sigma^{0.358-(3.8PI)}$	1992, Kawaga
	Kaolin	$G = 44750 OCR^{0.42}$	1994, Athanaspoulos
Arazi Deneyleri	Kil	$G = 500 \frac{1}{(e)^{0.15}} \sigma^{0.5}$	1996, Shibuya & Tanaka

3.3.2. Sönüm Oranı

Titreşim hareketi gösteren mekanizmalarda, titreşimin zaman içinde sona ermesini tanımlamak için sönüm oranı kavramı geliştirilmiştir. Bu kavram zeminlerde dinamik yükler etkisiyle ortaya çıkan deformasyon ve enerji kayıpları olarak ifade edilmektedir. Sönüm oranı olarak ifade edilen D, histerisis ilmeğinden faydalanılarak, denklem (3.8)'de belirtildiği şekilde hesaplanabilir.

$$D = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{\text{Histerisis İlmeğinin Alanı}}{\text{Eğrinin Altında Kalan Üçgenin Alanı}} \right) \quad (3.8)$$

Sönüm oranı ile ilgili yapılan çalışmalarda, çevrim sayısının arttıkça sönüm oranının azaldığı, yükleme frekansının etkisiyle değiştiği ve bazı parametreler ile sönüm oranının nasıl değiştiği şu şekilde sıralanmıştır:

- Çevre basıncının artması ile sabit kalabilir veya azalır.
- Boşluk oranının artması ile azalır.

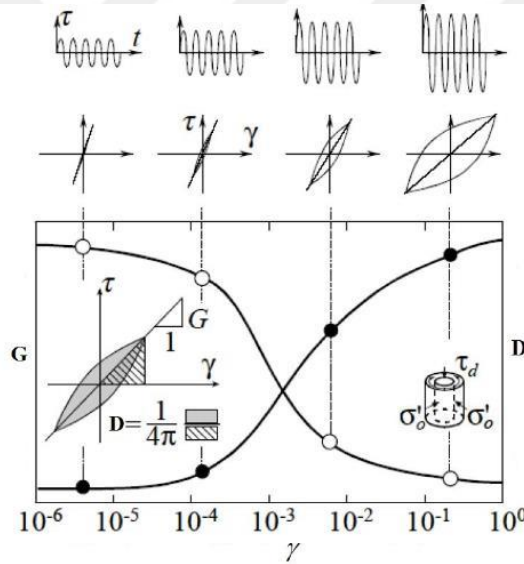
- Aşırı konsolidasyon oranının değişmesi ile değişmez.
- Plastisite indisinin artması ile azalır.
- Çimentolanma olayının gerçekleşmesi ile azalır.

Son dönemlerde gerçekleştirilen çalışmalarda, kohezyonlu zeminler için plastisite indisine dayalı denklemler (3.9) ve (3.10) geliştirilmiştir (Okur, 2002).

$$D = 21.05(0.99^{PI}) \left(1.17 - \exp(-12.75(0.99^{PI}\gamma)) \right) \quad (3.9)$$

$$D = 0.333 \frac{1 + \exp[-0.0145(PI)]}{2} 0.586 \left(\frac{G}{G_{maks}} \right)^2 - 1.547 \left(\frac{G}{G_{maks}} \right) + 1 \quad (3.10)$$

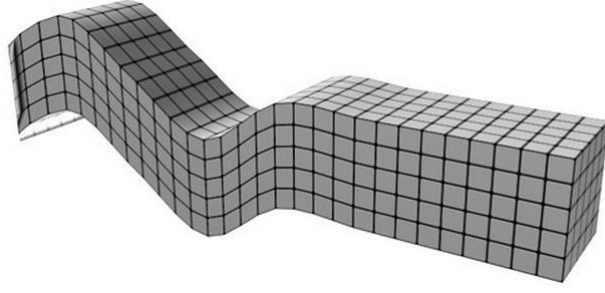
Laboratuvar ve arazi deneyleri neticesinde, zeminlerin dinamik yükler altında gösterdiği tepkiyi etkileyen temel parametrelerden biri olan sönüm oranı ile kayma modülü arasında bağlantılar kurulmuştur. Şekil 3.6'da ise bu ilişkiye dair görsel bir temsil sunulmaktadır.



Şekil 3.6. Kayma modülü ve sönüm oranı ilişkisi (Orense vd., 2012)

3.3.3. Kayma Dalgası Hızı

Kayma dalgası hızı bir gerilmenin dalgalar yoluyla tüm cisme yayılması olarak tanımlanır (Das, 2010). Sismik dalgalar, cisim ve yüzey dalgaları olarak ikiye ayrılır (Kramer, 1996). S dalgaları, kayma deformasyonlarına neden olup, daha düşük hızlara sahiptir ve çeşitli adlarla anılır (Şekil 3.7). Depremler sırasında bu dalgalar, yeryüzünde salınımlar oluşturur ve geçtikleri ortamlarda değişimlere yol açar. Zemin deformasyonları ve yapısal hasarlar nedeniyle dalga hızları, araştırma konusu olmuştur ve farklı zemin türlerinde bu hızlar belirlenmeye çalışılmaktadır.



Şekil 3.7. S dalgası hareketi (Sakarya Üniversitesi DAE, 2025)

Cisim dalgası hızları ve dalga karakteristikleri, zemin litolojisi, doygunluk seviyesi, kayma modülü, sönüm oranı, dalga dağılımı ve birim deformasyon gibi parametrelerin belirlenmesinde kullanılabilir (Kramer, 1996). Literatürde, dalga hızları ve bu hızlara etki eden parametrelerin belirlenmesi üzerine birçok çalışma bulunmaktadır. Kayma dalgası hızı ile sıvılaşma tahmini, kayma modülü ile dalga hızı arasındaki ilişki gibi konular, araştırmacılar tarafından sıkça incelenmektedir (Onur vd., 2012). Dalga hızlarının ölçülmesi, zeminlerin dinamik özellikleri hakkında değerlendirmeler yapmayı sağlar. Ayrıca, literatürde kayma dalgası hızı ile elastisite modülü (E) ve kayma modülü arasındaki ilişkilerle, zeminlerin gerilme ve deformasyon özellikleri de belirlenebilir (Das, 2010). Aşağıda, literatürde yaygın olarak kullanılan bazı eşitlikler verilmiştir (3.11 ve 3.12).

$$V_s = \sqrt{G/\rho} \quad (3.11)$$

$$V_s = \sqrt{E/(2\rho(1 + \mu))} \quad (3.12)$$

Dinamik deneyler sonucunda elde edilen kayma dalgasıyla ilgili yapılan tespitler şunlardır (Baxter vd., 2008; Bartake ve Singh, 2007; Yunmin vd., 2005; Cascante vd., 1998; Patel vd., 2008; Sykora, 1987; Alla, 2009):

- V_s ile sıvılaşma direnci arasında bir ilişki bulunmaktadır.
- Boşluk oranının artması ile V_s azalmakta, buna ilaveten kuru numunelerin sahip olduğu V_s doygun numunelere göre daha yüksek olmaktadır.
- Boşluk oranları aynı olan ince daneli kumlar, kalın daneli kumlara kıyasla daha yüksek V_s değerlerine sahiptir.
- Granüler malzemelerde, dane morfolojisi (örneğin küresellik, yuvarlaklık) ve dane boyutları V_s 'ı etkilemektedir.

- Çevre basıncı ile zeminlerin kuru ve doymun koşulları V_s 'i önemli ölçüde etkilemektedir.

- Arazi ölçümleriyle V_s tahmininde derinlik, jeolojik yaş ve rölatif dane boyutunun etkisi dikkate alınmalıdır.

- Zeminlerin su içeriği azaldıkça V_s ve rijitlik artış göstermektedir.

Arazi ve laboratuvar deneyleri sonucunda, V_s 'ın zemin tipine göre değişimi yaklaşık olarak tespit edilmiş ve Tablo 3.9'da aralıklarla sunulmuştur.

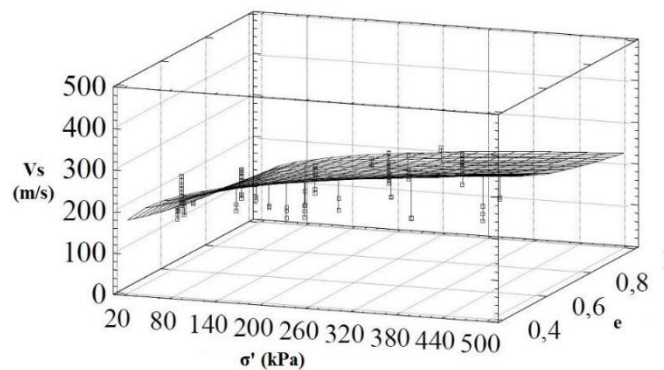
Tablo 3.9. Zeminlerin ortalama kayma dalgası hızları (Das, 2010)

Zemin Tipi	Kayma Dalgası Hızı (V_s)
İnce Kum	90-150 m/s
Sıkı Kum	220-250 m/s
Çakıl	180-330 m/s
Nemli Kil	500-550 m/s
Granit	2130-3360 m/s

Son yıllarda yapılan araştırmalarda, V_s 'i etkileyen parametrelerin yeni yöntemlerle incelenmesi sonucunda, Şekil 3.8'de gösterilen üç boyutlu grafikler oluşturulmuştur. Bu grafiklerin idealizasyonu ile elde edilen %82 temsil başarı oranına sahip yeni eşitlik, denklem (3.13) ile sunulmuştur (Markowska-Lech, 2008).

$$V_s = 60.87\sigma^{0.21}e^{-0.46} \quad (3.13)$$

Ayrıca, yapılan deneylerle kayma dalgası hızını etkileyen faktörler dikkate alınarak yeni eşitlikler oluşturulmuş ve Tablo 3.10'da bu eşitlikler sunulmuştur.



Şekil 3.8. Yeni nesil kayma dalgası hızı grafikleri (Barteke ve Singh, 2007)

Tablo 3.10. Kayma dalgası hızı için eşitlikler (Barteke ve Singh, 2007)

Doygunluk Durumu	Kullanılan Yöntem	Kullanılan Malzeme	Önerilen Eşitlik	Çalışma Tarihi, Araştırmacı
Kuru	Bender Element	Ottawa Kumu	$V_s = (120.9 - 59e)\sigma^{0.25}$	1984, DeAlba vd.
		Kumu	$V_s = 153.3\sigma^{0.23}$	1998, Brocanelli & Rinaldi
		Nevada Kumu	$V_s = 67.9\sigma^{0.25}$	2000, Arulnathan vd.
		Silika Kumu	$V_s = 91\sigma^{0.211}$	2004, Ortiz
		Silika Kumu	$V_s = 120\sigma^{0.12}$	2005, Ismail ve ark,
	Rezonant Kolon	Silika Kumu	$V_s = \sqrt{\frac{G(1 - S_r)^\eta}{\rho_w G_s(1 - n) + \rho_w n S_r}}$	1996, Cascante& Santamarina
		İnce Kum	$V_s = 78\sigma^{0.23}$	2002, Fam vd.
Doygun	Bender Element	İnce Kum	$V_s = (91 - 44.6e)\sigma^{0.25}$	2004, Huang vd.
		Silika Kumu	$V_s = 78\sigma^{0.28}$	2005, İsmail vd.
		Toyoura Kumu	$V_s = \sqrt{\frac{4786\sigma^{0.256}(1 + e)}{G_s e^{1.16}}}$	2005, Mohsin & Airey
	Rezonant Kolon	İnce Kum	$V_s = (135 - 86.6e)\sigma^{0.25}$	1996, Wei vd.
		İnce-Kaba Kum	$V_s = (68.5 - 65.5e)\sigma^{0.25}$	2000, Chien & oh

3.4. Dinamik Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanılan Yöntemler

Tekrarlı yükler altında zemin deformasyonları, G, D, yoğunluk, Poisson oranı ve boşluk oranı gibi zemin özelliklerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. G ile D, deformasyon seviyelerine göre farklılık gösterdiğinden, zeminin dinamik tepkisini belirleyen en önemli parametreler arasında yer almaktadır (Luna ve Jadi, 2000; Vardanega ve Bolton, 2013). Bu nedenle, zemin mukavemeti büyük ölçüde bu iki parametreye bağlı olup, literatürde birçok çalışma bu özelliklerin arazi ve laboratuvar deneyleriyle belirlenmesine odaklanmıştır (Teachavorasinskun vd., 2002; Gasparre, 2005; Ling vd., 2015; Hoyos vd., 2015; Kong vd., 2016; Cherian ve Kumar, 2016). Ayrıca, deformasyon seviyelerine bağlı olarak farklı tepkiler sergileyen zeminler, düşük kayma deformasyonlarında ($\gamma \leq 10^{-3}$) doğrusal elastik özellik gösterirken, artan deformasyon seviyelerinde doğrusal olmayan plastik davranışlar

sergilemektedir. Bu davranışları belirlemek için, arazi ve laboratuvar deneyleri gibi iki yöntem kullanılır. Bu yöntemler, kayma deformasyonu seviyelerine göre zeminlerin elastik ve plastik davranışlarını sınıflandırmaya çalışır. Düşük kayma deformasyonu seviyelerinde elastik davranış, yüksek deformasyon seviyelerinde ise plastik şekil değişikliği gözlemlenir.

Zemin, tekrarlı yükler nedeniyle çeşitli titreşimler ve kayma deformasyonlarına uğrar. Bu tür deformasyonlar, makine temelleri, trafik, deprem, patlama gibi olaylardan kaynaklanabilir. Bu deformasyonların anlaşılması ve zeminin dinamik davranışının belirlenmesi için, her bir durum için uygun deney yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler arasında düşük kayma deformasyonu seviyelerinde kullanılan RC deneyi, bender eleman ve ultrasonik pals deneyi gibi sonik hız yöntemleri ile arazi jeofizik yöntemleri bulunmaktadır. Yüksek deformasyon seviyelerinde ise TS, dinamik basit kesme ve dinamik üç eksenli deneyler tercih edilmektedir (Özaydın, 2011). Laboratuvar ve arazi deneylerinin her birinin avantajları ve sınırları olup, bu bölümde bu deneyler ve yöntemler ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

3.4.1. Laboratuvar Yöntemleri

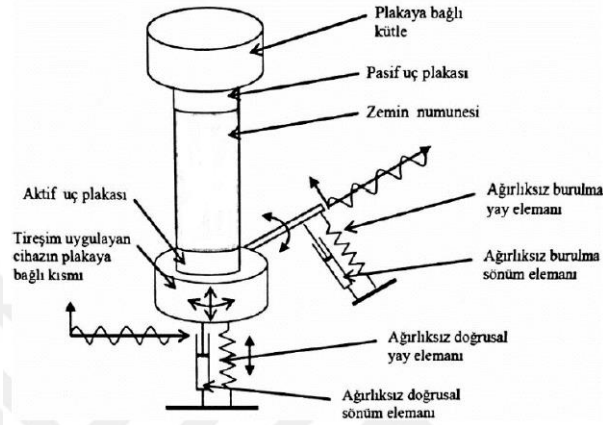
Laboratuvar deneyleri, genellikle sahadan alınan örselenmemiş veya laboratuvar ortamında yeniden oluşturulmuş küçük numuneler üzerinde yapılır ve bu deneylerin geçerliliği, zemin tabakalarının doğal koşullarının laboratuvar ortamında sağlanabilmesine bağlıdır. Örselenmiş numunelerle yapılan deneylerde zeminin doğal yapısının tam olarak yansıtılması zor olmaktadır. Kohezyonlu zeminlerde ince cidarlı tüplerle alınan numunelerle yapılan deneyler, daha doğru sonuçlar elde edilmesini sağlar. Laboratuvar ortamında dinamik parametrelerin belirlenmesinde kullanılan yöntemler arasında dinamik basit kesme, dinamik üç eksenli, RC ve TS deneyleri bulunmaktadır. Bu deneyler, küçük ve büyük birim deformasyonlar altında zemin davranışını incelemek amacıyla tercih edilmektedir.

3.4.1.1. Ultrasonik Darbe Deneyi

Bu deney kapsamında, zemin numunesinin her iki ucuna piezoelektrik kristaller yerleştirilerek ölçümler gerçekleştirilmektedir. Vericiye yüksek frekansta elektrik akımı uygulanması sonucu, kristalin kalınlığında değişim meydana gelir ve mekanik bir darbe oluşur. Bu darbe, numune boyunca ilerleyerek alıcı tarafından algılanır ve yeni bir elektrik sinyaline dönüştürülür. Darbenin numunenin bir ucundan diğer ucuna ulaşma süresi ölçülerek, Young modülü ve G hesaplanmaktadır (Das ve Ramana, 2010). Ultrasonik darbe deneyi, özellikle sondaj tüpü kullanılmaksızın yapılan deneyler için uygun olup, deniz çökelleri ve gevşek kum gibi zemin türlerinde etkili bir yöntem olarak değerlendirilmektedir (Koester, 1994).

3.4.1.2. Rezonant Kolon Deneyi

Rezonant kolon deneyi, zemin kayma parametrelerini belirlemek amacıyla 1930'lardan bu yana kullanılan bir tekniktir (Iida, 1938, 1940). Bu yöntem, geniş bir birim deformasyon aralığında dinamik deneyler yapılmasına olanak tanır (Kumar ve Clayton, 2007; Khan vd., 2008; Khosravi ve McCartney, 2011; Cherian ve Kumar, 2016; Yu ve Shan, 2017). Deneyde, zemin numunesine titreşim uygulayan aktif uç ile pasif uç plakası bulunur (Şekil 3.9).



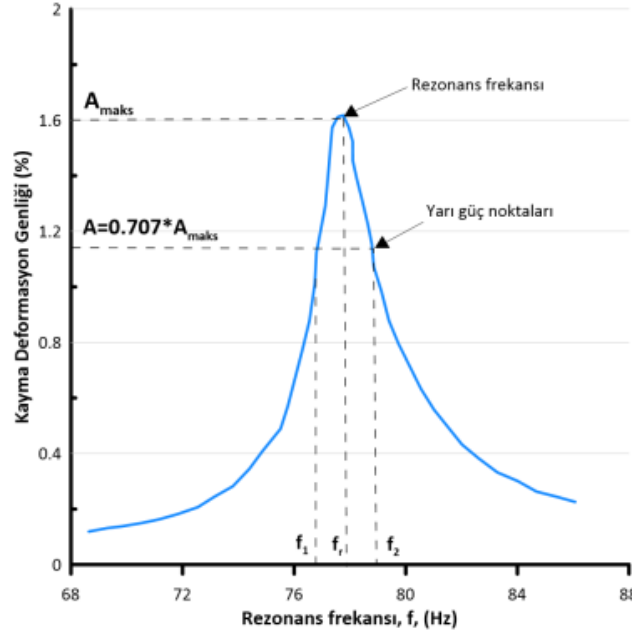
Şekil 3.9. Rezonant kolon deneyi (Özkan, 2017)

RC cihazının çalışma esasına göre, silindirik yapıdaki zemin numunesi sabit bir taban üzerine yerleştirilmekte ve üst kısmından eksenel veya burulmalı titreşimlerle uyarılmaktadır. Bu yöntemle, sistemin doğal frekansı belirlendikten sonra, titreşim genliği ile birlikte rezonans frekansına ait veriler elde edilmekte; elastisite kuramı temelinde bu ölçümlerden gerinim düzeyi ile dalga yayılım hızı hesaplanmaktadır. Kayma modülü ise, belirlenen dalga hızları ve numunenin yoğunluğu esas alınarak elde edilmektedir (Utest Malzeme Test Cihazları, 2024). Deney düzeneğinde, numunenin üst kısmındaki dönme hareketi proximetre aracılığıyla tespit edilmektedir.

Deneyisel uygulama sürecinde, zemin numunesi konsolidasyona tabi tutulduktan sonra, üst başlık yardımıyla burulmalı gerilmelere maruz bırakılmaktadır. Yükleme frekansı, uygulanan tork kuvvetiyle birlikte kademeli olarak artırılır ve bu süreçte birim kayma deformasyonunun en yüksek olduğu noktada oluşan frekans, rezonans frekansı olarak tanımlanır. Bu frekansa karşılık gelen maksimum genlik değeri ise A_{maks} şeklinde ifade edilmektedir. Örnek bir grafik, Şekil 3.10'da sunulmuştur. Elde edilen deney verileri yardımıyla, zemin sönüm oranları hesaplanabilmektedir. Bu oranlar, $A=0.707.A_{maks}$ değerine karşılık gelen frekansların belirlenmesiyle, yarı güç bandı esas alınarak ve aşağıdaki denklemde (3.14) yer alan bağıntı yardımıyla tahmin edilmektedir (Morsy ve ark., 2019; Banarjee ve Balaji, 2018;

Bedr vd., 2019). Titreşim, basınç veya kayma dalgası oluşturacak şekilde burulma momentiyle uygulanır. Rezonans frekansı belirlendikten sonra, numune özelliklerine dayalı deformasyon modülü hesaplanabilir. Günümüzde, bu yöntemi birleştiren sistemler kullanılmaktadır.

$$D = \frac{f_2 - f_1}{2f_r} \quad (3.14)$$



Şekil 3.10. Rezonans frekansının değişiminin gösterimi (Güler ve Afacan, 2020)

RC deney düzeneğinde, kayma modülünün maksimum değeri G_{maks} , zemin malzemesinin birim hacim kütlesi ile kayma dalgası yayılım hızına bağlı olarak belirlenmektedir. Bu ilişki, formül 3.15 ile matematiksel olarak ifade edilmektedir.

$$G_{maks} = \rho \cdot V_s^2 \quad (3.15)$$

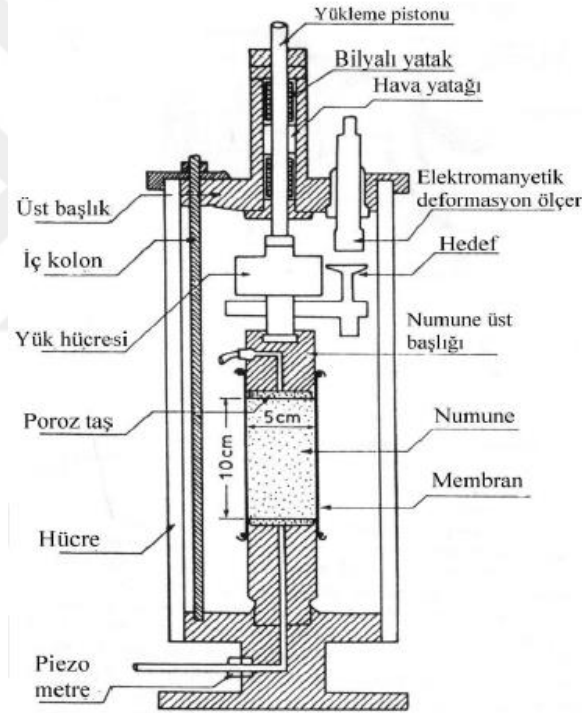
Deney düzeneğinde birim şekil değiştirme (gerinim), numunenin geometrik özellikleri ile deney sırasında merkez ekseninden sapma miktarına dayalı olarak belirlenmektedir. Bu hesaplama, formül 3.16’da verilen bağıntı aracılığıyla gerçekleştirilmektedir.

$$\gamma = \frac{r_{eq} \cdot \theta_{maks}}{h} \quad (3.16)$$

RC deneyinde, numuneye belirli bir frekansta etki eden titreşimler uygulandıktan sonra ölçümler tamamlanır ve sistem durdurularak numune serbest salınımına bırakılır. Bu aşamada, salınım süreci boyunca sönüm oranı hesaplanır. Deney, uyarım seviyesini kademeli olarak artırarak devam ettirilir. Uyarım seviyesi arttıkça numunedeki birim deformasyonlar da artar; bu durum numunede yumuşama meydana getirdiği için rezonans frekansı daha düşük seviyelerde gerçekleşir (Das ve Ramana, 2010).

3.4.1.3. Dinamik Üç Eksenli Deneyi

Zeminlerin statik yükleme altındaki mukavemetlerini belirlemek için kullanılan üç eksenli deneyle benzerlik gösterse de dinamik yükleme ortamı sağladığı için zeminlerin tekrarlı yüklemeler altındaki davranışını incelemeye yaygın bir yöntemdir (Bouferra vd., 2007; Cai vd., 2012; Guo vd., 2013; Ng ve Zhou, 2014; Wang vd., 2016; Yang vd., 2018; Moldenhauer ve Polito, 2018; Amini ve Noorzad, 2018). Deformasyon kontrollü deneyde elastisite modülü ile sönüm oranı hesaplanarak ve poisson oranı kullanılarak kayma modülü belirlenir. Dinamik üç eksenli deney düzeneklerinde (Şekil 3.11), örselenmemiş veya laboratuvar ortamında hazırlanmış numune, alt ve üst başlıklar arasında yerleştirilip çevre basıncında konsolide edilir. Ardından, eksenel ve yanal gerilmeler çevrimsel olarak artırılıp azaltılarak numune deformasyona uğrattılır. (ASTM D5311 / D531M, 2013).



Şekil 3.11. Dinamik üç eksenli deney sistemi (Ishihara, 1996)

Üç eksenli deney numunesinde, gerilme koşulları Şekil 3.12’de gösterildiği gibi olup, yanal gerilme sabit tutulurken eksenel gerilme artırılmaktadır. Bu süreçte, artan deformasyona karşılık gelen elastisite modülleri hesaplanmaktadır (Das ve Luo, 2016). Bu yöntem, zeminin farklı deformasyon seviyelerindeki dinamik tepkisini anlamak için önemli bir yaklaşımdır.

Dinamik üç eksenli deney numunesinin gerilme durumu, eksenel gerilme (σ_1) ve yanal gerilme (σ_3) olmak üzere iki ana bileşenden oluşur. Deney sırasında yanal gerilme sabit

tutulurken, eksenel gerilme çevrimsel olarak arttırılıp azaltılarak numune üzerine tekrarlı yüklemeler uygulanır. Bu süreçte:

Deviatorik gerilme (σ_d) şu şekilde tanımlanır (3.17):

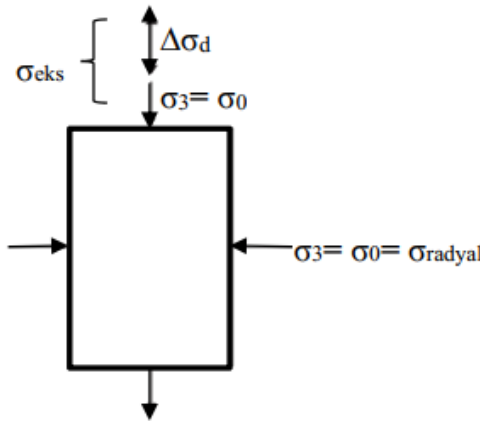
$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (3.17)$$

Elastisite modülü (E) ve sönüm oranı (D), elde edilen gerilme-deformasyon verileri kullanılarak hesaplanır.

Kayma modülü (G) ise elastisite modülü ve Poisson oranı (ν) ile şu denklemden bulunur (3.18):

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.18)$$

Bu deney, zeminlerin dinamik yükler altındaki deformasyon davranışını anlamak ve mühendislik analizlerinde kullanılacak parametreleri belirlemek için önemli bir yöntemdir.



Şekil 3.12. Dinamik üç eksenli deney numunesinin gerilme durumu

Dinamik üç eksenli deney sisteminin genel prensibi, eksenel dinamik gerilme ($\Delta\sigma_d$) uygulanarak numunede eksenel deformasyon oluşturulmasına dayanır. Elde edilen eksenel deformasyon kullanılarak E hesaplanır ve G belirlenir. Ancak bu deneyin bazı sınırlamaları bulunmaktadır:

Gerilme Şartları: Tekrarlı üç eksenli deneyde meydana gelen asal gerilmeler sadece düşey ve yatay eksenlerle sınırlıdır. Oysa S dalgalarında gerilmeler sürekli olarak dönmektedir. Bu nedenle, üç eksenli deney sistemi sismik dalga yayılma problemlerindeki gerilme şartlarını tam olarak yansıtamaz.

Şekil Değiştirme Hassasiyeti: Zeminlerde oluşan kayma şekil değişim değerinin 10^{-6} değerinin altında olduğu seviyelerde doğru ölçümler yapabilirken, 10^{-5} değerinden büyük

kayma şekil değişimlerinde tabakalanma hataları ve sistem uygunluğu gibi etkenler ölçümlerin doğruluğunu sınırlamaktadır (Kramer, 2016). Bu nedenlerle dinamik üç eksenli deney, zeminlerin sismik dalga yayılımı ve büyük deformasyonlar altındaki dinamik davranışlarını anlamada tek başına yeterli olmayabilir ve diğer dinamik deney yöntemleriyle birlikte değerlendirilmelidir.

3.4.1.4. Dinamik Basit Kesme Deneyi

Dinamik basit kesme deneyi ile elde edilen sonuçlara bakıldığında bu deney yüksek deformasyon seviyelerine sahip deneyler arasında bulunmaktadır. Bu deney arazinin sahip olduğu dinamik yükleme koşullarını en iyi temsil eden laboratuvar deneylerinden biridir. Özellikle sıvılaşma potansiyelini belirleme amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır (Montoya vd., 2013; Li vd., 2016; Vieira vd., 2013; Mortezaie ve Vucetic, 2013; Kang vd., 2015; Da Fonseca vd., 2015; Suazo vd., 2016; Nikitas vd., 2017; Hu vd., 2018; Mandokhail vd., 2018).

Bu deneyde kullanılan silindirik numuneler, çap 60mm ile 80mm, boy ise 20mm ile 30mm arasında değişebilen küçük numunelerden oluşmaktadır. Numune, üç farklı yöntemle sınırlandırılabilir:

Cambridge türü cihaz → Rijit sınır plakaları ile sınırlama

NGI tipi cihaz → Tel takviyeli membran kullanımı

SGI tipi cihaz → Üst üste yığılmış teflon ringler ile sınırlandırma

Deney sisteminde, numuneye verilen tekrarlı kayma gerilmeleri, zemin numunesinin düşey düzlemde yayılan S dalgaları gibi bir şekil değiştirme sergilemesine yol açmaktadır. (Kramer, 2016). Bu sayede dinamik yükleme altında zeminin davranışı, özellikle sıvılaşma potansiyeli açısından değerlendirilmiş olur. Bu deney, sismik dalgaların zemin üzerindeki etkilerini anlamada oldukça faydalı olup, yüksek deformasyon seviyelerinde zemin davranışını modellemek için ideal bir yöntemdir.

3.4.1.5. Dinamik Burulmalı Kesme Deneyi

Dinamik özelliklerin tespiti için kullanılan yöntemlerden biri, dinamik burulmalı kesme (TS) deneyidir (Yamada vd., 2008; Chiaro vd., 2012; Lentini ve Castelli, 2017; Zhuang vd., 2018). Dinamik üç eksenli ve dinamik basit kesme deney sistemlerinin birleşimiyle oluşturulan bu deneyde, hücreye yerleştirilen silindirik numuneye belirli frekanslarla üst başlıktan tork uygulanmaktadır (Şekil 3.13). Deney prensibi ve avantajları:

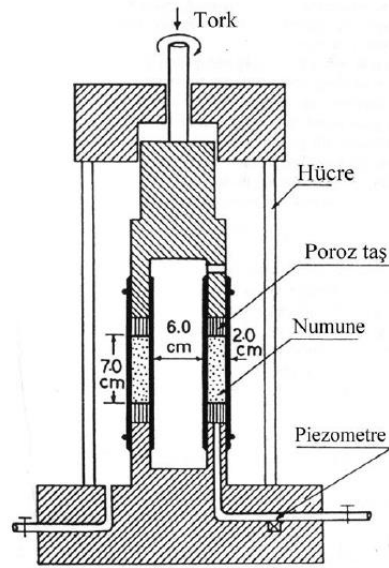
- Burulma etkisiyle numunede kayma gerilmeleri meydana gelir.

- Drenajsız olarak yapılan deneylerde ortaya çıkan boşluk suyu basıncı ve dinamik parametreler hesaplanmaktadır.

- 0.125Hz ile 5Hz arasında çalışma frekansına sahiptir.

- Bu deney sisteminde diğer dinamik deney sistemlerine (basit kesme ve üç eksenli) göre, numune üzerine uygulanan gerilmeler daha homojendir.

Bu özelliğiyle dinamik burulmalı kesme deneyi, zeminlerin dinamik özelliklerinin belirlenmesinde güvenilir ve etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır (Ishihara, 1996).



Şekil 3.13. Dinamik burulmalı kesme deneyi (Ishihara, 1996)

Tablo 3.11'de dinamik etkiler sonucu oluşan deformasyon genlikleri ile bu genliklerin laboratuvar ortamında analiz edilmesinde kullanılan deney sistemleri karşılaştırmalı bir şekilde sunulmuştur.

Tablo 3.11. Laboratuvar deney sistemlerinin deformasyon genliği aralıkları

Deneyler	Ultrasonik darbe deneyi		Dinamik basit kesme deneyi			
	Rezonant kolon deneyi				Burulmalı kesme deneyi	
			Dinamik üç eksenli deneyi			
Olaylar	Makina Temelleri	Açık Deniz Ağırılık Yapıları	Kuvvetli Yer Hareketi (Depremler, Heyelanlar)			Nükleer Patlamalar
Birim kayma deformasyonu, γ (%)	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	10 ⁰	10 ¹

Tablo 3.12'de ise, dinamik parametrelerin belirlenmesinde kullanılan deney sistemlerinin avantajları, dezavantajları ve kullanım amaçları detaylı bir şekilde karşılaştırılmıştır (Das ve Ramana, 2010).

Tablo 3.12. Dinamik parametrelerin belirlenmesinde kullanılan deney sistemleri

Deney Sistemi	Kayma Modülü	Young Modülü	Malzeme Sönümü	Çevrim Sayısı Etkisi
Rezonant Kolon Deneyi	İyi	İyi	İyi	İyi
Ultrasonik Darbe Deneyi	Orta	Orta	-	-
Çevrimsel Üç Eksenli Deneyi	-	İyi	İyi	İyi
Çevrimsel Basit Kesme Deneyi	İyi	-	İyi	İyi
Çevrimsel Burulmalı Kesme Deneyi	İyi	-	İyi	İyi

Bu tablolar, farklı dinamik olayların neden olduğu deformasyon seviyeleri ile bu seviyelere karşılık gelen uygun laboratuvar deneylerini belirlemek açısından önemli bir kaynak niteliğindedir.

3.4.2. Arazi Deneyleri

Arazi deneyleri, zeminlerin doğal ortam koşullarını bozmadan ölçüm yapılmasına olanak tanıyarak, mevcut şartların karmaşık etkilerinin doğrudan gözlemlenmesini sağlar. Bu yöntem, zeminin statik ve dinamik yükler altındaki davranışının gerçeğe en yakın şekilde belirlenmesine yardımcı olur. Laboratuvar deneyleri ile karşılaştırıldığında, arazi deneyleri zeminin daha büyük bir hacmini kapsayarak ölçüm alınmasını mümkün kılar. Özellikle dinamik yüklerin ve dalga yayılımının arazide doğrudan incelenebilmesi, laboratuvar yöntemlerine kıyasla önemli bir üstünlük sağlamaktadır. Ancak, arazi deneylerinin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Boşluk suyu basıncının oluşumunun kontrol edilememesi ve zeminin farklı çevresel koşullarda nasıl tepki vereceğinin belirlenmesindeki zorluklar, bu yöntemlerin önemli sınırlamaları arasındadır. Bununla birlikte, numune alma gerekliliği bulunmadığından, örselenme problemi veya küçük ölçekli numunelerin zeminin tamamını temsil edememe gibi durumlar arazi deneyleri için bir dezavantaj oluşturmaz.

Arazi deneyleri, zemin yüzeyinde yapılan sismik ölçümler ve zemin içine yerleştirilen ölçüm cihazlarıyla gerçekleştirilen kuyu içi testleri olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Yüzey sismik yöntemlerinde kaynak ve alıcı zemin yüzeyinde konumlandığından sondaj kuyusu açılmasına gerek duyulmaz, bu da yöntemi ekonomik açıdan daha avantajlı hale getirir. Kuyu içi deneylerde ise, alıcı ve kaynağın belirli derinliklere yerleştirilmesi sayesinde zemin tabakalarının derinliğe bağlı olarak değişimi incelenebilir. Bu yöntem, maliyet açısından daha yüksek olmasına rağmen, detaylı veri sağlaması nedeniyle tercih edilmektedir.

3.4.2.1. Kuyu İçi Yöntemler

Kuyu içi yöntemler, açılan bir kuyunun içine yerleştirilen kaynak ve alıcıların farklı konumlandırmalarıyla ölçüm alınmasını sağlayan tekniklerdir. Bu yöntemler, zeminin dinamik özelliklerini derinliğe bağlı olarak belirlemek için kullanılır. Alıcı ve kaynağın yerleşim düzenine bağlı olarak farklı kuyu içi yöntemleri geliştirilmiştir.

Şekil 3.14'te gösterildiği gibi, kuyu içi yöntemler karşıt kuyu, aşağı kuyu, yukarı kuyu, kuyu içi ve kuyu dibi olmak üzere beş farklı kategoriye ayrılmaktadır (İyisan, 1994):

Karşıt Kuyu (Cross-Hole) Yöntemi: Kaynak ve alıcı farklı kuyulara yerleştirilir. Dalga yayılımı kuyular arasında gerçekleşir. Kayma dalgası (S) ve sıkışma dalgası (P) hızlarının belirlenmesinde en güvenilir yöntemlerden biridir.

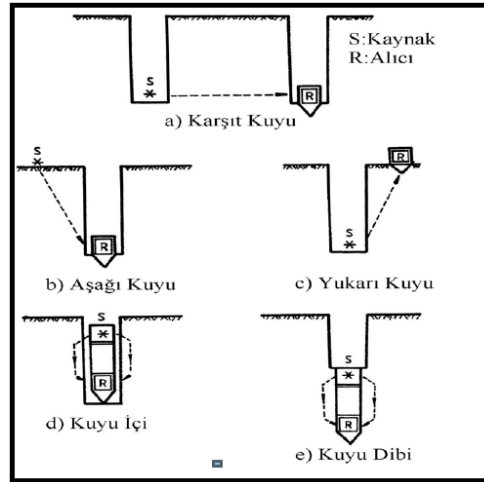
Aşağı Kuyu (Down-Hole) Yöntemi: Kaynak yüzeyde, alıcı ise kuyu içine yerleştirilir. Dalgalar yukarıdan aşağıya doğru yayılır. Zemin tabakalarının derinliğe bağlı olarak dalga hızlarındaki değişimi belirlemek için kullanılır.

Yukarı Kuyu (Up-Hole) Yöntemi: Kaynak kuyu içinde, alıcı yüzeyde bulunur. Dalgalar aşağıdan yukarıya doğru yayılır. Genellikle yumuşak zeminlerde ve kayaç-zemin sınırlarını belirlemek için kullanılır.

Kuyu İçi (In-Hole) Yöntemi: Hem kaynak hem de alıcı aynı kuyu içinde yer alır. Özellikle zeminin küçük ölçekli dalga yayılım özelliklerini belirlemek için uygundur.

Kuyu Dibi (Bottom-Hole) Yöntemi: Kaynak kuyunun dibinde, alıcı ise kuyunun üst kısmında yer alır. Derin kaya tabakalarının özelliklerini belirlemek için kullanılır.

Bu yöntemler arasından en uygun olanı, araştırılmak istenen zemin özelliklerine, kuyu derinliğine ve sismik dalga türüne bağlı olarak seçilmektedir.



Şekil 3.14. Kuyu içi yöntemler

Zeminlerin dinamik özelliklerini belirlemek amacıyla sahada en yaygın olarak kullanılan kuyu içi yöntemler, aşağı kuyu ve karşıt kuyu yöntemleridir. Bunlardan aşağı kuyu yönteminde, zemin yüzeyinde bulunan bir kaynaktan üretilen cisim dalgalarının kuyu içinde farklı derinliklere yerleştirilen alıcılara ulaşma süresi ölçülür. Tek bir kuyu kullanılır, bu nedenle ekonomik ve uygulaması kolaydır. Hem P hem de S dalgaları ölçülebilir. P dalgası üretimi için çelik veya tahta bir plaka üzerine düşey darbe uygulanarak sıkışma dalgaları oluşturulur. S dalgası üretimi için aynı plaka üzerine yatay darbe uygulanarak kayma dalgaları oluşturulur. Analiz aşamasında, ölçülen dalga varış zamanları kullanılarak derinlik-zaman grafikleri çizilir ve zemin tabakalarının dinamik özellikleri belirlenir.

Karşıt kuyu yönteminde, kuyu içine yerleştirilen kaynaktan üretilen cisim dalgalarının, bir veya birden daha fazla ve farklı kuyular içerisine yerleştirilen alıcılara yatay olarak varması için geçen süre ölçülür. En az iki kuyu gereklidir (bir kaynak kuyusu, bir veya daha fazla alıcı kuyusu). S dalgası ve P dalgası ölçümleri yapılabilir. Ölçüm her iki kuyudaki kaynak ve alıcı aynı derinlikte olacak şekilde alınır ve farklı derinliklerde deney tekrar edilerek zemin profili ve dalga hızının derinlikle değişimi belirlenir. Dalga yayılım yönü yatay olduğu için, dalga hızları daha hassas ölçülebilir ve yanal heterojenliklerin tespitinde oldukça etkilidir. Her iki yöntem de zeminlerin dinamik parametrelerini belirlemek için kullanılırken, aşağı kuyu yöntemi uygulama kolaylığı nedeniyle daha sık tercih edilmekte, karşıt kuyu yöntemi ise daha hassas ve güvenilir sonuçlar elde etmek için kullanılmaktadır (İyisan, 1994).

3.4.2.2. Yüzey Yöntemleri

Yüzey yöntemleri, zemin yüzeyinde yapılan sismik ölçümlerle zemin özelliklerinin belirlenmesine yönelik yöntemlerdir ve genellikle üç ana başlık altında sınıflandırılırlar.

Yüzey yansıma yönteminde, ölçümler sismik dalgaların iki farklı malzemenin ara yüzüne çarparak bu yüzeyden yansıma prensibiyle gerçekleştirilir. Kullanılan dalga türü P dalgasıdır. Deneyin prensibi ise şu şekilde açıklanabilir. Zemin yüzeyine yerleştirilen bir kaynak tarafından üretilen P dalgası, zemin yüzeyinde bulunan alıcıya ulaşmak üzere yayılır. Bu dalga zeminin hem yüzeyinden hem de altındaki yatay katman sınırından yansıyacaktır. Kaynaktan çıkan dalganın her iki yüzeyden de yansıması nedeniyle, iki farklı varış zamanı kaydedilir: Zemin yüzeyinden yansıyan dalga ile alıcıya ulaşan zaman. Yatay katman sınırından yansıyan dalga ile alıcıya ulaşan zaman. Hesaplamalar ise şu şekilde yapılır. Dalga hızı, P dalgasının zemin yüzeyinden alıcıya ulaşması için geçen varış süresi ile hesaplanır. Katman kalınlığı, yatay katman sınırından yansıyan dalga ile alıcıya ulaşan varış süresi kullanılarak, zemin katmanlarının kalınlıkları belirlenir. Bu yöntemle, özellikle katmanlar arası hız farkları ve zeminin derinliği hakkında bilgi edinmek mümkündür. Yüzey yansıma yöntemi, özellikle zemin tabakalarının derinliği ve özelliklerini tespit etmek için kullanılır.

Yüzey kırılma yöntemi, zemin yüzeyindeki dalga yayılımını inceleyerek yüzey dalgalarının hızlarını belirlemeye yönelik bir yöntemdir. Bu yöntemde homojen bir ortamda ilerleyen dalgaların, farklı bir ortamla karşılaştığında kırılma prensibini kullanmaktadır. Bu yöntemle, zemin yüzeyinin altındaki tabakaların özellikleri hakkında bilgi edinilebilir. Bu yöntemde prensip şu şekildedir. Dalgalar, farklı ortamlara temas ettiğinde kırılır ve yönlerini değiştirir. Bu kırılma, ortamın farklı özellikleri nedeniyle meydana gelir. Yüzey kırılma yöntemi, bu kırılmayı inceleyerek zemin yüzeyinin altındaki tabakaların özelliklerini belirler.

Yöntemin uygulaması ise; yüzeydeki kaynak tarafından üretilen dalga, doğrusal olarak dizilmiş alıcılara ulaşır. Alıcıya varış süresi, kaynağın konumuna ve alıcıların yerlerine göre ölçülür ve kaynak-alıcı mesafesinin fonksiyonu olarak çizilir. Bu süreler kullanılarak, zeminin katman yapısı ve özellikleri hesaplanabilir. Bu yöntem yeraltı araştırmaları, özellikle su seviyesinin ve ana kaya derinliğinin belirlenmesinde kullanılır. Yöntem, aynı zamanda fizibilite çalışmaları ve iş planlaması gibi alanlarda, geniş alanlarda uygulama kolaylığı sağlamak amacıyla da tercih edilir.

Yüzey Dalgalarının Spektral Analizi (SASW) Yöntemi, dispersiyon Rayleigh yöntemi olarak da bilinir ve özellikle zemin özelliklerini belirlemek için kullanılır. Bu yöntemde düşey bir darbe kullanılarak, zemin yüzeyinde doğrusal bir şekilde sıralanan alıcılara dalgaların ulaşması için gereken süre ölçülür. Bu verilerle dalga hızı ve zemin elastik özellikleri hakkında bilgi edinilir. SASW yöntemi, zeminin yüzey özellikleri ve katman yapısı hakkında daha detaylı bilgi edinmek için tercih edilen bir tekniktir.

4. SAHAYA ÖZEL DİNAMİK ANALİZ

4.1. Sahaya Özel Zemin Davranışı ve TBDY 2018

Deprem etkilerine karşı dayanıklı yapı tasarımında, kuvvetli yer hareketleri iki farklı yöntem çerçevesinde dikkate alınmaktadır. Bunlardan ilki, ivme kayıtlarının (akselerogram) zaman tanım alanında sisteme doğrudan etkitilmesi; diğeri ise, frekans tanım alanında, %5 sönüm oranına sahip TSD sistemlerin davranış spektrumlarının, deprem tehlike haritaları ve yerel zemin türü esas alınarak elde edilmesidir. Davranış spektrumları, bölgesel tektonik yapı, potansiyel deprem büyüklüğü, etkin fayların mesafesi ve yerel zemin karakteristikleri göz önünde bulundurularak deterministik yaklaşımla belirli bir ölçüde tanımlanmakta; bununla birlikte, bu etkilerin tamamı, olasılıksal yöntemlerle değerlendirilen kapsamlı mühendislik çalışmalarının bir çıktısı olarak ortaya çıkmaktadır.

Bunun yanı sıra, tasarım spektrumlarının doğrudan uygulanmadığı; zayıf zemin koşullarının mevcut olduğu, sıvılaşma potansiyeli taşıyan veya inşa edilecek yapı ya da tesisin hizmet gereklilikleri doğrultusunda özel analizlerin zorunlu olduğu durumlarda, bölgenin sismik özellikleri esas alınarak NL dinamik analizler yürütülmekte ve zaman tanım alanında deprem etkileri hesaplanmaktadır. Son yirmi yıl içinde, doğrusal ve doğrusal olmayan dinamik analizlerin, özellikle yüksek serbestlik derecesine sahip ve özel inceleme gerektiren yapılarda, mühendislik yazılımlarının gelişimiyle birlikte daha etkin bir şekilde kullanıldığı görülmektedir. Sonuç olarak, günümüzde modern sismik yönetmeliklerin büyük bir kısmında, zaman tanım alanında yapılan analizlerin önemi vurgulanmaktadır (Abrahamson, 1997; Ambraseys ve diğ., 2005).

Deprem dalgalarının, yapılara ulaşmadan önce zemin tabakaları içinde yayılması sırasında genlik, frekans ve süre parametrelerinde meydana gelen değişimler, yerel zemin etkileri olarak tanımlanmaktadır. 2018 TBDY'de, saha özelinde gerçekleştirilecek araştırma ve değerlendirmelerin gerekliliği vurgulanmakta olup, özellikle deprem etkisi altında yüksek yer değiştirmelerin öngörüldüğü sıvılaşabilir zeminlerde, yüksek plastisiteli ($PI > 50$) ve hassas killerde, organik madde içeriği yüksek zeminlerde, serbest zemin modelleri kullanılarak dinamik analizlerin yapılması gerektiği belirtilmiştir. Bu analizler sonucunda elde edilen zemin yüzeyindeki deprem hareketlerinin, yapı temelleri için gerçekleştirilecek kinematik etkileşim çalışmalarında kuvvetli yer hareketi girdisi olarak kullanılacağı ifade edilmiştir.

Yürütülen araştırmalar ve uluslararası sismik yönetmelikler, bu analizlerde kullanılan deprem hareketlerinin, modellerde dikkate alınan malzeme özellikleri ve tasarım kabulleri kadar sonuçlar üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir. Bu doğrultuda, deprem kayıtlarının seçimi ve ölçeklendirilmesi süreçlerinin, bu alanda teorik bilgiye sahip uzmanlar tarafından yönetilmesi gerektiği belirtilmiştir (TBDY, 2018).

Sahaya özel tepki analizlerinin gerçekleştirilmesinde, dinamik etkileri oluşturan deprem kayıtlarının seçimi ve analizlerde girdi hareketi olarak hazırlanması kritik aşamalardan biridir. Bu kayıtların temin edilebileceği kaynaklar üç temel kategoriye ayrılmaktadır:

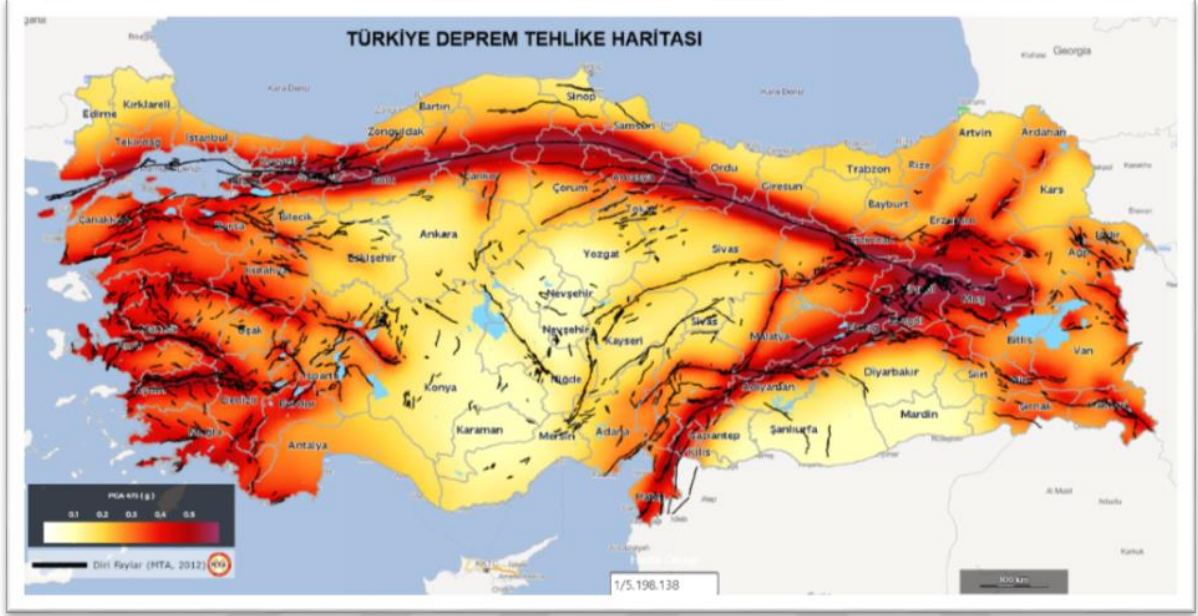
- i) Gerçek depremler sırasında kaydedilen yer hareketi verileri,
- ii) Abrahamson tarafından tasarım ivme spektrumuna uyum sağlayacak şekilde yapay olarak üretilen kayıtlar ve
- iii) Boore tarafından sismik kaynak ile dalga yayılım özellikleri fiziksel olarak modellenerek simüle edilen kayıtlar.

Teknolojik ilerlemelerle birlikte, deprem hareketlerinin izlenmesinin yaygınlaşması, kaydedilen veri miktarının giderek artması ve bunlara erişimin kolaylaşması, zaman tanım alanındaki analizlerde gerçek deprem kayıtlarının en yaygın kullanılan seçenek hâline gelmesine yol açmaktadır (Hutton ve Boore, 1987; Abrahamson, 1993; Campbell ve Bozorgnia, 2008).

2018 TBDY'ye göre, belirli bir bölgeye ait harita ivme spektrumu ve zemin sınıfına özgü tasarım ivme spektrumları belirlenebilmektedir. Yönetmelikte önerilen spektrumlar, geniş bir veri setinden elde edilen ve farklı sismik kaynakların etkisini aynı anda içeren istatistiksel analizlerin sonucunda oluşturulan elastik tasarım ivme spektrumlarıdır. Deprem kayıtlarının seçimi sırasında, olayın büyüklüğü, faylanma mekanizması, merkez üssüne olan mesafe ve zemin özellikleri gibi parametreler dikkate alınmaktadır. Seçilen deprem kayıtları ile elde edilen TSD doğrusal sistemlerin spektrumları, %5 sönüm oranına göre hesaplanmaktadır. Son aşamada, önerilen elastik tasarım ivme spektrumu ile ölçeklendirme yapılarak, spektrum ordinatlarının en az %90'ını sağlayan ve ilgili zemin sınıfına uygun en az 11 kayıt belirlenerek analizler gerçekleştirilmektedir (Aydınoğlu, 2003; Fahjan, 2006).

Türkiye deprem yönetmeliği çalışmaları kapsamında, geçmiş depremlerden elde edilen veriler ve bilimsel birikimler doğrultusunda Şekil 4.1'de verilen güncel Türkiye Deprem Tehlike Haritası oluşturulmuştur. Son olarak, 2018 yılında yürürlüğe giren ve yerel zemin

koşullarının etkisini daha fazla dikkate alan güncellenmiş yönetmelik yayımlanmıştır. 2019 itibarıyla yürürlükte olan TBDY (2018), önceki yönetmeliklere kıyasla sahaya özel yerel zemin sınıflarının belirlenmesine daha geniş yer vermekte; deprem yer hareketi spektrumlarının, yapının bulunduğu konum, fay uzaklığı ve zemin özellikleri doğrultusunda hesaplanmasını önermektedir.



Şekil 4.1. Türkiye Deprem Tehlike Haritası (AFAD, 2024)

Bu bölümde, dinamik analizlerde kullanılacak kuvvetli yer hareketinin seçimi ve ölçeklendirme sürecinde uygulanan yöntemler özetlenmiş; ayrıca, deprem kayıtlarının seçiminde dikkate alınması gereken hususlar ile TBDY (2018) hükümleri doğrultusunda sahaya özel davranış analizlerinin nasıl gerçekleştirileceğine dair temel bilgiler sunulmuştur.

4.2. Sismik Tasarımda Kullanılacak Depremlerin Seçimi

Geçmişten günümüze, mevcut yer hareketi kayıtlarının işlenmesi ve gelecekte tasarlanacak yapılarda kullanılabilecek verilerin üretilmesine yönelik önemli çalışmalar yürütülmüştür. Yapıların sismik tasarım sürecinde, kuvvetli yer hareketi kayıtlarının belirlenmesi amacıyla çeşitli alternatif seçim yöntemleri geliştirilmiştir. Deprem dalgaları, çok sayıda değişkenin etkisine bağlı olarak farklı özellikler sergileyen karmaşık süreçler içerdiğinden, bu kayıtların birebir yeniden üretilmesi son derece güç, hatta pratikte mümkün değildir. Bu nedenle, sürecin daha sistematik hâle getirilmesi amacıyla çeşitli deprem yönetmelikleri oluşturulmuş; böylece deprem kayıtlarının seçimi sırasında karşılaşılan belirsizliklerin ve zorlukların en aza indirilmesi hedeflenmiştir. Bu bölümde, dinamik

analizlerde kullanılacak uygun kayıt setlerinin belirlenmesine yönelik güncel yöntemler ele alınmaktadır.

Yapısal tasarım sürecinde, deprem yüklerinin belirlenmesi, ancak idealize edilmiş tepki spektrumları veya kaydedilen ivme zaman kayıtlarının dinamik yük olarak kullanıldığı doğrusal ya da doğrusal olmayan dinamik analizlerle mümkün olmaktadır. Dinamik analizde kullanılan girdi hareketinin, bölgesel sismisiteyi yansıtacak ve beklenen tasarım depremiyle uyumlu olacak şekilde seçilmesi kritik öneme sahiptir. Başka bir ifadeyle, analizlerde kullanılan gerçek deprem kayıtlarının, beklenen deprem tehlikesi analizleri doğrultusunda belirlenmesi gerekmektedir. Deprem tehlikesi kavramı, belirli bir bölgede ve zaman diliminde, can kaybı ve yapısal hasara yol açabilecek büyüklükte bir depremin meydana gelme olasılığını değerlendiren istatistiksel bir çalışma olarak tanımlanmaktadır (Erdik vd., 2006). Sismik tehlike analizleri ise belirlenen bir sahada kaydedilen önemli deprem verilerini, tekrarlama periyotları ve kaynak özellikleri açısından inceleyen iki temel yönteme ayrılmaktadır: deterministik (saptanabilir) ve olasılıksal (probabilistic) analizler (Gupta, 2002).

Deterministik sismik tehlike analizlerinde, incelenen sahaya en yakın noktada meydana gelebilecek en büyük kuvvetli yer hareketi özellikleri, bölgesel sismoloji verileri doğrultusunda belirlenmektedir. Bu süreçte, bölgedeki baskın sismik kaynakların fay mekanizmaları ve geçmiş deprem kayıtları dikkate alınarak tahminler yapılmaktadır.

Olasılıksal sismik tehlike analizlerinde ise farklı dönüşüm periyotlarına karşılık gelen spektral ivme değerleri, belirlenen deprem kayıt kümesi kullanılarak hesaplanmaktadır (Trifunac, 1989). Bu analiz yöntemi, jeolojik, tektonik, sismolojik ve tarihsel verileri sistematik bir şekilde inceleyerek şu adımları içermektedir: Deprem oluşum modellerinin analizi, sismik kaynak bölgelerinin belirlenmesi, depremlerin yinelenme ilişkilerinin değerlendirilmesi ve sismik dalga azalım ilişkilerinin kullanımı.

Türkiye ve çevresinde deprem tehlikesinin belirlenmesine yönelik çalışmalar, Birleşmiş Milletler Uluslararası Deprem Zararlarının Azaltılması Organizasyonu ve Global Deprem Tehlikesi Belirleme Programı kapsamında yürütülmüş olup, ayrıca Avrupa Birliği-Akdeniz Bölgesi Deprem Tehlikesi Belirleme Projesi çerçevesinde de araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda oluşturulan olasılıksal deprem tehlikesi haritaları, belirlenen tekrarlama periyotları için farklı aşılma olasılıklarında meydana gelebilecek en büyük yer ivmesi spektral eğrilerini, tanımlanan zemin koşulları çerçevesinde sunmaktadır. Söz konusu aşılma olasılıkları ve deprem tehlikesi parametreleri, TBDY (2018) kapsamında yer almakta

olup, uluslararası standartlarla uyumlu şekilde dünya genelinde kullanılan değerleri içermektedir (TBDY, 2018; Elghazouli ve Richard, 2011; Raoul vd., 2012).

4.3. Tektonik Yapı ve Kaynak Özellikleri

Bir bölgedeki aktif fayların deprem üretme potansiyeli ve bu fayların yapısal özellikleri, bölgenin sismik aktivitesini belirleyen temel unsurlar arasında yer almakta olup, kuvvetli yer hareketi kayıtları üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Kawaga vd. (2004) tarafından gerçekleştirilen çalışmalar, derin gömülü faylardan kaynaklanan depremlerin, yaklaşık 1.0 saniye periyodunda oluşturduğu yer hareketinin, yüzey kırılmalarından kaynaklanan depremlere kıyasla çok daha büyük olduğunu ortaya koymuştur.

Ayrıca, kaydedilen kuvvetli yer hareketleri ile tahmin edilen tepki spektrumları incelendiğinde, sığ yapıdaki Avrupa, Doğu Amerika, Japonya, Yeni Zelanda ve Tayvan gibi aktif sismik bölgelerde, diğer sığ deprem alanlarına kıyasla dalga yayılım hızının daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Amerika Birleşik Devletleri'nde yürütülen Yeni Nesil Azalım Modelleri Projesi (Next Generation Attenuation-NGA Models) kapsamında, aynı fay mekanizmasına sahip farklı noktalarda kaydedilen kuvvetli yer hareketlerinin önemli benzerlikler taşıdığı belirlenmiştir.

Deprem hareketlerinin tahminine yönelik geliştirilen eşitlikleri ayrıntılı bir şekilde inceleyen Stafford vd. (2008), NGA modellerinin Avrupa ve Orta Doğu'daki sismik tehlike analizlerinde uygulanabilir olduğunu vurgulamıştır. Aynı zamanda, Kuzey ve Batı Amerika'da geliştirilen yöntemin, benzer fay mekanizmalarına sahip bölgeler olan Avrupa ve Orta Doğu'da da kullanılabileceği ileri sürülmüştür (Stafford vd., 2008; Campbell ve Bozorgnia, 2008; Ancheta vd., 2014).

Depremin büyüklüğü (M) ile kırılma yüzeyinin incelenen sahaya uzaklığı (R -km) sismik hareketin temel parametreleri olup, deprem özelliklerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Deprem kayıtlarının seçimi sırasında, belirlenen yakınsama aralığında ($M \pm \Delta M$, $R \pm \Delta R$) kriterleri çerçevesinde seçim yapılmasına olanak tanıyan çeşitli yöntemler geliştirilmiş ve farklı araştırmacılar tarafından açık erişimli sistemlerde uygulanmıştır. Bu bağlamda, Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi (Pacific Earthquake Engineering Research Center-PEER) ve Kaliforniya Kuvvetli Yer Hareketi Belirleme Programı (California Strong Motion Instrumentation Program-CSMIP) gibi Amerika Birleşik Devletleri merkezli kuruluşlar, kayıtların sınıflandırılması ve seçilmesi sürecinde önemli veri havuzları sağlamaktadır. Ayrıca, İtalyan İvme Kayıtları Arşivi (Italian Accelerometric Archive-ITACA)

ve Japonya Kuvvetli Yer Hareketi Ağı (Strong-Motion Seismograph Networks-KiK-Net) gibi uluslararası platformlar da mevcut ivme-zaman kayıtlarını belirlenen kriterlere göre gruplandırma ve seçme imkânı sunmaktadır (CSMIP, 2018; PEER, 2019; ITACA, 2020; KiK-Net, 2020).

4.3.1. Yerel Zemin Özellikleri

Deprem kayıtlarının seçimi ve analizinde, incelenen sahadaki zemin sınıfı ve kuvvetli yer hareketi kaydedilen istasyonların yerel zemin özelliklerinin bilinmesi oldukça önemlidir. Yapılan çalışmalar, deprem hareketinin elastik kabul edilen ve zemin sınıflarının en rijit formunu oluşturan anakaya kaynaklı olarak başladığında, bu hareketin anakayanın özelliklerini koruyarak daha zayıf zemin tabakalarına doğru ilerlediğini ortaya koymaktadır.

Bu nedenle, deprem istasyonlarının kurulacağı yerlerde saha deneyleri ile zeminlerin kayma dalgası hızları ölçülerek, özellikle anakaya mostrasına yakın olan sahalar seçilmektedir. Bu yöntem, sahaya özel dinamik analizlerde kullanılacak kuvvetli yer hareketlerinin, kayıt alınan sahanın yerel özelliklerinden ayrıştırılmadan doğrudan kullanılması imkânı sağlar. Böylece, geri analiz (dekonvolüsyon) yapılmasına gerek kalmadan, bu yer hareketleri mostra kaydı (outcrop) olarak doğrudan değerlendirilip kullanılabilir.

4.3.2. Yerel Zemin Sınıfı ve Sınıflandırma Sistemleri

Yerel zemin sınıfının belirlenmesinde, üstteki 30 metre kalınlığındaki zemin tabakalarına ait kayma dalgası hızlarının $V_{s,30}$ harmonik ortalaması kullanılmaktadır. Bununla birlikte, daha derin zemin tabakalarının da saha davranışına etkisi olduğu bilinmektedir (Zhao ve Xu, 2013). Bu bağlamda, farklı yönetmeliklerde alternatif zemin sınıflandırma sistemleri tanımlanarak uygulanmaktadır.

Örneğin, ABD Jeolojik Araştırmalar birimi (United States Geological Survey-USGS), yüksek binaların tasarımında zeminleri S_1 kaya, S_2 sert ve S_3 yumuşak zeminler olarak sınıflandırmaktadır. Eurocode 8, NHERP ve Türkiye'deki TBDY 2018 gibi yönetmelikler de zemin sınıflandırmasını $V_{s,30}$ özelliklerine göre yapmaktadır. Bu sınıflandırmaya dayanarak, deprem hareketlerinin seçimi ya da doğrudan sahanın yerel zemin sınıfına göre elastik tasarım spektrumu belirlenmekte ve sahaya özel tepki analizleri yapılmaksızın spektral ivmelerle hesaplamalar yapılmaktadır. Böylece, bölgesel sismik kaynaklardan beklenen genlik ve periyotlara uyumlu kuvvetli yer hareketlerinden oluşan bir ivme-zaman seti seçilerek, analizler gerçekleştirilir (Elghazouli ve Richard, 2011; NHERP, 2015; TBDY, 2018; USGS, 2020).

4.3.3. Kuvvetli Yer Hareketinin Süresi ve İvme-Hız Oranı (a/v)

Kuvvetli yer hareketinin süresi, kaynaktan meydana gelen kırılmanın özelliği ve hareketin izlediği yolun jeolojik yapısı tarafından etkilenmektedir. Ayrıca, deprem hareketiyle açığa çıkan enerjinin ve yapı elemanlarında oluşan deformasyonların, hareket süresine bağlı olarak değiştiği bilinmektedir. Bu nedenle, depremde meydana gelen en büyük yer ivmesi ve hareketin periyodu kadar, kuvvetli yer hareketinin süresi de büyük önem taşımaktadır.

Iervolino vd. (2006), kısa, orta ve uzun süreli deprem kayıtlarından oluşan gruplarla yapılan tek serbestlik dereceli NL analizlerle deprem süresi etkilerini araştırmışlardır. Hancock ve Bommer (2006) ise farklı rijitlikteki sistemlerde yapılan tepki analizlerinde yer değiştirmelerin deprem hareketinin çevrim sayısına karşı hassasiyetini incelemişlerdir. Tektonik yapı ve yerel zemin özellikleri dikkate alınarak yapılan yer hareketi seçimlerinde, kaydedilen en büyük ivme değerinin en büyük hıza oranı (a/v) da seçim aşamasında tamamlayıcı bir unsur olarak kullanılabilir. Tso vd. (1992), ivme-hız oranının deprem büyüklüğü, kaynak uzaklığı ve frekans içeriğiyle doğrudan ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. Sonuç olarak, ivme kayıtlarının seçiminde düşük ($a/v < 0.80$ g/m/s), orta ($0.80 < a/v < 1.20$ g/m/s) ve yüksek ($a/v > 1.20$ g/m/s) olarak gruplandırmanın, umulan üst sınır değerlerini kapsayan yeterli sayıda yer hareketinin elde edilmesine olanak sağladığı vurgulanmıştır. Depremlerin seçimiyle ilgili kesin sınırlar olmamakla birlikte, a/v değerlerine göre yapılan seçimlerin, en büyük sismik etkiyi oluşturacak depremi kapsama olasılığının yüksek olması, bu yöntemi öne çıkarmaktadır.

4.4. Kuvvetli Yer Hareketi Kaydı Kaynakları

Deprem kayıtları, üretilen yapay kayıtlar, benzeştirilmiş kayıtlar ve gerçek deprem kayıtları olarak üç grupta değerlendirilmektedir (NHERP, 2015). Bu bölümde kuvvetli yer hareketi kaynakları açıklanmış, deprem hareketlerinin belirlenmesinde yapay ve gerçek kayıtların kullanım koşulları ele alınmıştır.

4.4.1. Yapay Deprem Kayıtları

Belirli periyod aralıklarında, tepki spektrumu elastik tasarım spektrumuna benzer yapay kayıtlar oluşturulabilir. Bu yöntem, sadeleştirilmiş tepki spektrumundan güç spektral yoğunluk fonksiyonunu çıkararak, rastgele faz açılarıyla birleştirir ve bu şekilde sinüzoidal hareket verisi elde edilir. Bütün sinüzoidal hareketler toplanır ve yapay kayıt elde edilir. Tasarım spektrumuyla eşleşmeyi iyileştirmek için iteratif bir yöntem kullanılır. Bu yöntemde, seçilen frekanslar için gerçek tepki spektrumu ile hedef tasarım spektrumunun ordinatları arasındaki

ölçekleme oranı hesaplanır. Bu oran, güç spektral yoğunluk fonksiyonu ile çarpılarak düzeltilir ve sonrasında yeni hareket kaydına ulaşılır.

Abrahamson tarafından yapay yollarla tasarım ivme spektrumuna uyumlu olarak RSPMATCH programı ile oluşturulan kayıtlar bu türdendir (Abrahamson, 1993; Chen ve Scawthorn, 2003). Hedef tasarım spektrumuna uyumlu yapay kayıtların oluşturulmasında, tepki spektrumu ve hareket süresi gibi ek verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu süreçte en büyük zorluk, çok sayıda kaydedilmiş hareketin ortalamasını temsil eden tek bir kayıt elde etmektir. Tasarım spektrumu, farklı sismik kaynaklardan elde edilen depremlerle yapılan istatistiksel analizlere dayandığı için, çeşitli periyotlar için belirlenen spektral ivme değerleri farklı deprem kaynaklarından türetilmiş olabilir. (Bommer vd., 2000).

4.4.2. Benzeştirilmiş Deprem Kayıtları

Yer hareketlerini deterministik yöntemler kullanarak belirleme sürecine dayanan, basit ancak etkili bir yaklaşımdır. Bu yöntem, yer hareketinin genliğinin deprem büyüklüğü ve kaynağa olan uzaklıkla bağlantılı olarak, deprem süresi boyunca değişen rastgele bir faz spektrumu aracılığıyla hesaplanabileceği varsayımına dayanır. Benzeştirme süreci, fay yüzeyindeki her bir noktanın yer hareketine etkisini Green Fonksiyonu yardımıyla yapılan integrasyonla belirler. Bu şekilde yer hareketlerini tahmin etme yöntemi, "stokastik yöntem" olarak bilinir ve kuvvetli yer hareketi kaydı bulunmayan bölgelerde sıkça kullanılmaktadır. Yöntemin en temel özelliği, yer hareketlerini etkileyen çeşitli faktörleri (kaynak, yol, zemin) bilinen fonksiyonel formlar aracılığıyla yer hareketlerini tahmin edilebilir hale getirmesidir. Boore tarafından oluşturulan SMSIM yazılımı, kaynak ve dalga yayılımı karakteristiklerinin fiziksel olarak simüle edilmiş kayıtlarını sağlamaktadır. Bu yöntemde karşılaşılan en büyük zorluk, doğru kaynak, yayılma ortamı ve zemin özelliklerinin tanımlanmasıdır. (Boore, 2005).

4.4.3. Gerçek Depremlerden Elde Edilen Yer Hareketi Kayıtları

Bu kayıtlar sahanın depremselliğine uygun olup, sismolojik yapıdan kaynaklanan tüm etkileri içeren verilerdir. Bu nedenle, bir sahada yapılacak tepki analizlerinde öncelikle o bölgede daha önce alınmış verilere ulaşılmalı, eğer kuvvetli yer hareketi kaydı bulunamıyorsa, benzer tektonik yapıya sahip alanlardan elde edilen gerçek kayıtlara başvurulmalıdır. Tepki analizlerinin sonuçları, kullanılan kuvvetli yer hareketi kayıtlarına önemli ölçüde bağlıdır. Ayrıca, deprem hareketini oluşturan karmaşık fay ve zemin özelliklerinin enerjii nasıl etkilediği, yapay kayıtlarda bu özellikleri oluşturma zorluğunu göz önünde bulundurulduğunda, gerçek kayıtların önemi artmaktadır. Deprem istasyonlarının sayısının gün

geçtikçe artmasıyla, daha fazla gerçek deprem ivme kaydından seçim yapılabilir; ancak sahaya uygun bir kayıt bulunamadığı durumlarda, diğer yöntemlere başvurulmaktadır (Bommer ve Acevedo, 2004).

4.5. Kuvvetli Yer Hareketlerinin Seçimi

Dinamik analizlerde kullanılacak deprem ivme kayıtlarının seçimi, analiz sonuçlarını doğrudan etkilemektedir. Bir bölgede depreme dayanıklı yapı tasarımı yapılırken, yer hareketinin süre, genlik ve frekans içeriği, bölgenin depremselliğiyle uyumlu olmalıdır. Başka bir deyişle, bölgede etkili olan faylardan kaynaklanacak kuvvetli yer hareketlerinin yaratacağı deprem yükleri, hesaplamalara dahil edilmelidir. Bu nedenle, deprem hareketlerinin seçimi büyük bir öneme sahiptir.

4.6. Yönetmelik Hükümleriyle Tasarım Spektrumlarının Belirlenmesi

Bina tasarımında deprem etkilerini hesaplarken, %5 sönüm oranında elde edilen spektral grafikler, yapının doğal periyotlarıyla ilişkilendirilerek kullanılmaktadır. Çalışılan bölgenin depremselliği ve yerel zemin sınıflarına göre belirlenen düşey ve yatay elastik spektrumlar, deprem tehlikesi haritalarında gösterilmektedir. TBDY 2018 ile oluşturulan Türkiye Deprem Tehlikesi Haritalarında, dört farklı deprem yer hareketi düzeyi için sahaya özel hedef spektrumlar belirlenmiştir. Bu düzeyler, DD-1, DD-2, DD-3, ve DD-4 olarak tanımlanır. Spektral büyüklükler, 50 yıllık aşılma olasılıklarına göre sırasıyla %2, %10, %50 ve %68 olan ve karşılık gelen tekrarlama periyotları, 2475, 475, 72, 43 yıl olarak hesaplanmıştır. DD-2 Deprem Yer Hareketi, "standart tasarım deprem yer hareketi" olarak da adlandırılmaktadır. TBDY, deprem tasarım spektrumlarının belirlenmesinde esas alınacak yerel zemin sınıflarını, yönetmeliğin 16. başlığında, yüzeyden 30 m derinliğe kadar ortalama kayma dalgası hızı $(V_s)_{30}$, ortalama SPT darbe sayısı $(N_{60})_{30}$ ve ortalama drenajsız kayma mukavemeti $(c_u)_{30}$ ile hesaplanmasını önermektedir (4.1). Tablo 4.1'de ise yerel zemin sınıfları yer almaktadır.

$$(V_s)_{30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{h_i}{V_{s,i}} \right)}; \quad (N_{60})_{30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{h_i}{N_{60,i}} \right)}; \quad (c_u)_{30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{h_i}{c_{u,i}} \right)} \quad (4.1)$$

Burada, N zemin kesitindeki alt tabaka sayısını, h ise alt tabakaların kalınlıklarını temsil etmektedir. Yönetmelik doğrultusunda, deprem yer hareketi spektrumları, belirli bir deprem yer hareketi seviyesi için zemin koşulları göz önünde bulundurularak, %5 sönüm oranıyla hesaplanır. Bu hesaplamalar, harita üzerindeki spektral ivme katsayıları, faya yakınlık katsayısı ve yerel zemin etki katsayıları kullanılarak, standart prosedürlerle ya da sahaya özel deprem risk analizleriyle belirlenir.

Tablo 4.1. Yerel zemin sınıfları (TBDY, 2018).

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

Deprem Tehlike Haritaları, dört farklı deprem yer hareketi düzeyine göre Spektral İvme Haritaları şeklinde düzenlenmiştir. Bu harita, kısa periyot bölgesi için S_s ve 1.0 saniye periyot için S₁ değerlerini içermektedir. Harita spektral ivme katsayıları, yatay doğrultularda deprem etkilerinin geometrik ortalamasını yansıtır ve referans zemin koşulu V_{s,30}=760m/s kabul edilerek %5 sönüm oranı ile sunulmuştur. Sonrasında, S_s ve S₁ katsayıları, faya yakınlık katsayısı (γ_F), yerel zemin etki katsayıları (F_s ve F₁) ile çarpılarak, tasarım spektral ivme katsayıları S_{DS} ve S_{D1} değerlerine dönüştürülmektedir (4.2 ve 4.3).

$$S_{DS} = S_s F_s \quad (4.2)$$

$$S_{D1} = S_1 \gamma_1 F_1 \quad (4.3)$$

4.6.1. Sahaya Özel Dinamik Analizlerle Tasarım Spektrumlarının Hesaplanması

Sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zemin sınıflarında, özellikle ZF sınıfı olarak tanımlanan (depreme bağlı olarak çökme ve potansiyel göçme riski taşıyan, sıvılaştırılabilir zeminler, yüksek plastisiteli killeri, organik içeriği yüksek zeminler gibi) yapılacaktır.

Zemin davranış analizleri, saha araştırmalarıyla belirlenen zemin özelliklerine dayanarak, yatay tabakalı “serbest zemin modeli” kurularak gerçekleştirilecektir. Deprem yer hareketi, taban kayasında tanımlanan zemin için EL ya da NL, frekans ya da zaman tanım alanında yapılan analizlerle yüzeye taşınacaktır. EL analizler pratikte daha yaygın olsa da NL

zaman tanım alanındaki analizlerde, zemin gerilme-şekil değiştirme davranışı tekrarlı yüklemelerle her bir nokta ve zaman adımı için şekil değiştirme değerine karşılık gelen kayma modülü kullanılarak hesaplanır. Serbest zemin modellerinde, analizlerde kullanılacak maksimum kayma modülü G_{maks} aşağıda verilen denklemle (4.4) hesaplanacaktır.

$$G_{maks} = \rho V_s^2 \quad (4.4)$$

Burada, V_s kayma dalgası hızının jeofizik yöntemlerle yerinde ölçülmesinin uygun olduğu belirtilmiş, büyük deformasyonlu saha deneyleri ile birlikte SPT, koni penetrasyon deneyi (CPT) ve küçük deformasyonlu sismik kırılma ve yansıma deneyleriyle hesaplanabileceği vurgulanmıştır. Deprem dalgalarının zemin kesitinde yayılması esnasında oluşan kayma birim şekil değiştirmesi ile uyumlu kayma modülü ve histeretik sönüm değerlerinin belirlenmesinde, kabul görmüş bağıntılar ya da laboratuvar deneyleriyle elde edilen eğriler kullanılabileceği ifade edilmiştir.

4.6.2. Sahaya Özel Analizler İçin Hedef Spektruma Uygun Depremlerin Seçilmesi Süreci

Yeni deprem yönetmeliğinin ikinci kısmında, yer hareketlerinin seçimi ve ölçeklendirilmesi için belirlenen kurallar detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Zaman tanım alanında yapılan analizlerde kullanılacak deprem kayıtları, tasarım düzeyiyle uyumlu olacak şekilde deprem büyüklüğü, fay uzaklığı, kaynak mekanizmaları ve yerel zemin koşulları göz önünde bulundurularak seçilmelidir. Eğer geçmişte alınmış uygun deprem kayıtları varsa, bunlar öncelikli olarak kullanılacaktır. Yeterli sayıda ve özellikte deprem kaydı bulunmadığında, benzeştirilmiş yer hareketi kayıtları kullanılabilir, ancak bu durumda bölgenin sismik özellikleri dikkate alınarak yapılan benzeştirme işlemi sahada kaydedilen gerçek verilerle doğrulanmalıdır.

Bir, iki veya üç boyutlu analizlerde kullanılacak deprem kayıtlarının sayısı en az 11 olacaktır. Ancak, aynı depremden seçilecek kayıt ya da kayıt takımı sayısı üçü geçmeyecektir. Bir veya iki boyutlu hesaplar için seçilen tüm kayıtlara ait spektrumların ortalamasının, bina doğal titreşim periyodu (T_p) olan $0.2T_p$ ile $1.5T_p$ arasındaki genliklerinin, tasarım spektrumunun aynı periyod aralığındaki genliklerinden küçük olmaması gerektiği kuralına göre, deprem yer hareketlerinin genlikleri ölçeklendirilecektir.

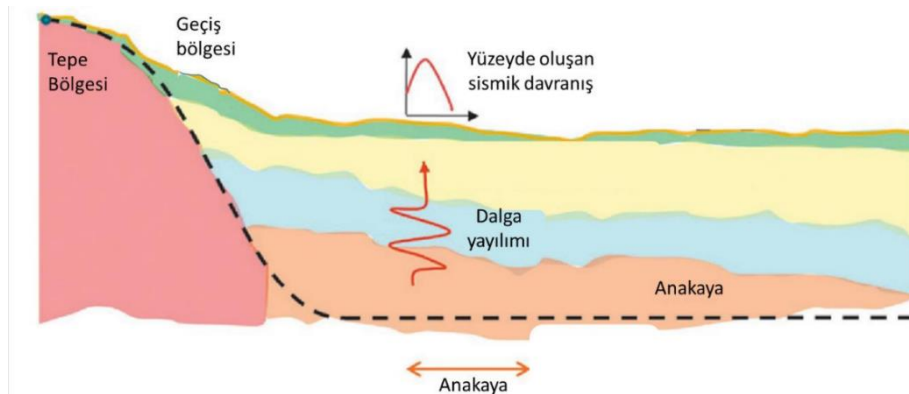
Üç boyutlu hesaplamalar için, her deprem kaydı takımının yatay bileşenlerinin spektrumlarının karelerinin toplamının karekökü alınarak bileşke yatay spektrum hesaplanır. Seçilen tüm kayıtlara ait bileşke spektrumlarının ortalamasının, $0.2T_p$ ile $1.5T_p$ periyotları

arasındaki genliklerinin, tasarım spektrumunun aynı periyot aralığındaki genliklerine oranının 1.3'ten küçük olmaması gerektiği kuralına göre, deprem yer hareketi bileşenlerinin genlikleri ölçeklendirilecektir. Yatay bileşenler, aynı ölçek katsayılarıyla ölçeklendirilecektir. Ayrıca, sismik yalıtımlı binalar için bu periyot aralığının farklı olabileceği de göz önünde bulundurulmalıdır. Yönetmeliğin on altıncı bölümünde, serbest zemin analizlerinde kullanılacak deprem kayıtlarının veya kayıt takımlarının yukarıda belirtilen kurallara göre ölçeklendirileceği ve incelenen periyot aralığının bina hâkim doğal titreşim periyodunun üst sınırının $2T_p$ olarak kabul edileceği ifade edilmiştir (TBDY, 2018).

Sahaya özel NL analizlerde kullanılacak deprem kayıtları, olasılıksal deprem tehlike analizleri ile TBDY 2018'de belirlenen 475 yıllık tekrarlama periyodunda oluşabilecek en büyük deprem için hesaplanan yer ivmesi değerlerine dayanmaktadır. Bu analizlerde, fay türü, merkez uzaklığı ve zemin özellikleri dikkate alınarak, 760 m/s kayma dalgası hızına sahip referans zemin tabakası için hesaplanan harita spektral ivmeleri yerel zemin etkisi ile güncellenerek elastik tasarım spektrumlarına dönüştürülür.

4.7. Zemin Büyütmesi ve Etkileyen Faktörler

Sahaya özel analizlerde, deprem ivme kayıtlarındaki genlik değişimleri incelenir ve yerel zemin koşullarına dayalı zemin büyütme analizleri yapılır. Sismik hareketler, yerel zemin özelliklerinden etkilenecek yüzeye ulaşırken, zemin türü ve dinamik özelliklerine bağlı olarak sönümlenir ya da büyür. Deprem dalgalarındaki genlik artışı, zemin büyütmesi olarak tanımlanır. (Şekil 4.2) (Ansal vd., 2011; Kaptan ve Tezcan, 2012; Horri ve Mousavi, 2019).



Şekil 4.2. Anakayadan yüzeye doğru deprem ivme kaydındaki değişim (Garcia vd. 2013'den düzenlenmiştir.)

Deprem dalgaları, tabakalar boyunca anakayadan yüzeye doğru geçerken, geçtikleri farklı tabakalarda zeminin özelliklerine göre yansıma ve kırılmalara uğrarlar. Yeryüzüne ulaşan dalgalar geldikleri açılara ve geçtikleri her bir katmanın özelliklerine göre değişkenlik gösterir.

Tabakalar arasında oluşan empedans farkları, ivme genliklerinde değişimlere yol açar. Daha sert tabakadan daha yumuşak tabakaya geçerken, deprem dalgalarının genliği artar. Deprem sırasında ortaya çıkan, zemin tabakalarındaki düşey S dalgalarının sismik empedansı (z), yoğunluk (ρ) ve dalga hızının (V_s) çarpımıyla hesaplanır.

$$z = \rho V_s \quad (4.5)$$

Tabakalardan yer yüzeyine doğru yaklaştıkça, zeminlerin sahip olduğu yoğunluk ve dalga hızları azalır (Yalçinkaya, 2004). Enerjinin korunumu prensibi dikkate alındığında yüzeye doğru yayılan sismik enerji şu şekilde ifade edilir:

$$E = \frac{1}{2} (\rho V_s) u(t) \quad (4.6)$$

Enerji, yeryüzüne yaklaşan deprem dalgalarının taşıdığı enerji, azalan yoğunluk (ρ) ve kayma dalgası hızı (V_s) nedeniyle empedansın düşmesine yol açar. Enerjinin korunumu gereği, $u(t)$ kadar danecik hızının artması beklenir (Kramer, 1996).

Deprem dalgalarının taşıdığı enerji, basit harmonik dalga olarak incelendiğinde, enerji (E) şu şekilde ifade edilir:

$$E = A^2 \omega^2 \rho V / 2 \quad (4.7)$$

Enerjiyi oluşturan dalga genliği (A), açısal frekans (ω), yoğunluk (ρ) ve ortamın dalga hızı (V) ile belirlenir (Stein ve Wysession, 2003; Yalçinkaya, 2010). Bu enerjinin yüzeye doğru hareketinde yaşanacak büyütme miktarı ise (B) ile ifade edilir:

$$B = \frac{1}{(1/\alpha) + (\pi/2)\xi} \quad (4.8)$$

Zemin büyütmesi, empedans oranı (α) ve sönüm oranı (ξ) değerlerine bağlı olarak değişir. Empedans oranının artması zemin büyütmesini artırırken, sönüm oranının artması ise zemin büyütmesini azaltır. Bu iki parametreyi açıklamak gerekirse:

$$\alpha = \frac{\rho_r V_r}{\rho_s V_s}, \quad \xi = \frac{\eta \omega}{2G} \quad (4.9)$$

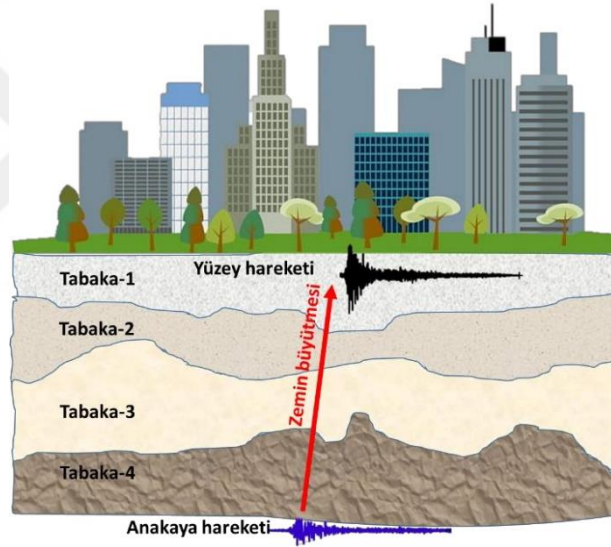
Zemin büyütmesi, deprem dalgalarının frekans içeriğine bağlı olarak farklı tepkiler göstermektedir. Yumuşak zemin tabakalarında, belirli frekanslarda daha fazla büyütme yaşanırken, diğer frekanslarda daha az büyütme meydana gelir. Empedans oranı ve sönüm oranı büyütme miktarını belirlerken, frekans içeriği de zemin tabakasının kalınlığı ve sismik dalga hızıyla ilişkilidir. Bu ilişki şu şekilde ifade edilir:

$$f_0 = \frac{V_s}{4H} \quad \text{veya} \quad T_0 = \frac{4H}{V_s} \quad (4.10)$$

Burada, f_0 ve T_0 , büyütmenin maksimum olduğu frekans seviyesini ve periyodunu, H ise yumuşak zemin tabakasının kalınlığını ve V_s ise zeminin kayma dalgası hızını temsil eder. Büyütmenin maksimum seviyede olduğu periyot, zeminin hâkim periyodu olarak kabul edilir.

4.8. Zemin Davranış Analizleri

Zeminlerin dinamik yükler altında anakayadan başlayarak yüzeye doğru olan hareketi, 1 boyutlu, 2 boyutlu ve 3 boyutlu analizler ile incelenmektedir. Bu analizlerde, zemin davranışı EL ve NL yöntemlerle ele alınmaktadır. EL analizlerde, zemin tabakalarının yatay yönde ve sonsuz olduğu ve dinamik parametrelerinin ise sabit kabul edildiği varsayılmaktadır. Öte yandan, NL analizlerde ise zemin tabakalarındaki dinamik parametrelerin her tabaka için değiştiği kabul edilmektedir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Dinamik harekete zemin tabakalarının etkisi (Güler, 2021)

4.8.1. Bir Boyutlu Eşdeğer Doğrusal Yaklaşım

Zemin davranışına ilişkin analizlerde sıklıkla başvuru yapılan yöntemlerden biri, frekans tanım alanında gerçekleştirilen ve transfer fonksiyonlarına dayanan yaklaşımdır. Bu fonksiyonlar, anakaya seviyesinde kaydedilen deprem hareketinin yer değiştirme, hız, ivme, kayma gerilmesi ve kayma şekil değiştirmesi gibi çeşitli parametrelerini üst yüzeydeki etkilerine dönüştürmek amacıyla kullanılmaktadır. Anakaya düzeyindeki yer hareketinin zamana bağlı değişimi Fourier serisi aracılığıyla temsil edilir ve her bir frekans bileşeni, ilgili transfer fonksiyonu ile çarpılarak yüzey hareketinin sahip olduğu Fourier bileşenleri elde edilir. Sonrasında bu seri ters Fourier dönüşümü ile zamana bağlı yüzey hareketine dönüştürülür. Bu

bağlamda transfer fonksiyonu, belirli bir frekansa sahip yer hareketi bileşeninin zemin profilince ne oranda büyütüldüğünü veya sönümlendiğini belirlemektedir (Kramer, 1996).

4.8.1.1. Bir Transfer Fonksiyonun Değerlendirilmesi

EL analiz yönteminde, zemin katmanlarının her biri için sabit kabul edilen kayma modülü ve sönüm oranı esas alınmaktadır. Bu yaklaşım çerçevesinde, yer hareketinin farklı zemin profilleri üzerindeki etkilerini değerlendirmede transfer fonksiyonları belirleyici rol oynamaktadır. Karmaşık matematiksel modellere ihtiyaç duyulmadan, farklı tabaka yapılarına sahip zeminlerin deprem yüklerine verdikleri tepkiler bu fonksiyonlar aracılığıyla etkin bir biçimde analiz edilebilmektedir. Çeşitli tabakalanma senaryoları için kullanılan transfer fonksiyonları, Kramer (1996) çalışmasından uyarlanarak Tablo 4.2’de sunulmuştur.

Zemin profiline özgü transfer fonksiyonları, zemin tabakalarının kalınlığı, sismik dalga hızı ve birim hacim ağırlığı gibi parametrelere bağlı olarak şekillenmektedir. Tek tabakalı sistemlerde, bu fonksiyonlar çoğunlukla basit harmonik çözümlemelerle ifade edilirken, çok tabakalı sistemlerde çözüm daha karmaşık hale gelmektedir. Transfer fonksiyonları aracılığıyla elde edilen spektral oranlar, zeminin belirli frekanslardaki büyütme potansiyelini ortaya koyar ve bu oranlar, mühendislik uygulamalarında yapıların doğal frekanslarıyla karşılaştırılarak rezonans riskinin belirlenmesinde kritik öneme sahiptir. Ayrıca, transfer fonksiyonu analizleri, yapı-zemin etkileşimini hesaba katan performans bazlı tasarım yaklaşımlarında da rehberlik etmektedir. Bu sayede, zemin büyütme etkilerinin sayısal olarak değerlendirilmesi ve deprem etkilerine karşı daha güvenli yapı tasarımı mümkün hale gelmektedir.

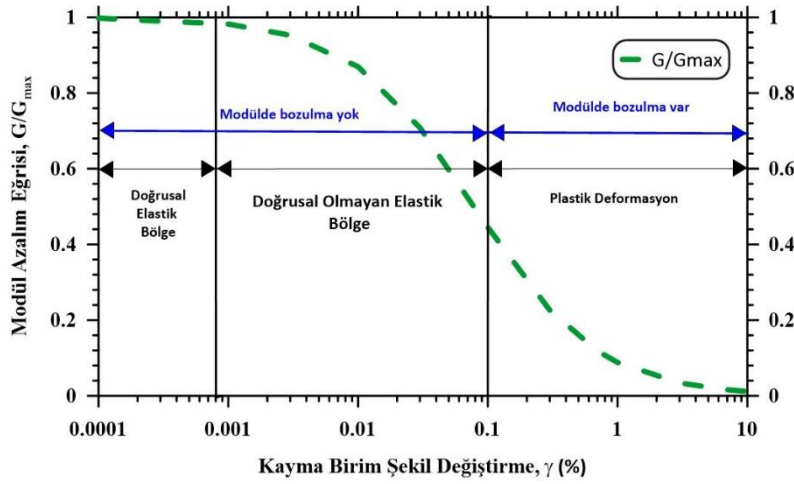
Tablo 4.2. Tabakalanma koşullarına bağlı olarak önerilen transfer fonksiyonlar

Jeolojik Koşul	Transfer Fonksiyonu
Rijit kaya üzerinde üniform, izotrop, doğrusal elastik, sönümsüz zemin	$F_{1\omega} = \frac{u_{max}(0, t)}{u_{max}(H, t)} = \frac{1}{\cos(\omega H/V_s)}$
Rijit kaya üzerinde üniform sönümlü zemin	$F_{2\omega} = \frac{1}{\cos(\omega H/V_s(1 + i\xi))}$
Elastik kaya üzerinde üniform sönümlü zemin	$F_{3\omega} = \frac{1}{\cos(\omega H/V_{ss*}) + iaz \cdot \sin(\omega H/V_{ss*})}$
Elastik kaya üzerinde katmanlı sönümlü zemin	$F_{ij\omega} = \left \frac{u_i}{u_j} \right \frac{a_i(\omega) + b_i(\omega)}{a_j(\omega) + b_j(\omega)}$

ω : zeminin frekansı, u_{max} : yatay yer değiştirme bağıntısı V_s : kayma dalgası hızı, H : zemin tabakasının kalınlığı, ξ : zeminin sönümü, V_{ss*} : zeminin kompleks kayma dalgası hızı

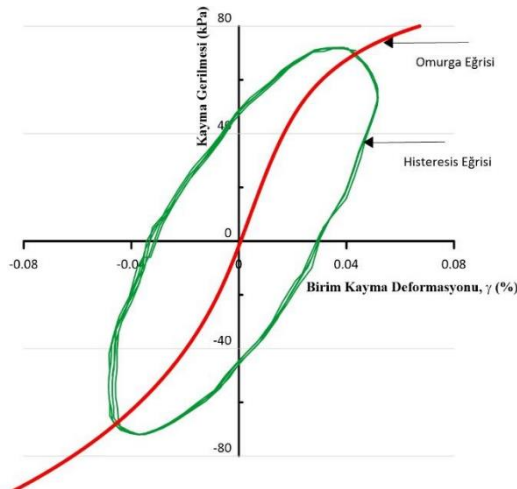
4.8.2. Bir Boyutlu Doğrusal Olmayan Yaklaşım

Zeminlerin farklı deformasyon seviyelerine karşı sergilemiş oldukları davranış, kullanılan analiz yöntemlerini etkilemektedir. Şekil 4.4'te gösterildiği gibi, “doğrusal elastik bölge” 10^{-3} birim deformasyon seviyelerinden daha düşük seviyelerde yer alırken, “doğrusal olmayan elastik bölge” 10^{-3} ile 10^{-1} arasındaki deformasyon aralığında ortaya çıkmaktadır. Daha yüksek deformasyon seviyelerinde ise plastik deformasyonlar meydana gelmektedir.



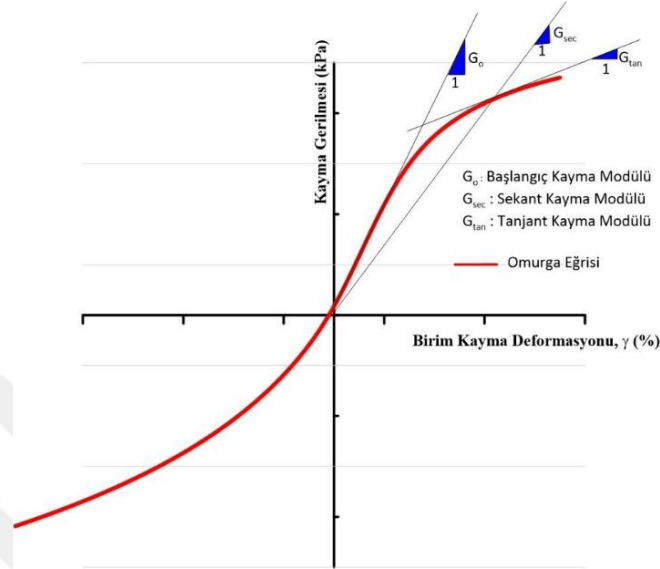
Şekil 4.4. Doğrusal ve doğrusal olmayan zeminin elastik ve plastik davranış bölgeleri (Güler, 2021)

Dinamik etkiler altında zemine uygulanan tekrarlayan yüklemeler, zeminin davranışında doğrusal olmayan değişimlere neden olmaktadır. Şekil 4.5'te sunulan Güler (2021) çalışmasında, elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrisine ait histerisiz döngüsü üzerinden, kayma modülü ile sönüm oranı değerleri hesaplanmıştır. Bu parametreler, doğrusal elastik yaklaşımla elde edilen değerlere kıyasla daha temsil edici sonuçlar sunarak, zemin davranışının gerçekçi bir şekilde modellenmesine katkı sağlamaktadır.



Şekil 4.5. Örnek histerisiz eğrisi (Güler, 2021)

Doğrusal olmayan yaklaşım modelinde analizlerde, tanjant kayma modülü (G_{tan}) kullanılırken, doğrusal yaklaşım analizlerinde sekant kayma modülü (G_{sec}) kullanılmaktadır. Histerisis eğrisinden elde edilen iskelet eğrisi ve başlangıç kayma modülü (G_o), G_{tan} ve G_{sec} değerleri, omurga eğrisinde Şekil 4.6'da olduğu gibi belirlenmektedir.



Şekil 4.6. Omurga eğrisinden elde edilen kayma modülleri (Güler, 2021)

NL yaklaşımda, her bir eğimden elde edilen değerler ile kayma modülü-birim şekil değiştirme eğrisi oluşturulmaktadır. Bu durum, NL elastik bölgenin doğru bir şekilde yansıtılması açısından önemli bir faktördür. EL ve NL yöntemler, farklı araştırmacılar tarafından incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalara göre:

EL analizlerde, karakteristik doğrusallık nedeniyle yanıltıcı rezonanslar ve yüksek büyütme değerleri ortaya çıkabilir.

EL analizlerde, efektif kayma birim deformasyonunun kullanılması, yüksek birim deformasyonlarda fazla kayma modülü ve sönüm değerlerinin kullanılmasına yol açmaktadır.

NL analizlerde, aşırı boşluk suyu basıncının oluşumu, dağılması ve sönümlenmesi formüle edilebilirken, EL modellerde bu durum hesaplanamaz.

NL analizlerde, sahayı daha doğru yansıtan kayma modülü-birim deformasyon ve sönümleme eğrilerinin kullanılması gereklidir.

EL ve NL yaklaşımların kullanımı, zeminlerin birim deformasyon seviyelerine bağlıdır.

Her iki yaklaşımda da zemin koşulları, yapılan varsayımlar ve zeminlerdeki belirsizliklere göre değişiklikler olabilir. Bu nedenle, deformasyon seviyesi belirsiz

durumlarda, herhangi bir modelin diğlerinden daha güçlü veya kesin olduğı söylenemez (Joyner ve Chen, 1975; Dikmen ve Ghaboussi, 1984; Kramer, 1996).

Zemin davranış analizinde, kullanılacak yöntemin belirlenmesinde zemin özellikleri ile anakaya deprem hareketinin karakteristikleri belirleyici olmaktadır. Tekrarlı gerilme seviyelerinin düşük olduğı koşullarda EL analiz daha uygun bir yaklaşım sunarken, yüksek gerilme seviyelerinde NL analizler daha güvenilir sonuçlar üretmektedir (Pruiksma, 2016; Carlton ve Tokimatsu, 2016; Selçuk vd., 2007). Bu durum, zeminlerin düşük gerilme altında elastik, yüksek gerilme seviyelerinde ise elasto-plastik veya plastik özellikler göstermesiyle açıklanmaktadır (Akdoğan, 2019). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğı (TBDY 2018), ZF sınıfına giren zeminler için, elasto-plastik ve plastik davranış olasılığının yüksek olması nedeniyle, bir boyutlu NL analizlerin uygulanmasını zorunlu kılmaktadır.

5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Dinamik etkiler nedeniyle oluşabilecek stabilite, taşıma kapasitesi ve deformasyon gibi sorunlara karşı etkili ve ekonomik çözümler üretebilmek için, zemin davranışının dinamik koşullar altında ayrıntılı bir şekilde araştırılması ve anlaşılması önemlidir. Zeminlerin dinamik özelliklerinin belirlenmesi deprem bölgelerinde gerçekleştirilecek tasarımlar açısından büyük bir öneme sahiptir. Bu doğrultuda, araştırmacılar için zeminlerin dinamik parametreleri, bu parametrelerin hesaplanma yöntemleri ve laboratuvar çalışmaları, aynı zamanda deprem ivmelerinin bölgedeki davranışlarının analiz edilmesi, önemli çalışma alanları olmuştur. Dünya genelinde, 1950 yılından itibaren, ülkemizde ise 2000 yılı itibari ile bu alanda yapılan araştırmalar artış göstermiştir. Bu bölümde, bu konuda gerçekleştirilen çalışmalar ve elde edilen bulgular iki başlık altında özetlenecektir. Bunlar; laboratuvar çalışmaları ve zemin büyütme analizleri üzerine yapılan çalışmalardır.

Zeminlerin dinamik parametrelerinin deneysel olarak belirlenmesinde, farklı deformasyon seviyelerine bağlı olarak çeşitli dinamik deneyler uygulanmaktadır. Bu doğrultuda, araştırmacılar tarafından yaygın olarak tercih edilen RC, TS ve dinamik üç eksenli (TRX) deneyleri, bu çalışmada değerlendirilmiştir.

Brown vd. (1975) siltli kil zeminlerinde yapılan dinamik üç eksenli deneylerde, aşırı konsolidasyon oranlarının kayma mukavemetine etkisini incelemişlerdir. Deneylerde, aşırı konsolide zeminlerde kayma mukavemetinin azaldığı ve bu azalmanın aşırı konsolidasyon oranı ile orantılı olarak arttığı belirlenmiştir.

Hyde ve Ward (1986), siltli kil numuneler ile gerçekleştirdikleri drenajsız dinamik üç eksenli deneylerde, aşırı konsolidasyon oranı arttıkça kayma mukavemetinin daha az değiştiğini ve yüksek derecede aşırı konsolide numunelerde çevrimsel yüklemelere karşı daha az boşluk suyu basıncı oluştuğunu bulmuşlardır.

Sykora (1987), kayma dalgası hızı ile kayma modülü arasındaki bağıntıyı araştırmıştır. Çalışmada, derinlik, jeolojik yaş, zemin türü, efektif gerilme, sıkılık ve doygunluk düzeyinin, bu iki parametre üzerinde belirleyici olduğu saptanmıştır. Özellikle granüler zeminlerde, kayma dalgası hızı ve kayma modülünün boşluk oranı ve efektif gerilme ile kuvvetli bir ilişki sergilediği ifade edilmiştir. Ayrıca, jeolojik yaşın zemin dokusunu doğrudan etkilediği de çalışma kapsamında vurgulanmıştır.

Ishibashi ve Zhang (1993), kum ve kil zeminlerinin dinamik kayma modülü ve sönüm oranlarını belirlemek için geliştirdikleri eşitlikte, kumlar için boşluk oranı ve efektif gerilme,

killer için ise plastisite indisini kullanmışlardır. RC deneyi ile elde edilen kayma modülü verilerinin arazi deneyleriyle daha uyumlu olduğu bulunmuştur.

Vucetic vd. (1998), kum ve kil numunelerinin sönüm oranlarını analiz etmiş ve kayma birim deformasyonu %0.01'in üzerine çıktığında, kumların killere göre daha yüksek sönüm oranına sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Bununla birlikte, plastisite indisindeki artışın killerin sönüm oranını düşürdüğünü belirlemişlerdir. Çalışma, kumların daha belirgin NL davranış sergilediğini, killerin ise daha viskoz özellikler gösterdiğini ortaya koyarak, farklı zemin türlerinin sönüm mekanizmalarının değişkenlik gösterdiğini ortaya koymuştur.

Wang ve Kuwano (1999), killi kum numunelerinin kayma modülü ve sönüm oranlarını incelemişlerdir. Çalışmada, farklı oranlarda karıştırılan kum ve kil içeren numuneler, drenajsız dinamik üç eksenli deneylere tabi tutulmuştur. Sonuçlar, çevrim sayısının artışıyla boşluk suyu basıncının yükseldiğini ve kayma modülünün düşüş gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, kayma modülünün ince malzeme içeriğiyle ilişkili bir parametre içermesi gerektiği ve kayma modülünün çevre basıncı ile normalize edildiğinde daha tutarlı sonuçlar elde edildiği bulunmuştur. Sönüm oranı ise çevre basıncı değişiminden önemli ölçüde etkilenmemektedir.

Schneider vd. (1999), Piedmont çökel zeminlerinin dinamik kayma modülünü belirlemek amacıyla laboratuvar ve saha deneyleri gerçekleştirmiştir. RC deneyleri laboratuvar ortamında uygulanırken, saha çalışmalarında sismik kuyudan kuyuya, sismik dilatometre ve yüzey dalgası yöntemleri kullanılmıştır. Kayma modülünün derinlikle arttığı, doygunluk derecesinin dinamik davranışı etkilediği ve yer altı su seviyesinin üzerindeki bölgelerde daha yüksek kayma modülü değerlerinin elde edildiği tespit edilmiştir. Örselenme nedeniyle laboratuvar sonuçları saha verilerinden daha düşük bulunmuş, konsolidasyon oranı her iki deney türünde benzerlik gösterirken, plastisite indisinin artışına bağlı olarak kayma modülünün azaldığı belirlenmiştir.

Santos ve Correia (2000), küçük ve orta deformasyon seviyelerinde zemin rijitliğini araştırmış ve kayma modülünü etkileyen plastisite indisi ve efektif gerilme gibi parametreleri farklı zemin tipleriyle karşılaştırmıştır. Çalışma, kayma modülü ile boşluk oranı ve efektif gerilme arasında ilişki bulunduğunu, ancak hacimsel eşik birim deformasyonunun daha fazla araştırılması gerektiğini ortaya koymuştur. Teachavorasinskun vd. (2002) ise Bangkok kilinin kayma modülü ve sönüm oranını incelemiş ve drenajsız koşullarda yapılan dinamik üç eksenli deneylerde, kayma modülünün literatürle uyumlu olduğunu gözlemlemişlerdir. Sönüm oranı, düşük deformasyon seviyelerinde %5, yüksek deformasyon seviyelerinde ise %30 oranında

farklılık göstermiştir. Ayrıca, yükleme frekansının kayma modülünü etkilemediği, ancak sönüm oranında hafif bir azalma yaptığı bulunmuştur. Dinamik yükleme geçmişinin ise belirgin bir etkisi olmamıştır.

Chaudhary vd. (2002), Toyoura kumu üzerinde yapılan dinamik deneylerde, numune hazırlama yöntemlerinin zemin yapısı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Kuru yağmurlama, sulu çökeltme ve kuru çubuklama yöntemleriyle hazırlanan numunelerin kayma modülü ve sönüm oranları ölçülmüştür. Sonuçlar, numune hazırlama yöntemlerinin zemin yapıları üzerindeki etkisinin minimal olduğunu, ancak kuru yağmurlama yönteminin yüksek anizotropiyi, kuru çubuklama yönteminin ise izotropik yapıyı sağladığını ortaya koymuştur.

Richter ve Huber (2004), ince daneli zeminlerin kayma modülü ve sönüm oranı üzerindeki dane boyutu, efektif gerilme ve boşluk suyu basıncının etkilerini RC cihazı kullanarak incelemiştir. Ayrıca, ikincil konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilerek zamana bağlı zemin davranışı analiz edilmiştir. Çalışma bulguları, bozulma, çözülme ve kimyasal bağ oluşumu gibi süreçlerin kayma mukavemetini artırdığını göstermiş, ancak numune yoğunluğu ve danelerin koordinasyonunun mukavemet artışı üzerindeki etkisi konusunda kesin bir sonuca ulaşamamıştır.

Ülker (2004), siltli ve killi zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışını TS aletiyle incelemiş ve deneylerde en önemli etmenlerin gerilme seviyesi, çevrim sayısı, plastisite, ince dane miktarı, konsolidasyon süresi ve yükleme hızı olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, laboratuvar ortamındaki örselenmemiş numunelere kıyasla daha fazla mukavemet kaybı gözlemlenmiştir.

Erken ve Ülker (2007), örselenmiş ve örselenmemiş zemin numuneleri üzerinde burulmalı kesme deneyleri gerçekleştirmiştir. Örselenmiş numuneler yumuşak siltli ve killi zeminlerden temin edilmiştir. Dinamik mukavemet artışı, plastisite indisinin %10'un üzerinde belirginleşmiş, örselenmemiş numunelerde ise dinamik mukavemetlerin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Tekrarlı yükleme sonrası zeminlerin statik mukavemetlerinde %50'ye kadar azalma olduğu, boşluk suyu basıncı ile birim kayma deformasyonlarının arttığı ve bu durumun taşıma gücü kaybına yol açtığı tespit edilmiştir. Bu bulgular, çevrimsel gerilme sayısı, genlik, plastisite indisi, ince dane oranı, konsolidasyon süresi, yükleme hızı ve numune yapısının dinamik davranış üzerindeki etkilerini vurgulamaktadır.

Şener vd. (2007), Adapazarı'ndan alınan zemin numuneleriyle dinamik üç eksenli ve burulmalı kesme deneyleri yapmıştır. Numuneler drenajsız koşullarda test edilerek gerilme, şekil değiştirme ve boşluk suyu basıncı değişimleri incelenmiştir. Üç eksenli deneylerde,

eksenel deformasyon ve boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısına bağlı değişimi analiz edilmiş ve sonuçlar literatürle uyumlu bulunmuştur. Burulmalı kesme deneylerinde ise dinamik kayma gerilmesi, birim kayma ve boşluk suyu basıncındaki değişimler değerlendirilmiştir. Analizler, yüksek dinamik kayma gerilmesi seviyelerinde numunelerin göçme kriterine ulaşacağını ve gerilme oranlarındaki artışın boşluk suyu basıncı ve deformasyon seviyelerini artıracığını göstermiştir.

Markowska-Lech (2008), kohezyonlu doymuş zeminlerde kayma modülünü belirlemek için bender eleman içeren üç eksenli deney yöntemini kullanmıştır. Çalışmada, aşırı konsolide Warsaw kiline ait kayma dalgası hızları ölçülmüş ve efektif gerilme artışıyla boşluk oranının azalmasına bağlı olarak kayma dalgası hızında artış gözlemlenmiştir. Deney verileri, boşluk oranı, efektif gerilme, kayma modülü ve kayma dalgası hızı arasındaki ilişkiyi görselleştirmek amacıyla üç boyutlu grafiklerle analiz edilmiştir. Ayrıca, kayma modülü ile kayma dalgası hızı arasındaki en uygun matematiksel modellerin türetilmesi amaçlanmıştır. Araştırma sonuçları, kayma dalgası hızının efektif gerilme ve boşluk oranından doğrudan etkilendiğini, özellikle efektif gerilme ile doğrusal bir ilişki gösterdiğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, düşük efektif gerilme seviyelerinde ve yüksek frekanslı sinyaller kullanıldığında ölçüm sürecinde bazı zorluklar yaşandığı belirtilmiş ve daha fazla deney yapılmasının gerekliliği vurgulanmıştır.

Meidani vd. (2008), çakıl ve kil malzemedan oluşan karışımların dinamik özelliklerini incelemek amacıyla dinamik ve statik üç eksenli deneyler gerçekleştirmiştir. Farklı şekil yapısına sahip çakıllar, düşük plastisiteli kil ile belirli oranlarda karıştırılarak test edilmiştir. Çakıl oranı %44'ün altında olduğunda, kilin baskın olduğu ve çakılların yeterli etkileşimi sağlayamadığı, %54 ve üzerindeki oranlarda ise malzemenin davranışının çakıllar tarafından belirlendiği saptanmıştır. Kayma modülü ve sönüm oranı, çakıl oranının artışıyla belirgin şekilde değişmiş; yuvarlak daneli çakılların kayma modülünü artırdığı görülmüştür. Çevre basıncının yükselmesiyle bu fark daha belirgin hale gelirken, sönüm oranının çakıl oranı arttıkça azaldığı ancak yuvarlak daneli çakılların daha yüksek sönüm değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, yuvarlak çakıl içeren karışımların, düşük oturma gerektiren zeminlerde kullanımının uygun olduğu önerilmiştir.

Kallioglou vd. (2008), RC cihazı kullanarak örselenmiş ve örselenmemiş kohezyonlu zeminlerin dinamik özelliklerini incelemiştir. Çevre basıncı, aşırı konsolidasyon oranı, boşluk oranı ve plastisite indisinin kayma modülü ve sönüm oranı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sonuçlar, kayma modülünü etkileyen başlıca parametrelerin plastisite ve zemin

yapısı olduğunu, sönüm oranının ise en fazla zemin yapısına bağlı olarak değiştiğini ortaya koymuştur.

Okur ve Ansal (2009) İstanbul Avcılar bölgesinden alınan örselenmemiş normal konsolide kil numunelerle dinamik üç eksenli deneyler yapmışlardır. Sonuçlar, kayma modülünün çevre basıncı ile arttığını, plastisite indisinin ise lineer olmayan elastik davranışta etkisiz olduğunu, ancak bu eşik değeri aşıldığında önemli bir faktör haline geldiğini göstermektedir. Ayrıca, laboratuvar verileri ile arazi ölçümleri arasındaki kayma modülü farkının, örselenme ve laboratuvar koşullarından kaynaklandığı vurgulanmıştır.

Sun vd. (2013), RC deneyleri ile farklı konsolidasyon oranlarındaki zeminlerde dinamik kayma modülündeki değişiklikleri incelemiştir. Anizotropik ve izotropik konsolidasyonlar arasındaki ilişkiyi tanımlayan bir model geliştirilmiştir. Sonuçlar, konsolidasyon oranı değişikliklerinin zeminlerin doğrusal olmayan özellikleri üzerinde önemli bir fark yaratmadığını ancak güçlü yer hareketlerinde yüzey ivmesinin etkisinin belirginleştiğini göstermektedir. Ayrıca, anizotropik konsolidasyonun karakteristik periyodu azalttığı ve deprem etki faktörünü artırdığı bulunmuştur, bu da anizotropik konsolidasyonun etkilerinin güçlü yer hareketi analizlerinde dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Morsy vd. (2019) Mısır'ın kuzey sahilindeki iki bölgeden alınan zemin malzemeleri üzerinde, küçük ve orta kayma şekil değiştirme aralıklarında kayma modülü ve sönüm oranını sabit-serbest RC aparatı kullanarak değerlendiren bir deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. Ayrıca, eğilme ve elastisite modülleri, eğilme sönüm oranı ve Poisson oranı da belirlenmiştir. Etkin çevresel gerilme, boşluk oranı ve doyma durumunun dinamik özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, silisli zeminlerde kayma modülünün etkin çevresel gerilme ile yüksek üs değerleriyle üstel olarak arttığını göstermektedir. Ayrıca, boşluk oranı azaldıkça kayma modülünün arttığı, bu etkinin düşük boşluk oranlarında daha belirgin olduğu ortaya konulmuştur. Düzensiz ve pürüzlü daneciklere sahip kuru çimentolu zeminlerin, doymuş zeminlere kıyasla daha düşük maksimum kayma modülü ve daha yüksek gerilme üsleri gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca, doğal sementasyonun, danecikler arası özellikleri değiştirdiği için zeminin dinamik özelliklerini dolaylı olarak etkilediği belirlenmiştir.

Hussain ve Sachan (2019) tarafından yapılan çalışmada, Hindistan'ın yüksek depremsellik özelliği taşıyan Kutch bölgesinin doğal zeminlerinin dinamik özellikleri incelenmiştir. Çalışma, kumlu zeminlerin dinamik karakteristiklerini, plastik ve plastik olmayan ince parça içeriği açısından değerlendirerek literatürden farklı bir yaklaşım

sergilemiştir. Çevrimsel üç eksenli testler, Kutch bölgesindeki zeminlerin sıvılaşmaya şiddetli ile orta derecede eğilimli olduğunu, ancak bu eğilimin ince parça içeriğinden çok plastisiteye bağlı olduğunu göstermiştir. Ayrıca, siltli zeminlerde gözenek basıncı oranı, efektif basınç ve çevrimsel gerilme oranlarının, sıvılaşma ile çakışan efektif kopma gerilmesini işaret ettiği bulunmuştur. Killi zeminlerde ise sıvılaşma yerine mukavemette bozulma gözlemlenmiş ve plastisite indisinin bu bozulmanın derecesini etkilediği belirlenmiştir. Çalışma, siltli zeminlerde döngü sayısı arttıkça sekant kayma modülü ve sönüm oranının azaldığını, killi zeminlerde ise bu azalmanın daha düşük olduğunu ortaya koymuştur.

Son 20 yıl içerisinde, zemin tepki analizleri çerçevesinde dinamik yükler altındaki zemin davranışı çeşitli yönleriyle incelenmiştir.

Andrus vd. (2003), Güney Karolina bölgesinde gerçekleştirdikleri çalışmada, SPT ve CPT test sonuçlarıyla kayma dalgası hızını tahmin etmiş ve sonrasında laboratuvar ortamında 122 numune üzerinde RC ile TS testler yapmışlardır. Bu deneyler sonucunda çevresel basınç, plastisite indisi etkisi ile kayma modülü arasında bir ilişki geliştirmişlerdir.

Yalçinkaya ve Alptekin (2003), yaptıkları çalışmada Dinar ilçesinde 1995 yılında yaşanan deprem sonrası, 5 farklı istasyonda kaydedilen verileri kullanarak Klasik Spektral Oran ve Yatay/Düşey Spektral Oran hesaplamalarını yapmış ve bu oranlar arasında 2-3 katlık bir fark tespit etmiştir. Dinar Ovası'nda bulunan zeminlerde ise 8 kata kadar çıkan zemin büyütme etkisi gözlemlenmiştir. Ayrıca burada hasara uğrayan 4-5 kata sahip olan binaların doğal titreşim periyotlarıyla zemin büyütmesinin üst üste geldiği belirlenmiştir. Bölgede meydana gelen hasarların, zemin büyütmesi ve rezonans etkisinin önemli bir rol oynadığı ortaya konmuştur.

Roblee ve Chiou (2004), 28 farklı sahada 154 adet örselenmemiş numune kullanarak yaptığı deneylerle zeminlerin dinamik özelliklerini temsil eden bir model önermiştir. Önerdiği model RCTS ile elde ettiği deney sonuçları, RC ve TS deney sistemiyle karşılaştırılmış ve çevre basıncının etkisi araştırılarak kayma modülüne dair bir trend oluşturulmuştur. Çalışma sonucunda önerilen model ile Darendeli (2001) modeli arasında bir karşılaştırma yapılmıştır.

İnce (2005), İstanbul ilinde yaptığı çalışmasında 125 adet örselenmemiş sondaj verisi kullanarak zemin büyütmesi, şev stabilitesi ve sıvılaşma tehlikesi analizlerini gerçekleştirmiştir. Çalışma bölgesini 250m*250m boyutlarında bölümlere ayırarak Coğrafi Bilgi Sistemi ile mikrobölgeleme gerçekleştirilmiştir.

Kale (2008), İstanbul Zeytinburnu ilçesindeki yüzey hareketlerini hem 1D hem de 2D boyutlarında incelemiştir. Farklı analiz yazılımları kullanılarak EL ve NL analizler yapılmış,

zemin yüzeyindeki yer hareketinin sahip olduğu özelliklerin saha zemin koşulları ve arazi topografyasına bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir.

Eskişar (2008), Ege Bölgesi'nde sismik tehlikenin yüksek olduğu bir alanda sondaj verileriyle oluşturduğu jeoteknik veri tabanı üzerinden bir boyutlu EL analizler yaparak, bölgenin deprem etkilerine ilişkin dinamik zemin parametrelerini belirlemiştir. Araştırma, 1977 İzmir, 2003 Urla ve 2005 Urla depremlerine ait ivme-zaman kayıtlarıyla gerçekleştirilmiş ve senaryo depremleri için yapılan analizlerle afet riskine dair saha içi değişimler haritalanmıştır. Ayrıca, mikrotremör ölçümleriyle zemin hâkim periyodu ve zemin büyütme katsayıları saptanmıştır.

Tönük (2009), gerçekleştirdiği çalışmada zemin davranış analizlerinde kullanılan yöntemleri ele alarak, ivme-zaman kayıtları, sayısal yöntemler ve gerilme ile frekans bağımlı NL zemin tepkisinin analizler üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Çalışmada, zemin profillerinin davranışlarını değerlendirmek için EL ve modifiye EL yaklaşımlar önerilmiştir.

Haşal (2009), kuvvetli yer hareketleri altında, yüzey ve yüzey altı topoğrafyasındaki ani değişimlerin olduğu bölgelerde bir ve iki boyutlu dinamik analizlerin yeterliliğini araştırmış ve yapılacak olan çalışmalarda ikinci boyut etkisinin de dikkate alınmasının gerektiğini vurgulamıştır.

Üsküloğlu (2010), 1999 yılında yaşanan Marmara Depremi verilerini kullanarak EXSIM programı aracılığıyla Yalova ili, Çiftlikköy ve Çınarcık ilçelerindeki anakaya ve alüvyon zeminlerde yüzeyde gerçekleşen ortalama ivme değerlerini hesaplamış ve spektral ivme değerlerinin 0.2-0.4 saniye periyot aralığında olduğunu tespit etmiştir.

Hashash vd. (2010), NL analiz yöntemleri kapsamında zemin davranışı analizinde şartlara bağlı olarak parametre seçimini incelemiş ve inceleme sonucunda dinamik özelliklerin pratik bir şekilde belirlenmesine yönelik etkin bir yaklaşım geliştirmiştir.

İyisan ve Haşal (2011) gerçekleştirdikleri çalışmada, zemin koşullarındaki farklılıkların zemin büyütmesi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu amaç doğrultusunda, yüksek plastisiteye sahip olan killi ve siltli kum tabakalarının bulunduğu durumlar için, 6 adet anakaya deprem verisi kullanarak bir ve iki boyutlu dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, 6 farklı deprem kaydı için yüzeyde meydana gelen ivme-zaman ve ivme-spektrum grafiklerini oluşturmuşlardır. Anakaya üzerinde yer alan zemin kum olduğunda yüzeyde yaklaşık iki kat, kil olduğunda ise daha yüksek büyütme oranları gözlemlenmiştir. Çeşitli yazılımlar kullanılarak bir ve iki boyutlu analizler yapılmıştır.

Kaptan ve Tezcan (2012) çalışmasında, zemin büyütme etkisinin önemine dikkat çekmiş ve İzmir ilinde yumuşak zemin üzerinde bulunan üç ayrı yapı için zemin büyütme analizleri yapmıştır. Analiz sonucunda, zemin büyütmesinin anakaya ivmesini 6.7 kat artırdığı ve yerel zemin koşulları dikkate alınarak yapılacak zemin büyütme analizlerinin, tasarımlar için belirli ivme spektrumları kullanılarak yapılması gerektiği vurgulanmıştır.

Çokar (2012), yapmış olduğu çalışmasında 1D zemin davranış analizlerinde SHAKE2000 yazılımı ile EL analiz yöntemi kullanarak, anakaya ve zemin yüzeyinde kullanılan aynı deprem kaydının etkilerini değerlendirmiş ve deprem etkisinin yüzeyde zemin tabakalarından yaklaşık üç kat arttığını gözlemlemiştir.

Erdil (2013), Van deprem kayıtları ve zemin koşullarını kullanarak, kum ve kil zeminlerde kayma dalgası hızlarına dayalı olarak zeminin sahip olduğu hâkim periyot değerlerini belirlemiş ve spektral ivme-periyot, hız-periyot ve deplasman-periyot ilişkilerini inceleyerek çalışma yaptığı zeminin risk analizlerini yapmıştır.

Adampira vd. (2014), sivilaşma riski taşıyan bir bölgedeki LNG liman projesinde, EL ve NL analiz yöntemlerini karşılaştırarak, sivilaşabilir zeminler için her iki analiz yönteminin de kullanılması gerektiğini belirtmiştir.

Khanbabazadeh (2014), değişik değerlere sahip anakaya eğimleri, zemin türleri ve jeolojik düzensizlikler altında ovalarda meydana gelen zemin davranışını araştırmış ve alüvyon ovaların anakaya hareketleri altında gösterdiği davranışın, rezonans periyodu ve maksimum zemin büyütmesi açısından farklılıklar arz ettiğini gözlemlemiştir.

Aksu (2014), yapmış olduğu çalışmasında Erzurum il merkezinde, seçmiş olduğu kuzey-güney doğrultuya sahip hat boyunca zemin ve yapı periyodunu değerlendirerek, bölgedeki zemin sınıflaması, büyütme ve hâkim periyodu belirlemiştir. İki farklı büyüklükteki deprem verisi ile zemin ve yapı üzerindeki etkiler analiz edilerek, zemin hâkim periyodu ve yapı hâkim periyodu arasındaki ilişki incelenmiş ve olası riskler ortaya konulmuştur.

Afacan (2014), yumuşak kil tabakalarındaki saha davranışını, santrifüj deneylerinde doğrusal ve doğrusal olmayan analiz yöntemleriyle incelemiştir. Sonuçlar, kısa periyotlarda doğrusal olmayan davranışın daha etkili olduğunu, uzun periyotlarda ise doğrusal davranışın etkisinin daha belirgin olduğunu göstermektedir.

Mirshekari ve Ghayoomi (2015), yapmış olduğu araştırmada kısmi doymuş zeminlerde doğrusal olmayan analiz zorluklarını inceleyerek, Northridge depremi verileriyle yapılan

analizler sonucunda eşdeğer doğrusal analizle elde edilen büyütme değerlerinin, doğrusal olmayan analizlere kıyasla daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir.

Aslan (2015), Erzincan depremi esnasında yerel zemin koşullarının büyütme etkisini inceleyerek, eşdeğer doğrusal analizler ile SHAKE yazılımı kullanarak zemin profillerinin davranışını değerlendirmiştir. Dönmezçelik (2015), Erzincan bölgesinde zemin büyütme analizleri yaparak, belirli periyotlar için büyütme oranlarını hesaplamıştır.

Carlton ve Tokimatsu (2016), yapmış oldukları çalışmada EL ve NL yöntemleri karşılaştırarak, EL yöntemle elde edilen spektral ivmelerin, kısa ve orta periyotlarda NL yöntemlere göre daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Pruiksma (2016) ise benzer bir çalışma ile spektral ivme değişimlerini vurgulamıştır.

Fırat ve Demir (2016), Adapazarı bölgesindeki yerel zemin koşullarının deprem hareketleri üzerindeki büyütme etkilerini incelemişlerdir. Yapılan analizler, zemin davranış spektrumlarının mevcut yönetmeliklerle karşılaştırıldığında tasarım spektrumlarının dışında kaldığını ortaya koymuştur. Ayrıca, zemin yüzeyindeki pik ivme değerlerinin, alt tabakalardakilerden yüksek olduğunu ve zeminlerin NL özellikleri nedeniyle düşük frekansta büyük, yüksek frekansta ise küçük büyütme etkilerinin gözlemlendiğini belirtmişlerdir.

Ateş (2016), 1999 Düzce depremi sırasında yapı-zemin rezonans etkilerini inceleyerek, bölgenin (SPT)-N darbe sayısı, V_s , zemin büyütme katsayısı ve zemin hâkim titreşim periyodu gibi verilerle bölgedeki yapıların kat yüksekliği arasındaki ilişki değerlendirilmiştir.

Koçer vd. (2018), TBDY, 2018 ve önceki versiyonu olan Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY, 2007) kapsamında tanımlaması yapılmış olan spektral ivme ve zemin hâkim periyodu değerlerini incelemişlerdir. Kocaeli, Eskişehir, Kayseri ve Konya illerine ilişkin veriler, Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı veri tabanındaki koordinatlarla karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda, Kocaeli ilinde ZC zemin grubunda en yüksek spektral ivme değeri elde edilirken, diğer illerde ZE zemin grubunda en büyük spektral ivme gözlemlenmiştir. Araştırmacılar, TBDY 2018'in, TDY 2007'e göre daha güvenli bir yaklaşım sunduğunu ifade etmişlerdir.

Afacan vd. (2019), santrifüj deneyleriyle yumuşak kil tabakalarının bir boyutlu yer tepki özelliklerini belirlemiş ve EL ile NL analiz sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri bulgular, EL analizlerin NL modellere kıyasla daha yüksek PGA değerleri ürettiğini, bu nedenle büyük gerilme koşullarında NL modellemenin EL yöntemle desteklenmesini önerdiklerini göstermektedir.

Ildır vd. (2020) yapmış oldukları çalışmalarında, zemin büyütme faktörü değerini sıvılaşma potansiyeli yüksek olan zeminler için incelemişlerdir. Çalışma sahası olarak Adapazarı ilçesini seçmişlerdir. Bu ilçe zemini için Flac 2D programı kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde, zemin büyütme etkisi gözlemlenmiş ve düşey ile yatay ivme arasında değişimlerin olduğu araştırmacılar tarafından belirlenmiştir.

Uyanık vd. (2021) ise yaptıkları çalışmada deprem sonucunda ortaya çıkan maksimum yatay yer ivme değerini tahmin etmişlerdir. Çalışmada 152 deprem kaydı kullanılarak dinamik parametreler elde edilmiş ve çok sayıda verinin bulunduğu bir bellek oluşturulmuştur. Ayrıca, çalışma sonunda geliştirdikleri deneysel azalım ilişkisi, literatürde bulunan diğer deneysel ilişkilerle karşılaştırılmıştır.

Bilican vd. (2021), yaptıkları çalışma ile bir boyutlu zemin büyütme analizlerinde kullanılabilecek transfer fonksiyonlarının elde edilmesi amacıyla bir yöntem önermişlerdir. Bu çalışma, özellikle zemin tiplerinin ve yapı yüksekliğinin zemin büyütmesinin büyüklüğü üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir. Sayısal analizlerde, farklı zemin tiplerine göre transfer fonksiyonu değerlerinin 0.15 ile 0.35 arasında değiştiği, bunun sonucunda ise spektral ivme değerlerinde %20'ye kadar bir artış gözlemlendiği ifade edilmiştir. Bu bulgular, zemin büyütmesinin yapılar üzerindeki dinamik etkilerini anlamada önemli bir katkı sağlamaktadır.

Yavuzoğlu vd. (2021) yaptıkları çalışmada, zemin büyütmesinin kaynak, soğrulma, topografya, sismik ışının izlediği yol ve dispersiyon etkilerinden etkilendiği belirtilmiştir. Zemin büyütme etkisinin temel topografya, soğrulma ve dispersiyonun yüzey dalgası üzerindeki etkileri belirlenmiş ve bu etkilerin 3 boyutlu modellenmesi yapılmıştır.

Gücek vd. (2023), 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrası Türkiye'nin güneydoğusunda yer alan üç bölgede (Antakya, Gölbaşı ve Türkoğlu) zemin büyütmesi ve sıvılaşma olgularını incelemişlerdir. Çalışmalarında, zemin katmanlarının sıvılaşma potansiyelini ve deprem yer hareketine karşı zemin davranışlarını değerlendiren sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. DeepSoil v6 yazılımı kullanılarak yapılan analizlerde, özellikle Antakya ve Türkoğlu bölgelerinde zemin büyütmesi gözlemlenmiştir. Antakya bölgesinde, yerel zemin koşullarına bağlı olarak maksimum spektral ivmeler 2g civarında olduğu, Gölbaşı bölgesinde 3g olduğu ve Türkoğlu bölgesinde ise 2.5g'ye kadar çıktığı bulunmuştur. Bu çalışma, bölgenin deprem sırasında ciddi yapısal zararlar görebileceğini ve zemin büyütmesinin sismik etkileri artırabileceğini vurgulamaktadır.

6. MATERYAL VE METOT

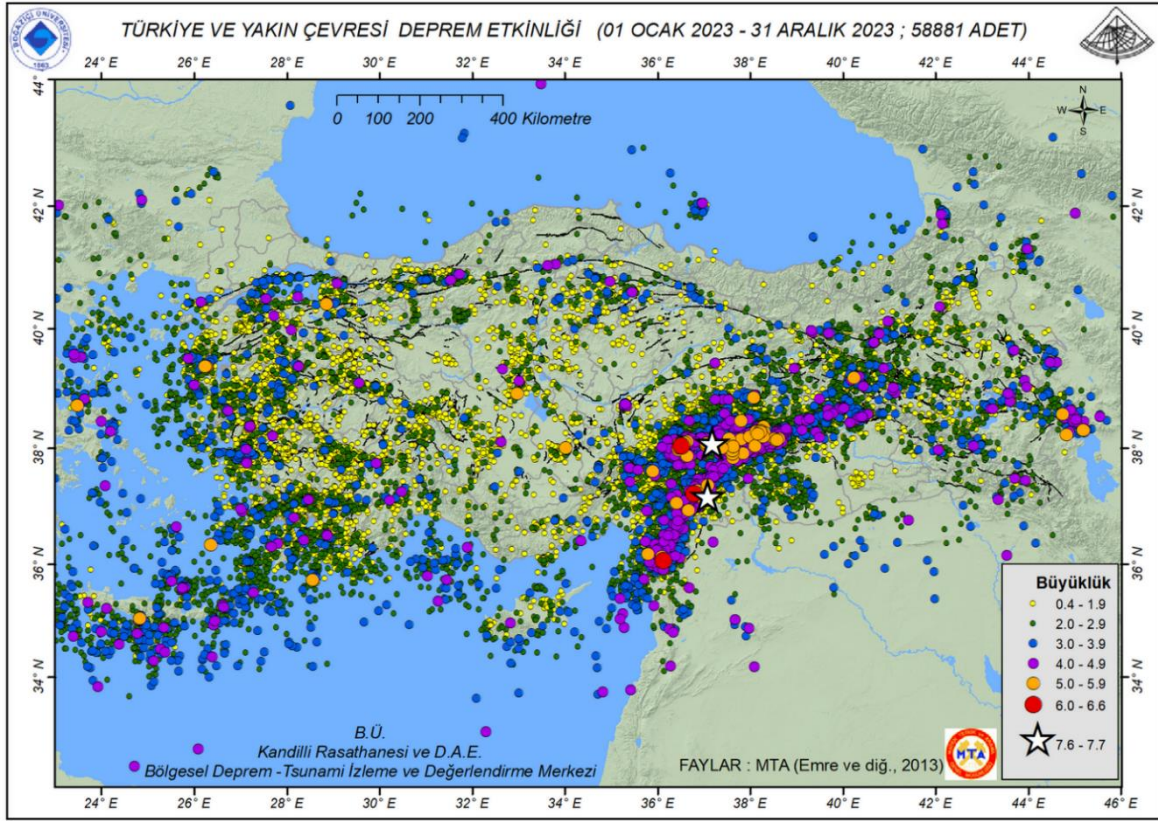
6.1. Giriş

Günümüzde zeminlerin dinamik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla farklı deney sistemleri kullanılmakta olup, her bir sistemde birim deformasyon seviyelerine bağlı olarak kayma dayanımı ve sönüm oranları elde edilmektedir. Bu çalışmada, Sakarya ilinden sahaya özel olarak temin edilen örselenmemiş zemin numuneleri üzerinde elek analizi, hidrometre testi, özgül ağırlık tayini ve kıvam deneyleri yapılarak fiziksel özellikler, RC ve TS deneyleri yapılarak dinamik parametreler belirlenmiştir.

6.2. Çalışma Bölgesinin Tanıtılması

Türkiye, aktif tektonik kuşaklardan biri olan Alp-Himalaya orojenik kuşağı içerisinde yer almakta olup, yüksek sismik aktiviteye sahip bir ülkedir. Ülke genelinde üç ana fay zone belirleyici rol oynamaktadır: Kuzey Anadolu Fay Hattı (KAF), Doğu Anadolu Fay Hattı (DAF) ve Batı Anadolu Fay Sistemi. KAF, doğrultu atımlı bir fay olup, Türkiye'nin en büyük ve en yıkıcı depremlerini üretme potansiyeline sahiptir. DAF ise Arap ve Anadolu levhaları arasındaki sıkışmanın etkisiyle sol yanal atımlı bir karakter sergilemektedir. Batı Anadolu'da ise genişlemeli tektonik rejimin etkisiyle normal faylanmalar yaygın olarak görülmektedir. Tarihsel ve aletsel dönem kayıtları incelendiğinde, Türkiye'de sık sık yıkıcı depremler meydana geldiği ve bu durumun gelecekte de devam edeceği anlaşılmaktadır. Bu nedenle, sismik risk yönetimi, yapılaşma politikaları ve deprem erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Dünyanın en aktif sismik kuşaklarından biri üzerinde yer alan Türkiye'de, 2023 yılı içerisinde çeşitli büyüklüklerde ($0.2 \leq M \leq 7.0$) toplam 58.881 deprem kaydedilmiştir. Bu sarsıntıların episantr dağılımları ve büyüklüklerine ilişkin veriler Şekil 6.1'de detaylandırılmıştır.



Şekil 6.1. 2023 yılı içerisinde Türkiye ve çevresinde meydana gelen depremler ve büyüklükleri (BÜ,2024)

Çalışma alanı, Türkiye'nin kuzeybatısında yer alan ve jeolojik yapısı itibarıyla oldukça karmaşık bir bölgede konumlanan KAF'ın etkisi altında bulunan Sakarya ili (Şekil 6.2)., tarih boyunca önemli depremlerle karşı karşıya kalmıştır. Bölgenin seçiminde, geçmişte çeşitli büyüklüklerde yıkıcı depremlerin meydana gelmiş olması etkili bir faktör olmuştur. Bu durum, çok sayıda araştırmacının ilgisini çekmiştir.



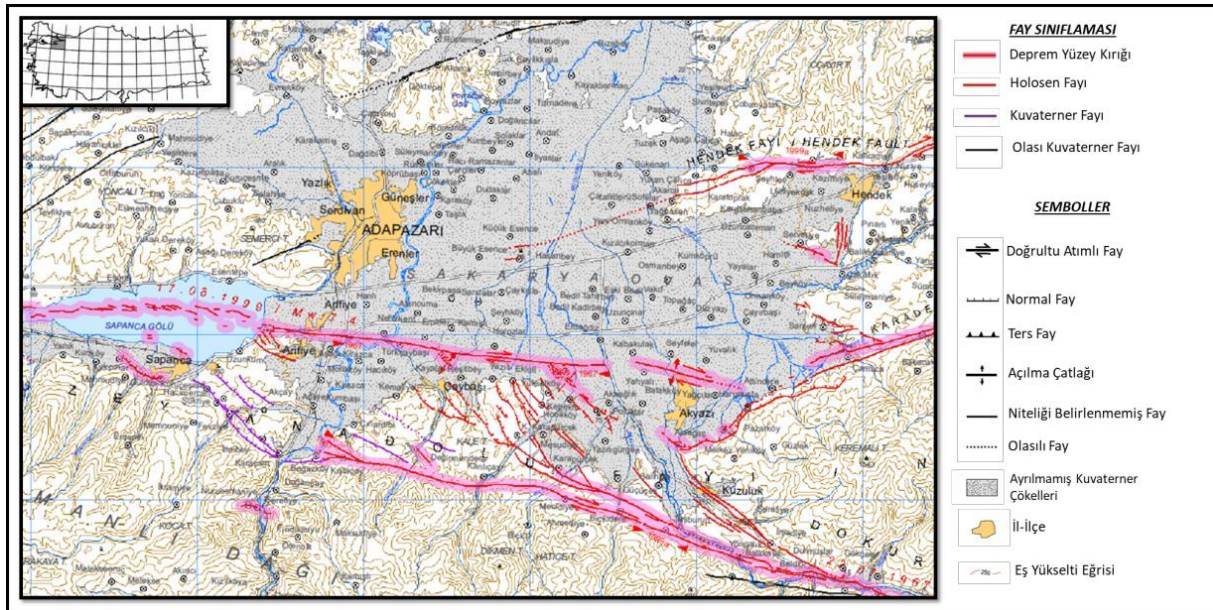
Şekil 6.2. Çalışma bölgesi

6.3. Bölgenin Depremselliği ve Jeolojisi

Sakarya ilinin depremselliği, bölgenin bulunduğu tektonik ortamdan kaynaklanmaktadır. Türkiye, aktif bir tektonik kuşakta yer almakta olup, bu durum ülke genelinde sık sık depremler yaşanmasına neden olmaktadır. Sakarya ili de bu kuşaktan etkilenmekte olup, özellikle KAF ve Marmara Bölgesi'nin diğer aktif fay sistemlerinin etkisi altındadır. Bu hat üzerinde ve yakınlarında birçok deprem meydana gelmiştir. Yakın tarihlerde meydana gelen depremler 1992 yılında M:6.9 büyüklüğünde Erzincan depremi, 1999 yılında M:7.4 büyüklüğünde Kocaeli depremi ve yine aynı yıl M:7.2 büyüklüğünde Düzce depremi, 2011 yılında M:7.2 büyüklüğünde Van depremi, 2020 yılında M:6.8 büyüklüğünde Elazığ depremi, 2020 yılında M:6.9 büyüklüğünde Seferihisar ve son olarak 2023 yılında M:7.7 ve M:7.6 büyüklüğünde Kahramanmaraş depremleri yaşanmış çok sayıda yapıda hasar oluşmuş/yıkılmış ve çok sayıda can kaybı yaşanmıştır.

Bu fay hattı üzerinde veya yakınında yer alan sanayi şehirlerinin varlığı ve bu alanlarda hızlı şehirleşmenin yaşanması sonucu, ülkemiz nüfusunun büyük bir kısmı deprem tehlikesiyle karşı karşıyadır. Bu bağlamda mühendislik uygulamalarında yapılar tasarlanırken analizlerin sahaya özel olarak yapılması ve yapı-zemin etkileşiminin detaylı bir şekilde incelenmesi büyük önem taşımaktadır.

KAF Sistemi'nin ana hattı üzerinde yer alan Sakarya ili, tarihsel süreçteki büyük depremlerden önemli ölçüde etkilenmiştir. 1943'te M:6.6 büyüklüğündeki Hendek, 1957'deki M:7.1 büyüklüğündeki Abant, 1967'de M:6.0 büyüklüğündeki Akyazı, 1999'da M:7.2 büyüklüğündeki Adapazarı ve 2000'de M:5.2 büyüklüğündeki Akyazı depremleri, son yüzyılda bu bölgede büyük hasarlara yol açan sismik olaylar arasında yer almaktadır (Harman ve Küçük, 2016; Afad, 2021). KAF zonunun son yıllarda meydana gelen büyük depremlerde önemli bir rol oynayan kuzey kolu, doğrultu atımlı segmentlerden oluşmaktadır (Tekin, 2012) (Şekil 6.3). Bu segmentler, Sapanca-Gölcük segmenti, İzmit-Karamürsel segmenti ve Yarımca-Yalova segmentini içermektedir.



Üst S.istem	Sistem	Seri	Formasyon	KAYA TÜRÜ	AÇIKLAMALAR
SENOZOYİK	Üst Holosen	Pleyistosen	Q5		Alüvyal yelpaze- Nehir Çökelleri
			Q4		Alüvyal - Taşkın Çökelleri
		Alt Pleyistosen	Q3		Büyük Alüvyal yelpaze- Nehir Çökelleri
			Q1		Alüvyal yelpaze- Seki Çökelleri
	Orta Lütetliyen-Üst Eosen	Pliyosen	P/3		Çakıltı - kumtaşı
			T7		Andezit ve bazaltik kayalar
		Alt-Orta Eosen	m2		Kumtaşı - şeyl
	Alt Senoniyen	Maastrichtliyen-Paleosen	MaPa1		Kumtaşı - çakıltı
			MaPa		Kireçtaşı
			Sna		Kumtaşı, miltaşı ve çakıltı
			O/1		Ultramafik kumlat ve tektonik birimler
MESOZOYİK	Alt-Orta Jura	TRJ			Şist, mermer ve metabazit
			TRJ1		Kumtaşı, şeyl, proklastik kaya birimleri
			PTRa		Kireçtaşı, kırıntılı kaya, volkanit ve bazen ofiyolitik kaya dilimil melan
	(Alt Devoniyen)	D1			Arkozik konglomera, mor miltaşı ve fosillli miltaşı
PALEOZOYİK	(Permian-Triyas)				

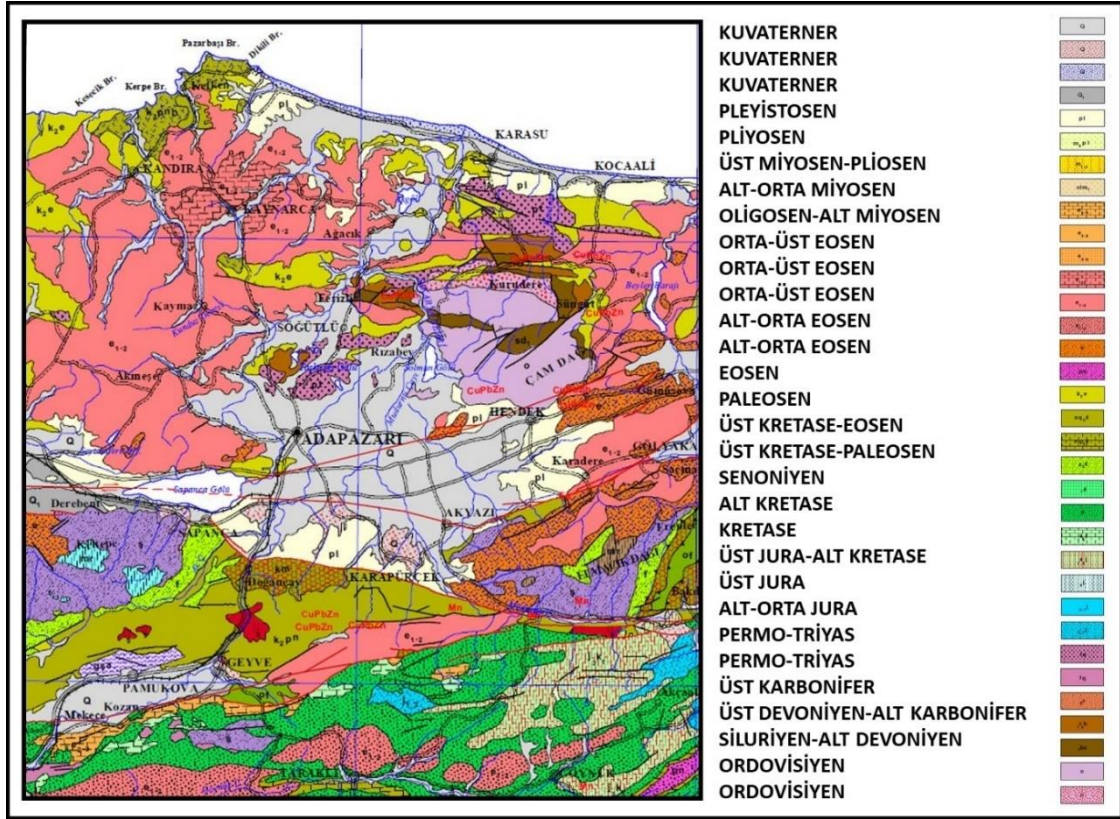
Şekil 6.4. Bölgenin genelleştirilmiş dikme kesiti (Herece ve Akay, 2003)

YAŞ	FORMASYON	KALINLIK (m)	KAYA TÜRÜ (FASİYES)	OLUŞUM ORTAMI	KAYA TÜRÜ ÖZELLİKLERİ
KUVATERNER	SAKARYA	0.3-4		Yelpaze / Taşkın Ovası Akarsu - Mandıresli Nehir	Kahverenkli, kahverenkli - siyah, güncel tarım toprağı (1-4 m kalınlıklı) Çakıl ve kum mercikleri içeren, gri-yeşil-siyah renkli silt ve kil ardalanması Kanal içi ve nokta barları olarak oluşmuş çakıl, kum ve ince katmanlı kil bantları ardalanması Seçilmemiş köşeli, çöktür bileşenli talus UYUMSUZLUK
		> 300			
GEÇ PLİYOSEN	KARAPÜRÇEK - KANLIÇAY	> 750		Akarsu (kanal) Taşkın Ovası	Merceksel, kalın katmanlı-masif, çöktür bileşenli, az gelişmiş çapraz katmanlı, çöktür bileşenli, çatlaklı çakıltaşı merceksel çakıltaşı (kanal dolgusu), karbonat bantları ve kumtaşı kamaları içeren silttaşı, şeyl, marn ardalanması. Çatlaklı ve kalsit damarlarıyla kesilmiş. Seçilmemiş, kalın tabakalı-masif, çöktür bileşenli, bileşenler iyi yuvarlaklaşmamış, yer yer çapraz katmanlı, kesme kırıklarıyla kat edilmiş çakıltaşı. Taban Çakıltaşı. Çöktür bileşenli, 1 m'ye varan boyutta blok ve çakılları içerir. Kumtaşı hamurulu, çatlaklı, tabakalanma göstermez. ACILI UYUMSUZLUK
		> 750			
GEÇ KRETASE - EOSEN	YİĞİLCA - ÇAYCUMA	> 500		Açık derin deniz	FLİŞ. Başlıca ince tabakalı pelajik kireçtaşı, kumtaşı, şeyl-marn ardalanması. Çatlaklı ve 3 m'ye dek ayrışmalı VOLKANİK KAYALAR. Başlıca volkanik breş, tüf, tüfit, andezitik ve bazaltik lav, az oranda gri-mavi renkli, ince-katmanlıülüminalı şeyl-killi kireçtaşı ve volkanik malzemece zengin kumtaşı ardalanmasından oluşur. Lav düzeyleri oldukça sert ve dayanımlı, yer yer 4 m'ye dek ayrışmalı ve çatlaklı. FLİŞ. Başlıca pelajik kireçtaşı, şeyl, marn ve türbiditik kumtaşı ardalanmasından oluşur. Kireçtaşları sarı-beyaz renkli, ince-orta-kalın katmanlı, çatlaklı ve killi Şeyl ve marnlar mavi-gri renkli, dilinimli, organik maddece zengin. Kumtaşları ince-orta-kalın katmanlı, dereceli katmanlı, çatlaklı. Yer yer ayrışma gösterir. Çatlaklar genellikle kalsit dolguludur. İnce-orta katmanlı, çatlaklı, kıvrımlı çört (siliş), yumrulu killi kireçtaşı. İnce katmanlı, çatlaklı, kıvrımlı, killi kireçtaşı. Kalın katmanlı, çatlaklı, gözenekli resifal çakıltaşı, çöktür bileşenli taban çakıltaşı. AÇILI UYUMSUZLUK
	AKVEREN	> 750			
		100			
		80			
GEÇ KRETASE ÖNCESİ				YAŞLI TEMEL KAYALAR	Çoğunlukla Paleozoyik ve Triyas yaşlı kireçtaşı, dolomit, değişik tür metamorf ve ofiyolitik kaya topluluğu. Kıvrımlı, kırıklı ve ezik.

Şekil 6.5. Bölgenin genelleştirilmiş dikme kesiti (Basa vd. 1998)

Sakarya ilinde yapılmış olan incelemeler, bölgenin genel olarak yaşlı alüvyon çökellerinden oluştuğunu ortaya koymuştur (Şekil 6.6). Bölgedeki ovalar, kum, silt, kil ve çakıl gibi materyallerden meydana gelmektedir. Bu alüvyonlar, Sakarya Nehri, Çark Suyu ve Mudurnu Çayı tarafından taşınmıştır. Taşınma, KAFZ ve bölgenin güneyindeki kayalardan

gerçekleşmiştir. Adapazarı bölgesinde, Bol (2003) ve Devlet Su İşleri tarafından yapılan çalışmalarda, 200 metrelik sondajlar alüvyon katmanları içinde kalmıştır. Bu da bölgede yoğun bir alüvyon tabakasının bulunduğunu göstermektedir (Bol, 2003).



Şekil 6.6. Sakarya ili jeoloji haritası (Akat vd. 2002)

6.4. Saha Çalışması

Sakarya ili ile ilgili yapılan çalışmalar sonucunda, çalışma bölgesinde yapılan sondaj çalışmasından örselenmemiş numuneler temin edilmiştir. Yapılan 2 adet sondajdan belirli aralıklarla toplam 20 adet örselenmemiş numune temin edilmiştir. Yeraltı su seviyesinin 1m civarında olması nedeni ile alınan numunelerin suya doymun olduğu kabul edilmiştir. Bölgenin sismik özelliklerinin tespitinde, laboratuvar analizleri kadar saha çalışmalarının da önemli bir rolü bulunmaktadır. Bu doğrultuda, arazi koşullarının daha ayrıntılı şekilde değerlendirilmesi ve temin edilen örselenmemiş numunelerin davranışlarının daha doğru analiz edilmesi amacıyla, Standart Penetrasyon Testi (SPT) uygulanmıştır.

SPT, arazide gerçekleştirilen bir deney olup, şahmerdan olarak adlandırılan 63.5kg ağırlığındaki tokmağın, 76cm yükseklikten serbest düşme prensibiyle bırakılması ve Shelby tüpünün zemine 45cm derinliğe kadar çakılması esasına dayanmaktadır. Bu süreçte, tüpün son

30cm'lik ilerlemesi için gereken toplam darbe sayısı, zeminin penetrasyon direnci (SPT-N) olarak tanımlanmaktadır.

Belirlenen sondaj noktalarındaki zemin boşluk oranı, gerilme koşulları, efektif gerilme durumu ve sıkılık gibi parametrelere bağlı olan fiziksel özellikler sergilediğinden, bu değişkenlerin sahada ölçülmesi büyük önem taşımaktadır.

6.5. Laboratuvar Çalışması

Yapılan bu tez kapsamında, deprem bölgesinde gerçekleştirilen sondaj çalışmaları sonucunda temin edilen örselenmemiş numuneler üzerinde zemin özelliklerini belirlemek için bazı deneyler yapılmıştır. Bu deneyler arasında özgül ağırlık, doğal su muhtevası tayini, elek analizi ve kıvam limitleri belirleme deneyleri yer almaktadır (Tablo 6.1). Elde edilen sonuçlar ile ASTM zemin sınıflandırma sistemine göre zemin sınıfı CL olarak belirlenmiştir. Ayrıca, dinamik parametrelerin tespit edilmesi için RC ve TS deney sistemleri kullanılmıştır.

Tablo 6.1. Deneyleri yapılan sondaj kuyuları

SK No	Örselenmemiş Numune No	Tabaka No	Tabaka Kalınlığı (m)	γ (kN/m ³)	c_u (kPa)	PI (%)	Zemin Türü
SK1	UD-1	Tabaka-1	1.5	16.19	40.0	18.0	CL
		Tabaka-2	1.5				
	UD-2	Tabaka-3	1.5	16.19	40.0	18.0	
		Tabaka-4	1.5				
	UD-3	Tabaka-5	1.5	16.40	50.0	20.0	
		Tabaka-6	1.5				
	UD-4	Tabaka-7	1.5	16.40	50.0	20.0	
		Tabaka-8	1.5				
		Tabaka-9	1.5				
	UD-5	Tabaka-10	1.5	17.03	60.0	19.0	
UD-6	Tabaka-11	1.5	17.03	60.0	19.0		
	Tabaka-12	1.5					
UD-7	Tabaka-13	1.5	17.04	70.0	21.0		
	Tabaka-14	1.5					
UD-8	Tabaka-15	1.5	17.04	70.0	21.0		
	Tabaka-16	1.5					
UD-9	Tabaka-17	2.0	17.05	80.0	20.0		
	Tabaka-18	2.0					
UD-10	Tabaka-19	2.0	17.05	80.0	20.0		
SK2	UD-1	Tabaka-1	2.0	16.80	60.0	19.0	CL
		Tabaka-2	2.0				
	UD-2	Tabaka-3	2.0	17.05	70.0	18.0	
		Tabaka-4	2.0				
	UD-3	Tabaka-5	2.0	17.32	80.0	20.0	
	UD-4	Tabaka-6	2.0	17.40	85.0	22.0	
	UD-5	Tabaka-7	2.0	17.50	90.0	21.0	
		Tabaka-8	2.0				
	UD-6	Tabaka-9	2.0	17.80	100.0	20.0	
	UD-7	Tabaka-10	2.0	17.85	105.0	19.0	
UD-8	Tabaka-11	2.0	18.00	110.0	22.0		
	Tabaka-12	2.0					
UD-9	Tabaka-13	2.0	18.30	115.0	23.0		
UD-10	Tabaka-14	2.0	18.50	120.0	21.0		
	Tabaka-15	2.0					

Zeminlerin özgül ağırlığı, katı danelerin birim hacim başına kütlesinin aynı hacimdeki suyun kütlesine oranı olarak tanımlanır. Bu parametre, zeminlerin mühendislik sınıflandırması, boşluk oranı ve doygunluk derecesi gibi birçok hesaplamada temel bir veri olarak kullanılmaktadır.

Zemin içerisindeki su miktarının belirlenmesi, mühendislik özelliklerinin değerlendirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Su muhtevası (w), zemindeki su kütlesinin kuru zemin kütlesine oranı olarak ifade edilir ve genellikle yüzde (%) cinsinden belirtilir. Bu değer, genellikle fırında kurutma yöntemi (105°C sıcaklıkta 24 saat) ile belirlenir ve zeminlerin mukavemet, sıkışma ve plastisite özelliklerini anlamada kritik bir parametre olarak kabul edilmektedir.

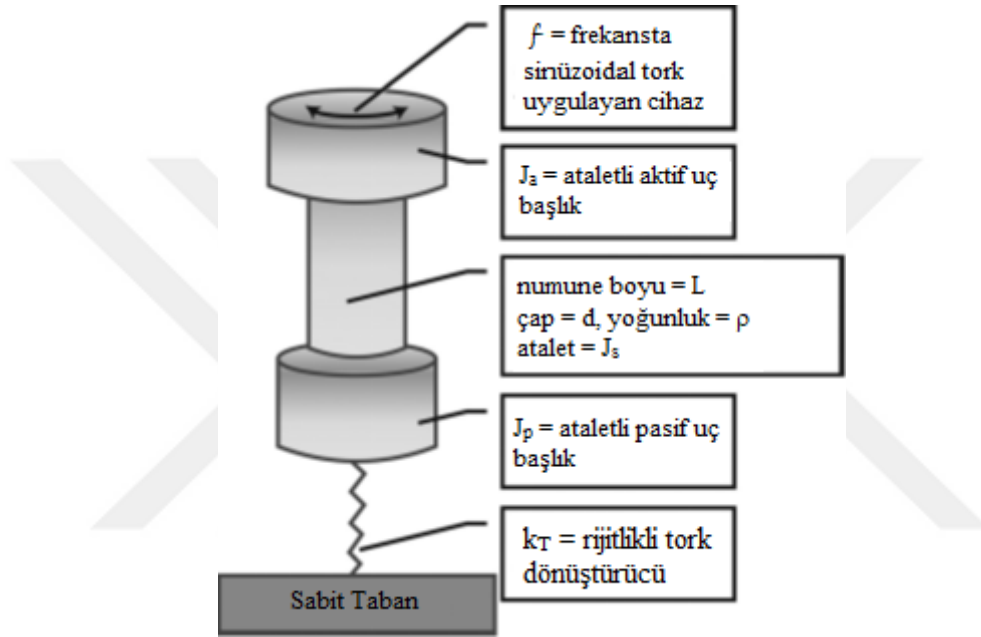
Elek analizi, zeminlerin dane boyu dağılımını belirlemek amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Belirli standartlara sahip (ASTM, TS, BS vb.) eleklerden geçirilerek, farklı boyutlardaki danelerin yüzde dağılımı belirlenir. Bu yöntem ile zeminin kum, çakıl veya silt-kil gibi ince daneli malzeme içerip içermediği tespit edilir ve mühendislik sınıflandırmaları yapılır. Özellikle iri daneli zeminlerin gradasyonunu belirlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kıvam limitleri, ince daneli zeminlerin plastisite özelliklerini belirlemek için kullanılan bir dizi testtir. Bu limitler, zeminlerin su içeriğine bağlı olarak değişen davranışlarını tanımlar ve likit limit (LL), plastik limit (PL) ve plastisite indisini (PI) içerir. LL zemin, sıvı ve plastik arasında geçiş yaptığı noktada ölçülen su içeriğidir. Bu değer, zeminin sıvı hale geldiği, yani akışkanlık kazandığı su içeriğini belirtir. PL zemin, plastik ve yarı katı arasında geçiş yaptığı noktada ölçülen su içeriğidir. Bu değer, zemin daha fazla su almadıkça şekil alabilen ve plastisite gösteren su içeriğini tanımlar. PI, LL ile PL arasındaki farktır ve zeminlerin plastisite derecesini gösterir. Yüksek bir PI değeri, zeminin daha plastik olduğunu ve daha fazla şekil alabileceğini gösterir. Kıvam limitleri, özellikle kil zeminlerin mühendislik özelliklerinin değerlendirilmesinde önemli bir yer tutar ve zeminlerin sıkışabilirlik, dayanım ve işlenebilirlik gibi özelliklerini anlamada kullanılır.

6.6. Örselenmemiş Numuneler Üzerinde RC ve TS Deneylerinin Yapılması

Zemin dinamik özelliklerinin belirlenmesi, deprem mühendisliği ve geoteknik çalışmalar açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, RC deneyi, özellikle zeminlerin kayma modülü ve sönüm oranı gibi parametrelerini belirlemek amacıyla yaygın olarak kullanılan bir laboratuvar yöntemidir. 1930'lu yılların sonlarından itibaren uygulanan bu

yöntem, düşük deformasyon genliklerinde kayma parametrelerini hesaplamaya olanak tanımaktadır. RC deneyi, deprem etkileri, trafik titreşimleri, makine temelleri ve konsolidasyonun gerçekleşmediği statik yükleme koşullarında analiz ve tasarım süreçlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. 1981 yılında ASTM tarafından standartlaştırılan bu deney yöntemi, 1980'lerden itibaren çeşitli araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir. Werden vd. ise 2013 yılında RC deneyine yönelik yeni bir yaklaşım sunarak, yarı-sabit tabanlı ve serbest başlığa sahip burulmalı kesme cihazını tanıtmıştır (Şekil 6.7). Bu yeni sistemde, tork gücünü aktaran rijit başlık, sabit hazne tabanı ile alt taban arasına yerleştirilmiştir.

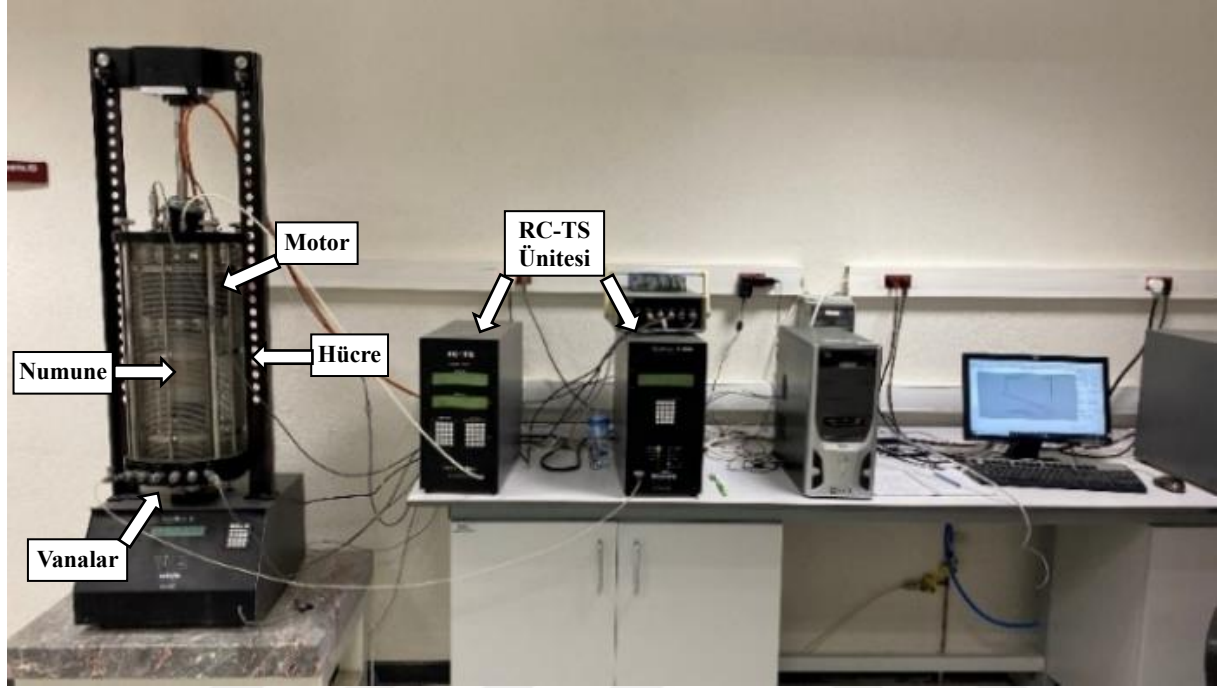


Şekil 6.7. Rezonant kolon cihazı

Deney sürecinde, yüksek kapasiteye sahip tork motoru aracılığıyla üst baskı levhasına hareket kazandırılarak, bu levhanın açısız yer değiştirilmesi, numune tabanında oluşan tork ve uyarma frekansı ölçülmektedir. Elde edilen bu veriler doğrultusunda, alt baskı levhası için bir denge denklemi türetilmiş ve numunenin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla bir rijitlik matrisi oluşturulmuştur. Bu yaklaşım, kayma modülü ile sönüm oranının, daha geniş bir deformasyon ve frekans aralığında, yüksek hassasiyetle ve tekrarlanabilir şekilde hesaplanmasına olanak tanımaktadır. Drnevich vd. (2014), Werden vd. (2013) tarafından geliştirilen yeni RC cihazının sağladığı yenilikleri değerlendirerek, bu sistemin ASTM D4015 standardındaki değişikliklerle olan ilişkisini incelemiştir. Geleneksel RC cihazlarında, üst başlıkta meydana gelen burulma direncinin sönüm oranlarını etkilediği ifade edilmiştir. Ancak, yeni sistemde ölçülen torkun yalnızca numune tarafından iletilmesi sağlanarak bu olumsuz etki

ortadan kaldırılmıştır. Bunun yanı sıra, tork motorunun kullanımı sayesinde elektromanyetik osilatörlerin yapısal sınırlamalarından kaynaklanan problemlerin giderildiği belirtilmiştir.

Sonuç olarak, bu araştırmada zeminlerin dinamik özelliklerini analiz etmek amacıyla, Werden vd. (2013) tarafından geliştirilen RC ve TS cihazı kullanılmıştır (Şekil 6.8).



Şekil 6.8. RC-TS cihazı

RC deneyinin uygulanması, belirli aşamaların titizlikle takip edilmesini gerektirir.

Deneyin gerçekleştirilme süreci incelendiğinde ilk aşamada, zemin numunesinin hazırlanması işlemi gerçekleştirilir. Numune, laboratuvar standartlarına uygun olarak seçilir ve homojen bir yapıda olması sağlanır. Eğer deney doygun numuneler üzerinde gerçekleştirilecekse, numunenin tam doygun hâle getirilmesi ve boşluk suyu basıncının dengelenmesi için gerekli önlemler alınır. Hazırlanan numune, RC cihazında test edilebilecek şekilde uygun ölçülere getirilir. Bu çalışmada sahadan temin edilen numuneler 70x140 mm boyutunda deneye tabi tutulmuştur.

Numune hazırlandıktan sonra, deney cihazına yerleştirilmesi gerekmektedir. Numune, RC deney sistemine dikkatlice yerleştirilerek, alt ve üst başlıklardan sıkıca sabitlenir. Cihazın tüm bağlantıları kontrol edilerek deneyin sağlıklı bir şekilde yürütülmesi için gerekli önlemler alınır. Numune cihaza yerleştirildikten sonra hücre kapatılır ve hücre içerisine çevresel basınç verebilmek için su doldurulur. Deney öncesinde, başlangıç koşullarının ayarlanması önem taşımaktadır. Numuneye uygulanacak çevresel basınç belirlenerek deney sistemine tanıtılır.

Ardından, sistemin stabil hâle gelmesi için statik yükleme gerçekleştirilir ve numunenin dengeye ulaşması beklenir. Bu aşama, deneyin hassasiyetini doğrudan etkileyen faktörlerden biri olduğundan, dikkatlice yürütülmelidir. Başlangıç koşullarının dengeye ulaşmasının ardından doyurma işlemine geçilir. Doyurma yani $B=0.95$ oluncaya kadar devam eder. B değerinin istenilen rakama ulaşmasının ardından konsolidasyon aşamasına geçilir. Numune konsolide olduktan sonra RC cihazı aracılığıyla numuneye belirli bir genlikte sinüzoidal tork ya da eksenel titreşim uygulanır. Numune, farklı frekans aralıklarında titreşime tabi tutularak rezonans frekansı belirlenmeye çalışılır. Titreşim sırasında, numunenin davranışını ölçmek için gelişmiş sensörler kullanılır ve zamana bağlı deformasyon verileri kaydedilir. Deney sırasında, numunenin rezonans frekansının belirlenmesi, dinamik parametrelerin hesaplanabilmesi açısından kritik bir aşamadır. Numunenin maksimum genlikte titreşim yaptığı frekans belirlenerek bu noktada elde edilen veriler kaydedilir. Rezonans frekansının tespit edilmesi, numunenin elastik davranışını anlamak açısından büyük önem taşımaktadır. Rezonans frekansının belirlenmesinin ardından, kayma modülü ve sönüm oranının hesaplanması işlemleri gerçekleştirilir. Kayma modülü, rezonans frekansı ile numunenin fiziksel özellikleri arasındaki ilişkiye dayanarak hesaplanır. Sönüm oranı ise, numunenin titreşimlerinin zamanla azalmasıyla belirlenen bir parametredir ve zeminin enerji kaybı kapasitesini ifade eder. Bu hesaplamalar, zemin malzemesinin dinamik yükler altındaki davranışına ilişkin önemli bilgiler sunar.

Son olarak, verilerin analizi ve yorumlanması aşamasına geçilir. Deneyden elde edilen ölçümler grafiksel olarak işlenir ve numunenin dinamik özellikleri detaylı bir şekilde değerlendirilir. Kayma modülü ve sönüm oranı gibi parametrelerin deformasyon ile ilişkisi incelenerek zeminin mühendislik açısından taşıdığı riskler belirlenir. Bu analizler sonucunda, zeminin deprem yükleri altındaki davranışı ve yapısal stabilite üzerindeki etkileri hakkında çıkarımlar yapılabilir.

Sonuç olarak, RC deneyi, zeminlerin dinamik yükler altında sergilediği özelliklerin anlaşılmasını sağlayan önemli bir test yöntemidir. Özellikle geoteknik mühendisliği ve dinamik çalışmalar açısından büyük bir öneme sahip olan bu deney, zeminin kayma modülü ve sönüm oranı gibi kritik parametrelerinin belirlenmesine olanak tanır. Bu sayede, zeminlerin mühendislik tasarım süreçlerinde nasıl davranacağı öngörülerek güvenli yapısal çözümler üretmek mümkün hâle gelir.

Çalışmada kullanılan RC sistemi, üç farklı deney yöntemiyle analiz yapılmasını sağlamaktadır. Rezonans deneyinde, numunenin rezonans frekansı belirlenerek farklı uyarım seviyelerinde kayma modülü ve sönüm oranı ölçülmektedir. Rezonans tarama yönteminde,

belirlenen frekans aralığında rezonans frekansı değiştirilerek kayma modülü ve sönüm oranı hesaplanmaktadır. Genlik taraması ise, sabit bir frekansta uyarım seviyesini değiştirerek bu parametrelerin belirlenmesini amaçlamaktadır.

Bu çalışmada, tüm numunelere %1 şekil değiştirme değerine ulaşana kadar rezonans yöntemi uygulanmış ve maksimum kayma modülü ile ilgili frekanslar tespit edilmiştir. Ayrıca, dinamik kayma modülü hesaplanarak kayma modülü eğrisi ve sönüm oranları belirlenmiştir.

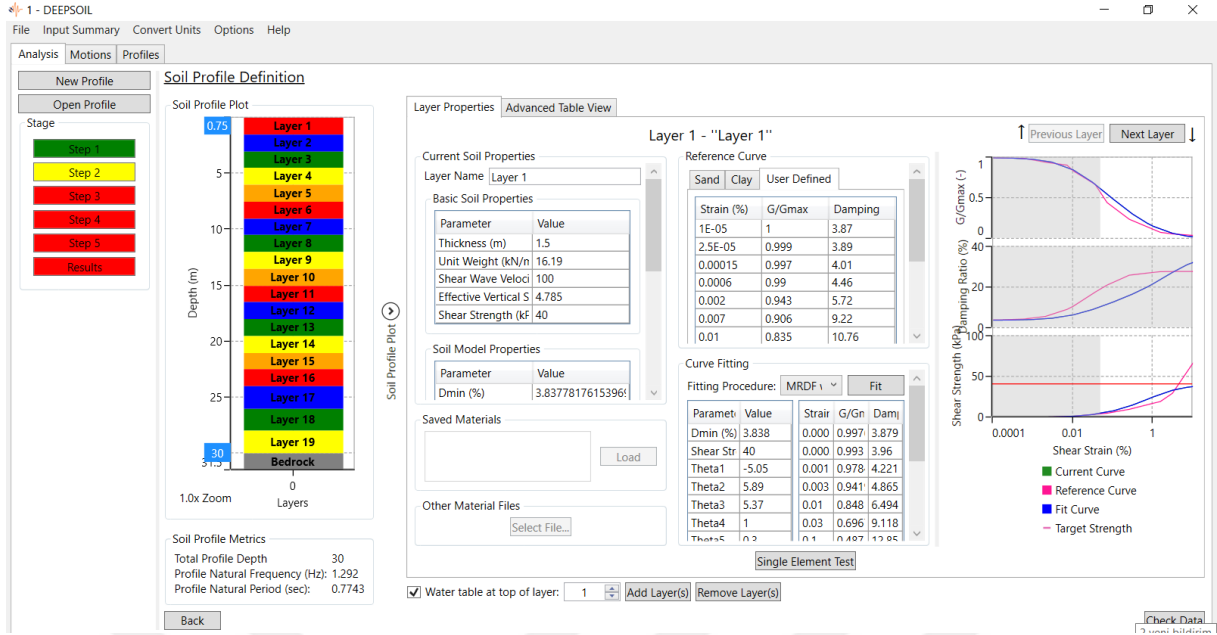
RC deneyinde %1 şekil değişimine uğrayan numuneler, %10 şekil değiştirmeye kadar sinüzoidal yükleme ile TS deneyine tabi tutulmuştur. Bu deneyler sonucunda kayma modülleri ve sönüm oranları belirlenerek kayma modülü eğrileri oluşturulmuştur.

6.7. Sahaya Özel Zemin Büyütme Analizlerinin Yapılması

Zeminlerin sahaya özel davranışları belirlenirken araştırmacılar tarafından çeşitli yazılımlar kullanılmaktadır. Bu alanda kullanılan ilk yazılım, kayma dalgalarının etkisi altında dalga yayılma çözümlmelerini temel alan SHAKE yazılımıdır. Ardından geliştirilen EERA yazılımı ve 1998 yılında zeminlerin 1D analizlerinde kullanılan DEEPSOIL programı bulunmaktadır.

Bu çalışmada, Hashash ve çalışma arkadaşları tarafından geliştirilen DEEPSOIL yazılımı aracılığıyla, belirli bir sahaya özel 1D zemin büyütme analizleri gerçekleştirilmiştir. Söz konusu yazılım, EL ve NL analizleri hem frekans hem de zaman tanım alanlarında uygulayabilme yeteneğine sahiptir. Zemin profili ve yer hareketi girdileri tanımlandıktan sonra yürütülen analizler sonucunda, her bir zemin katmanına ait ivme, kayma gerilmesi, büyütme oranı, Fourier genlik spektrumu ile genel davranış spektrumu gibi çıktılar elde edilmektedir.

Yazılım arayüzünde analiz tipi, hesaplama yöntemi, efektif gerilme ile boşluk suyu basıncı modellemesi ve kullanılacak birim sistemi kullanıcı tarafından seçilmekte; ardından, zemin katmanlarına ilişkin isim, kalınlık, birim hacim ağırlığı ve kayma dalgası hızı gibi geoteknik parametreler girilmektedir. Bir sonraki adımda ise, her bir katman için kayma gerilmesi, G/G_{max} eğrileri ile sönüm oranı eğrilerinin tanımlanması gerekmektedir. Bu çalışmada, ilgili eğriler sahaya özel olarak elde edilen örselenmemiş numuneler üzerinden laboratuvar ortamında belirlenmiş ve yazılıma manuel olarak entegre edilmiştir (Şekil 6.9).



Şekil 6.9. DEEPSOIL programına verilerin tanıtılması

Programa tanımlanan eğriler, gerçekleştirilecek analizlerde referans olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, programda zemin türüne bağlı olarak farklı referans eğriler de seçilebilir. Bu aşamanın ardından, bölgeye uygun seçilen depremlere ait ivme kayıtlarıyla analizler yapılmaktadır.

Sahaya özel zemin büyütme analizleri DEEPSOIL programında yapıldıktan sonra OPENSEES yazılımında oluşturulan kod ile tekrar yapılarak sonuçlar karşılaştırılacaktır. Sahaya özel zemin büyütme analizleri zemin özelliklerinin ve yapı-zemin etkileşiminin daha doğru bir şekilde değerlendirilmesi amacıyla yapılan önemli mühendislik çalışmalarındandır. Bu analizler, özellikle sismik yer hareketlerinin zemin üzerinde yarattığı etkilerin incelenmesi için kritik bir rol oynamaktadır. OPENSEES programı, zemin büyütme analizlerinin gerçekleştirilmesinde güçlü bir araç sunarak, doğrusal ve doğrusal olmayan zemin davranışlarını modelleme imkânı sağlamaktadır. Yazılım, zeminlerin dinamik özelliklerini, sismik ivme kayıtlarına göre nasıl tepki verdiğini ve yer hareketlerinin zemin üzerindeki etkilerini simüle etmede kullanılır. Zemin büyütme analizlerinde, özellikle zemin katmanlarının dinamik özellikleri, zemin sıvılaşması, zemin ile yapının etkileşimi ve sismik zemin davranışı gibi faktörler göz önünde bulundurulur. OPENSEES, bu tür karmaşık analizlerin doğru bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak tanır ve zemin davranışının farklı yükleme koşullarında nasıl değişeceğini öngörmeye yardımcı olur.

Sahaya özel zemin büyütme analizlerinde, yerel zemin koşulları ve deprem ivme kayıtları kullanılarak yapılan analizlerde OPENSEES'in özelleştirilebilir malzeme modelleri ve

zemin-yapı etkileşimi çözümleri, mühendislerin yerel koşullara uygun doğru simülasyonlar yapabilmesini sağlar. Yazılım, zaman tanım alanında analizler yaparak, zeminin depremsel büyütme etkilerini dinamik olarak modeller ve bu sayede zemin büyütmesinin yapının performansı üzerindeki etkileri kullanıcı tarafından değerlendirilir. Ayrıca, OPENSEES'in gelişmiş hesaplama algoritmaları ve esnek analiz seçenekleri, zemin büyütme analizi yapılacak saha verilerini (sondaj sonuçları, zemin katmanlarının özellikleri, yerel deprem hareketleri vb.) doğru bir şekilde entegre etme imkânı sunar. Bu sayede, saha koşullarına özel daha gerçekçi analizler yapılır ve yapıların deprem güvenliği daha güvenilir bir şekilde değerlendirilir.

Sonuç olarak, OPENSEES, sahaya özel zemin büyütme analizlerinin gerçekleştirilmesinde sağladığı özelleştirilmiş analiz araçları, dinamik modelleme kapasitesi ve esneklik ile geoteknik mühendisliğinde önemli bir yazılım aracı olarak kullanılmaktadır. Bu yazılım, mühendislerin saha verilerine dayalı olarak daha doğru ve güvenilir sonuçlar elde etmelerini sağlamak ve zemin-yapı etkileşimlerinin deprem koşullarındaki etkilerini daha ayrıntılı bir şekilde incelemelerine olanak tanımaktadır.

6.7.1. Bölgeye Uygun Depremlerin Seçimi

Sahaya özel analizlerde kullanılacak deprem kayıtlarının, bölgenin sismik özelliklerini doğru bir şekilde yansıtması gerekmektedir. Zaman tanım alanında gerçekleştirilen deprem hesaplamalarında, deprem kayıtlarının seçimi; tasarıma esas olan deprem yer hareketi düzeyiyle uyumlu deprem büyüklükleri, fay uzaklıkları, kaynak mekanizmaları ve yerel zemin koşulları göz önünde bulundurularak yapılacaktır. Eğer çalışma bölgesindeki tasarıma esas deprem yer hareketi düzeyiyle uyumlu geçmiş deprem kayıtları mevcutsa, öncelikle bu kayıtların kullanılması gerekmektedir (TBDY, 2018).

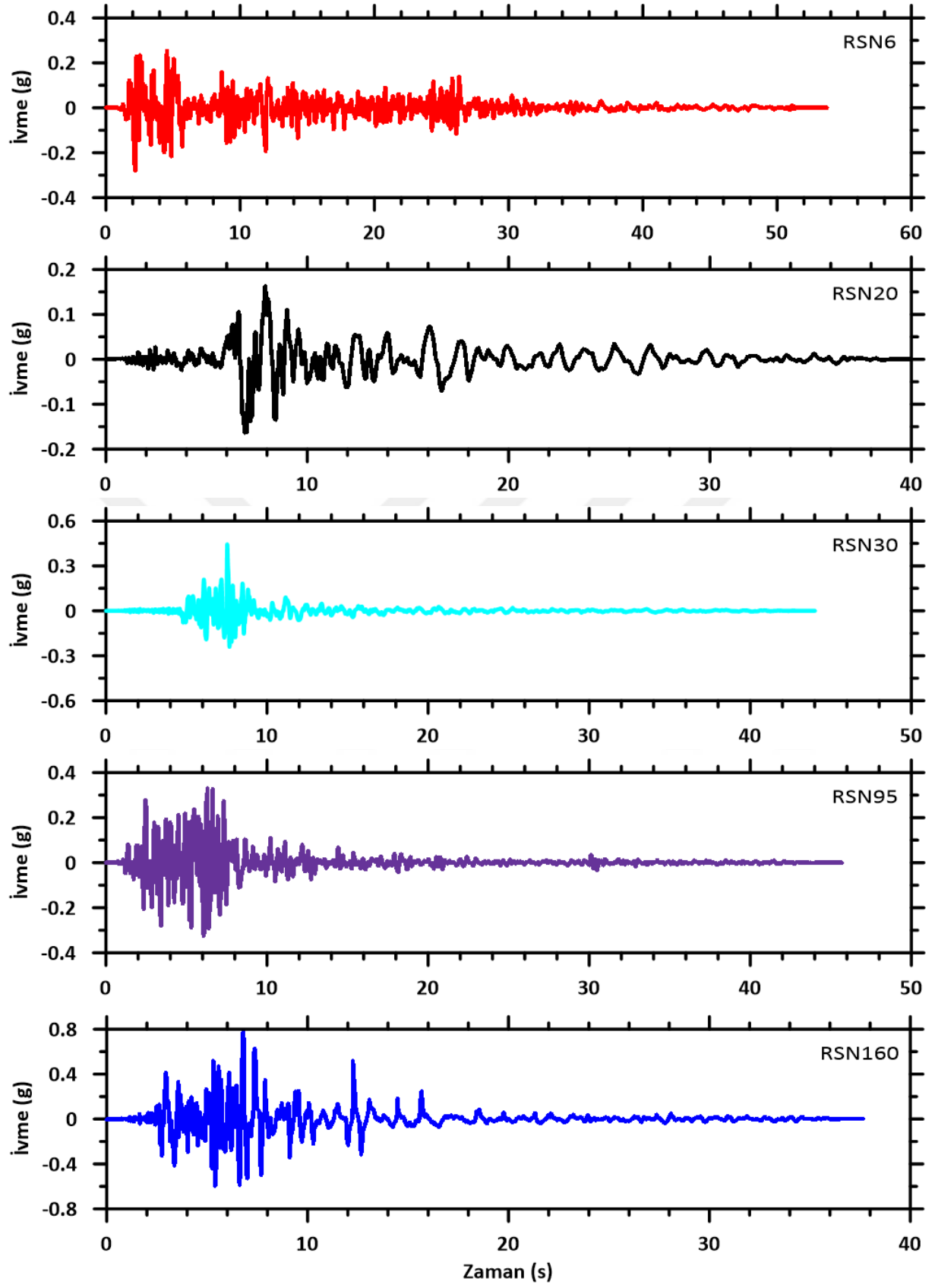
Bu kapsamda, PEER tarafından paylaşılan deprem ivme kayıtları incelenmiş ve 17 adet deprem ivme kaydı seçilmiştir. Yapılan tarama sonucunda seçilen bu deprem kayıtları Tablo 6.2'de sunulmuştur.

Gerçekleştirilen tarama çalışması sonucunda, bölgenin sismik karakteristiklerini temsil eden ve büyüklükleri $M_w:6$ ile 7.5 arasında değişen doğrultu atımlı fay mekanizmalarına sahip depremlerin yüzeye en yakın istasyon kayıtları seçilmiştir. Bu kayıtlara ait ivme verileri Şekil 6.10'da ve bu depremlere ait spektral ivme değerleri Şekil 6.11'de gösterilmiştir. Bu kayıtlar incelendiğinde, benzer jeolojik yapı ve kırılma özelliklerine sahip olmalarına rağmen, kayıtların frekans içerikleri, süreleri, pik ivme değerleri ve diğer dinamik parametreler açısından birbirlerinden önemli ölçüde farklılık gösterdiği görülmektedir. Seçilen depremlerin bu

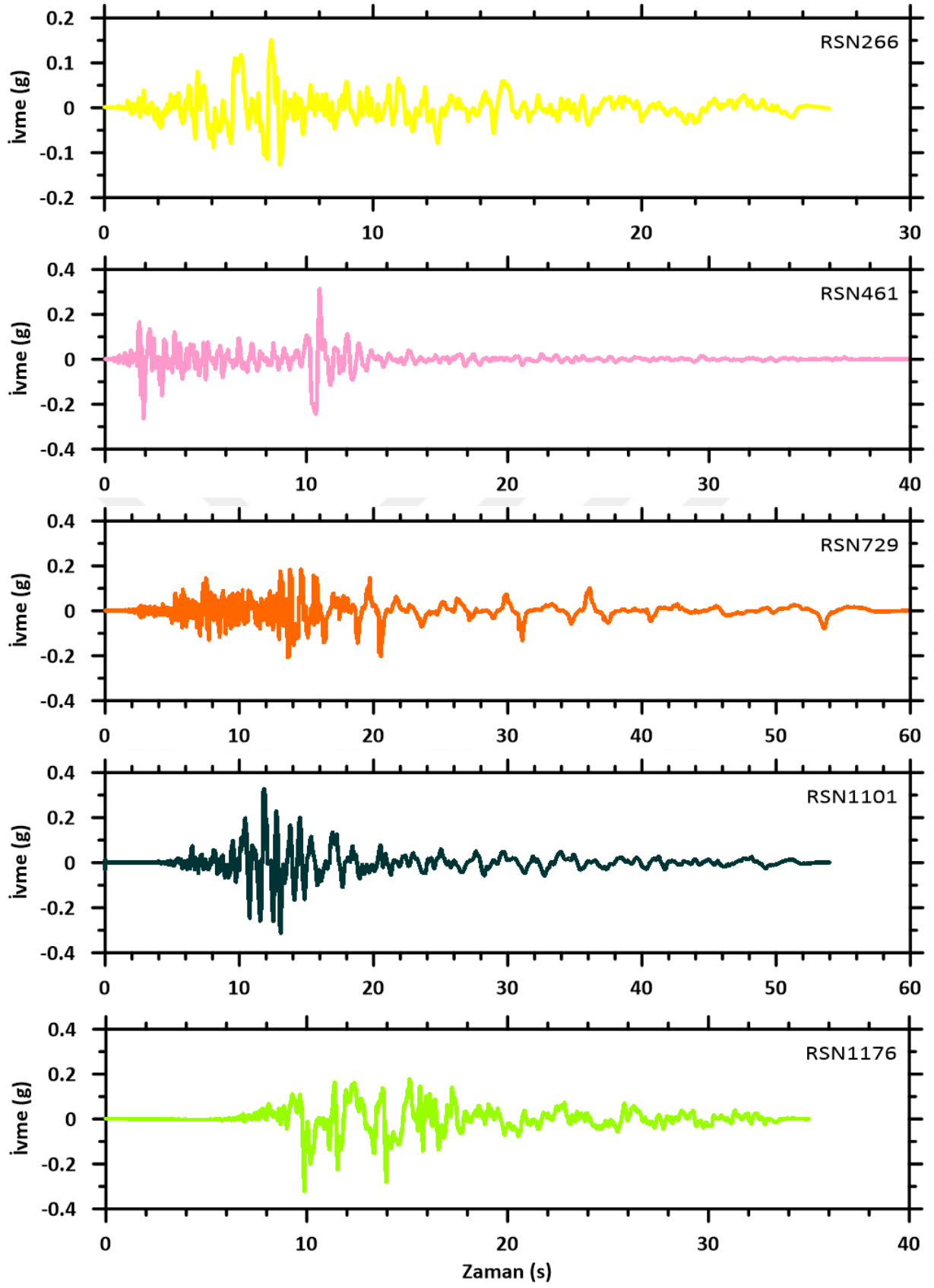
çeşitliliği, ilgili yönetmeliğin saha özelinde yapılacak analizler için öngördüğü en az 11 farklı deprem kaydı koşulunu karşılamaktadır.

Tablo 6.2. Seçilen depremler

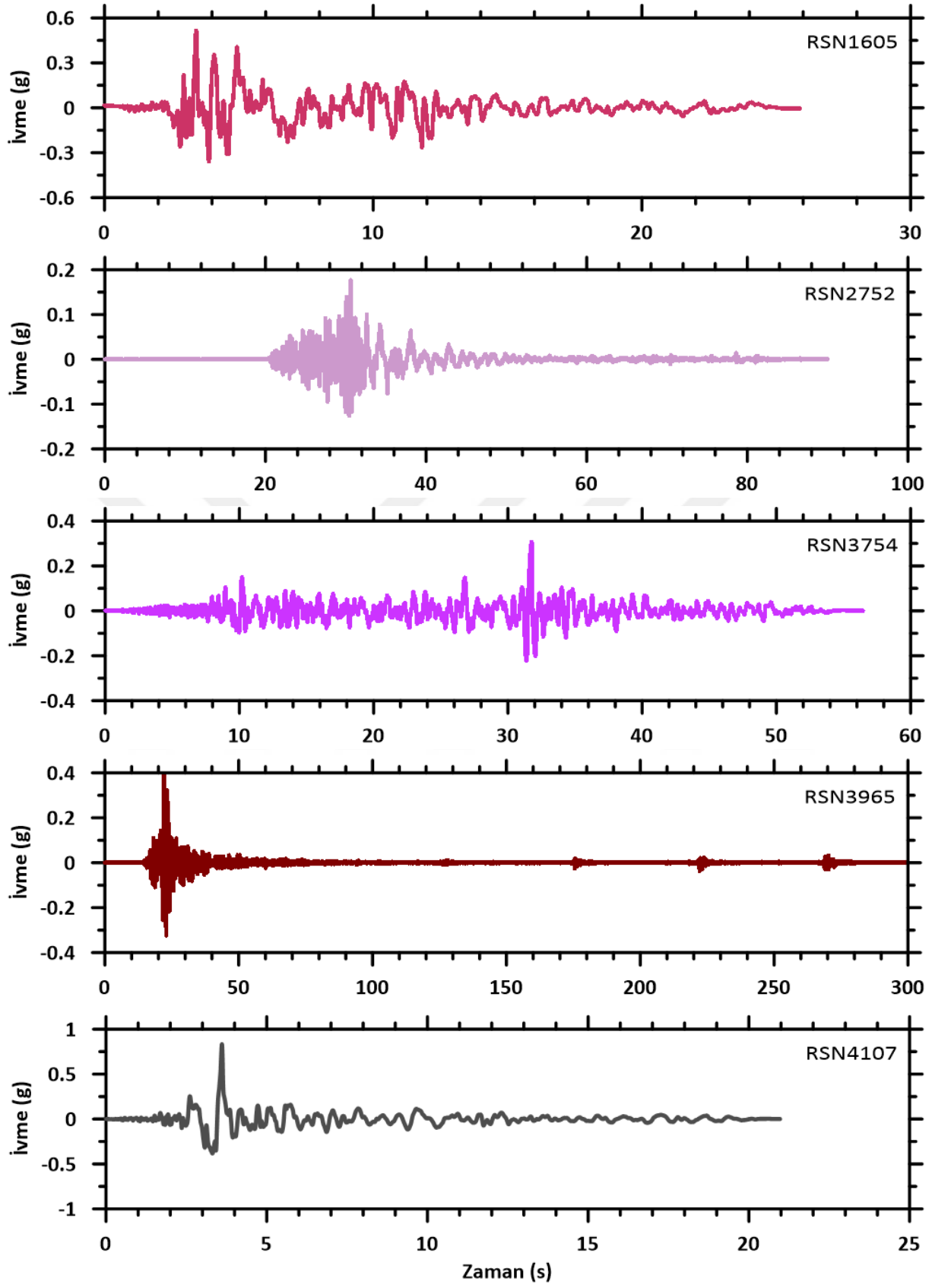
	Deprem	Yıl	Mw	Fay tipi	R _{jb} (km)	V _{s,30} (m/s)	PGA (g)	PGV (m/s)	PGD (m)
1	Imperial Valley-02 (RSN6)	1940	6.95	Doğrultu atımlı	6.09	213.44	0.28	0.31	0.087
2	Northern Calif-03 (RSN20)	1954	6.5	Doğrultu atımlı	26.72	219.31	0.16	0.36	0.15
3	Parkfield (RSN30)	1966	6.19	Doğrultu atımlı	9.58	289.56	0.44	0.25	0.058
4	Managua Nicaragua-01 (RSN95)	1972	6.24	Doğrultu atımlı	3.51	288.77	0.33	0.31	0.062
5	Imperial Valley-06 (RSN160)	1979	6.53	Doğrultu atımlı	0.44	223.03	0.78	0.45	0.15
6	Victoria_Mexico (RSN266)	1980	6.33	Doğrultu atımlı	18.53	242.05	0.15	0.26	0.14
7	Morgan Hill (RSN461)	1984	6.19	Doğrultu atımlı	3.45	281.61	0.31	0.39	0.07
8	SuperstitionHills-02 (RSN729)	1987	6.54	Doğrultu atımlı	23.85	179	0.21	0.36	0.29
9	Landers (RSN3754)	1992	7.28	Doğrultu atımlı	48.84	292.12	0.31	0.36	0.094
10	Kobe_Japan (RSN1101)	1995	6.9	Doğrultu atımlı	11.34	256	0.33	0.45	0.28
11	Duzce_Turke (RSN1605)	1999	7.14	Doğrultu atımlı	0	281.86	0.51	0.84	0.48
12	Kocaeli_Turkey (RSN1176)	1999	7.51	Doğrultu atımlı	1.38	297	0.23	0.7	0.62
13	Chi-Chi_Taiwan-04 (RSN2752)	1999	6.2	Doğrultu atımlı	21.62	258.89	0.18	0.18	0.081
14	Tottori_Japan (RSN3965)	2000	6.61	Doğrultu atımlı	6.86	139.21	0.39	0.54	0.21
15	Parkfield-02_CA (RSN4107)	2004	6	Doğrultu atımlı	0.02	178.27	0.83	0.81	0.11
16	ElMayor-Cucapah_Mexico (RSN5827)	2010	7.2	Doğrultu atımlı	13.21	242.05	0.54	0.62	0.35
17	Darfield_NewZealand (RSN6927)	2010	7	Doğrultu atımlı	5.07	263.2	0.46	1.1	0.67



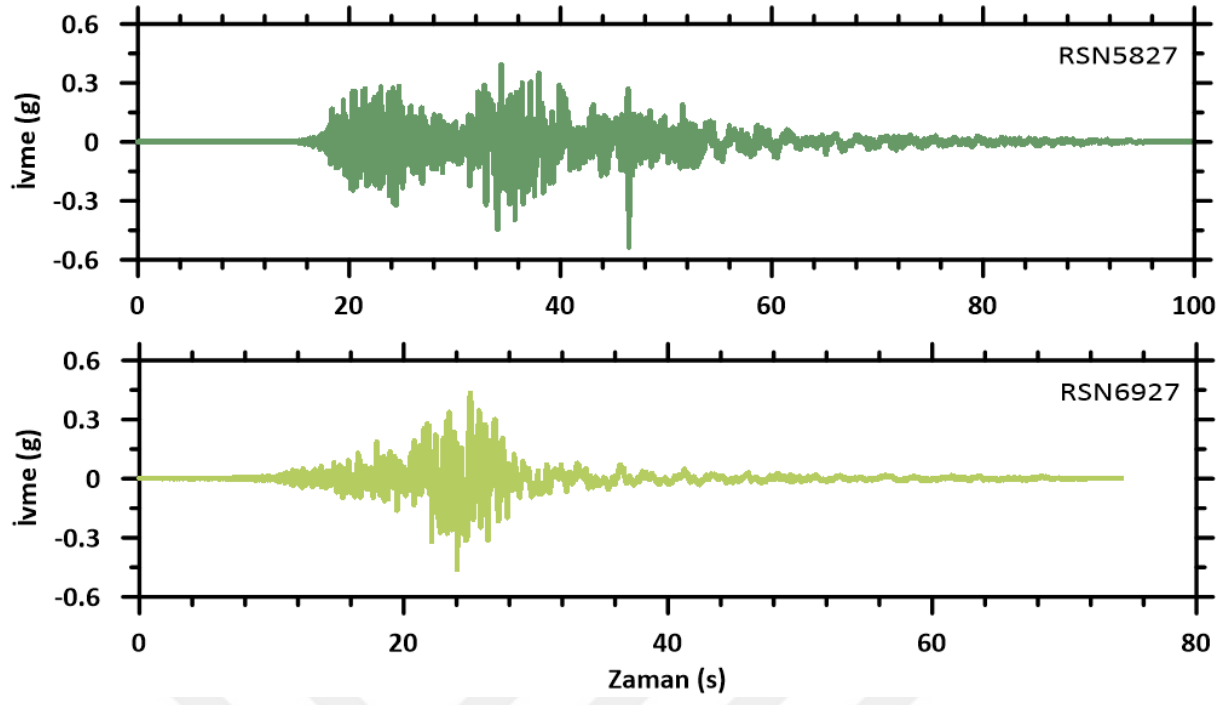
Şekil 6.10. Analizlerde kullanılacak olan 17 adet depreme ait ivme-zaman grafikleri



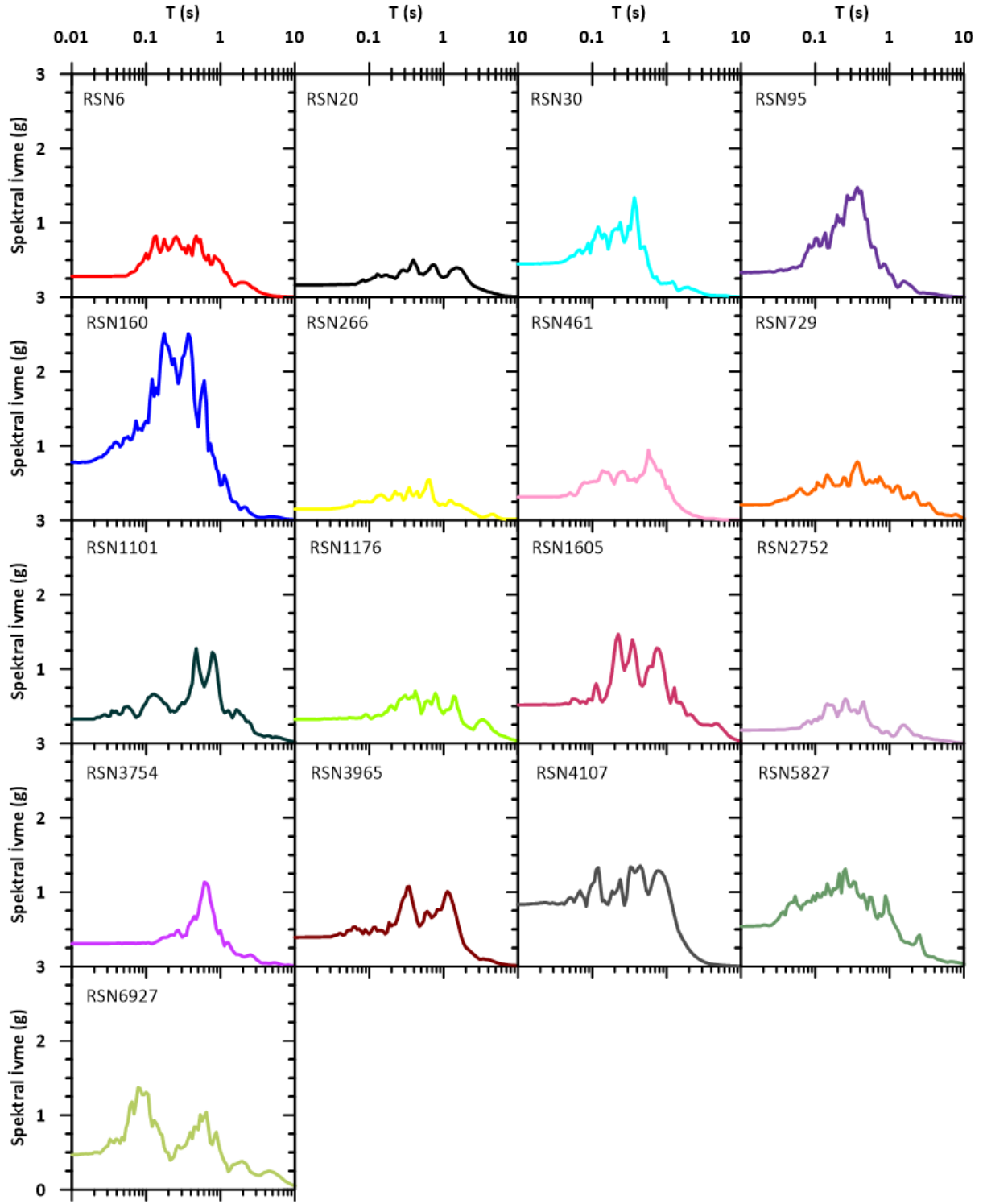
Şekil 6.10. Analizlerde kullanılacak olan 17 adet depreme ait ivme-zaman grafikleri (devam)



Şekil 6.10. Analizlerde kullanılacak olan 17 adet depreme ait ivme-zaman grafikleri (devam)



Şekil 6.10. Analizlerde kullanılacak olan 17 adet depreme ait ivme-zaman grafikleri (devam)



Şekil 6.11. Analizlerde kullanılacak olan deprem kayıtlarının spektral ivme-periyot grafikleri

6.7.2. Analizlerde Kullanılacak Olan Depremlerin Ölçeklendirilmesi

Geoteknik mühendisliğinde yapıların sismik performansını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen dinamik analizler, seçilen deprem kayıtlarının uygun bir şekilde ölçeklendirilmesini gerektirir. Deprem ölçeklendirme, yapının dinamik karakteristikleriyle

uyumlu yer hareketleri kullanılarak gerçekçi ve güvenilir analiz sonuçları elde edilmesini amaçlamaktadır.

Ölçeklendirme yöntemleri genellikle iki ana kategoriye ayrılmaktadır: Basit ölçeklendirme (zaman tanım alanında) ve spektral uyumlu ölçeklendirme (frekans tanım alanında). Zaman tanım alanındaki ölçeklendirme, seçilen deprem kaydının tüm ivme değerlerinin sabit bir katsayı ile çarpılması esasına dayanırken, frekans tanım alanındaki ölçeklendirme belirli bir referans spektrumuna en iyi şekilde uyum sağlayacak şekilde kayıtların frekans içeriğinin değiştirilmesini içerir.

Ölçeklendirme işlemi, yapıların dinamik özelliklerine uygun gerçekçi analiz sonuçları elde edilmesini sağlamak için büyük önem taşımaktadır. Yanlış ölçeklendirilmiş deprem kayıtları, yapının gerçekte maruz kalacağı etkileri olduğundan farklı gösterebilir ve tasarım sürecinde hatalara yol açabilir. Bu nedenle, kullanılacak olan yönetmeliğin sunduğu kriterlere uygun bir ölçekleme yöntemi kullanılarak, güvenli ve ekonomik tasarım ilkelerine bağlı kalınması sağlanmalıdır. Ölçeklendirme işlemi, yapının doğrusal olmayan davranışlarını göz önünde bulunduracak şekilde gerçekleştirildiğinde, analizin doğruluğunu artırır ve yapı tasarımında daha güvenilir kararların alınmasını sağlar (Chopra, 2017).

Deprem ivme kayıtları üç farklı yöntemle temin edilebilmektedir: yapay deprem kayıtları, simüle edilmiş kayıtlar ve gerçek deprem kayıtları (Özdemir ve Fahjan, 2007; Fahjan, 2008). Farklı yönetmeliklerde tanımlanan sismolojik kriterlere uygun olarak ölçeklendirilmiş deprem kayıtları kullanılarak, deprem etkilerinin zemin büyüme mekanizması üzerindeki rolü üzerine çeşitli araştırmalar gerçekleştirilmektedir (Alielahi ve Adampira, 2016; Ebrahimi Motlagh ve Rahai, 2017; Rodrigues vd., 2018; Arslan vd., 2018).

TBDY 2018 kapsamında, seçilen deprem ivme kayıtlarının basit ölçeklendirme yöntemi kullanılarak düzenlenmesi zorunlu kılınmıştır. Bu doğrultuda, AFAD tarafından sağlanan interaktif web tabanlı uygulama aracılığıyla, belirlenen koordinatlar için önerilen zemin davranış spektrumu elde edilmekte ve analiz süreçlerinde kullanılmaktadır (Şekil 6.12).

Çalışmanın yürütüldüğü bölgeye ilişkin, ilgili yönetmelikte belirtilen saha koşulları (anakaya) aşağıda sunulmuştur. Ayrıca, bölge için belirlenen hedef tasarım spektrumu grafiksel olarak Şekil 6.13’de gösterilmiştir.

Belirlenen deprem yer hareketi düzeyi, DD-2 olarak tanımlanmış olup, bu düzey 50 yıl içinde aşılma olasılığı %10 olan (yaklaşık 475 yıl tekrarlanma periyoduna sahip) bir deprem yer hareketi düzeyini temsil etmektedir.

Yerel zemin sınıfı: ZE Enlem: 40.637903° Boylam: 30.635055°

$S_s = 1.759$ $S_1 = 0.475$ $S_{DS} = 1.407$ $S_{D1} = 1.069$

$PGA = 0.715$ $PGV = 56.110$

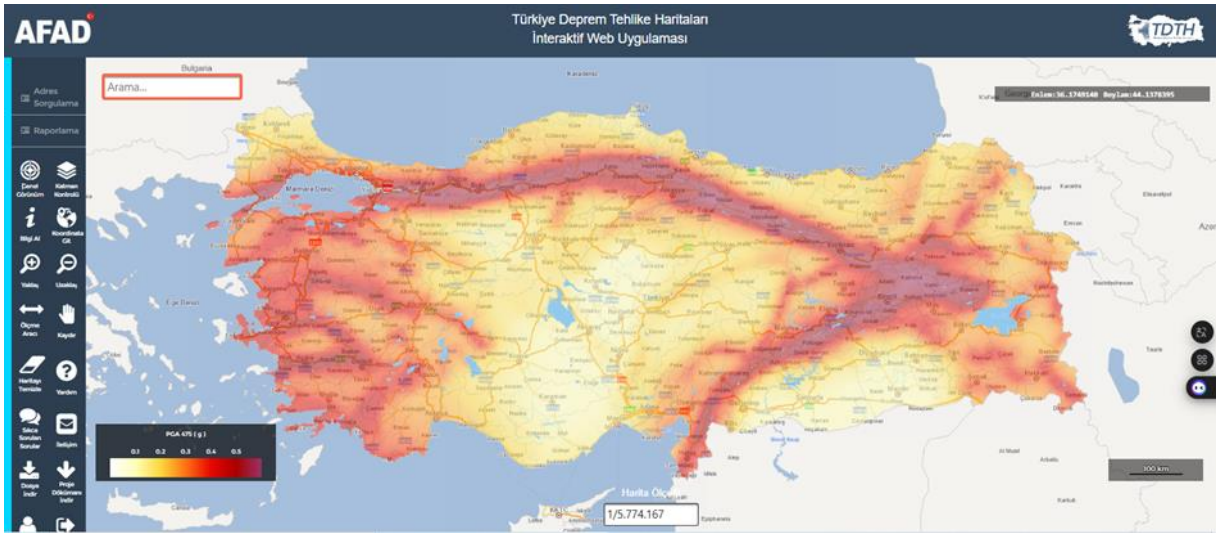
S_s : Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı [boyutsuz],

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

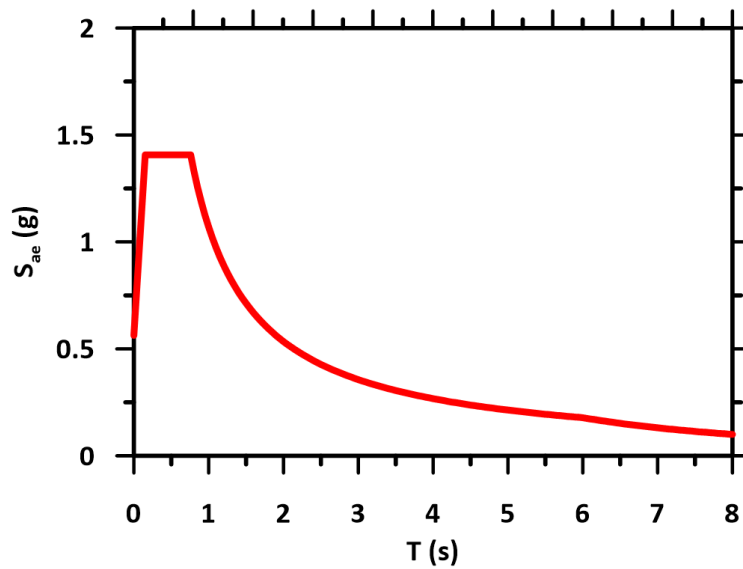
S_{DS} : Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı [boyutsuz],

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].



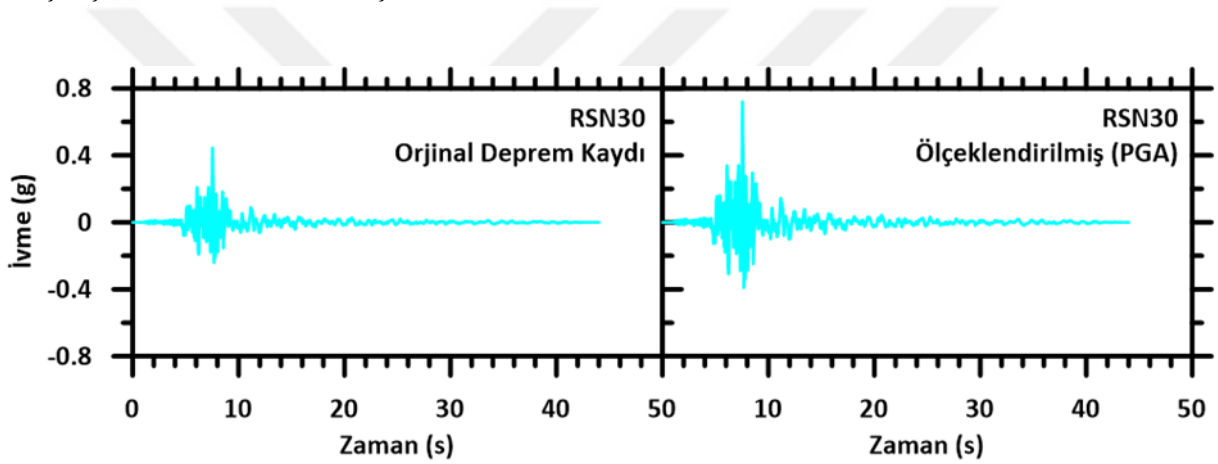
Şekil 6.12. AFAD interaktif web uygulaması



Şekil 6.13. Hedef tasarım spektrumu (AFAD, 2024)

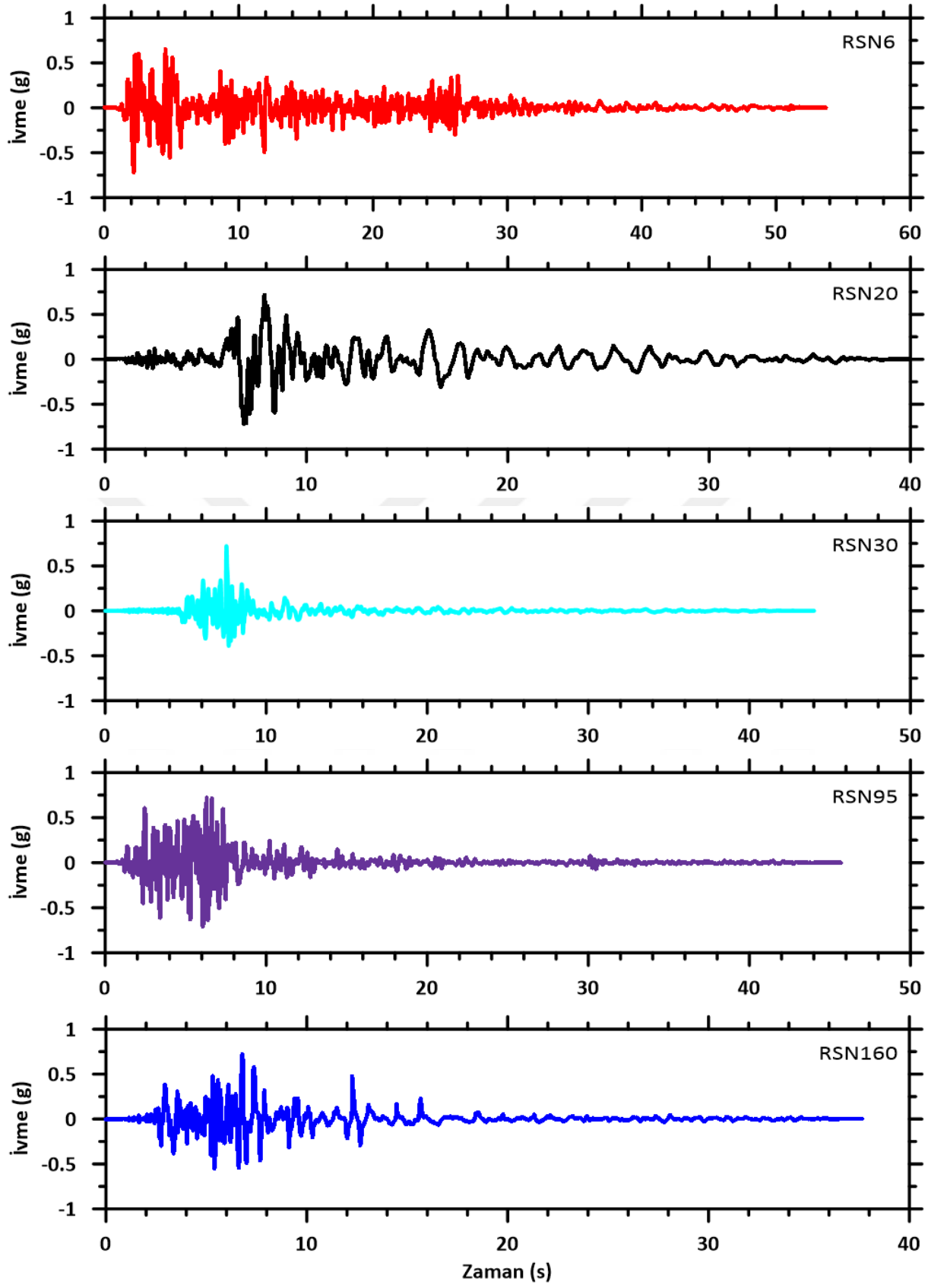
Basit ölçeklendirme yöntemi, bölgenin PGA değeri esas alınarak zaman tanım alanında gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada, kullanılan tüm deprem ivme kayıtları öncelikli olarak zaman tanım alanında PGA değerine göre ölçeklendirilmiştir.

Basit ölçeklendirme işlemi olarak adlandırılan zaman tanım alanında yapılan ölçeklendirme sonucunda, ivme kaydının genlik değerlerinde belirgin değişiklikler meydana gelmiştir. Bu yöntem, kaydın frekans içeriğini değiştirmeden yalnızca genlik ölçeklendirmesi yaptığı için, zaman serisi içerisindeki ivme değerleri PGA değeri doğrultusunda artırılmış veya azaltılmıştır. Özellikle, ölçekleme katsayısına bağlı olarak, kaydın maksimum ivme değerinde değişim gözlemlenmiş, ancak ivmenin zaman içerisindeki dağılımı korunmuştur. Şekil 6.14'de, RSN30 "Parkfield" depremine ait orijinal deprem ivme kayıtları ve ölçeklendirilmiş (PGA) hali karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

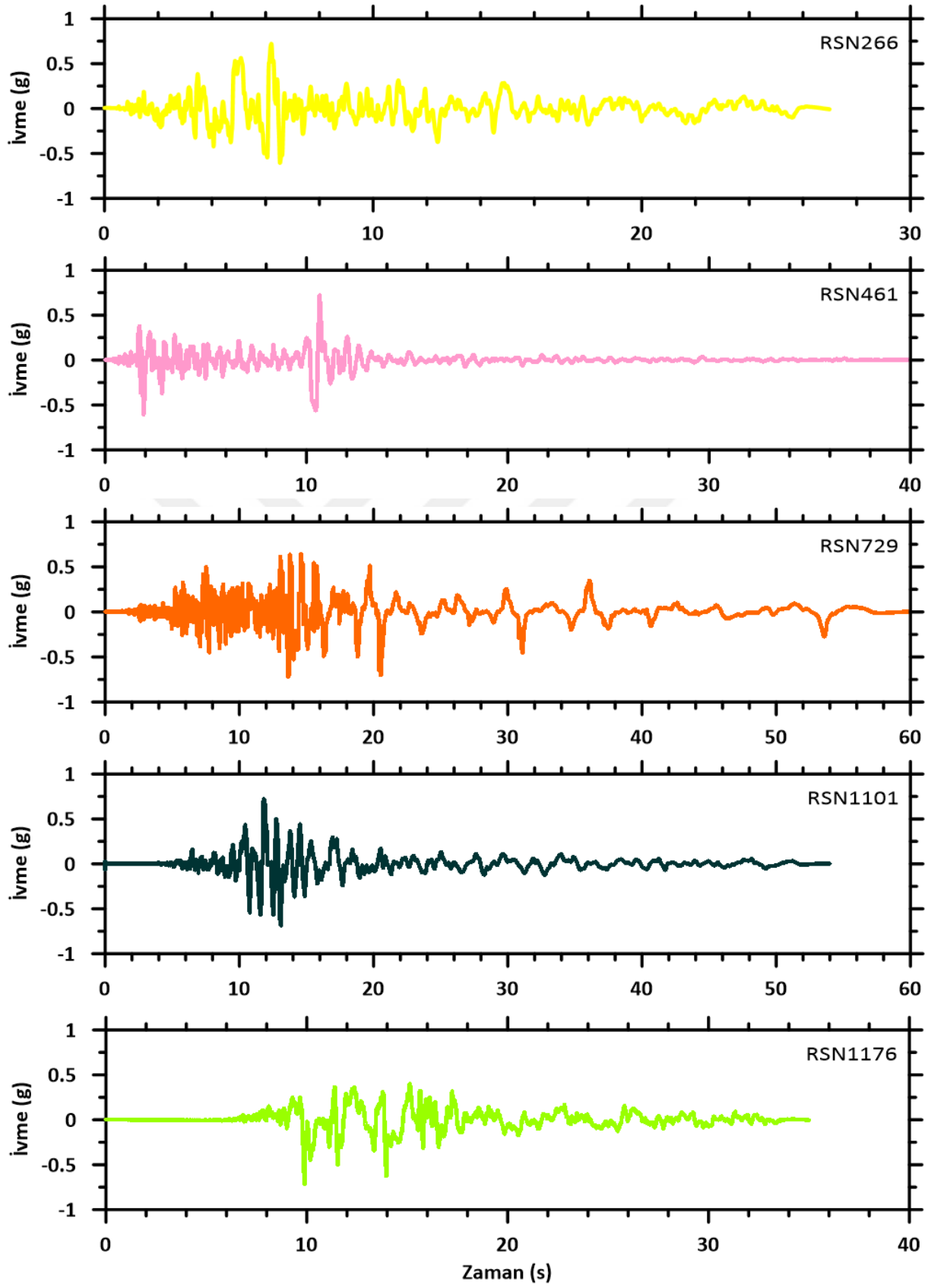


Şekil 6.14. Basit ölçeklendirme işlemi sonucunda ivme kaydında oluşan değişim

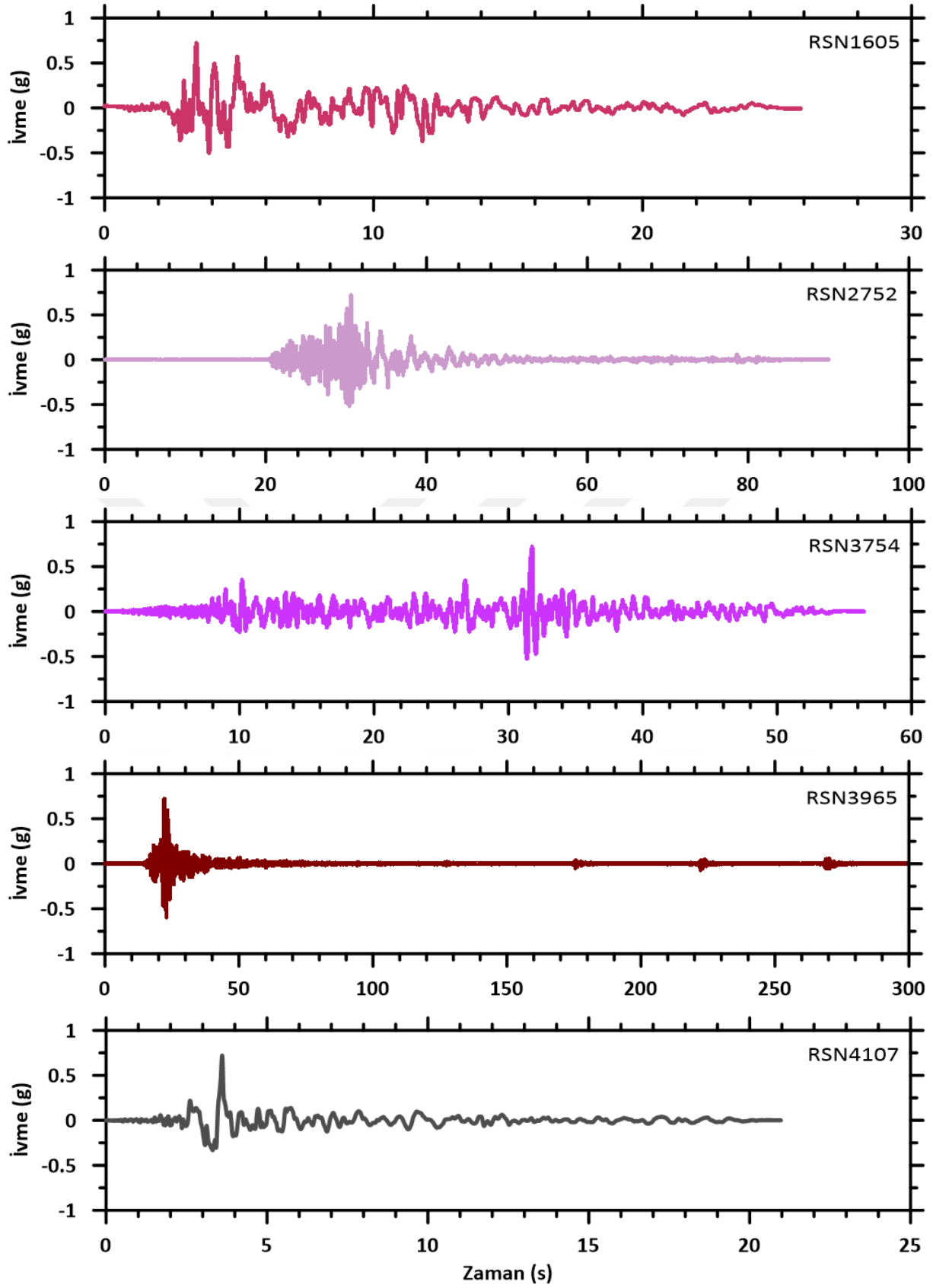
Analizlerde kullanılacak olan 17 adet deprem ivme kaydı, zaman tanım alanında ölçeklendirilmiş olup, bu kayıtlara ait spektral ivme grafiklerinin başlangıç değeri 0.72g olarak belirlenmiştir. Ölçeklendirilmiş (PGA) ivme kayıtları ve bu kayıtlara ilişkin spektral ivme değerleri, sırasıyla Şekil 6.15 ve Şekil 6.16'da verilmiştir.



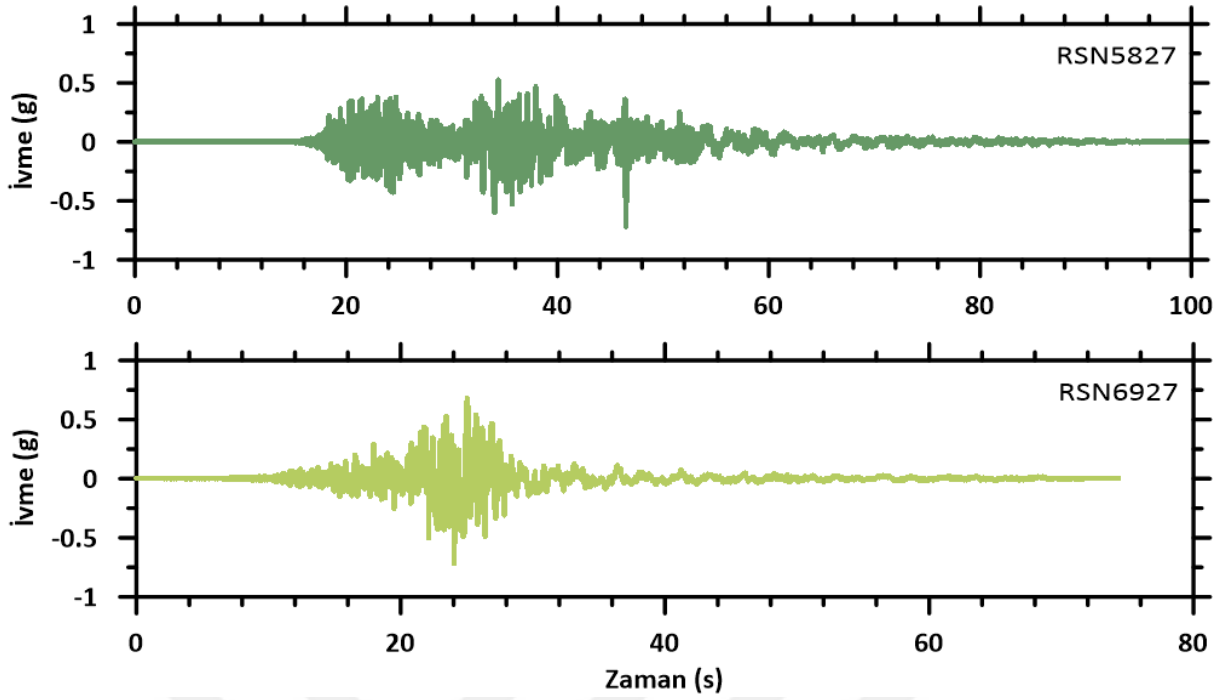
Şekil 6.15. Basit ölçeklendirme (PGA) sonucu oluşan ivme kayıtları



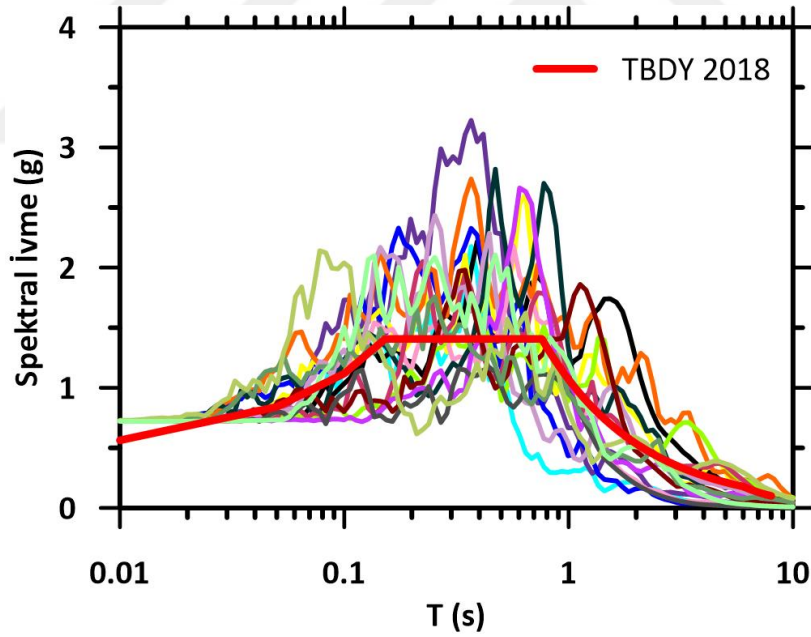
Şekil 6.15. Basit ölçeklendirme (PGA) sonucu oluşan ivme kayıtları (devamı)



Şekil 6.15. Basit ölçeklendirme (PGA) sonucu oluşan ivme kayıtları (devamı)



Şekil 6.15. Basit ölçeklendirme (PGA) sonucu oluşan ivme kayıtları (devamı)



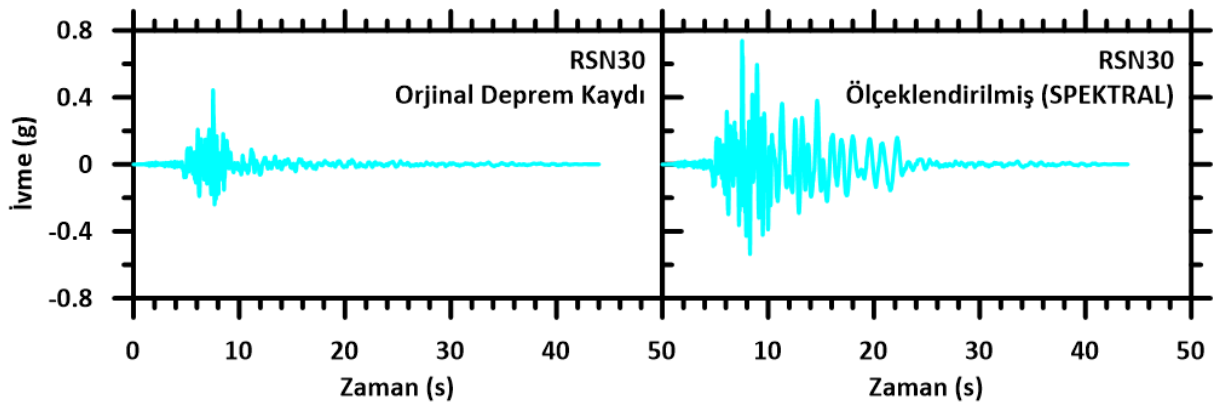
Şekil 6.16. Basit ölçeklendirme (PGA) sonucu oluşan spektral ivme değerleri

Frekans tanım alanında yapılan ölçeklendirme işlemi, deprem kayıtlarının frekans içeriğini değiştirmek suretiyle, kaydın tasarım ivme spektrumuna uygun hale getirilmesini sağlayan bir tekniktir. Bu yöntemde, yer hareketi kaydının genliği sadece değiştirilmekle kalmaz, aynı zamanda kaydın frekans bileşenleri de hedef spektrum ile uyumlu olacak şekilde modifiye edilir. Bu sayede, yapının dinamik tepkisini daha doğru bir şekilde yansıtan yer

hareketleri elde edilir. Frekans tanım alanındaki ölçeklendirme, özellikle NL analizlerde daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesini sağlar.

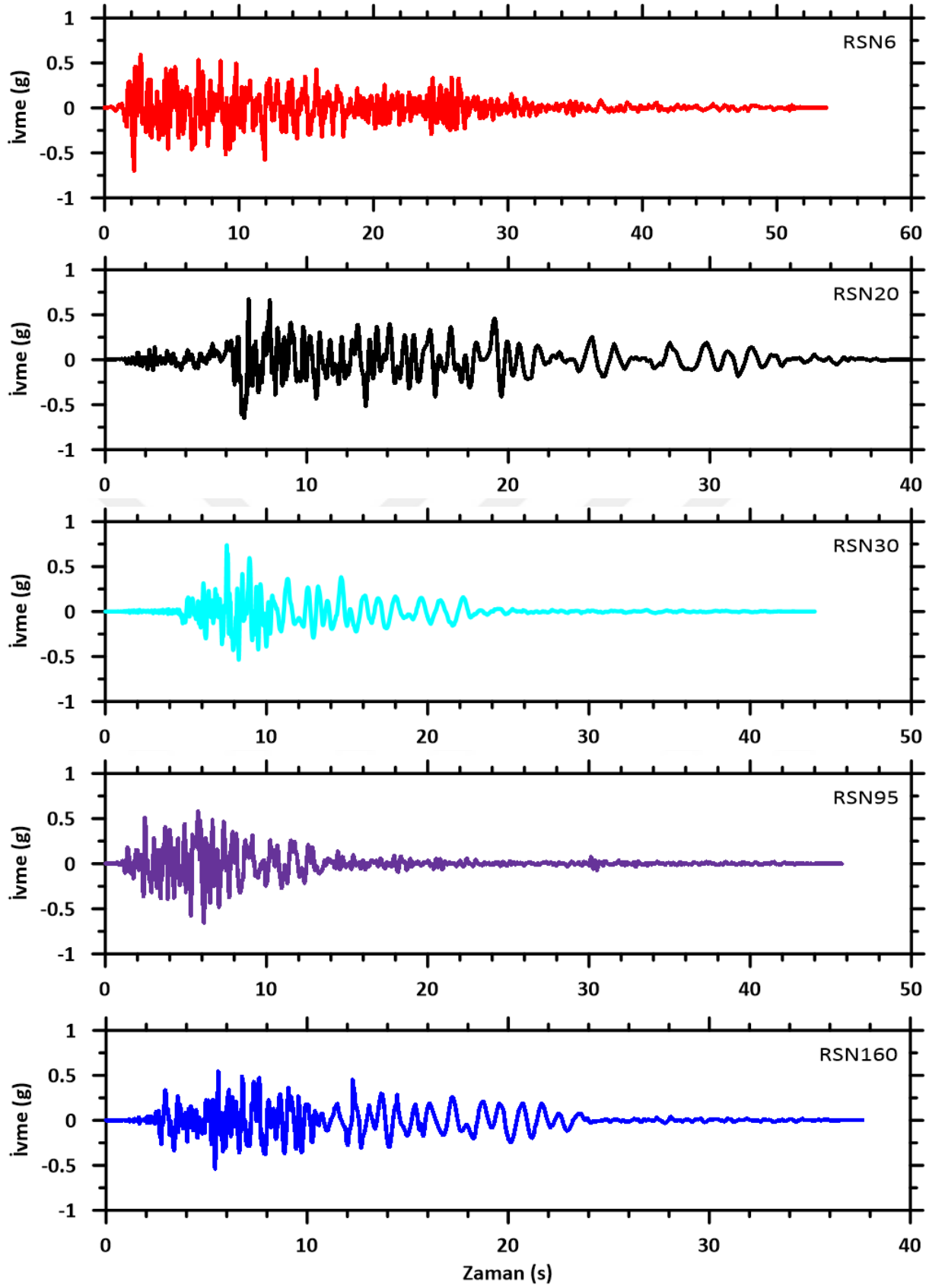
Frekans tanım alanında yapılan ölçeklendirme işleminde, deprem kayıtları hedeflenen tasarım ivme spektrumuna uyumlu olacak şekilde ölçeklendirilir. Bu doğrultuda, TBDY 2018'in bölgeye önerdiği hedef spektrum zarfına dayalı olarak her bir deprem ivme kaydı frekans tanım alanında ölçeklendirilmiştir.

Frekans tanım alanında yapılan ölçeklendirme sonucunda RSN30 depremi ivme değerlerindeki değişim Şekil 6.17'de verilmiştir.

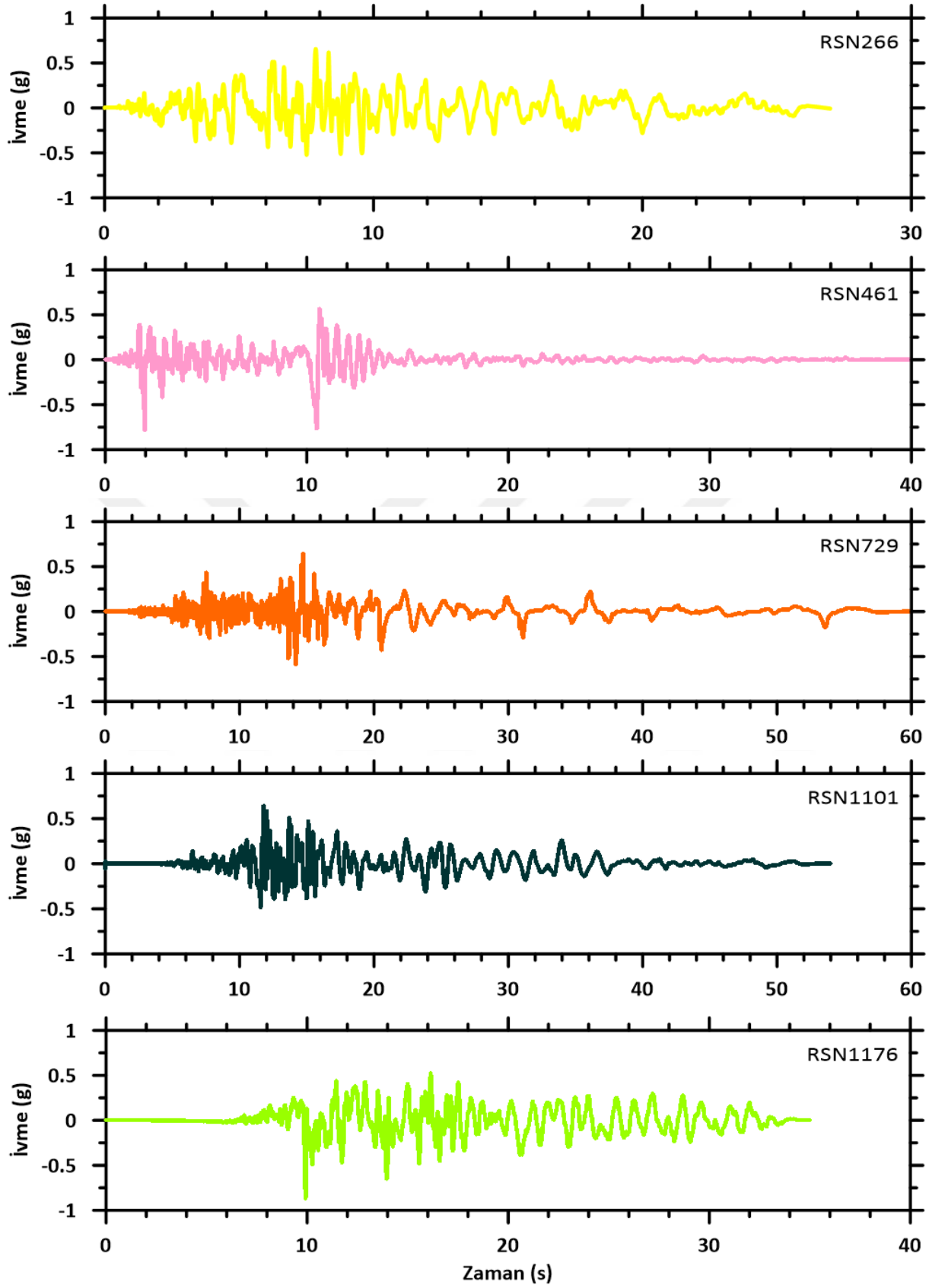


Şekil 6.17. Spektral ölçeklendirme işlemi sonucunda ivme kaydında oluşan değişim

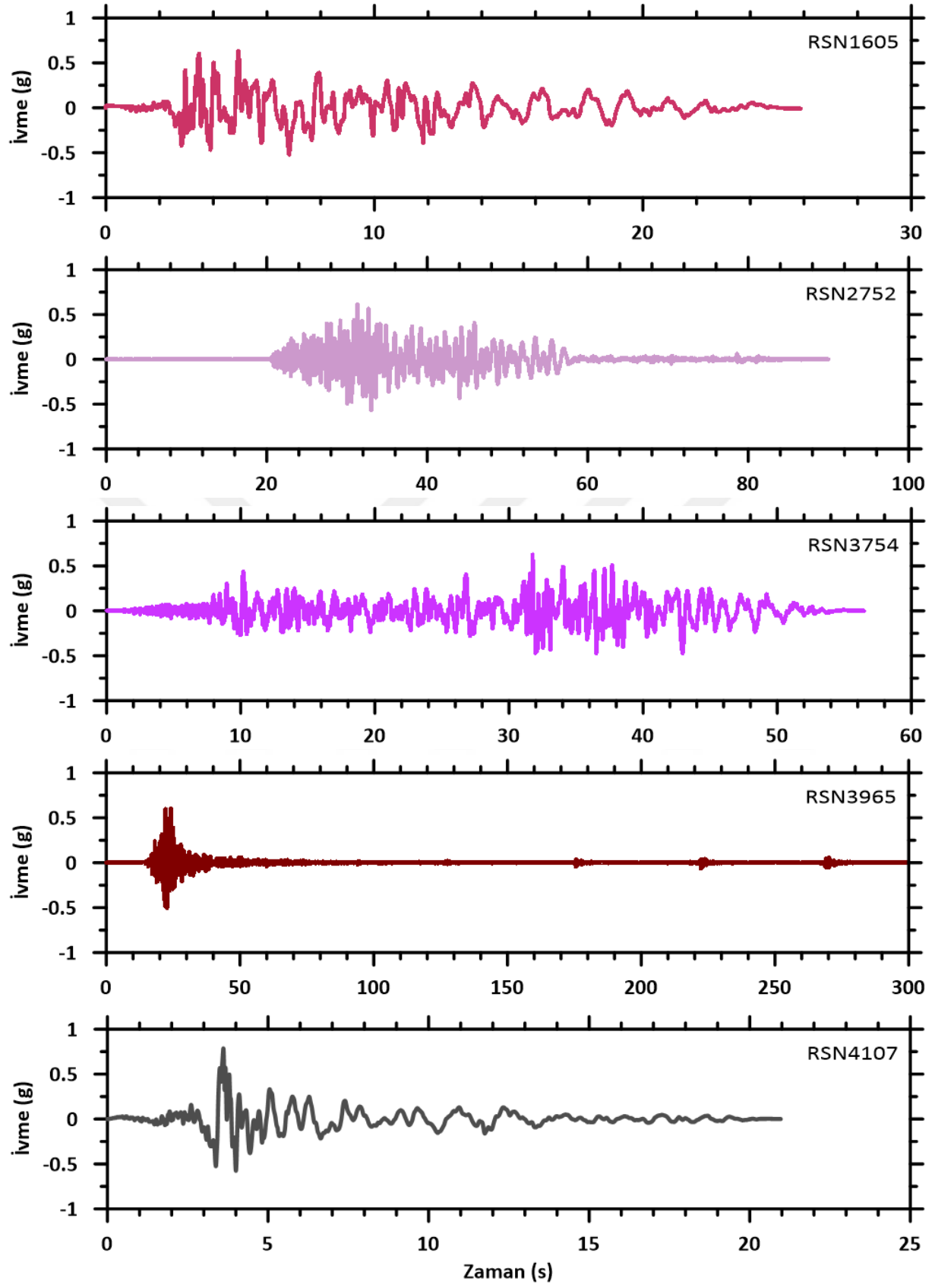
Analizlerde kullanılacak olan 17 adet deprem ivme kaydı, frekans tanım alanında ölçeklendirilmiş olup, bu depremlere ait ivme kayıtları ve bu kayıtlara ilişkin spektral ivme değerleri, sırasıyla Şekil 6.18 ve Şekil 6.19'da verilmiştir.



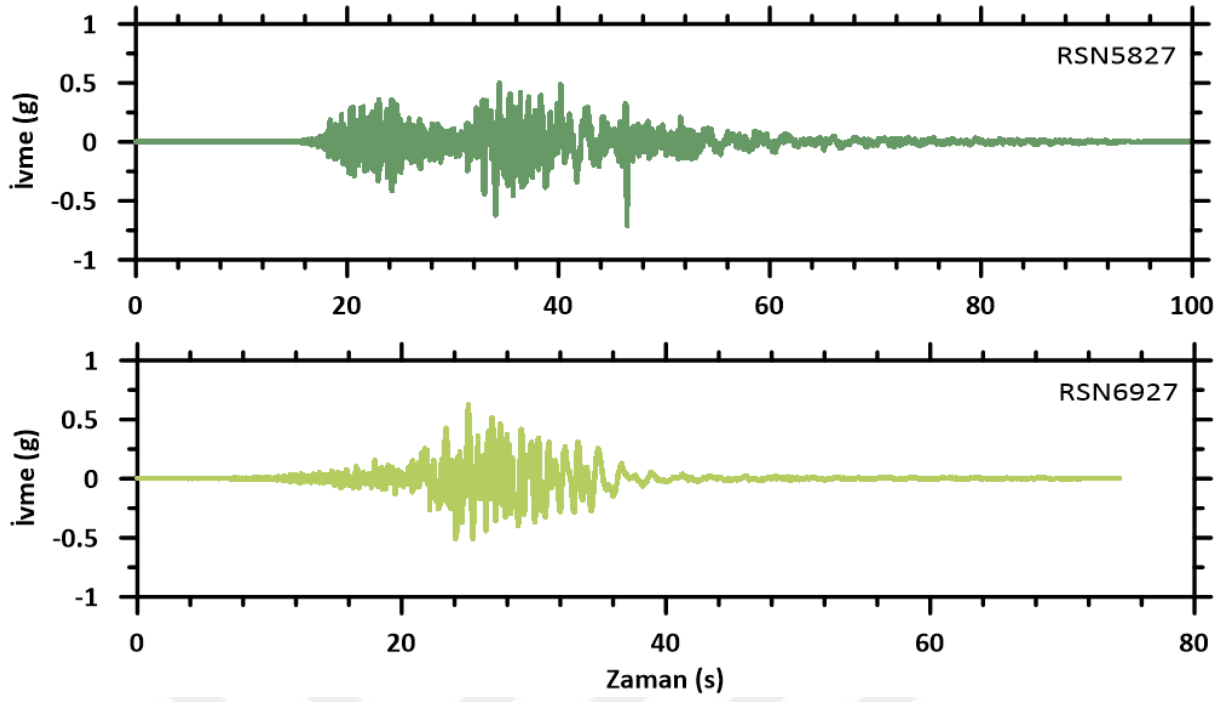
Şekil 6.18. Spektral ölçeklendirme sonucu oluşan ivme kayıtları



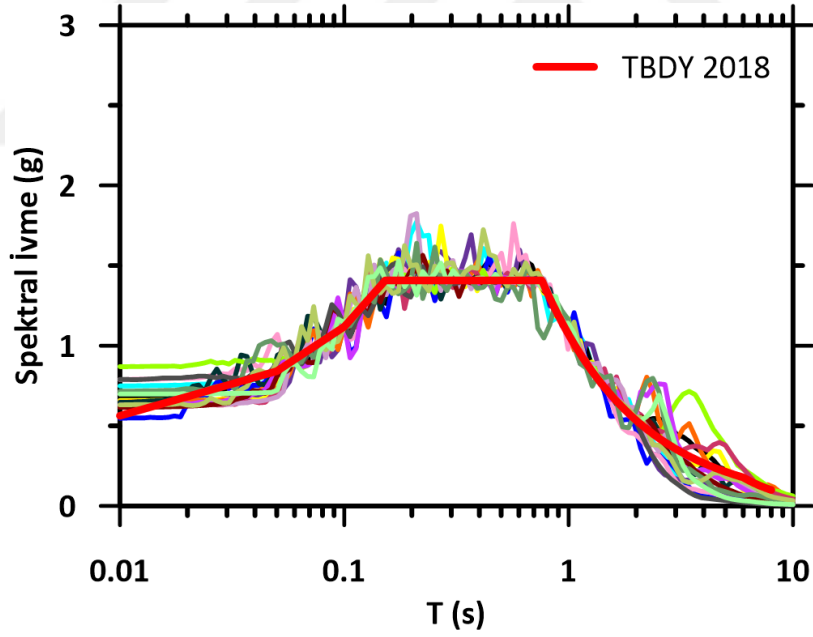
Şekil 6.18. Spektral ölçeklendirme sonucu oluşan ivme kayıtları (devamı)



Şekil 6.18. Spektral ölçeklendirme sonucu oluşan ivme kayıtları (devamı)

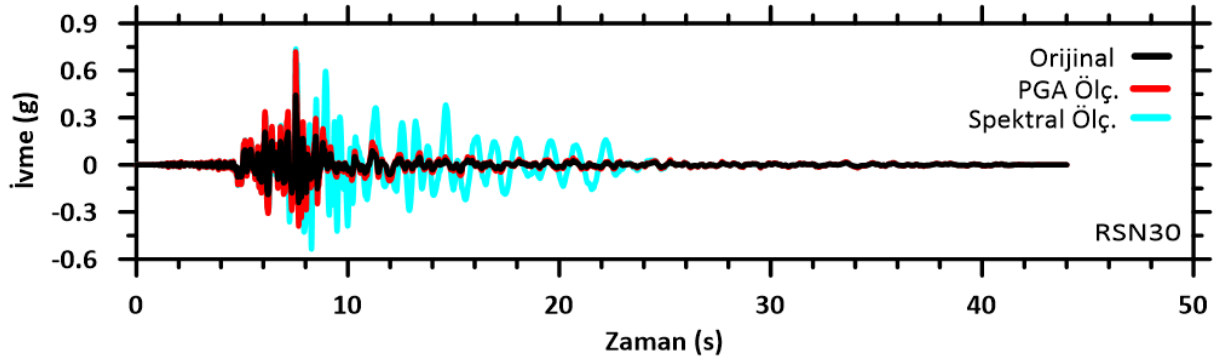


Şekil 6.18. Spektral ölçeklendirme sonucu oluşan ivme kayıtları (devamı)



Şekil 6.19. Spektral ölçeklendirme sonucu oluşan spektral ivme değerleri

Zaman ve frekans tanım alanında yapılan ölçeklendirme işlemleri sonucunda örnek olarak RSN30 deprem kaydında meydana gelen değişiklikler Şekil 6.20’de gösterilmiştir.



Şekil 6.20. RSN30 deprem kaydı orijinal ve iki farklı ölçeklendirme sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 6.20'deki grafikte orijinal (ölçeklendirilmemiş), PGA ölçekli ve spektral ölçekli kayıtlar karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Siyah renkle gösterilen kayıt, orijinal ivme-zaman serisini temsil etmektedir. Bu kayıt, yaklaşık 5. saniyeden itibaren belirgin ivme artışı göstermekte ve 8. saniyede maksimum değerlere ulaşmaktadır. Takip eden süreçte ise ivmenin azaldığı ve titreşimin zamanla sönümlendiği gözlemlenmektedir.

Kırmızı renkte sunulan kayıt, PGA'ya göre ölçeklendirilmiş deprem kaydını temsil etmektedir. Bu kayıt, orijinal kayıtle aynı trendde olmakla birlikte, ivme büyüklükleri zaman tanım alanında yapılan ölçeklendirme neticesinde orijinal kayıtlara göre aynı zamanda gerçekleşmiş ancak daha yüksek değerlere ulaşmıştır. Bu tür bir ölçeklendirme, özellikle yapısal tasarımda hedeflenen sarsıntı şiddetinin sağlanması açısından önem arz etmektedir.

Turkuaz renkle gösterilen kayıt ise, belirli bir hedef spektruma uyumlu olacak biçimde spektral ölçeklendirme yapılmış deprem kaydını ifade etmektedir. Bu yöntemde yalnızca genlik değil, aynı zamanda frekans içeriği de düzenlenmektedir. Dolayısıyla spektral ölçeklendirilmiş kayıt, diğer kayıtlardan farklı trendde bir hareket göstermiştir. Özellikle 8 ila 20. saniyeler arasında daha uzun süreli ve düzenli salınımlar içermektedir.

Zaman tanım alanında ve frekans tanım alanında yapılan ölçeklendirme işlemleri sonucunda PGA'lardaki değişim Tablo 6.3'de verilmiştir.

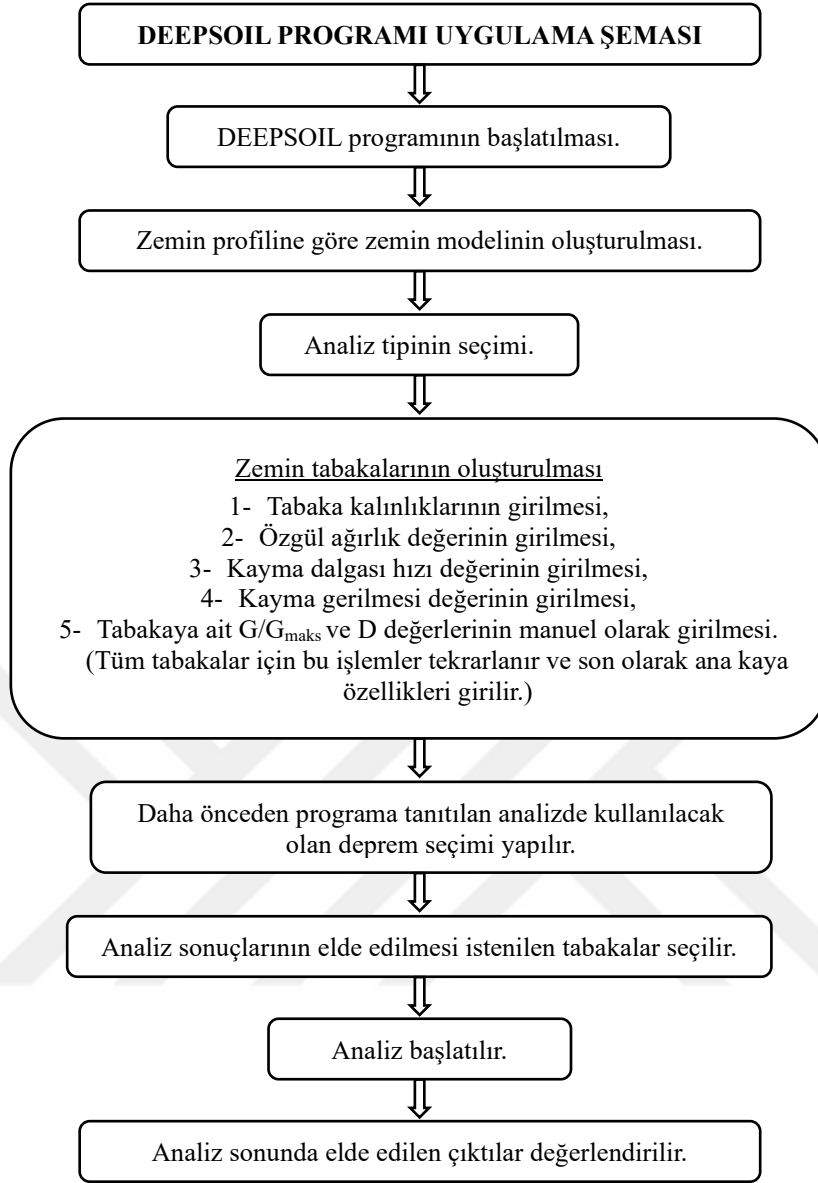
Tablo 6.3. Ölçeklendirme işlemleri sonucu PGA değişimi

	Maksimum İvme (PGA)		
Deprem RSN No	Orijinal	Zaman Tanım Alanında Ölçeklendirme	Frekans Tanım Alanında Ölçeklendirme
RSN6	0.28	0.72	0.70
RSN20	0.16	0.72	0.68
RSN30	0.44	0.72	0.74
RSN95	0.33	0.72	0.66
RSN160	0.78	0.72	0.54
RSN266	0.15	0.72	0.66
RSN461	0.31	0.72	0.78
RSN729	0.21	0.72	0.64
RSN1101	0.33	0.72	0.64
RSN1176	0.32	0.72	0.87
RSN1605	0.52	0.72	0.63
RSN2752	0.18	0.72	0.62
RSN3754	0.31	0.72	0.63
RSN3965	0.39	0.72	0.60
RSN4107	0.83	0.72	0.79
RSN5827	0.54	0.72	0.71
RSN6927	0.46	0.72	0.62

6.7.3. DEEPSOIL V7.1 ile 1D Zemin Büyütme Analizlerinin Gerçekleştirilmesi

Sahaya özel zemin büyütme analizleri, deprem bölgesinde gerçekleştirilen sondaj çalışmalarından temin edilen örselenmemiş numuneler ve sahanın depremsellik özelliklerini yansıtan 17 adet deprem ivme kayıtlarının seçimi ve çeşitli ölçeklendirme işlemlerinden sonra gerçekleştirilmiştir. Bu veriler, DEEPSOIL V7.1 programı ile 1D zemin büyütme analizlerinin yapılmasına olanak tanımıştır.

DEEPSOIL programında orijinal ve iki farklı ölçeklendirme yöntemi ile ölçeklendirilmiş deprem ivme kayıtları kullanılarak, toplamda 204 adet NL ve EL zemin büyütme analizi Şekil 6.21’de belirtilen şemadaki adımlar izlenerek gerçekleştirilmiştir.



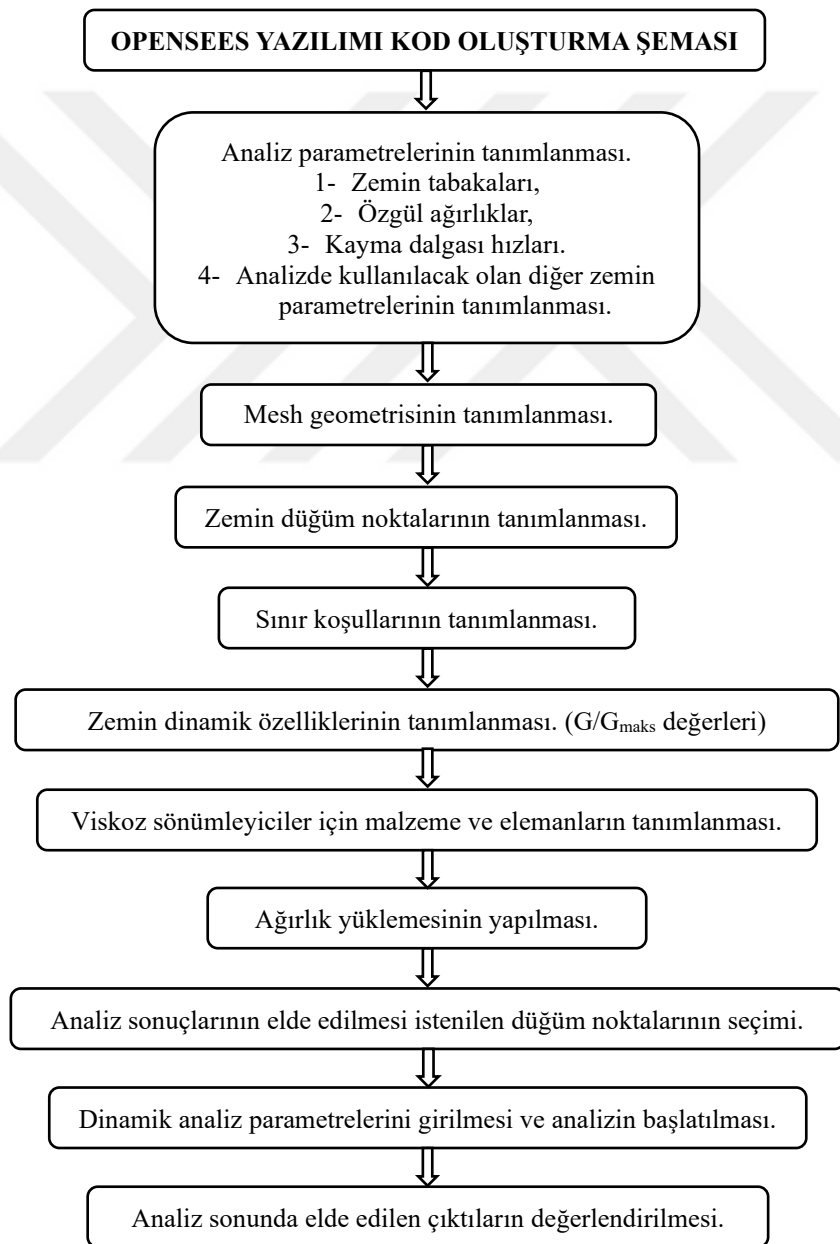
Şekil 6.21. DEEPSOIL programı uygulama şeması

6.7.4. OPENSEES Yazılımı ile Zemin Büyütme Analizlerinin Gerçekleştirilmesi

OPENSEES, geoteknik mühendisliği ve yapısal analizler alanında yaygın olarak kullanılan, açık kaynak kodlu bir yazılımdır. OPENSEES yazılımı, geoteknik mühendisliği alanında büyük bir öneme sahiptir, çünkü zemin davranışlarının modellenmesi ve yapı-zemin etkileşimi gibi karmaşık analizlerin gerçekleştirilmesinde güçlü bir araçtır. Bu yazılım, doğrusal olmayan zemin modelleri ve zemin davranışına dayalı analizler yapılabilmesini sağlayarak, yapıların zeminle olan etkileşimlerini daha gerçekçi bir biçimde değerlendirmeye olanak tanır. Geoteknik mühendisliğinde, zemin büyütme etkileri ve sismik davranış analizleri için zemin-yapı etkileşimi simülasyonları son derece önemlidir ve bu yazılım bu tür analizlerin yapılmasını kolaylaştırır. Özellikle yer altı yapıları ve zemin-yapı etkileşimlerinin modellenmesinde,

zeminlerin dinamik tepkilerinin daha iyi anlaşılmasına yardımcı olur. Bunların yanı sıra, OPENSEES'in özelleştirilebilir yapısı, geoteknik mühendislerinin özgün projelere ve saha koşullarına uygun zemin malzeme modelleri ve depremsel analizler geliştirmesine olanak verir. Sonuç olarak, OPENSEES, geoteknik mühendisliği uygulamalarında, zeminlerin deprem gibi dinamik yükler altındaki davranışlarının doğru bir şekilde modellenmesi ve yapıların bu zeminler üzerindeki performanslarının değerlendirilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir.

Bu kapsamda Şekil 6.22'de gösterilen şemaya göre OPENSEES yazılımında oluşturulan kod ile orijinal ve iki farklı yöntemle ölçeklendirilen deprem ivme kayıtları ile toplam 102 adet NL zemin büyütme analizi yapılmıştır.



Şekil 6.22. OPENSEES yazılımı kod oluşturma şeması

Yapıların dinamik davranışını temsil eden sayısal analizlerde, enerji dağılımını ve sönüm mekanizmalarını doğru şekilde modellemek, özellikle deprem etkilerine karşı güvenilir sonuçlar elde etmek açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda DEEPSOIL programı ve OPENSEES yazılımı ile gerçekleştirilen analizlerin karşılaştırılması yapılırken program ve yazılımda kullanılan sönüm oranları dikkate alınmalıdır. DEEPSOIL programı sönüm oranı olarak ya program içerisinde seçilen modellere ait değerleri kullanmakta ya da kullanıcının manuel olarak girdiği değerleri kullanmaktadır. Buna karşılık OPENSEES yazılımında Rayleigh sönüm modeli kullanılmaktadır.

Yapısal sistemler, özellikle deprem gibi dinamik etkiler altında doğrusal olmayan davranış sergileyerek enerji tüketiminde önemli bir rol oynar. Bu doğrusal olmayan davranış, yapısal malzemelerin akma dayanımını aşması, kalıcı şekil değişiklikleri göstermesi ve çevrimsel yüklemelere maruz kalmasıyla ortaya çıkar. Bu süreçte malzeme tarafından sönümlenen enerji, literatürde çevrimsel enerji olarak tanımlanmakta olup, NL analizlerde bu enerji genellikle eşdeğer viskoz sönümleme yaklaşımıyla modellenmektedir (Chopra, 2012).

Çevrimsel enerjiden farklı olarak, yapı sistemlerinde herhangi bir doğrusal olmayan davranış ortaya çıkmasa dahi mevcut olan içsel sönümleme mekanizmaları da enerji tüketimine katkıda bulunur. İçsel sönümleme, yapı sisteminin malzeme ve detay düzeyindeki doğal sönümleme kapasitesine işaret eder ve çoğunlukla mikro düzeyde gerçekleşen fiziksel olaylarla ilişkilendirilir. Ancak bu tür mekanizmaların matematiksel olarak kesin biçimde modellenmesi oldukça güçtür. Bu nedenle içsel sönümleme genellikle yaklaşık bir modal eşdeğer viskoz sönüm oranı olarak tanımlanır. Saha verilerine dayanan çalışmalar doğrultusunda, içsel sönümlemeye karşılık gelen bu eşdeğer viskoz sönüm oranı çoğu zaman kritik sönümleme oranının yaklaşık %5'i olarak kabul edilmektedir. Bu değer tarihsel olarak varsayılan bir yaklaşım olmakla birlikte, son dönemde yapılan deneysel ve analitik çalışmalar bazı yapı tiplerinde bu oranın daha düşük olabileceğini ortaya koymuştur (Charney, 2008). Özellikle modern, rijit ve yüksek performanslı yapı sistemlerinde, içsel sönüm oranlarının %2-%3 seviyelerine kadar düştüğü gözlemlenmiştir.

İçsel sönümlemeyi temsil edebilmek adına genellikle eşdeğer viskoz sönümleme yaklaşımı tercih edilir ve bu yaklaşım kapsamında sistemin sönümleme matrisi C oluşturulur. Eşdeğer viskoz sönümlemeye dayalı olarak C matrisinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan modellerden biri Rayleigh sönümleme modelidir (Chopra, 2012). Rayleigh sönümleme modeli, sönüm matrisi C 'nin kütle matrisi M ve rijitlik matrisi K ile lineer kombinasyonu olarak ifade edilmesini öngörür (6.1):

$$C = a_0 M + a_1 K \quad (6.1)$$

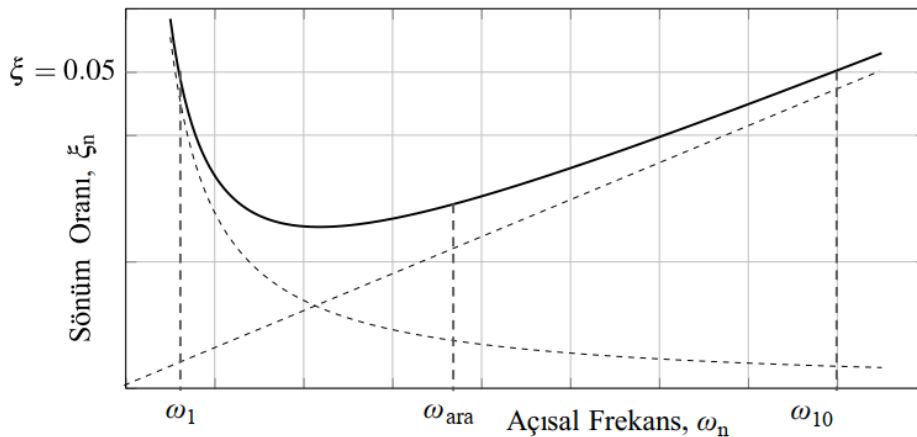
Bu noktada, kütle ve rijitlik katsayıları olan a_0 ve a_1 iki farklı doğal mod frekansı göz önüne alındığında, aşağıda verilen formül 6.2 aracılığıyla hesaplanabilmektedir.

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{\omega_i} & \omega_i \\ \frac{1}{\omega_j} & \omega_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \xi_i \\ \xi_j \end{Bmatrix} \quad (6.2)$$

Bu ifadede, yapı sistemine ait i. ve j. modlara karşılık gelen açısal frekanslar sırasıyla ω_i , ω_j ile gösterilmekte, ilgili modların sönüm oranları ise ξ_i ve ξ_j olarak tanımlanmaktadır. Söz konusu denklemin çözümünden elde edilen katsayılar aşağıdaki biçimde formüle edilebilir (6.3).

$$a_0 = \xi \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad a_1 = \xi \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \quad (6.3)$$

Burada a_0 ve a_1 katsayıları, yapı sisteminin belirli doğal frekanslarına karşılık gelen modlara belirli eşdeğer sönüm oranları atanacak şekilde seçilir. Genellikle düşük mertebedeki mod (örneğin birinci mod) ile daha yüksek mertebedeki bir mod (örneğin onuncu mod) için hedeflenen eşdeğer viskoz sönüm oranı (çoğunlukla %5) esas alınarak bu katsayılar hesaplanır (Şekil 6.23) (Clough ve Penzien, 2003). Bu yöntem, yapıdaki enerji tüketiminin fiziksel olarak makul seviyelerde modellenmesini sağlarken, ara modların sönüm oranları hedefin altında kalmakta ve böylece aşırı sönümleme riski azaltılmaktadır.



Şekil 6.23. Rayleigh sönüm grafiği (Chopra, 2012)

Rayleigh sönümleme modeli, özellikle NL analizlerde tercih edilmektedir çünkü modal sönümleme gibi yalnızca doğrusal sistemlerde geçerli olan modellerin yetersiz kaldığı durumlarda esneklik sağlar. Bu yöntemle yapı sisteminin hem kütle hem de rijitlik etkileri dikkate alınarak zamana bağlı sönüm davranışı modellenenebilir. Ancak dikkat edilmesi gereken

husus, seçilen a_0 ve a_1 katsayılarının sistemin genel enerji tüketimini gereğinden fazla artırmayacak biçimde belirlenmesidir. Aksi halde sistem, gerçekçi olmayan derecede sönümlenmiş tepkiler gösterebilir (Charney, 2008).

Sonuç olarak, Rayleigh sönümleme hem analitik esneklik hem de hesaplama kolaylığı sağlaması bakımından, NL analizlerde içsel sönümün etkili bir biçimde modellenmesini mümkün kılmaktadır.

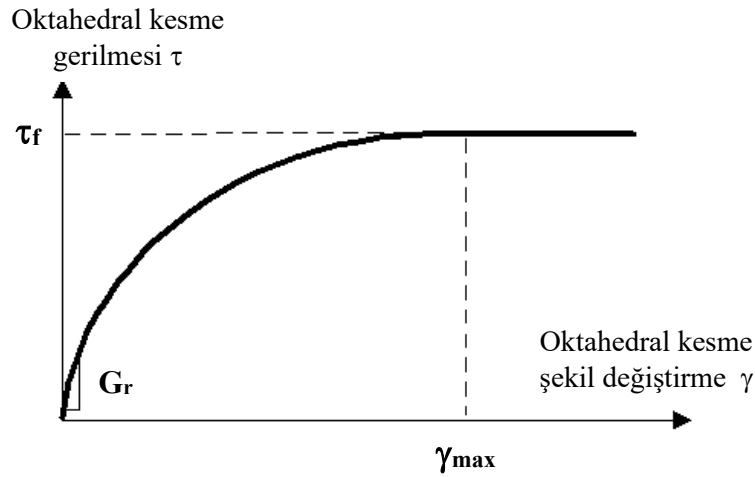
OPENSEES yazılımında Rayleigh sönümlemesi, analiz seviyesinde veya belirli elemanlar özelinde tanımlanabilmektedir. Yazılımın Rayleigh komutu, kullanıcıya kütle ve rijitlik katkılarına ilişkin sönüm oranlarını sistem genelinde uygulama imkânı sunar (Mazzoni vd., 2007). Ancak, bu yaklaşımın sınırlılıkları da bulunmaktadır. Özellikle yüksek frekanslı modlarda, rijitlik oranına bağlı sönümleme nedeniyle yapay olarak aşırı sönüm oluşabilmekte, bu da enerji sönümleme oranlarını yapının gerçek davranışından uzaklaştırabilmektedir (Charney, 2008). Bu durumun önüne geçilebilmesi adına, modal analizle belirlenen frekans değerlerine dayalı olarak Rayleigh katsayılarının dikkatle kalibre edilmesi gerekmektedir.

OPENSEES yazılımında oluşturulan kodda dikkat edilmesi gereken bir diğer hususta kullanılacak malzeme modeli seçimidir. Bu çalışmada, zemin profili içerisinde yer alan düşük plastisiteli kil tabakalarının, özellikle drenajsız hızlı yüklemeler altındaki davranışlarını gerçekçi bir şekilde temsil edebilmek amacıyla PressureIndependMultiYield (PIMY) malzeme modeli tercih edilmiştir. Bu model, şekil değiştirme bileşenlerine bağlı plastisite tanımı içermekte olup, hacimsel gerilme-şekil değiştirme tepkisini doğrusal elastik kabul etmektedir. Söz konusu yaklaşım, siltli veya killi zeminlerin deprem gibi kısa süreli yüklemeler altında kayma davranışının çevresel basınca karşı duyarsız hale geldiği durumları temsil etmede son derece uygundur (Yang vd., 2003; Elgamal vd., 2002). Ayrıca modelde kullanılan çok yüzeyli (multi-yield surface) plastisite yapısı, çevrimsel yüklemeler altında gözlenen yumuşama, şekil değiştirme birikimi ve dayanım azalması gibi karmaşık zemin davranışlarının sayısal olarak yakalanmasına olanak tanımaktadır. Bu yönüyle PIMY modeli, özellikle düşük plastisiteli killerin sismik yüklemeler altında gösterebileceği enerjisel zayıflama, yeniden yükleme sertleşmesi gibi etkileri temsil etmek için literatürde sıklıkla önerilen bir modeldir (Parra, 1996; Yang vd., 2003). Ayrıca modelin yerçekimi yüklemesi gibi yavaş yüklemelerde elastik, ancak dinamik yüklemelerde elasto-plastik davranış göstermesi, aşamalı analiz senaryolarında zemin tepkisinin gerçekçi biçimde modellenmesini sağlamaktadır. Tüm bu nedenlerle, çalışma kapsamında analiz edilen zemin koşullarına ve yükleme türüne uygunluğu göz önünde bulundurularak, PIMY malzeme modeli tercih edilmiştir.

Modelin temelini oluşturan kesme gerilmesi-kesme birim şekil değişirmesi (τ - γ) ilişkisi, aşağıda idealize biçimde gösterilmiştir (Şekil 6.24). Bu eğride, yatay ekseninde oktahedral kesme şekil değişirmesi (γ), düşey ekseninde ise oktahedral kesme gerilmesi (τ) yer almaktadır. Eğrinin başlangıç kısmı doğrusal elastik davranışı temsil eder ve eğimi referans kesme modülü G_r olarak tanımlanır. Bu rijitlik değeri, malzemenin düşük şekil değiştirme seviyelerinde gösterdiği elastik karakteristiği ifade eder.

Zemin, belirli bir şekil değiştirme seviyesine kadar elastik tepki verirken, bu sınır aşıldığında plastisite etkileri devreye girer. Eğrinin düzleştiği kısımda ulaşılan maksimum kesme gerilmesi τ_f , zemin tarafından taşınabilecek en yüksek kesme gerilmesini ifade eder. Bu noktadan itibaren, şekil değiştirme artmaya devam ederken kesme gerilmesi sabit kalır. Bu durum, zemin davranışındaki plastik deformasyonun baskın hale geldiğini gösterir. Eğrinin yatay hale geldiği noktadaki şekil değiştirme değeri ise γ_{max} ile ifade edilir ve modelde plastisite sınırı olarak kabul edilir.

Bu τ - γ ilişkisi, PIMY modelinin dinamik analizlerde kullandığı çok yüzeyli akma yüzeylerinin temelini oluşturur. Model, bu eğriyi çeşitli çevresel basınç seviyeleri için yeniden ölçeklendirerek çok katmanlı bir yapıda uygular. Böylece, zeminlerin döngüsel yüklemeler altındaki karmaşık tepkileri örneğin modül azalması, enerji sönümleme ve kalıcı şekil değiştirme birikimi gerçekçi biçimde simüle edilmektedir. Grafikteki τ_f terimi denklem 6.4 ile ifade edilir.



Şekil 6.24. PIMY modeli kesme gerilmesi-kesme birim şekil değiştirme grafiği

$$\tau_f = \frac{2\sqrt{2}\sin\phi}{3-\sin\phi} p'_i + \frac{2\sqrt{2}}{3} c \quad (6.4)$$

Bu denklemde sürtünme açısı (ϕ) ve kohezyon (c), tepe (oktahedral) kayma mukavemeti (τ_f)'nin mevcut efektif çevre gerilmesi (p'_i) ile nasıl değiştiğini tanımlar.

Otomatik yüzey oluşturma: Sabit bir efektif çevre gerilmesi (p') altında, oktahedral kayma gerilmesi (τ) ile oktahedral kayma birimi şekil değiştirmesi (γ) arasındaki doğrusal olmayan ilişki, hiperbolik bir eğri (ana eğri) ile tanımlanır. Bu tanıma göre τ denklem 6.5 ile ifade edilir.

$$\tau = \frac{G\gamma}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r} \left(\frac{p'_r}{p'} \right)^d} \quad (6.5)$$

Burada, γ_r aşağıdaki denklemi (6.6), p'_r değerinde sağlar:

$$\tau_f = \frac{2\sqrt{2}\sin\phi}{3-\sin\phi} p'_i + \frac{2\sqrt{2}}{3} c = \frac{\gamma_r G_{max}}{1 + \gamma_{max}/\gamma_r} \quad (6.6)$$

(Kullanıcı tanımlı yüzeyler)

Kullanıcının belirttiği sürtünme açısı $\phi=0$ ise, kohezyon c dikkate alınmaz. Bunun yerine, c değeri denklem 6.7 ile tanımlanır:

$$c = \frac{\sqrt{3}\sigma_m}{2} \quad (6.7)$$

Burada, σ_m değeri, modül indirgeme eğrisindeki son modül ve şekil değiştirme çiftinin çarpımıdır. Bu nedenle, uygun bir kohezyon (c) değeri elde edebilmek için ana eğrinin (backbone curve) doğru şekilde ayarlanması büyük önem taşır.

Eğer kullanıcı $\phi>0$ olacak şekilde bir sürtünme açısı belirtirse, bu değer dikkate alınmaz. Bunun yerine, ϕ denklem 6.8 ile tanımlanır:

$$\sin\phi = \frac{3(\sqrt{3}-\sigma_m-2c)/p'_r}{6+(\sqrt{3}-\sigma_m-2c)/p'_r} \quad (6.8)$$

Eğer hesaplanan $\phi<0$ çıkarsa, bu durumda $\phi=0$ olarak alınır ve kohezyon değeri denklem 6.7 değeri ile tanımlanır.

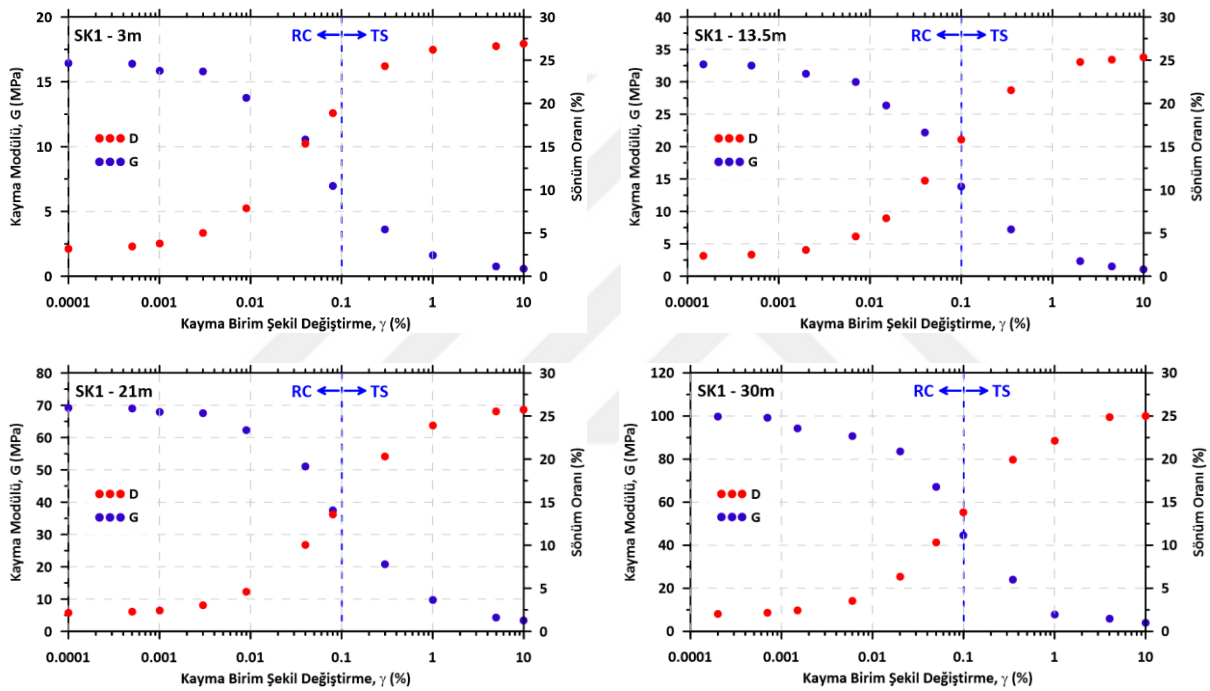
Ayrıca, hatalı tanımlanmış modül indirgeme eğrilerinin, negatif teğetsel kayma modülü ile sonuçlanan birim şekil değiştirmede yumuşama tepkisi oluşturabileceği unutulmamalıdır. Bu tür davranışlara mevcut model formülasyonu kapsamında izin verilmemektedir.

Son olarak, ana eğrinin çevre gerilmesi ile birlikte değişkenlik gösterdiğini, ancak bu değişimin çoğu mühendislik uygulamasında kullanılan çevre gerilmesi aralığında görece küçük olduğunu belirtmek gerekir.

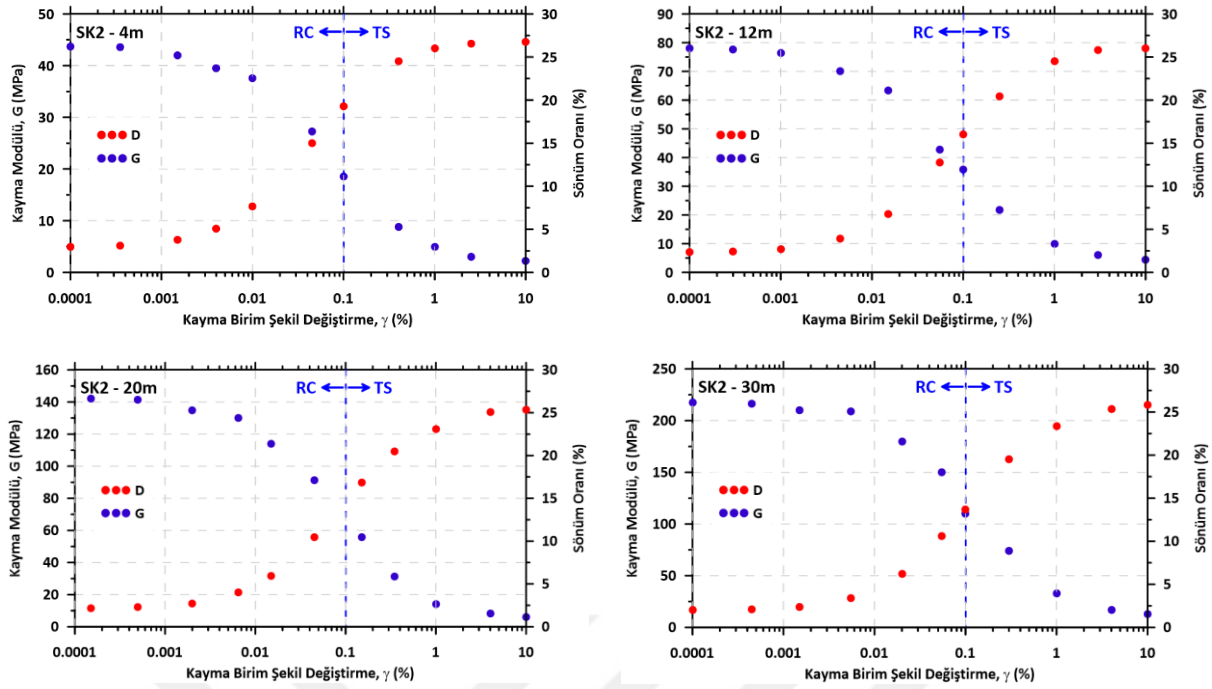
7. BULGULAR VE TARTIŞMA

7.1. Dinamik Deney Sonuçları

Uygulanan dinamik deneyler neticesinde, sahaya özel dinamik davranışları yansıtan kayma modülü-kayma birim şekil değiştirme ilişkileri ile sönüm oranlarını gösteren eğriler oluşturulmuştur. SK1 için bu değerler Şekil 7.1’de verilmiştir. Her iki deney yönteminden (RC-TS) elde edilen kayma modülü verilerinde bir geçiş noktası bulunmaktadır. Bu nokta kayma birim şekil değiştirmenin %0.1 olduğu noktadır. Grafiklerden derinliğin artması ile kayma modülü değerindeki artış açıkça görülmektedir. SK2 için yapılan deney sonuçlarına ait oluşturulan grafikler ise Şekil 7.2’de verilmiştir.



Şekil 7.1. SK1’e ait RC ve TS deney sonuçları



Şekil 7.2. SK2'ye ait RC ve TS deney sonuçları

7.2. Eşdeğer Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Analiz Sonuçları

Geoteknik mühendisliği çalışmalarında, zeminin sismik yükler altındaki davranışının doğru bir şekilde belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Sahaya özel yapılan sismik analizler, belirli bir bölgedeki yer hareketlerini daha gerçekçi bir şekilde değerlendirmeye olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, EL ve NL analiz, zeminin dinamik tepkisini incelemek için kullanılan başlıca yöntemlerdir. EL analiz, doğrusal davranışları yaklaşık olarak temsil eden iteratif bir yöntemken, NL analiz, zeminin elasto-plastik davranışını doğrudan modelleyen daha gelişmiş bir yaklaşımdır.

EL analiz, genellikle SHAKE, DEEPSOIL ve STRATA gibi yazılımlar aracılığıyla gerçekleştirilen ve mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu analizde, zemin küçük adımlara bölünerek her adımda doğrusal kabul edilir ve gerilme seviyesine bağlı olarak G ve D iteratif bir süreçle güncellenir. Zeminin belirli katmanlara bölünmesiyle gerçekleştirilen bu analiz, deprem dalgalarının yayılımını belirleyerek zemin tepkisini hesaplar. Yöntemin en büyük avantajı, hesaplama süresinin kısa olması ve mühendislik projelerinde pratik bir çözüm sunmasıdır. Ancak, büyük deformasyonlar altında doğruluğu azalmakta ve yüksek genlikli yer hareketleri için yeterli hassasiyeti sağlayamamaktadır. Buna karşılık, NL analiz, zeminin gerilme-gerinim ilişkisini elasto-plastik olarak ele alan ve zamana bağlı davranışları doğrudan hesaplayan bir yöntemdir. DEEPSOIL, OPENSEES, FLAC ve PLAXIS gibi yazılımlar kullanılarak gerçekleştirilen bu analiz, zeminin

elastik sınırını aşan deformasyonlarını ve plastik davranışlarını dikkate alır. Gerçek bir deprem kaydı kullanılarak yapılan zaman tanım alanındaki analizler, büyük genlikli yer hareketlerine karşı zeminin tepkisini daha doğru bir şekilde belirlemektedir. NL analiz, özellikle sıvılaşma, kayma deformasyonları ve kalıcı yer değiştirmeler gibi karmaşık geoteknik problemlerin modellenmesi açısından büyük avantajlar sunmaktadır. Ancak, yüksek hesaplama süresi ve karmaşık parametre gereksinimleri nedeniyle mühendislik uygulamalarında daha sınırlı bir kullanıma sahiptir.

Bu iki analiz yöntemi karşılaştırıldığında, küçük ve orta büyüklükteki depremler için EL analiz yeterli olurken, büyük ölçekli depremler, sıvılaşma riski veya büyük deformasyonların önemli olduğu durumlarda NL analiz tercih edilmelidir. Ayrıca, sahaya özel sismik değerlendirmelerde, zemin özelliklerinin doğru bir şekilde belirlenmesi ve analizlerde uygun modelin seçilmesi büyük önem taşımaktadır. Sonuç olarak, mühendislik uygulamalarında bu analiz yöntemlerinin doğru seçimi, yapı güvenliği açısından kritik bir rol oynamaktadır.

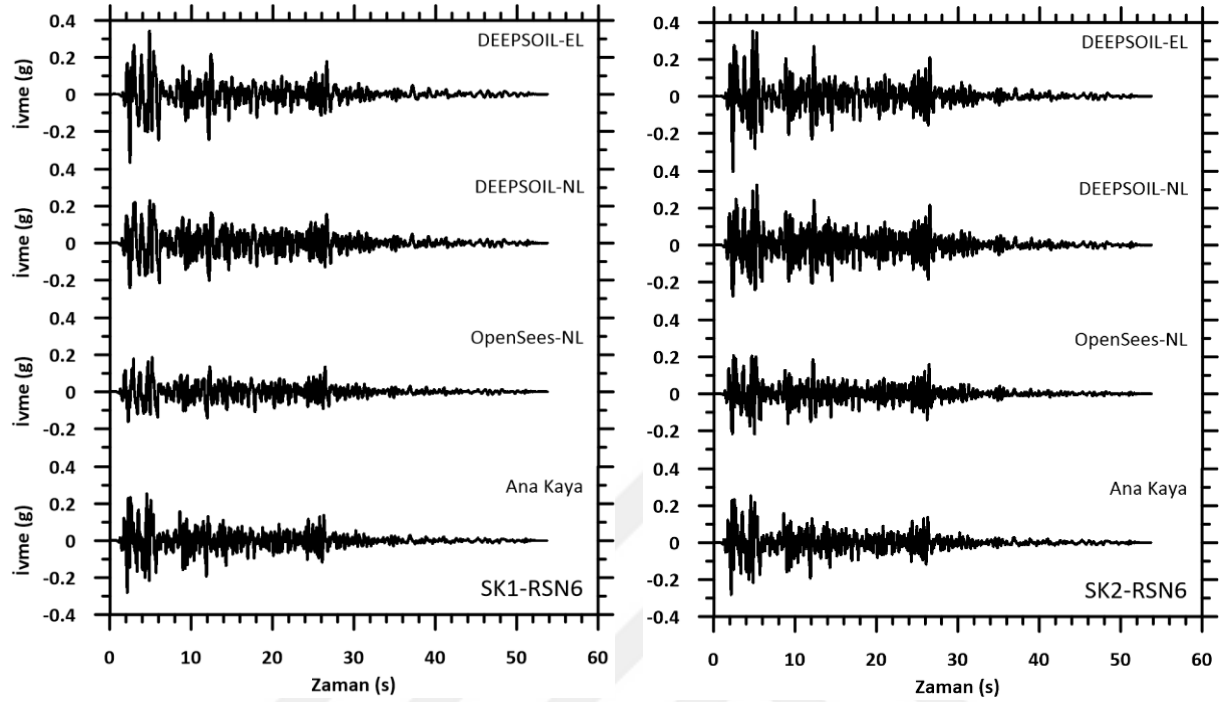
7.2.1. Sahaya Özel Analizlerde Zemin Yüzeyinde Oluşan İvme Değerleri

Sahaya özel olarak belirlenen zemin dinamik parametreleri ve bölgenin sismik özelliklerini temsil eden 17 farklı deprem ivme kaydı, iki ayrı ölçeklendirme yöntemi kullanılarak ölçeklendirilmiş ve zemin büyütme analizleri (orijinal veriler ve ölçeklendirilmiş veriler kullanılarak 3 farklı şekilde) DEEPSOIL programı ve OPENSEES yazılımında oluşturulan kod ile gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, bir boyutlu EL ve NL analizler uygulanmıştır.

SK1 ve SK2 için orijinal ivme kayıtları kullanılarak gerçekleştirilen OPENSEES yazılımıyla 34 adet NL ve DEEPSOIL programıyla 34 adet EL ve 34 adet NL analizine ait yüzey ivme değerleri, Şekil 7.3-Şekil 7.19'da gösterilmiştir.

RSN6 depremine ait orijinal ivme kayıtları kullanılarak SK1 için ilk analiz gerçekleştirilmiştir. Ana kaya için PGA değeri 2.2 saniyede 0.28g olarak belirlenmiştir. Yapılan DEEPSOIL-EL analiz sonucunda elde edilen ivme-zaman verilerine göre, PGA değerinin yaklaşık 0.37g olduğu ve bu değere 2.5 saniye içerisinde ulaşıldığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, DEEPSOIL programı ile yapılan NL analizde PGA değerinin yaklaşık 0.24g olduğu ve 2.5 saniye içerisinde, OPENSEES yazılımı ile yapılan NL analizde ise PGA değerinin yaklaşık 0.19g olduğu ve 5 saniye içerisinde ulaşılmıştır. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %32 oranında büyütme, DEEPSOIL-NL analizi için %14 ve OPENSEES-NL analizi için %32 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. EL analizi

sonuçlarının, NL analizine kıyasla daha yüksek ivme değerlerine ulaştığı tespit edilmiştir. Yapılan analizler sonucu oluşan ivme-zaman grafikleri ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.3).



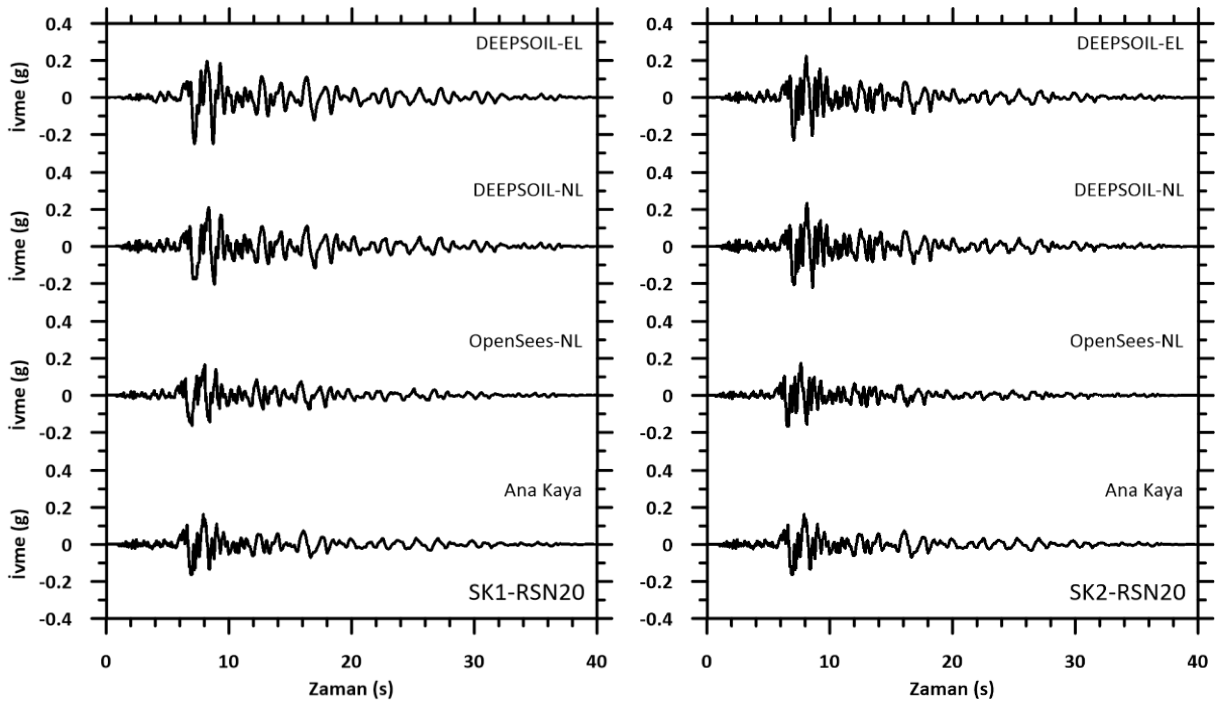
Şekil 7.3. RSN6 orijinal deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Diğer taraftan SK2 için gerçekleştirilen DEEPSOIL-EL analiz sonucunda elde edilen ivme-zaman verilerine göre, PGA değerinin yaklaşık 0.41g olduğu ve bu değere 2.3 saniye içerisinde ulaşıldığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, DEEPSOIL programı ile yapılan NL analizde PGA değerinin yaklaşık 0.32g olduğu ve 5.3 saniye içerisinde ulaşıldığı, OPENSEES yazılımı ile yapılan NL analizde ise PGA değerinin yaklaşık 0.22g olduğu ve 5 saniye içerisinde ulaşıldığı tespit edilmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %46, DEEPSOIL-NL analizi için %14 oranında büyütme ve OPENSEES-NL analizi için %21 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analizler sonucu oluşan ivme-zaman grafikleri ana kaya ile benzerlik göstermiştir.

SK1'den daha yüksek rijitliğe sahip SK2 yüzey ivme değerleri SK1'e göre daha yüksek çıkmıştır. Zemin büyütme analizlerinde rijitliğin artması, yüzey ivme değerleri üzerinde doğrudan etkili olup, özellikle zemin tabakalarının özellikleriyle ilişkilidir. Rijitliğin artması, zeminin kayma dalgası hızının yükselmesine ve dolayısıyla doğal periyodun kısalmasına neden olmaktadır. Bu durum, kısa periyotlu sismik dalgaların büyütmesini artırırken, uzun periyotlu bileşenlerin büyütme faktörünü azaltabilir. Yüzey ivme değerleri açısından

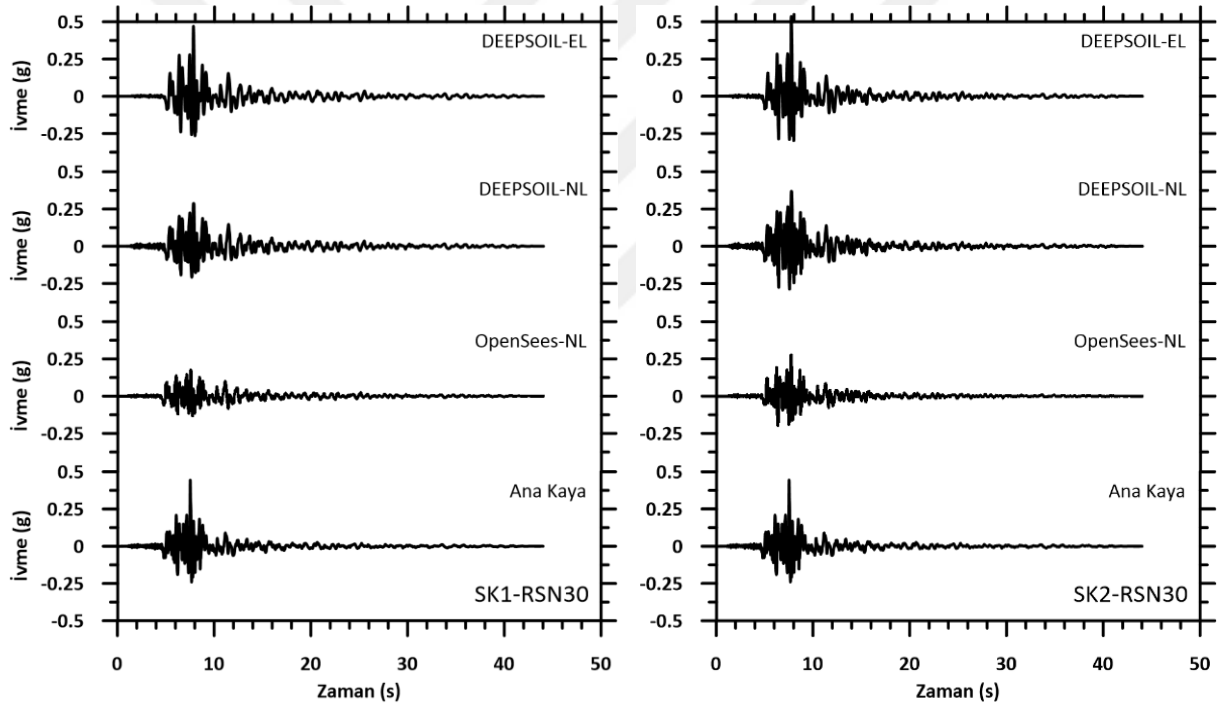
değerlendirildiğinde, rijitliğin artması sismik dalgaların daha fazla yansımaya yol açarak yüzeyde maksimum ivme değerlerinin yükselmesine sebep olabilir. Ayrıca, rijit zeminlerde düşük sönümlenme kapasitesi nedeniyle gelen sismik dalgalar enerji kaybına uğramadan yüzeye ulaşabilmekte, bu da yüzeyde daha yüksek ivme değerlerine neden olmaktadır. Sonuç olarak, rijitliğin artışı yüzey ivme değerlerinde genel bir artışa yol açarken, düşük frekanslı dalgalarda büyütme etkisi sınırlı kalmakta, yüksek frekanslı bileşenlerde ise ivme değerleri daha belirgin şekilde yükselmektedir.

Analizlerde ikinci deprem verisi olarak RSN20 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 6.9 saniyede 0.16g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 8.7 saniyede 0.25g, DEEPSOIL-NL analizi için 8.3 saniyede 0.21g, OPENSEES-NL analizi için 8 saniyede 0.17g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %56, DEEPSOIL-NL analizi için %31 ve OPENSEES-NL analizi için %6 oranında büyütme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 7 saniyede 0.23g, DEEPSOIL-NL analizi için 8.1 saniyede 0.23g, OPENSEES-NL analizi için 7.6 saniyede 0.17g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL ve DEEPSOIL-NL analizi için %44 ve OPENSEES-NL analizi için %6 oranında büyütme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.4).



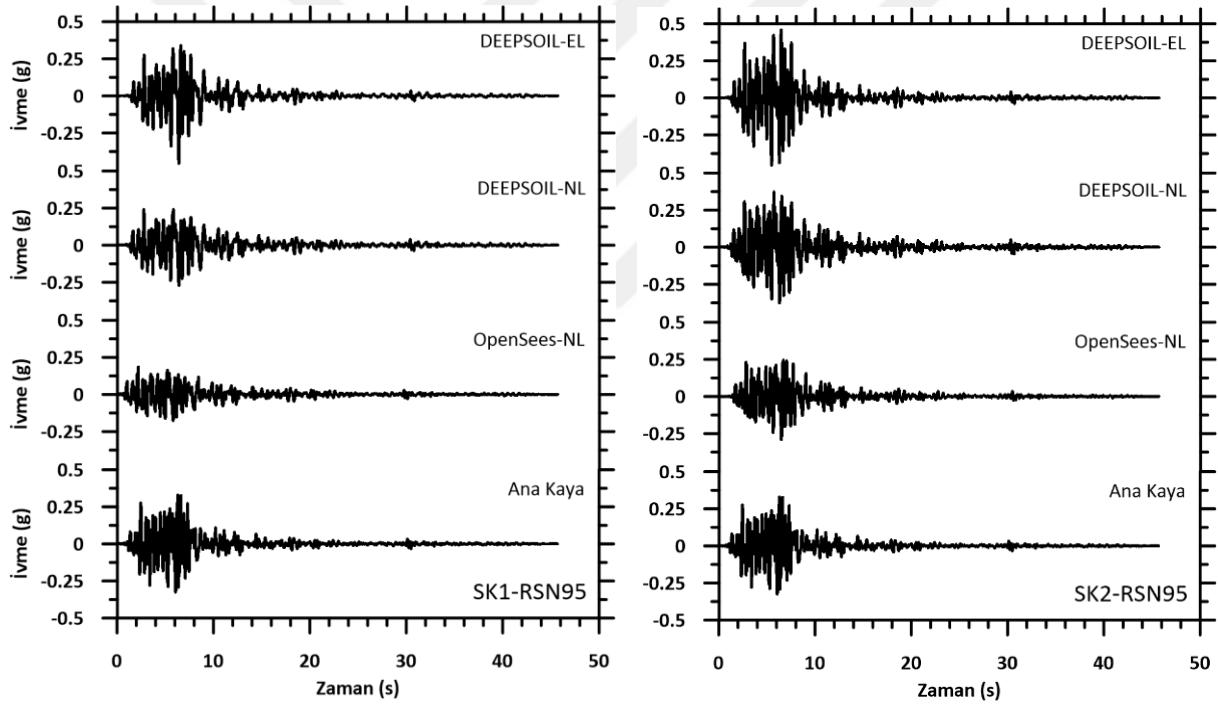
Şekil 7.4. RSN20 orijinal deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde üçüncü olarak RSN30 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 7.6 saniyede 0.44g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 7.8 saniyede 0.47g, DEEPSOIL-NL analizi için 7.9 saniyede 0.29g, OPENSEES-NL analizi için 7.6 saniyede 0.18g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %7 oranında büyütme, DEEPSOIL-NL analizi için %34 ve OPENSEES-NL analizi için %59 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 7.7 saniyede 0.54g, DEEPSOIL-NL analizi için 7.7 saniyede 0.37g, OPENSEES-NL analizi için 7.7 saniyede 0.28g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %23 oranında büyütme, DEEPSOIL-NL analizi için %16 ve OPENSEES-NL analizi için %36 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.5).



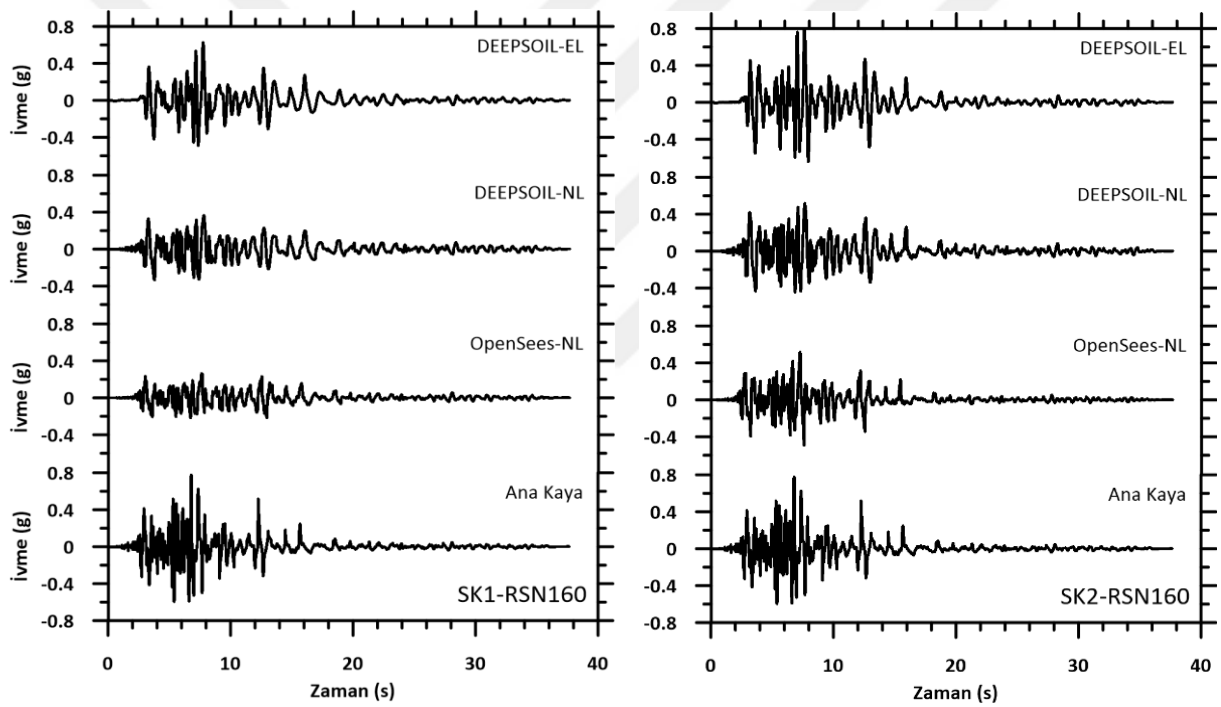
Şekil 7.5. RSN30 orijinal deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde dördüncü olarak RSN95 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 6.3 saniyede 0.33g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 6.4 saniyede 0.46g, DEEPSOIL-NL analizi için 6.4 saniyede 0.27g, OPENSEES-NL analizi için 2.2 saniyede 0.19g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %39 oranında büyütme, DEEPSOIL-NL analizi için %18 ve OPENSEES-NL analizi için %42 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 6.5 saniyede 0.46g, DEEPSOIL-NL analizi için 6.3 saniyede 0.38g, OPENSEES-NL analizi için 6.5 saniyede 0.3g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %39, OPENSEES-NL analizi için %15 oranında büyütme ve DEEPSOIL-NL analizi için %9 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.6).



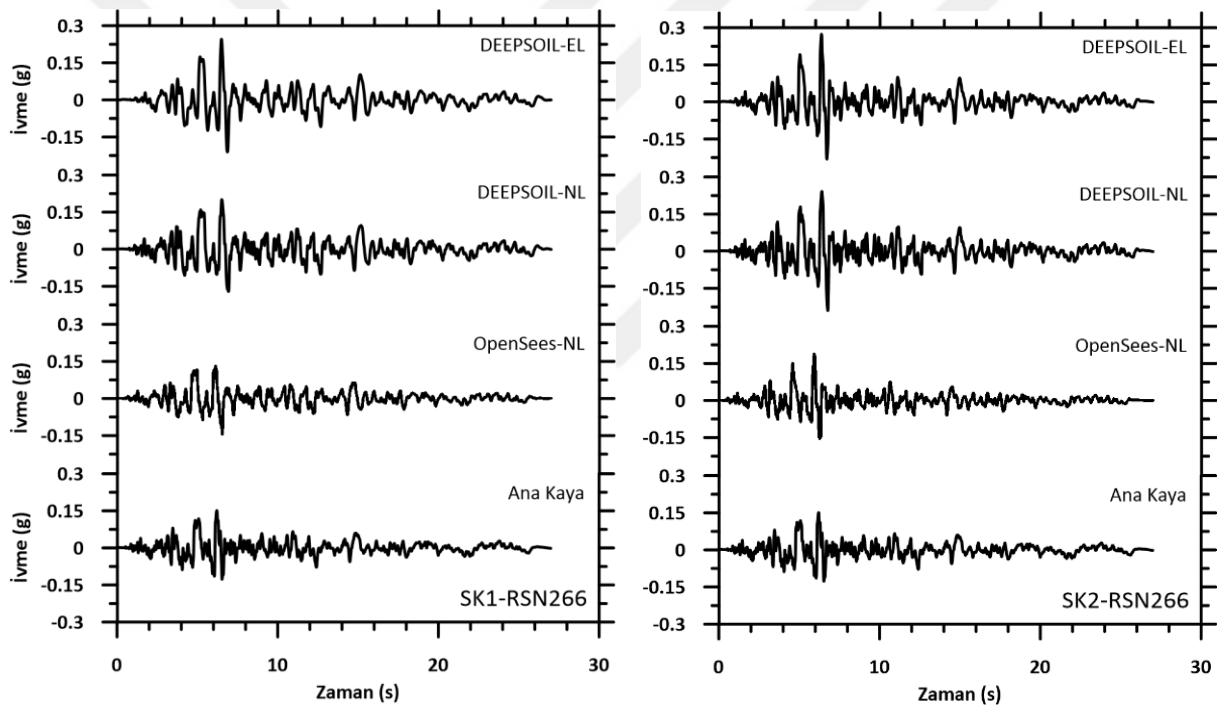
Şekil 7.6. RSN95 orijinal deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde beşinci olarak RSN160 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 6.8 saniyede 0.78g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 7.7 saniyede 0.63g, DEEPSOIL-NL analizi için 7.8 saniyede 0.36g, OPENSEES-NL analizi için 7.6 saniyede 0.26g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %19, DEEPSOIL-NL analizi için %54 ve OPENSEES-NL analizi için %67 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 7.6 saniyede 0.8g, DEEPSOIL-NL analizi için 7.6 saniyede 0.52g, OPENSEES-NL analizi için 7.3 saniyede 0.52g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %3 oranında büyütme, OPENSEES-NL ve DEEPSOIL-NL analizi için %33 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.7).



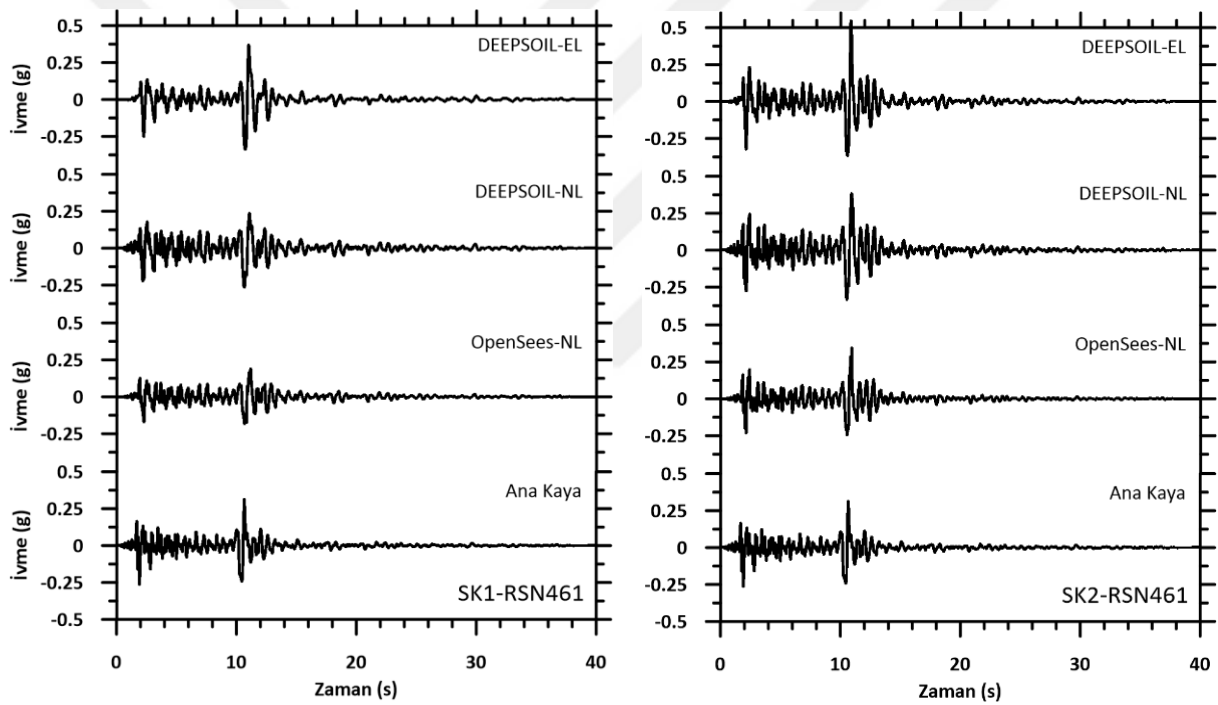
Şekil 7.7. RSN160 orijinal deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde altıncı olarak RSN266 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 6.2 saniyede 0.15g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 6.5 saniyede 0.25g, DEEPSOIL-NL analizi için 6.5 saniyede 0.2g, OPENSEES-NL analizi için 6.5 saniyede 0.14g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %67, DEEPSOIL-NL analizi için %33 oranında büyütme ve OPENSEES-NL analizi için %7 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 6.4 saniyede 0.27g, DEEPSOIL-NL analizi için 6.4 saniyede 0.24g, OPENSEES-NL analizi için 5.9 saniyede 0.19g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %80, DEEPSOIL-NL analizi için %60 ve OPENSEES-NL analizi için %27 oranında büyütme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.8).



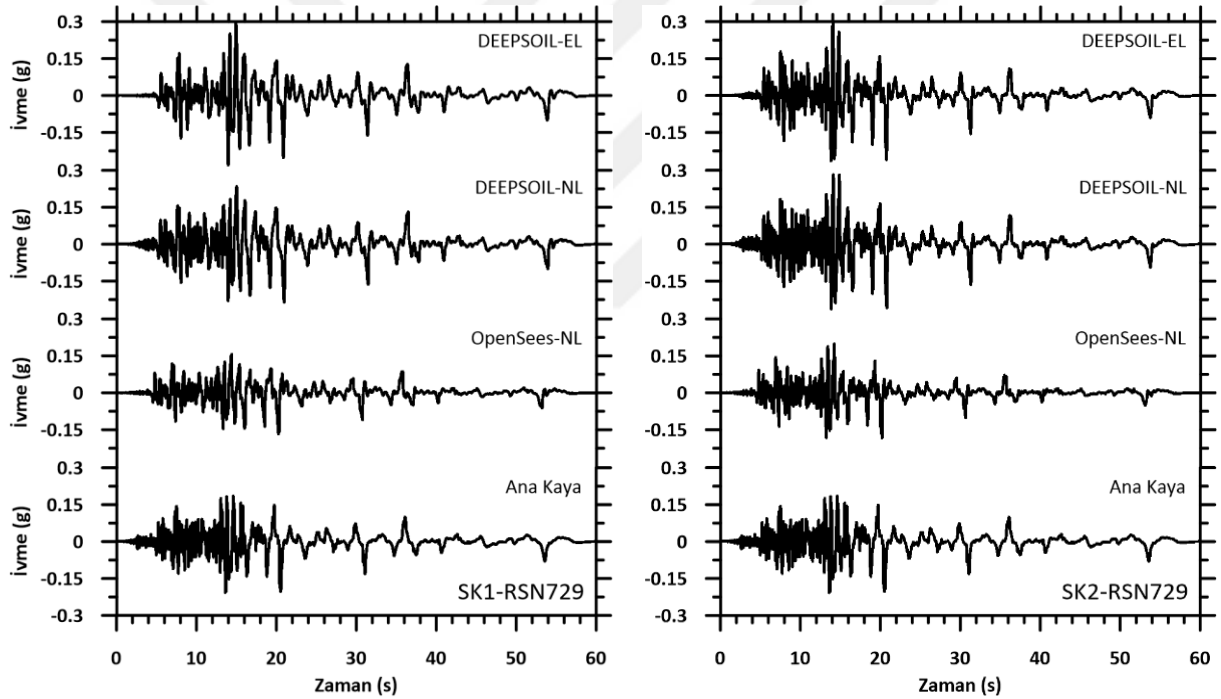
Şekil 7.8. RSN266 orijinal deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde yedinci olarak RSN461 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 10.7 saniyede 0.31g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 11.0 saniyede 0.37g, DEEPSOIL-NL analizi için 10.6 saniyede 0.27g, OPENSEES-NL analizi için 11.2 saniyede 0.19g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %19 oranında büyütme, DEEPSOIL-NL analizi için %13 ve OPENSEES-NL analizi için %39 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri tüm analizler için 10.9 saniyede DEEPSOIL-EL analizi için 0.55g, DEEPSOIL-NL analizi için 0.38g, OPENSEES-NL analizi için 0.34g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %77, DEEPSOIL-NL analizi için %23 ve OPENSEES-NL analizi için %10 oranında büyütme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.9).



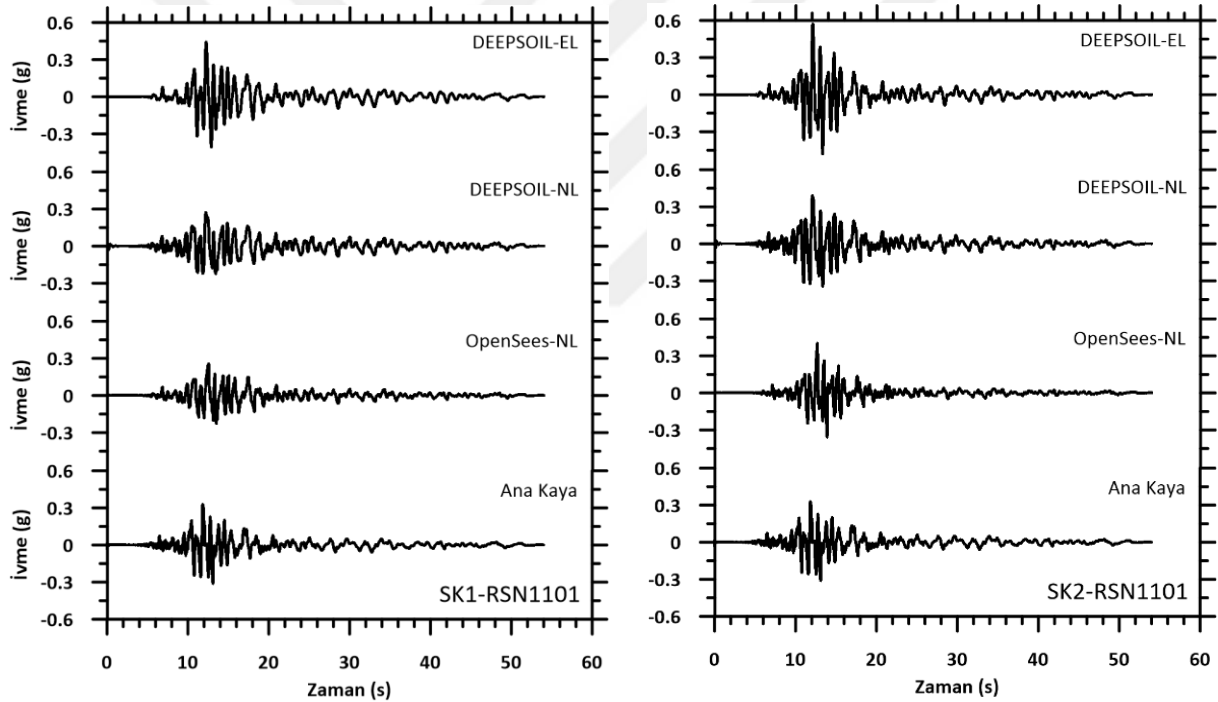
Şekil 7.9. RSN461 orijinal deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde sekizinci olarak RSN729 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 13.7 saniyede 0.21g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 14.9 saniyede 0.3g, DEEPSOIL-NL analizi için 20.9 saniyede 0.24g, OPENSEES-NL analizi için 20.2 saniyede 0.17g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %43, DEEPSOIL-NL analizi için %14 oranında büyütme ve OPENSEES-NL analizi için %19 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 14.0 saniyede 0.3g, DEEPSOIL-NL analizi için 14.0 saniyede 0.29g, OPENSEES-NL analizi için 14.2 saniyede 0.2g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %43, DEEPSOIL-NL analizi için %38 oranında büyütme ve OPENSEES-NL analizi için %5 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.10).



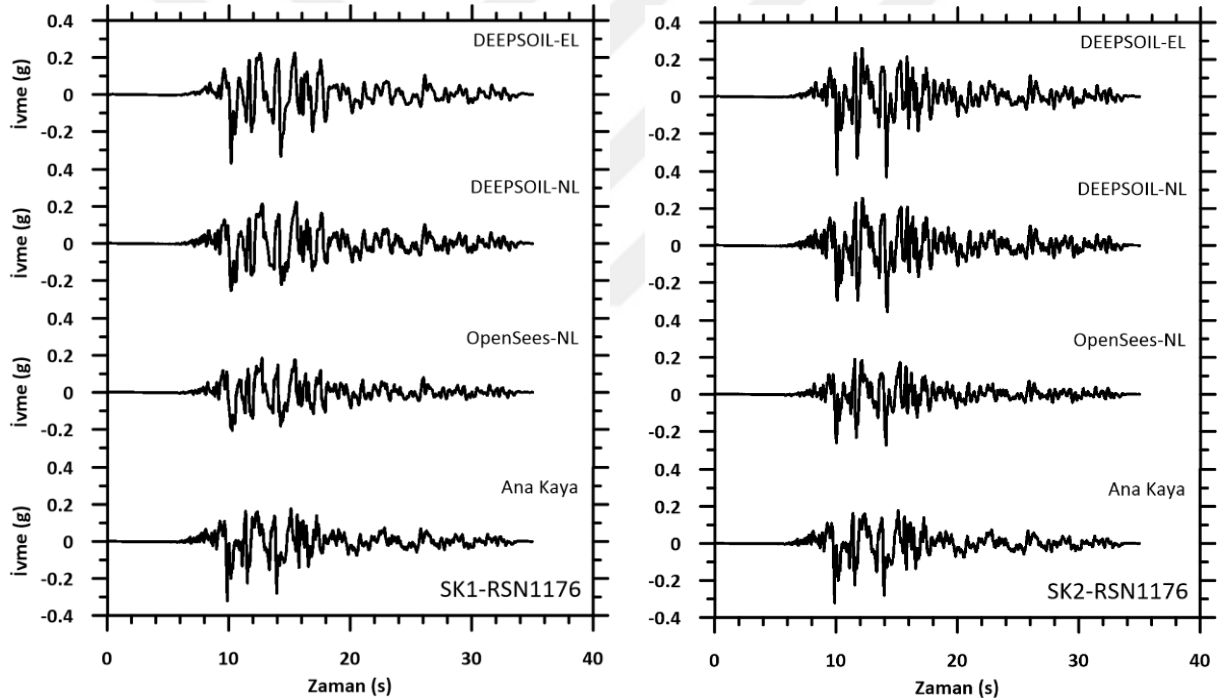
Şekil 7.10. RSN729 orijinal deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde dokuzuncu olarak RSN1101 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 11.8 saniyede 0.33g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 12.2 saniyede 0.44g, DEEPSOIL-NL analizi için 12.2 saniyede 0.27g, OPENSEES-NL analizi için 12.5 saniyede 0.26g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %33 oranında büyütme, DEEPSOIL-NL analizi için %18 ve OPENSEES-NL analizi için %21 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 12.1 saniyede 0.57g, DEEPSOIL-NL analizi için 12.0 saniyede 0.39g, OPENSEES-NL analizi için 12.6 saniyede 0.4g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %73, DEEPSOIL-NL analizi için %18 ve OPENSEES-NL analizi için %21 oranında büyütme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.11).



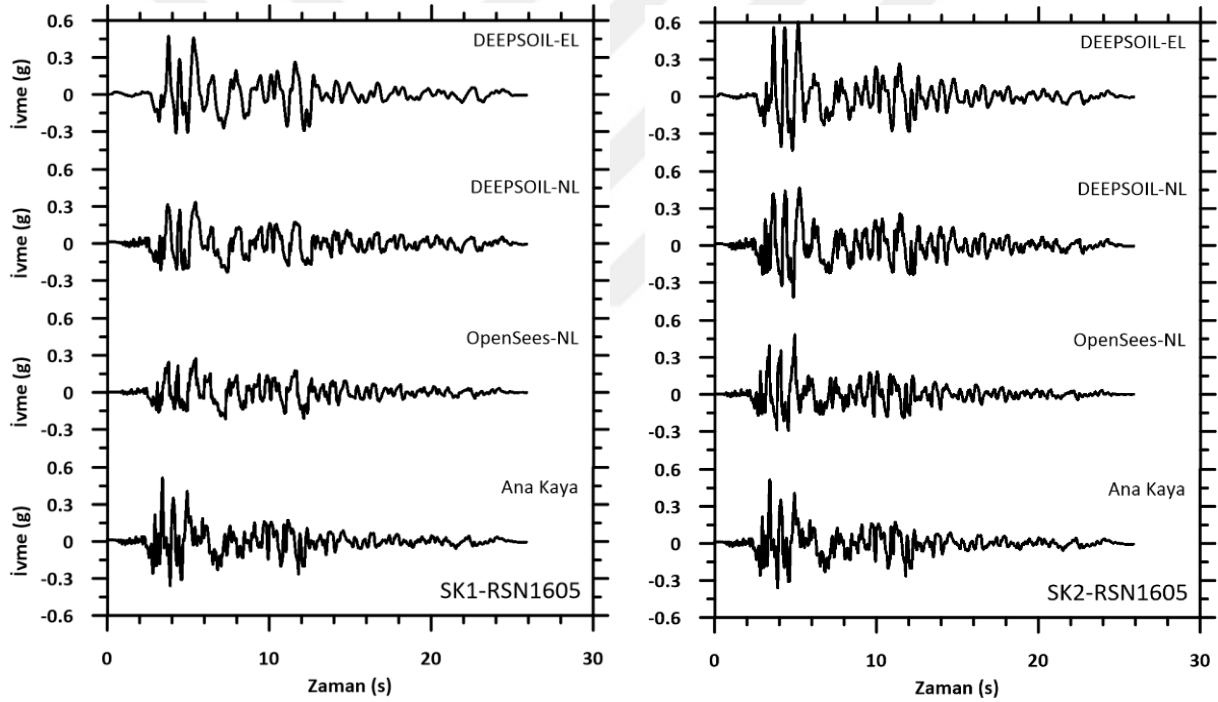
Şekil 7.11. RSN1101 orijinal deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde onuncu olarak RSN1176 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 9.9 saniyede 0.32g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 10.2 saniyede 0.37g, DEEPSOIL-NL analizi için 10.2 saniyede 0.26g, OPENSEES-NL analizi için 10.3 saniyede 0.21g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %16 büyütme, DEEPSOIL-NL analizi için %19 ve OPENSEES-NL analizi için %34 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 14.1 saniyede 0.44g, DEEPSOIL-NL analizi için 14.2 saniyede 0.36g, OPENSEES-NL analizi için 14.1 saniyede 0.28g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %38, DEEPSOIL-NL analizi için %13 büyütme, OPENSEES-NL analizi için %13 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.12).



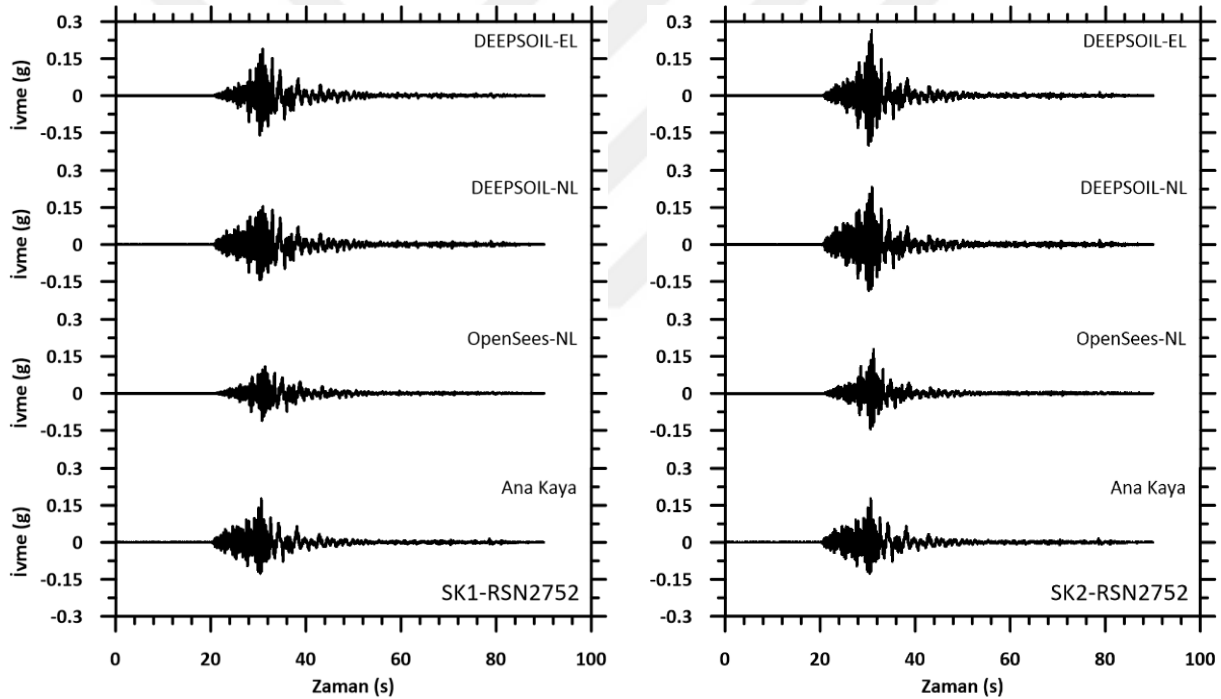
Şekil 7.12. RSN1176 orijinal deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde on birinci olarak RSN1605 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 3.4 saniyede 0.52g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 3.8 saniyede 0.42g, DEEPSOIL-NL analizi için 5.4 saniyede 0.33g, OPENSEES-NL analizi için 5.5 saniyede 0.28g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %19, DEEPSOIL-NL analizi için %37 ve OPENSEES-NL analizi için %46 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 5.2 saniyede 0.61g, DEEPSOIL-NL analizi için 5.2 saniyede 0.47g, OPENSEES-NL analizi için 4.9 saniyede 0.49g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %17 oranında büyütme, DEEPSOIL-NL analizi için %10 ve OPENSEES-NL analizi için %6 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.13).



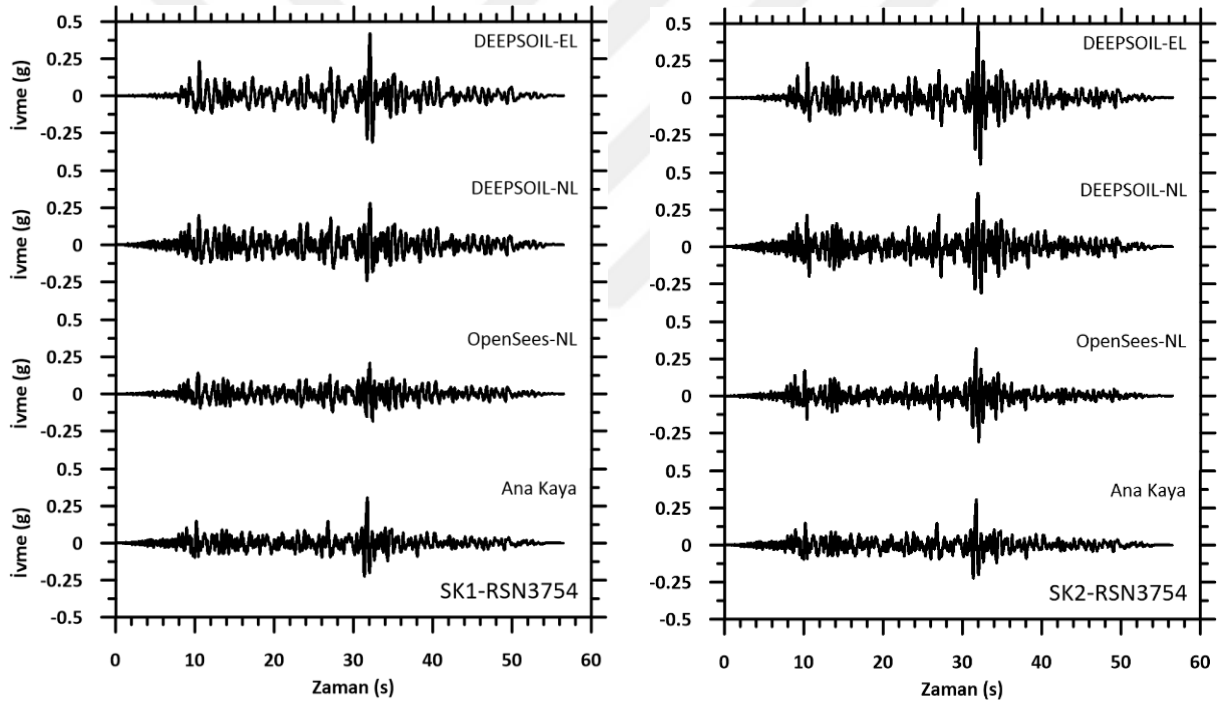
Şekil 7.13. RSN1605 orijinal deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde on ikinci olarak RSN2752 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 30.6 saniyede 0.18g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 30.9 saniyede 0.19g, DEEPSOIL-NL analizi için 30.9 saniyede 0.15g, OPENSEES-NL analizi için 30.7 saniyede 0.11g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %6 oranında büyütme, DEEPSOIL-NL analizi için %17 ve OPENSEES-NL analizi için %39 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 30.8 saniyede 0.26g, DEEPSOIL-NL analizi için 30.8 saniyede 0.23g, OPENSEES-NL analizi için 31.2 saniyede 0.18g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %44, DEEPSOIL-NL analizi için %28 oranında büyütme ve OPENSEES-NL analizi için aynı olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.14).



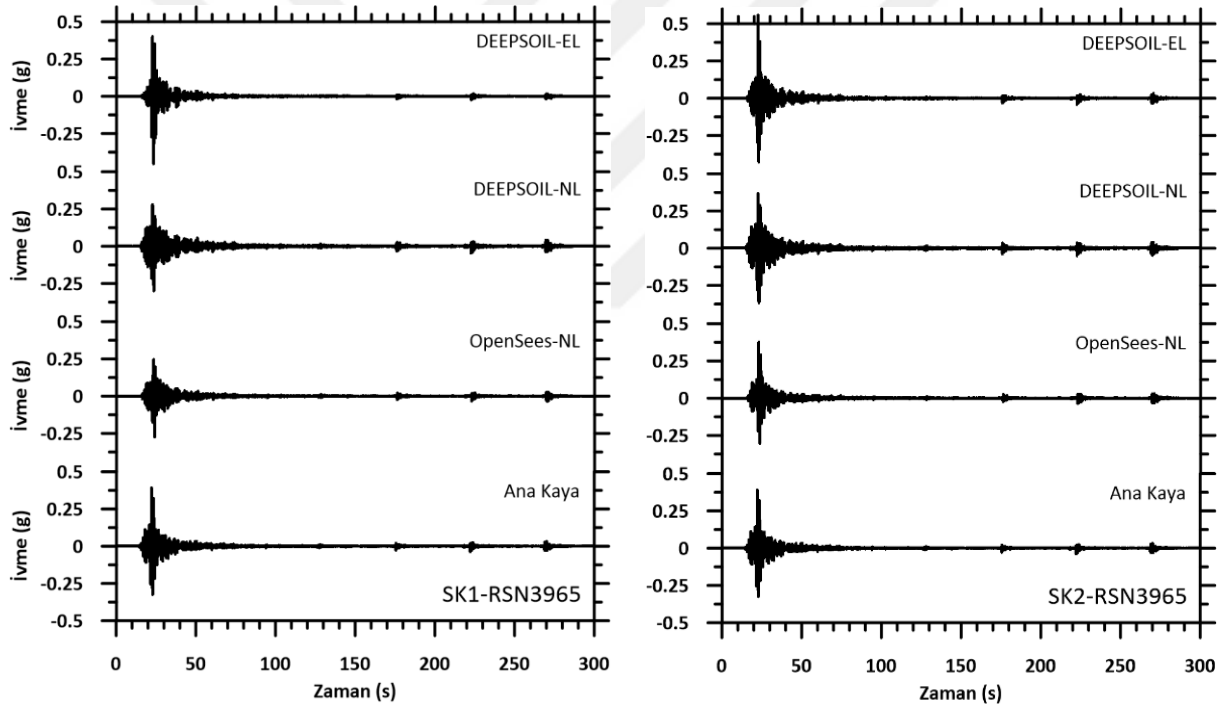
Şekil 7.14. RSN2752 orijinal deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde on üçüncü olarak RSN3754 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 31.8 saniyede 0.31g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 32.0 saniyede 0.42g, DEEPSOIL-NL analizi için 32.1 saniyede 0.28g, OPENSEES-NL analizi için 32.0 saniyede 0.21g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %35 oranında büyütme, DEEPSOIL-NL analizi için %10 ve OPENSEES-NL analizi için %32 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 31.9 saniyede 0.50g, DEEPSOIL-NL analizi için 31.9 saniyede 0.36g, OPENSEES-NL analizi için 31.7 saniyede 0.32g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %61, DEEPSOIL-NL analizi için %16 ve OPENSEES-NL analizi için %3 oranında büyütme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.15).



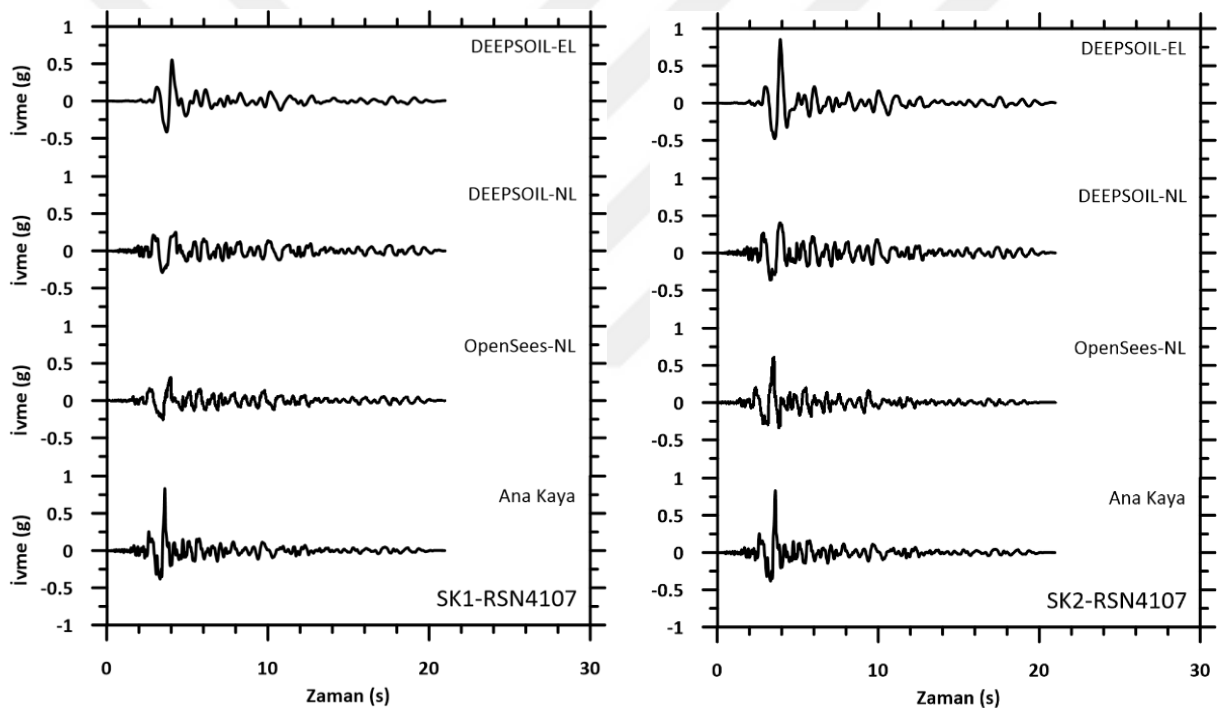
Şekil 7.15. RSN3754 orijinal deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde on dördüncü olarak RSN3965 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 22.2 saniyede 0.39g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 23.3 saniyede 0.45g, DEEPSOIL-NL analizi için 23.4 saniyede 0.3g, OPENSEES-NL analizi için 23.9 saniyede 0.28g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %15 oranında büyütme, DEEPSOIL-NL analizi için %23 ve OPENSEES-NL analizi için %28 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 22.4 saniyede 0.56g, DEEPSOIL-NL analizi için 22.5 saniyede 0.37g, OPENSEES-NL analizi için 23.0 saniyede 0.38g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %44 oranında büyütme, DEEPSOIL-NL analizi için %5 ve OPENSEES-NL analizi için %3 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.16).



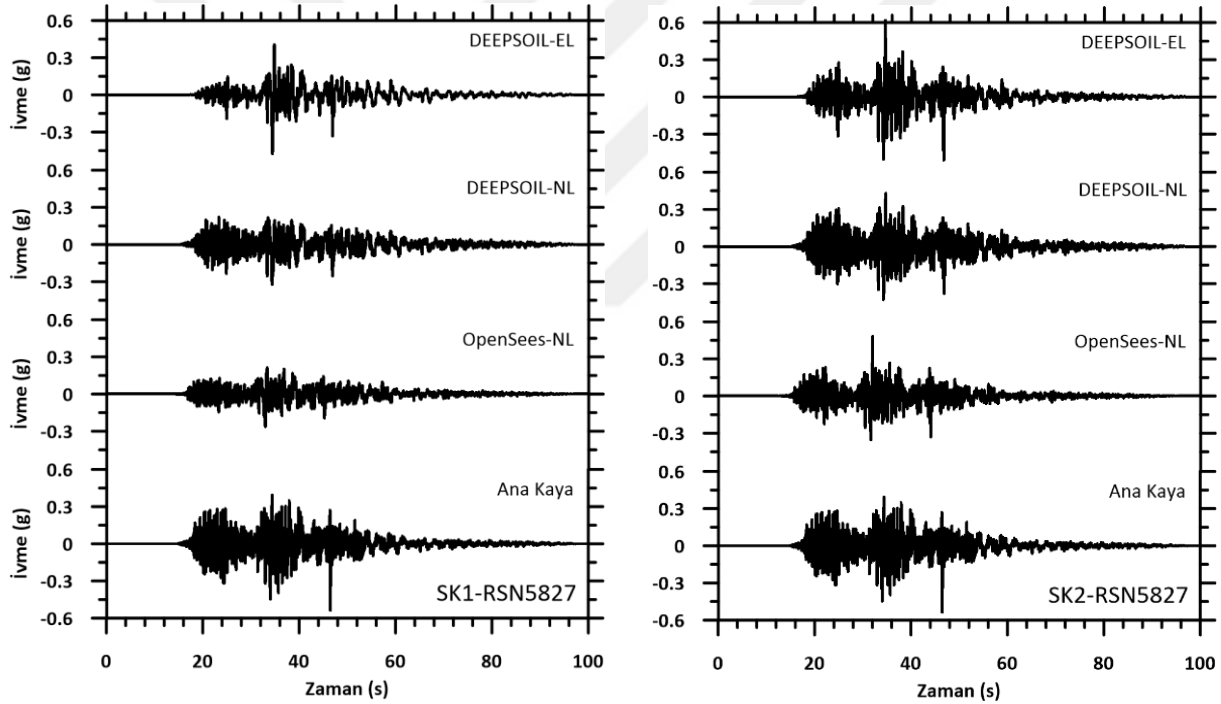
Şekil 7.16. RSN3965 orijinal deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde on beşinci olarak RSN4107 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 3.6 saniyede 0.83g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 4 saniyede 0.55g, DEEPSOIL-NL analizi için 3.4 saniyede 0.29g, OPENSEES-NL analizi için 4 saniyede 0.31g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %34, DEEPSOIL-NL analizi için %65 ve OPENSEES-NL analizi için %63 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 3.9 saniyede 0.85g, DEEPSOIL-NL analizi için 3.9 saniyede 0.4g, OPENSEES-NL analizi için 3.5 saniyede 0.61g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %2 oranında büyütme, DEEPSOIL-NL analizi için %52 ve OPENSEES-NL analizi için %27 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.17).



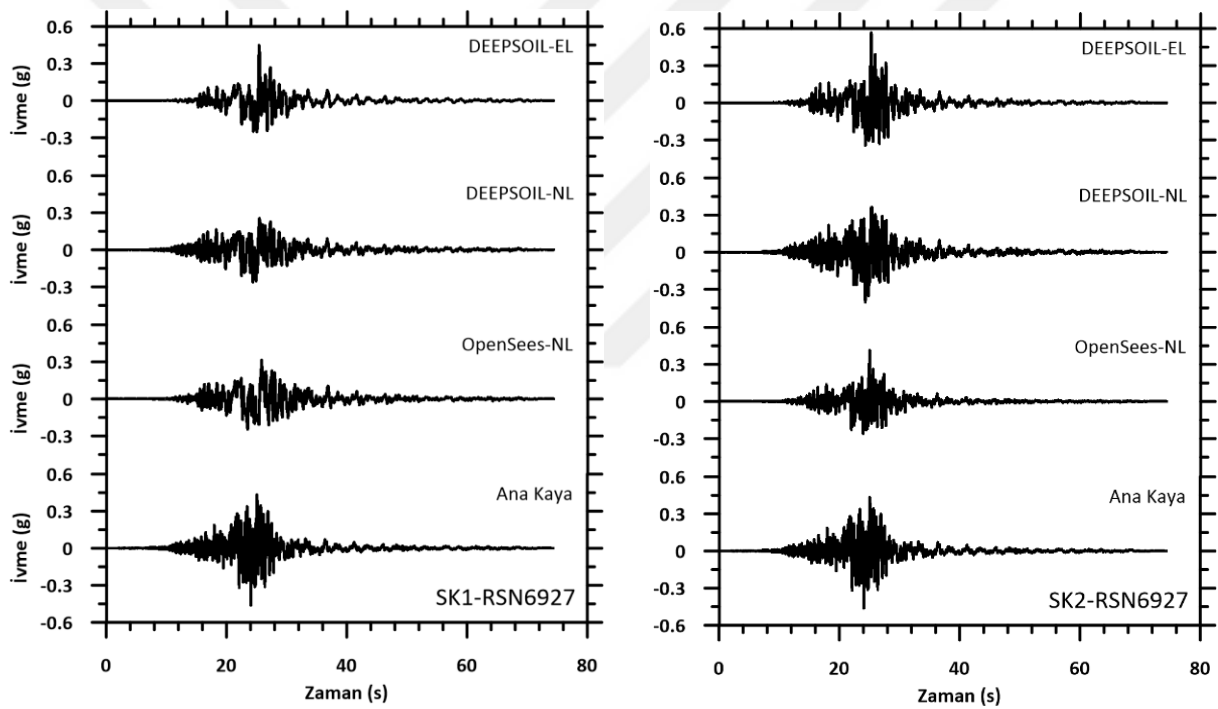
Şekil 7.17. RSN4107 orijinal deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde on altıncı olarak RSN5827 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 46.5 saniyede 0.54g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 34.4 saniyede 0.48g, DEEPSOIL-NL analizi için 34.3 saniyede 0.32g, OPENSEES-NL analizi için 32.9 saniyede 0.27g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %11, DEEPSOIL-NL analizi için %41 ve OPENSEES-NL analizi için %50 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 34.6 saniyede 0.62g, DEEPSOIL-NL analizi için 34.2 saniyede 0.43g, OPENSEES-NL analizi için 32 saniyede 0.48g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %15 oranında büyütme, DEEPSOIL-NL analizi için %20 ve OPENSEES-NL analizi için %11 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.18).



Şekil 7.18. RSN5827 orijinal deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

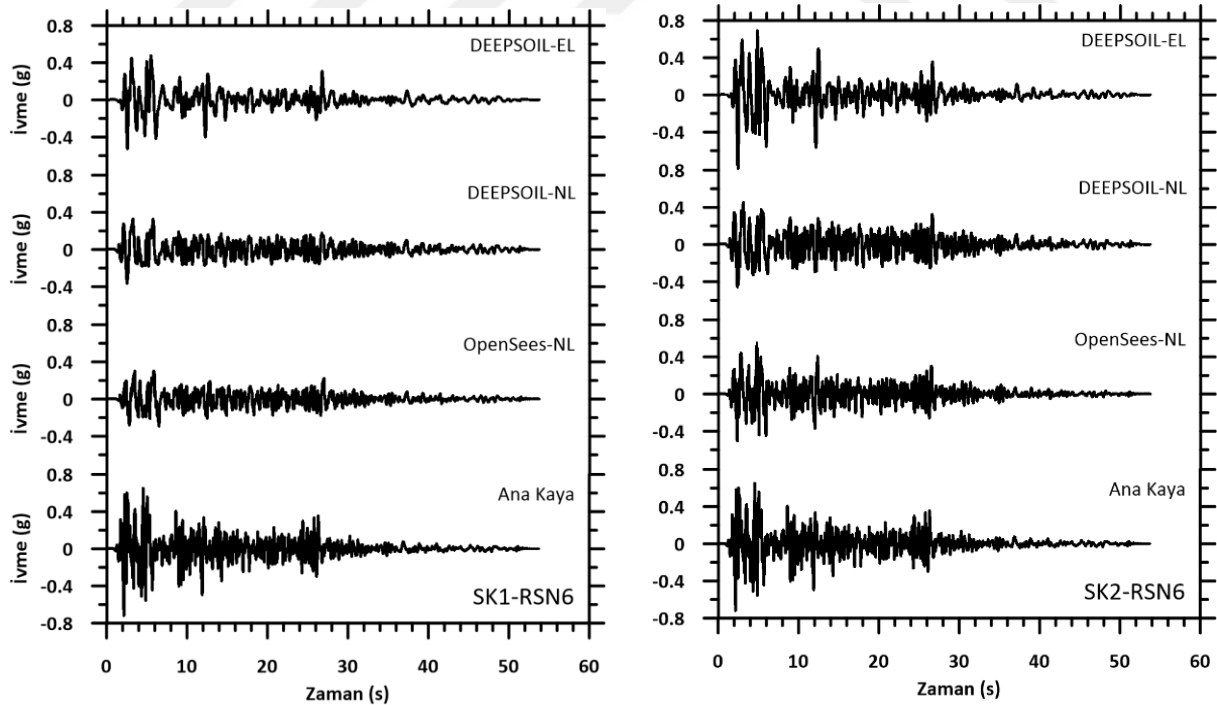
Analizlerde son olarak RSN6927 deprem verisi kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 24.1 saniyede 0.46g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 25.4 saniyede 0.45g, DEEPSOIL-NL analizi için 24.3 saniyede 0.26g, OPENSEES-NL analizi için 25.8 saniyede 0.32g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %2, DEEPSOIL-NL analizi için %43 ve OPENSEES-NL analizi için %30 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 34.6 saniyede 0.62g, DEEPSOIL-NL analizi için 34.2 saniyede 0.43g, OPENSEES-NL analizi için 32 saniyede 0.48g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %35, OPENSEES-NL analizi için %4 oranında büyütme ve DEEPSOIL-NL analizi için %7 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.19).



Şekil 7.19. RSN6927 orijinal deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

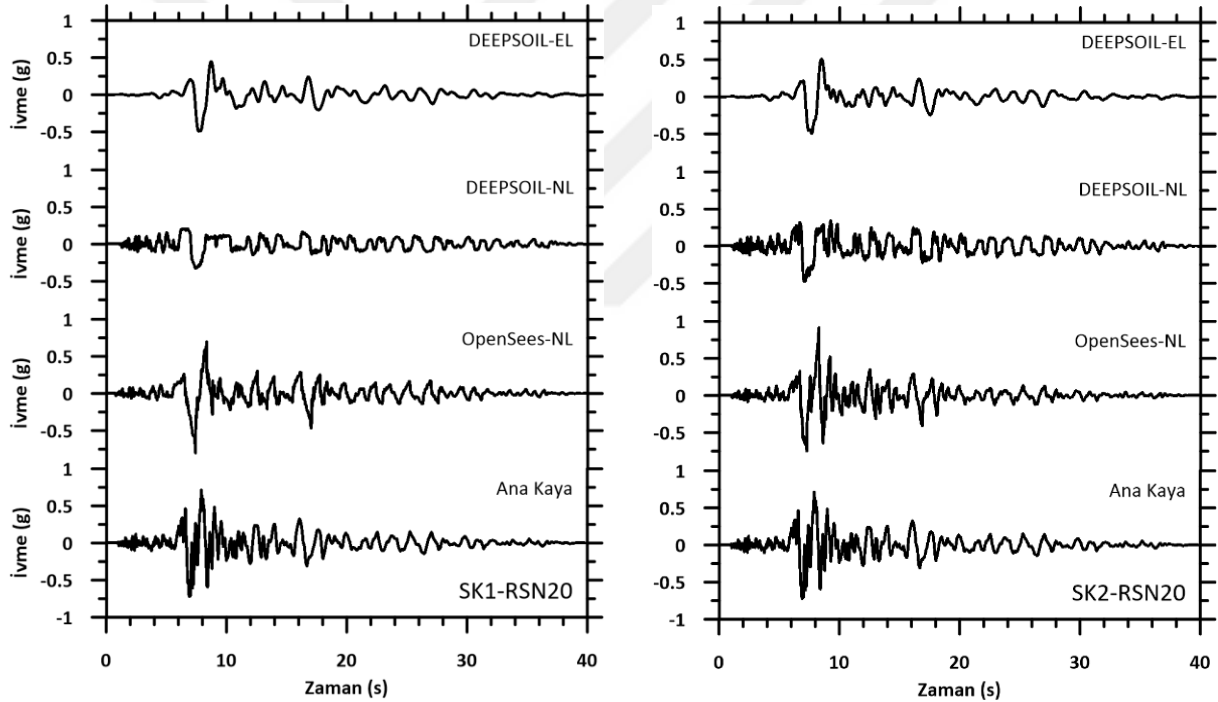
Orijinal deprem kayıtları ile yapılan analizlerin ardından zaman tanım alanında yapılan PGA ölçeklendirmesi sonucu elde edilen ivme kayıtları kullanılarak SK1 ve SK2 sondaj kuyusunda gerçekleştirilen OPENSEES yazılımıyla 34 adet NL ve DEEPSOIL programıyla 34 adet EL ve 34 adet NL analizine ait yüzey ivme değerleri, Şekil 7.20-Şekil 7.36’da gösterilmiştir.

PGA ölçeklendirmesi sonucu elde edilen veriler ile yapılan analizlerde ilk olarak RSN6 deprem verisi kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 2.2 saniyede 0.72g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 2.5 saniyede 0.53g, DEEPSOIL-NL analizi için 2.5 saniyede 0.36g, OPENSEES-NL analizi için 5.8 saniyede 0.3g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %26 oranında, DEEPSOIL-NL analizi için %50 ve OPENSEES-NL analizi için %58 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 2.4 saniyede 0.8g, DEEPSOIL-NL analizi için 2.3 saniyede 0.46g, OPENSEES-NL analizi için 4.8 saniyede 0.55g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %11 oranında büyütme, DEEPSOIL-NL analizi için %36 ve OPENSEES-NL analizi için %24 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.20).



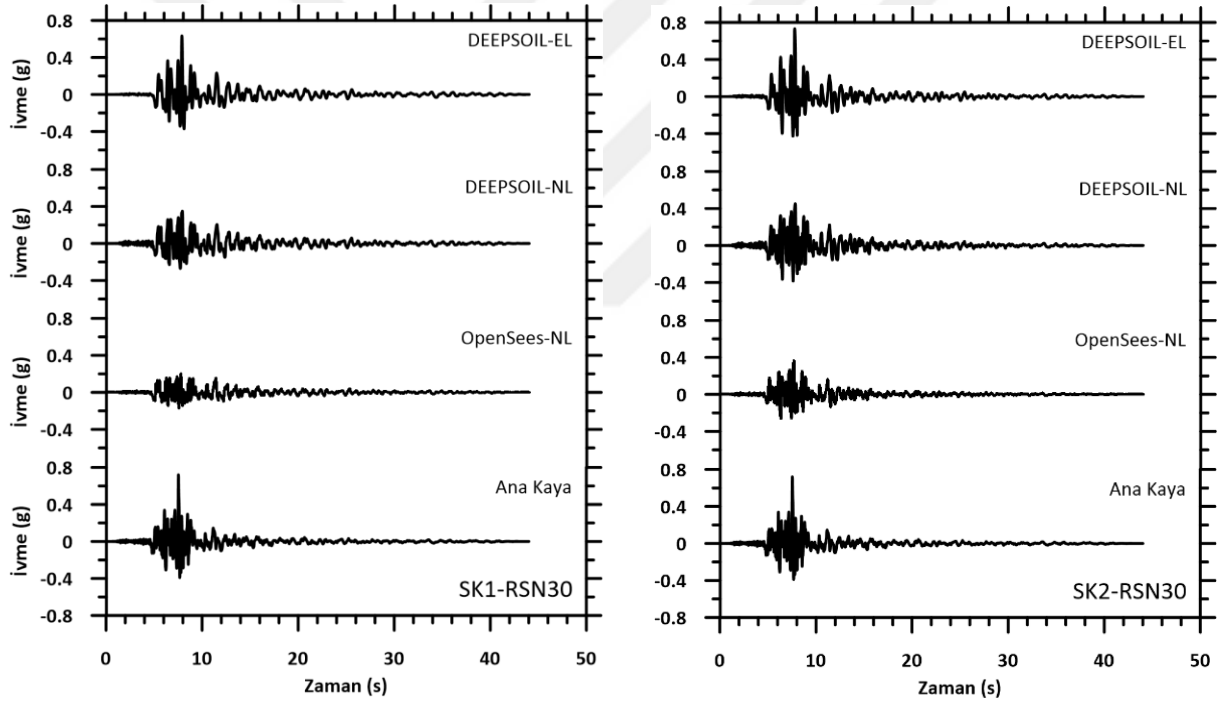
Şekil 7.20. RSN6 PGA ölçeklendirmesiyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde ikinci olarak RSN20 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 2.2 saniyede 0.72g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 7.7 saniyede 0.5g, DEEPSOIL-NL analizi için 7.4 saniyede 0.33g, OPENSEES-NL analizi için 7.4 saniyede 0.8g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %70, DEEPSOIL-NL analizi için %46 oranında küçültme ve OPENSEES-NL analizi için %11 oranında büyütme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 7.0 saniyede 0.51g, DEEPSOIL-NL analizi için 8.5 saniyede 0.47g, OPENSEES-NL analizi için 8.3 saniyede 0.91g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %29, DEEPSOIL-NL analizi için %35 oranında küçültme ve OPENSEES-NL analizi için %26 oranında büyütme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.21).



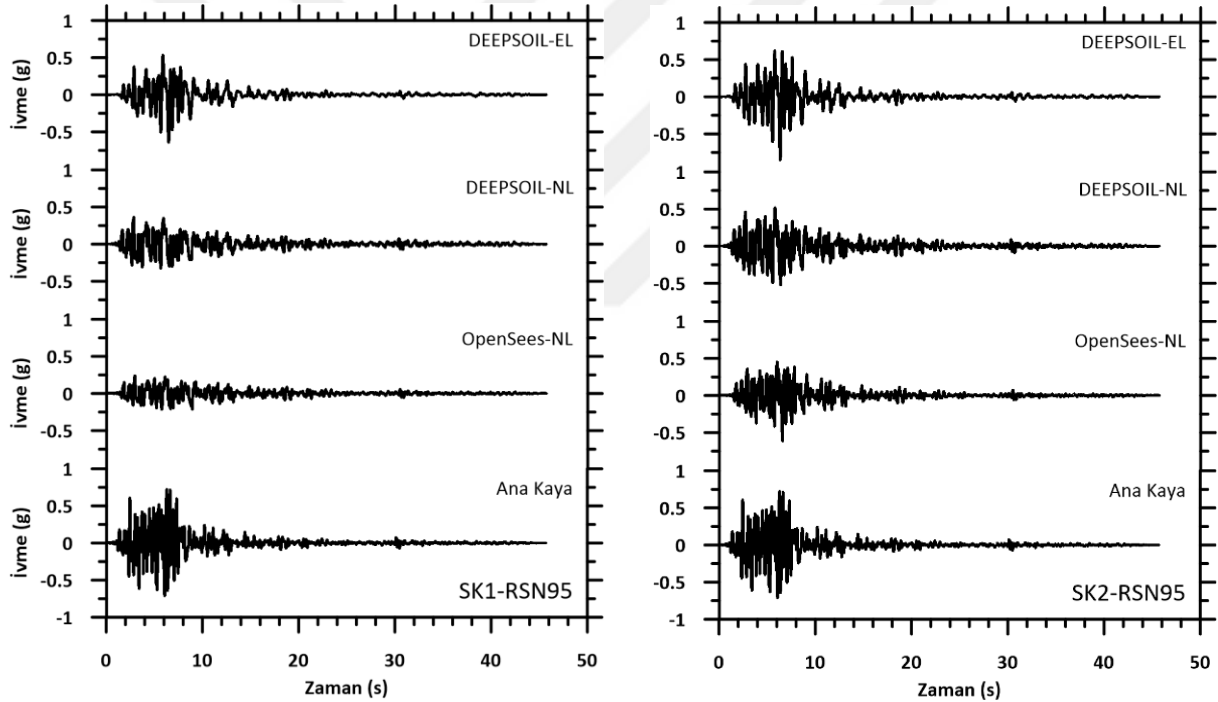
Şekil 7.21. RSN20 PGA ölçeklendirmesiyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde üçüncü olarak RSN30 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 7.5 saniyede 0.72g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1'de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 7.9 saniyede 0.63g, DEEPSOIL-NL analizi için 7.9 saniyede 0.35g, OPENSEES-NL analizi için 7.8 saniyede 0.2g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %13, DEEPSOIL-NL analizi için %51 ve OPENSEES-NL analizi için %72 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2'de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 7.7 saniyede 0.73g, DEEPSOIL-NL analizi için 7.8 saniyede 0.45g, OPENSEES-NL analizi için 7.7 saniyede 0.36g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %1 oranında büyütme, DEEPSOIL-NL analizi için %38 ve OPENSEES-NL analizi için %50 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.22).



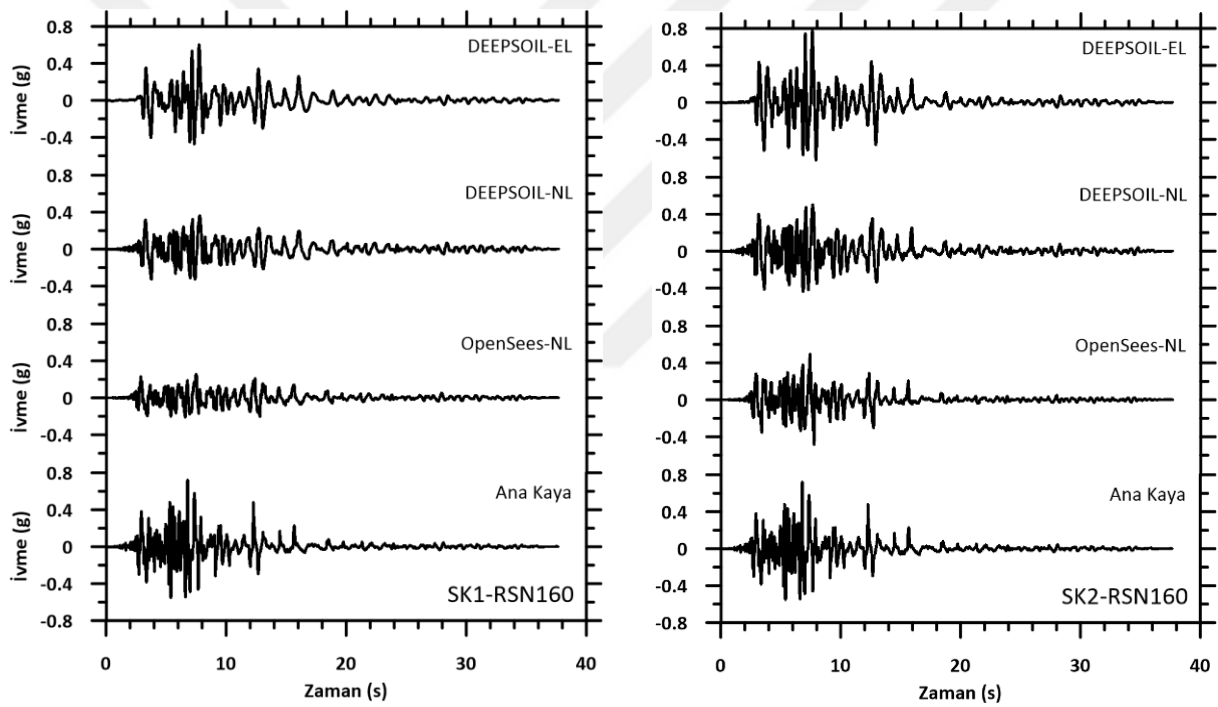
Şekil 7.22. RSN30 PGA ölçeklendirmesiyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde dördüncü olarak RSN95 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 6.3 saniyede 0.72g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 6.5 saniyede 0.64g, DEEPSOIL-NL analizi için 2.8 saniyede 0.36g, OPENSEES-NL analizi için 2.9 saniyede 0.24g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %11, DEEPSOIL-NL analizi için %50 ve OPENSEES-NL analizi için %67 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 6.3 saniyede 0.85g, DEEPSOIL-NL analizi için 6.4 saniyede 0.52g, OPENSEES-NL analizi için 6.7 saniyede 0.61g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %18 oranında büyütme, DEEPSOIL-NL analizi için %28 ve OPENSEES-NL analizi için %15 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.23).



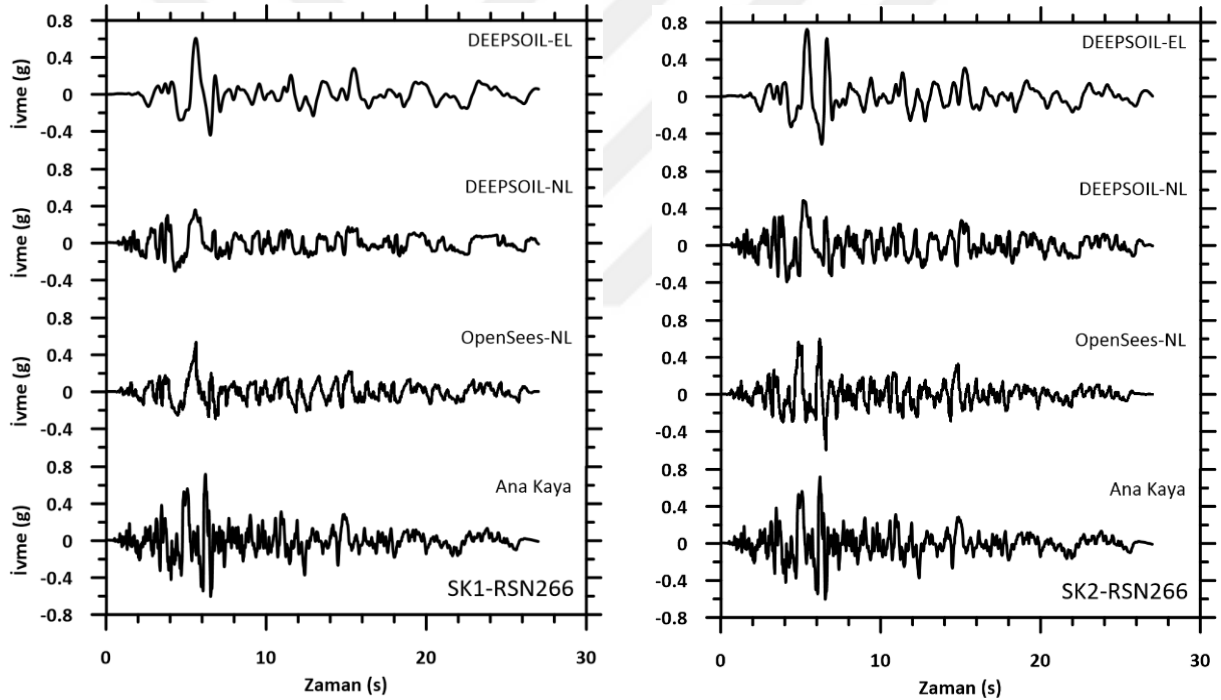
Şekil 7.23. RSN95 PGA ölçeklendirmesiyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde beşinci olarak RSN160 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 6.8 saniyede 0.72g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 7.7 saniyede 0.6g, DEEPSOIL-NL analizi için 7.8 saniyede 0.36g, OPENSEES-NL analizi için 7.5 saniyede 0.25g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %17, DEEPSOIL-NL analizi için %50 ve OPENSEES-NL analizi için %65 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 7.6 saniyede 0.77g, DEEPSOIL-NL analizi için 7.6 saniyede 0.5g, OPENSEES-NL analizi için 7.4 saniyede 0.5g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %7 oranında büyütme, DEEPSOIL-NL ve OPENSEES-NL analizi için %31 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.24).



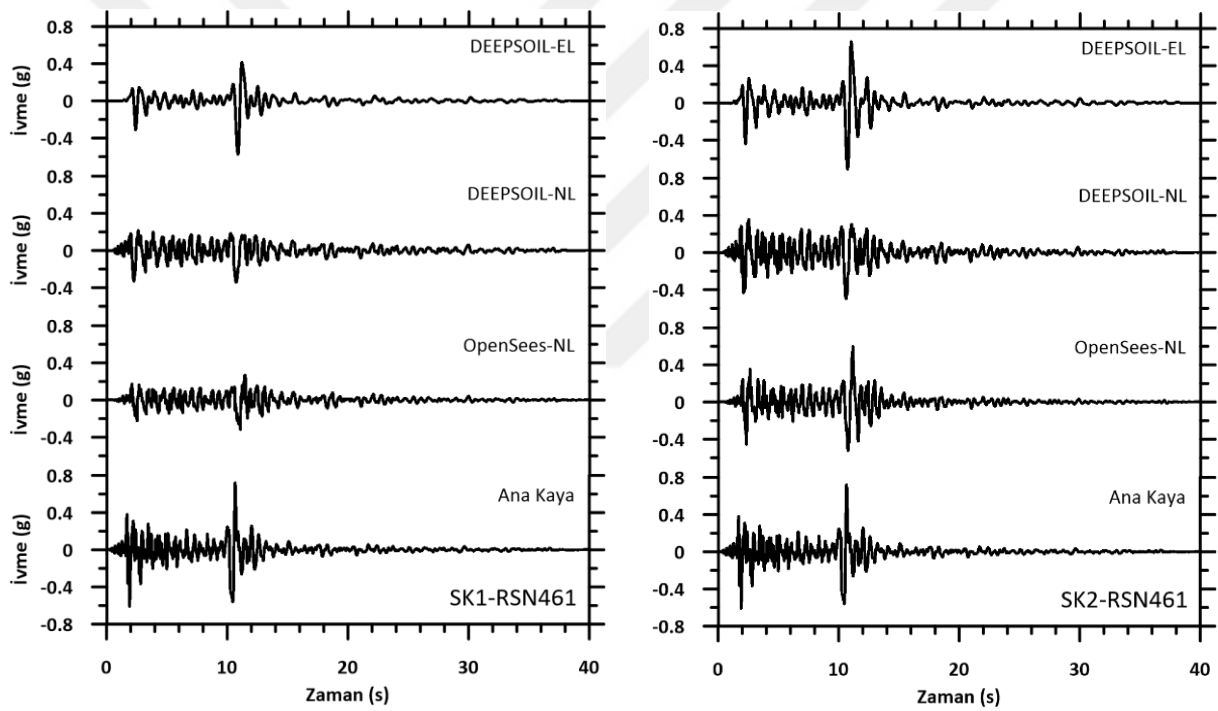
Şekil 7.24. RSN160 PGA ölçeklendirmesiyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde altıncı olarak RSN266 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 6.2 saniyede 0.72g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1'de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 5.6 saniyede 0.61g, DEEPSOIL-NL analizi için 5.5 saniyede 0.36g, OPENSEES-NL analizi için 11.2 saniyede 0.54g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %15, DEEPSOIL-NL analizi için %50 ve OPENSEES-NL analizi için %25 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2'de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 5.4 saniyede 0.73g, DEEPSOIL-NL analizi için 5.1 saniyede 0.49g, OPENSEES-NL analizi için 6.6 saniyede 0.6g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %1 oranında büyütme, DEEPSOIL-NL analizi için %32 ve OPENSEES-NL analizi için %17 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.25).



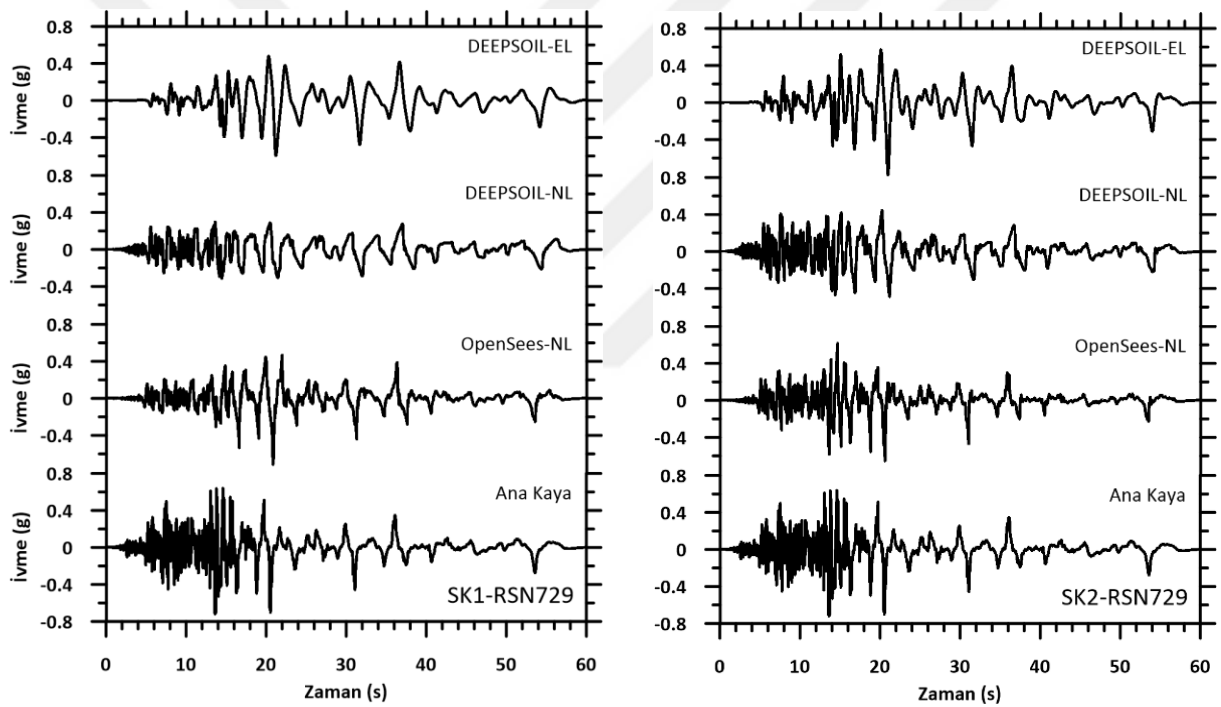
Şekil 7.25. RSN266 PGA ölçeklendirmesiyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde yedinci olarak RSN461 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 10.7 saniyede 0.72g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 10.9 saniyede 0.58g, DEEPSOIL-NL analizi için 10.7 saniyede 0.34g, OPENSEES-NL analizi için 11.1 saniyede 0.32g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %19, DEEPSOIL-NL analizi için %53 ve OPENSEES-NL analizi için %56 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 10.7 saniyede 0.71g, DEEPSOIL-NL analizi için 10.6 saniyede 0.5g, OPENSEES-NL analizi için 11.2 saniyede 0.6g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %1, DEEPSOIL-NL analizi için %31 ve OPENSEES-NL analizi için %17 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.26).



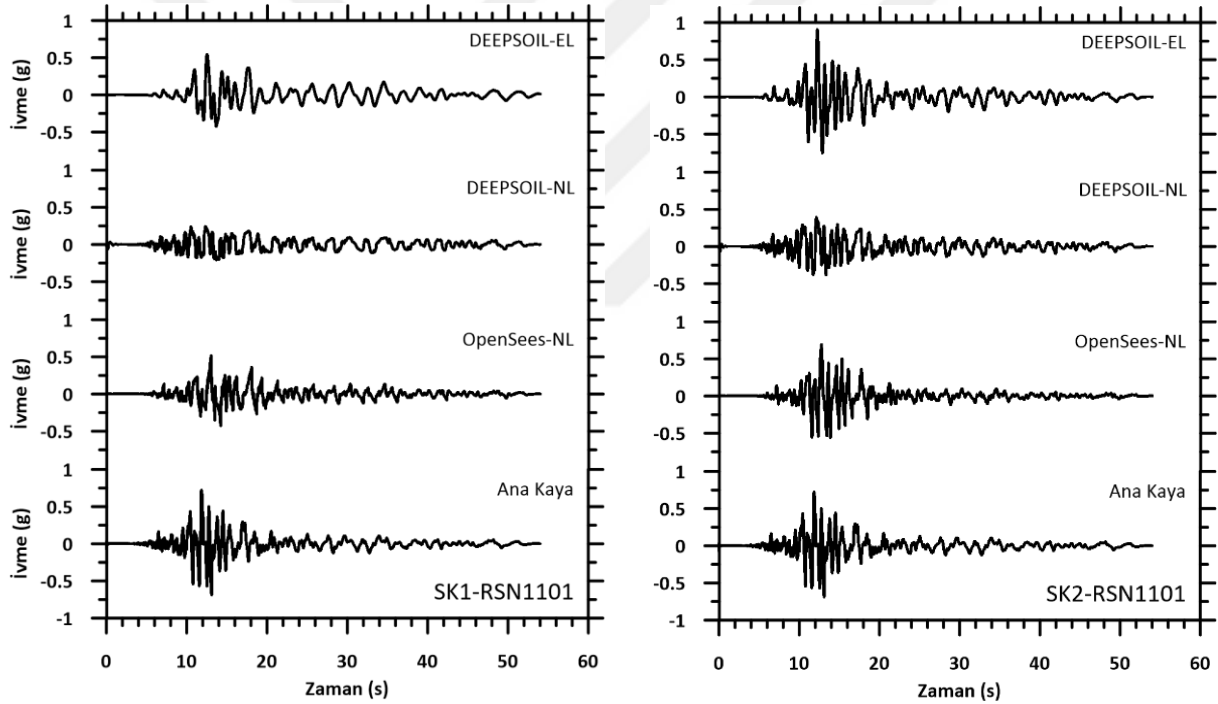
Şekil 7.26. RSN461 PGA ölçeklendirmesiyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde sekizinci olarak RSN729 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 13.6 saniyede 0.72g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1'de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 21.2 saniyede 0.6g, DEEPSOIL-NL analizi için 14.4 saniyede 0.31g, OPENSEES-NL analizi için 20.8 saniyede 0.71g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %17, DEEPSOIL-NL analizi için %57 ve OPENSEES-NL analizi için %1 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2'de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 21.0 saniyede 0.78g, DEEPSOIL-NL analizi için 21.1 saniyede 0.5g, OPENSEES-NL analizi için 20.6 saniyede 0.66g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %8 oranında büyütme, DEEPSOIL-NL analizi için %31 ve OPENSEES-NL analizi için %8 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.27).



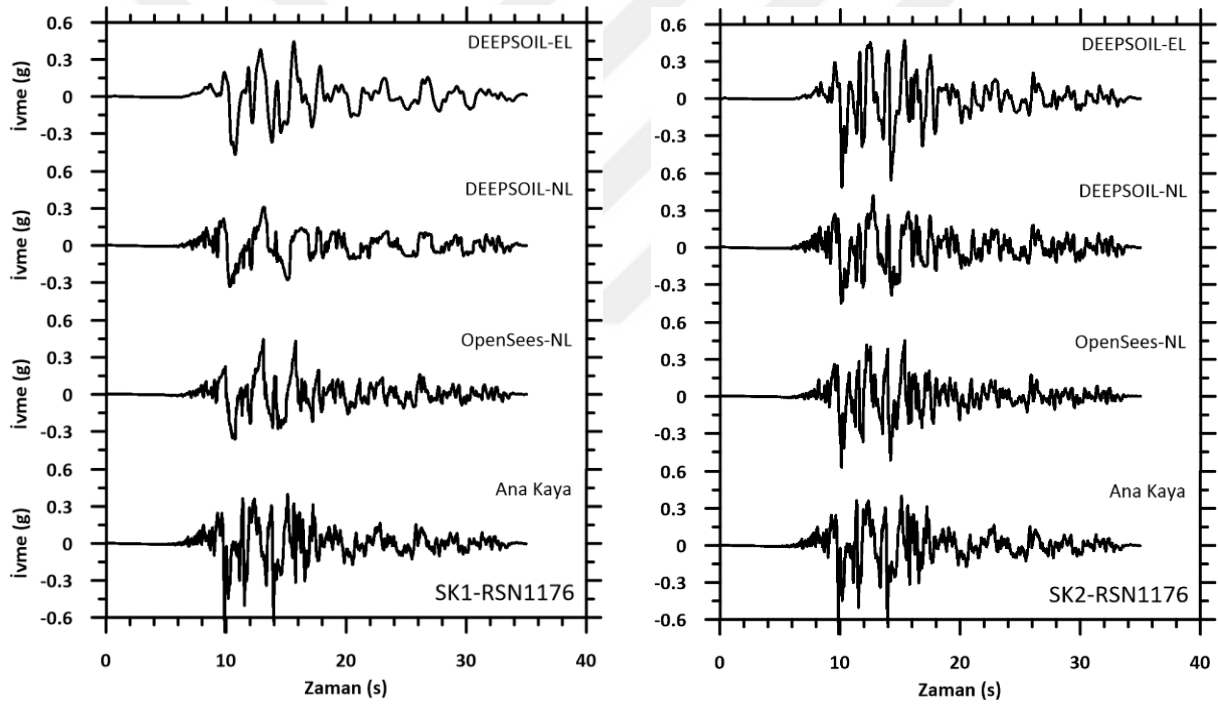
Şekil 7.27. RSN729 PGA ölçeklendirmesiyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde dokuzuncu olarak RSN1101 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 11.8 saniyede 0.72g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 12.5 saniyede 0.54g, DEEPSOIL-NL analizi için 12.3 saniyede 0.24g, OPENSEES-NL analizi için 13.0 saniyede 0.52g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %25, OPENSEES-NL analizi için %67 ve DEEPSOIL-NL analizi için %28 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 12.2 saniyede 0.9g, DEEPSOIL-NL analizi için 12.1 saniyede 0.39g, OPENSEES-NL analizi için 12.7 saniyede 0.69g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %25 oranında büyütme, DEEPSOIL-NL analizi için %46 ve OPENSEES-NL analizi için %4 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.28).



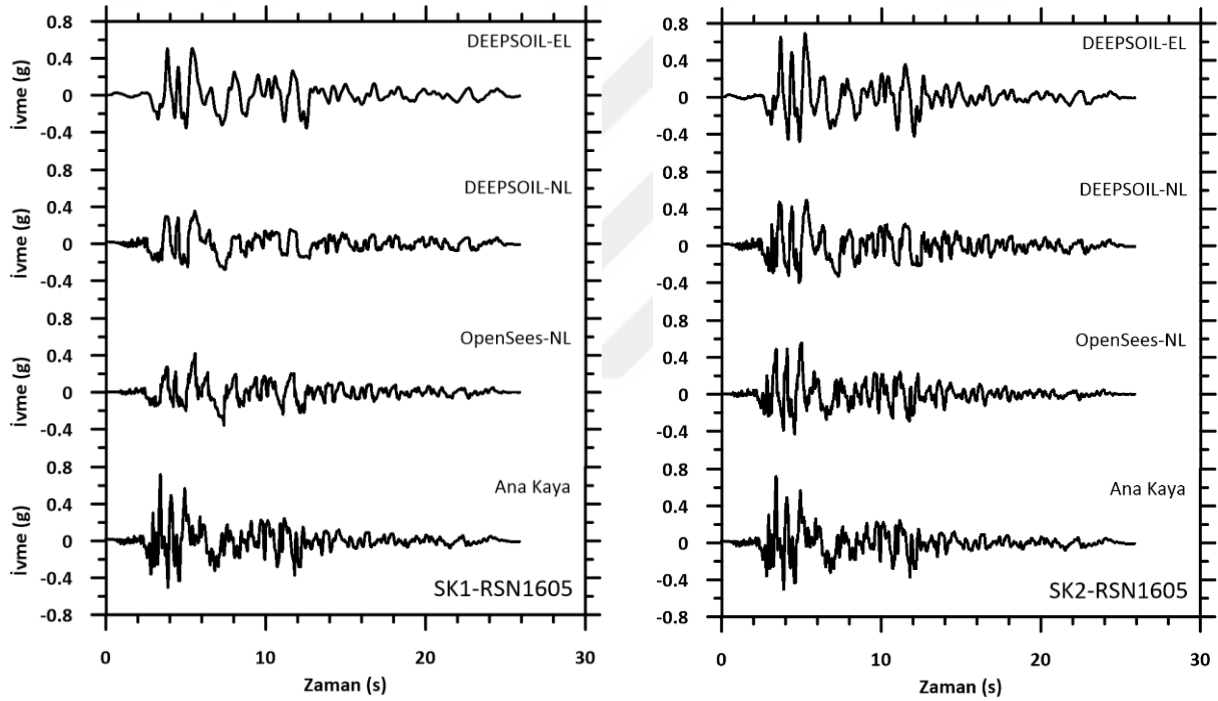
Şekil 7.28. RSN1101 PGA ölçeklendirmesiyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde onuncu olarak RSN1176 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 15.8 saniyede 0.72g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 10.7 saniyede 0.47g, DEEPSOIL-NL analizi için 10.3 saniyede 0.34g, OPENSEES-NL analizi için 26.1 saniyede 0.45g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %35, DEEPSOIL-NL analizi için %53 ve OPENSEES-NL analizi için %38 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 10.1 saniyede 0.72g, DEEPSOIL-NL analizi için 10.1 saniyede 0.45g, OPENSEES-NL analizi için 20.1 saniyede 0.58g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi aynı değer verirken DEEPSOIL-NL analizi için %38 ve OPENSEES-NL analizi için %19 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.29).



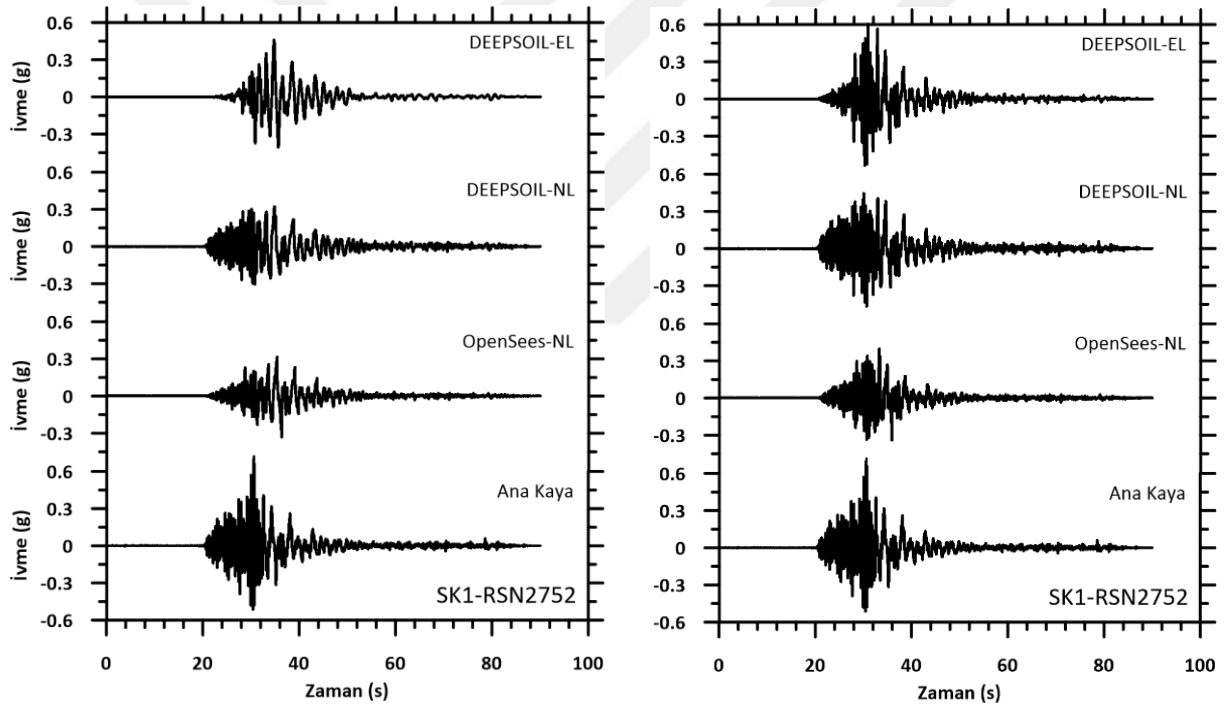
Şekil 7.29. RSN1176 PGA ölçeklendirmesiyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde on birinci olarak RSN1605 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 3.4 saniyede 0.72g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 5.4 saniyede 0.51g, DEEPSOIL-NL analizi için 5.4 saniyede 0.35g, OPENSEES-NL analizi için 5.6 saniyede 0.42g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %29, DEEPSOIL-NL analizi için %51 ve OPENSEES-NL analizi için %42 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 5.2 saniyede 0.69g, DEEPSOIL-NL analizi için 5.3 saniyede 0.49g, OPENSEES-NL analizi için 5.0 saniyede 0.56g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %4, DEEPSOIL-NL analizi için %32 ve OPENSEES-NL analizi için %22 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.30).



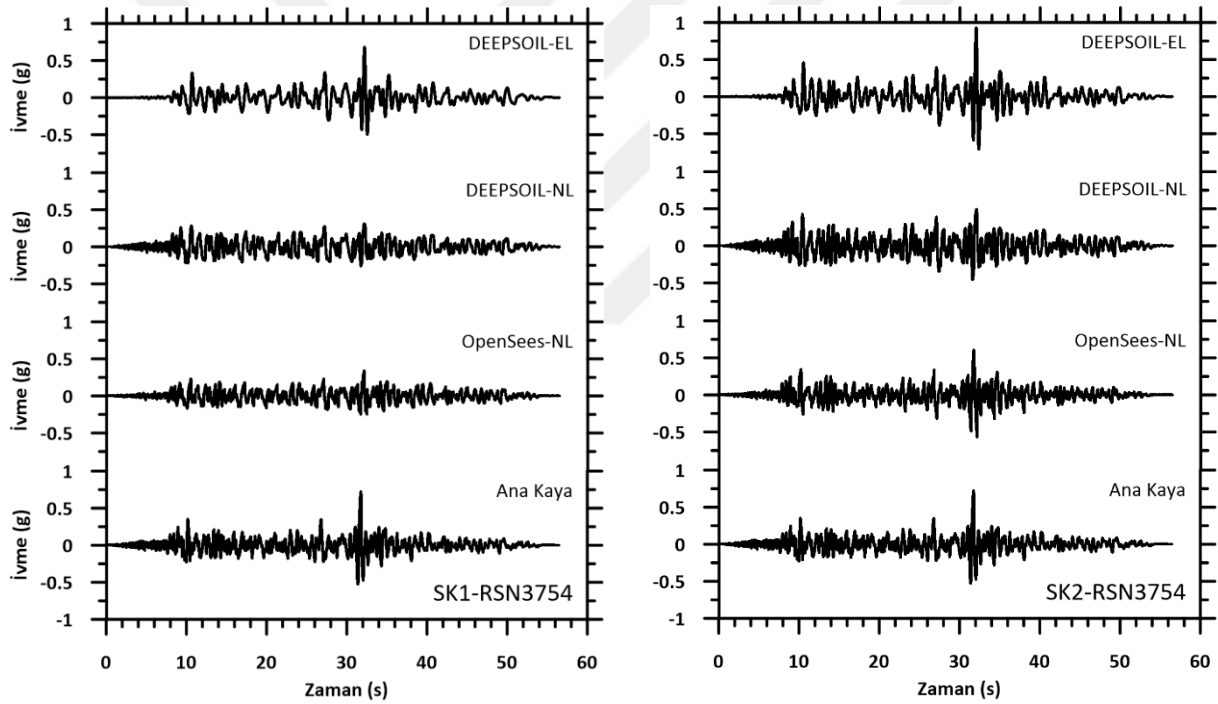
Şekil 7.30. RSN1605 PGA ölçeklendirmesiyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde on ikinci olarak RSN2752 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 30.6 saniyede 0.72g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 34.7 saniyede 0.46g, DEEPSOIL-NL analizi için 34.8 saniyede 0.32g, OPENSEES-NL analizi için 36.3 saniyede 0.33g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %36, DEEPSOIL-NL analizi için %56 ve OPENSEES-NL analizi için %54 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 30.8 saniyede 0.6g, DEEPSOIL-NL analizi için 30.6 saniyede 0.47g, OPENSEES-NL analizi için 33.3 saniyede 0.4g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %17, DEEPSOIL-NL analizi için %35 ve OPENSEES-NL analizi için %44 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.31).



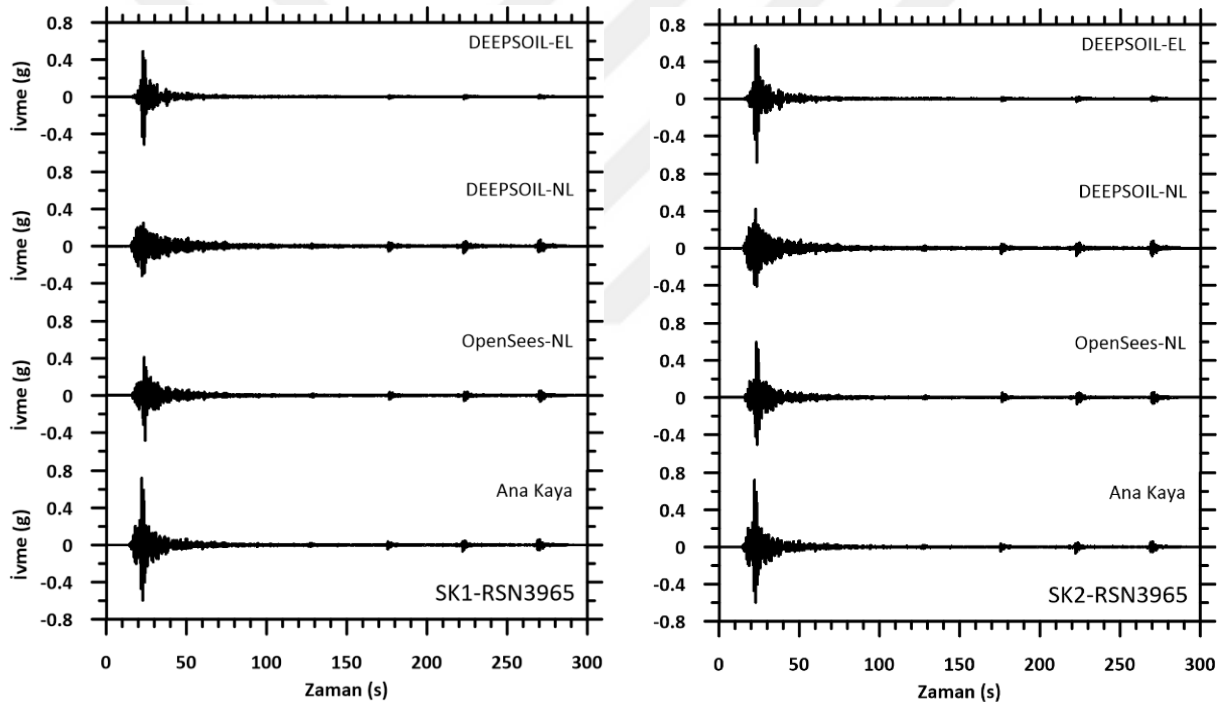
Şekil 7.31. RSN2752 PGA ölçeklendirmesiyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde on üçüncü olarak RSN3754 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 31.8 saniyede 0.72g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 32.2 saniyede 0.68g, DEEPSOIL-NL analizi için 32.1 saniyede 0.31g, OPENSEES-NL analizi için 32.1 saniyede 0.34g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %5 ve DEEPSOIL-NL analizi için %57 ve OPENSEES-NL analizi için %53 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 32.0 saniyede 0.93g, DEEPSOIL-NL analizi için 32.1 saniyede 0.49g, OPENSEES-NL analizi için 31.7 saniyede 0.61g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %29 oranında büyütme, DEEPSOIL-NL analizi için %32 ve OPENSEES-NL analizi için %15 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.32).



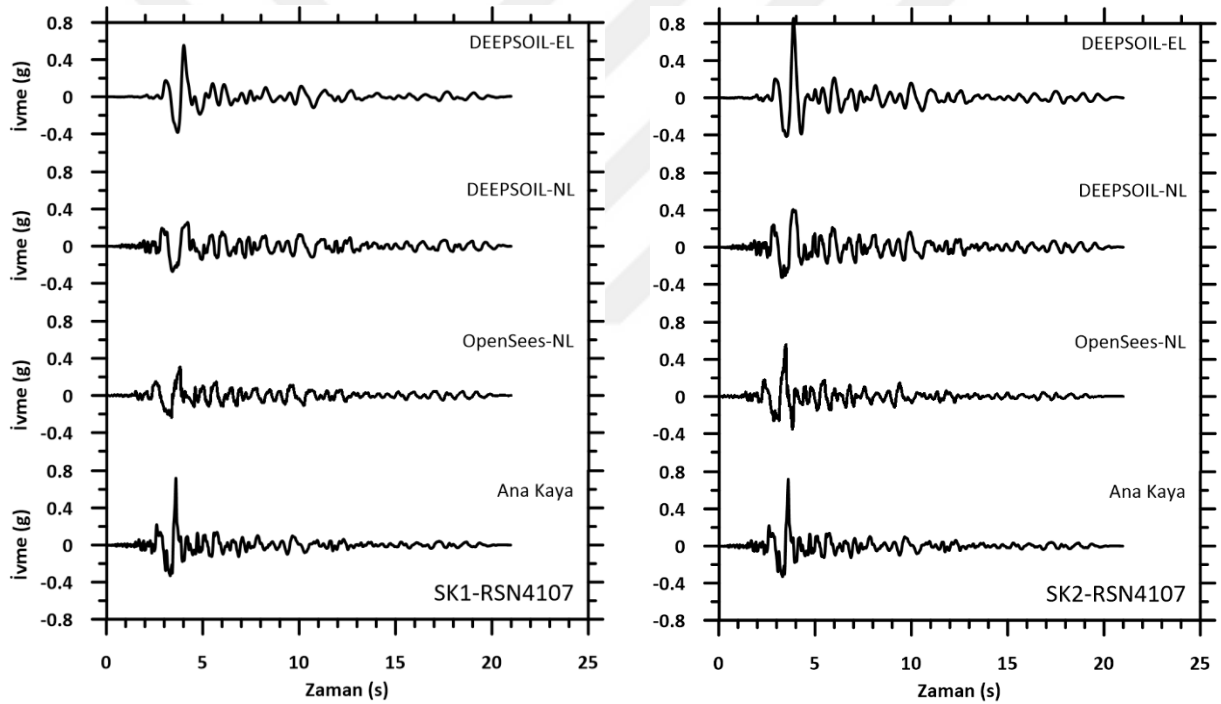
Şekil 7.32. RSN3754 PGA ölçeklendirmesiyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde on dördüncü olarak RSN3965 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 22.2 saniyede 0.72g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 23.4 saniyede 0.52g, DEEPSOIL-NL analizi için 22.1 saniyede 0.32g, OPENSEES-NL analizi için 24.2 saniyede 0.49g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %28, DEEPSOIL-NL analizi için %56 ve OPENSEES-NL analizi için %32 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 23.3 saniyede 0.69g, DEEPSOIL-NL analizi için 22.5 saniyede 0.42g, OPENSEES-NL analizi için 22.9 saniyede 0.59g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %5, DEEPSOIL-NL analizi için %42 ve OPENSEES-NL analizi için %18 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.33).



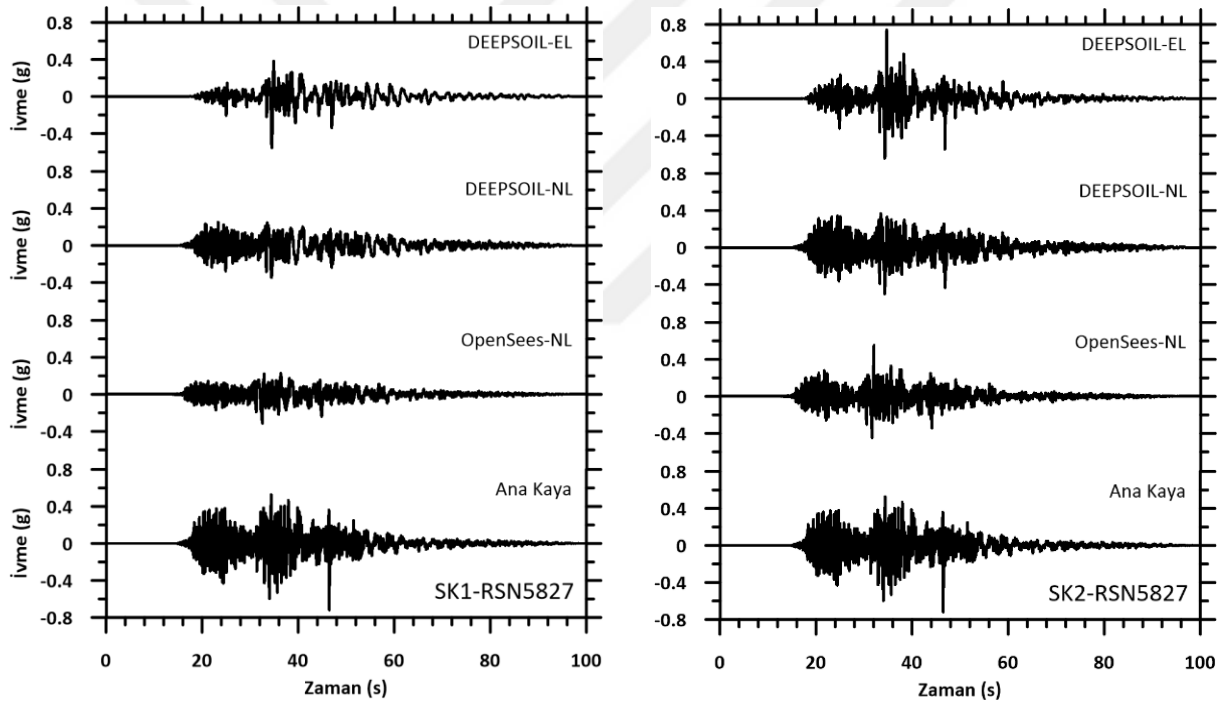
Şekil 7.33. RSN3965 PGA ölçeklendirmesiyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde on beşinci olarak RSN4107 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 3.6 saniyede 0.72g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 4.0 saniyede 0.56g, DEEPSOIL-NL analizi için 3.4 saniyede 0.27g, OPENSEES-NL analizi için 3.8 saniyede 0.31g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %22, DEEPSOIL-NL analizi için %63 ve OPENSEES-NL analizi için %57 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 3.9 saniyede 0.86g, DEEPSOIL-NL analizi için 3.8 saniyede 0.41g, OPENSEES-NL analizi için 3.5 saniyede 0.56g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %19 oranında büyütme, DEEPSOIL-NL analizi için %43 ve OPENSEES-NL analizi için %22 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.34).



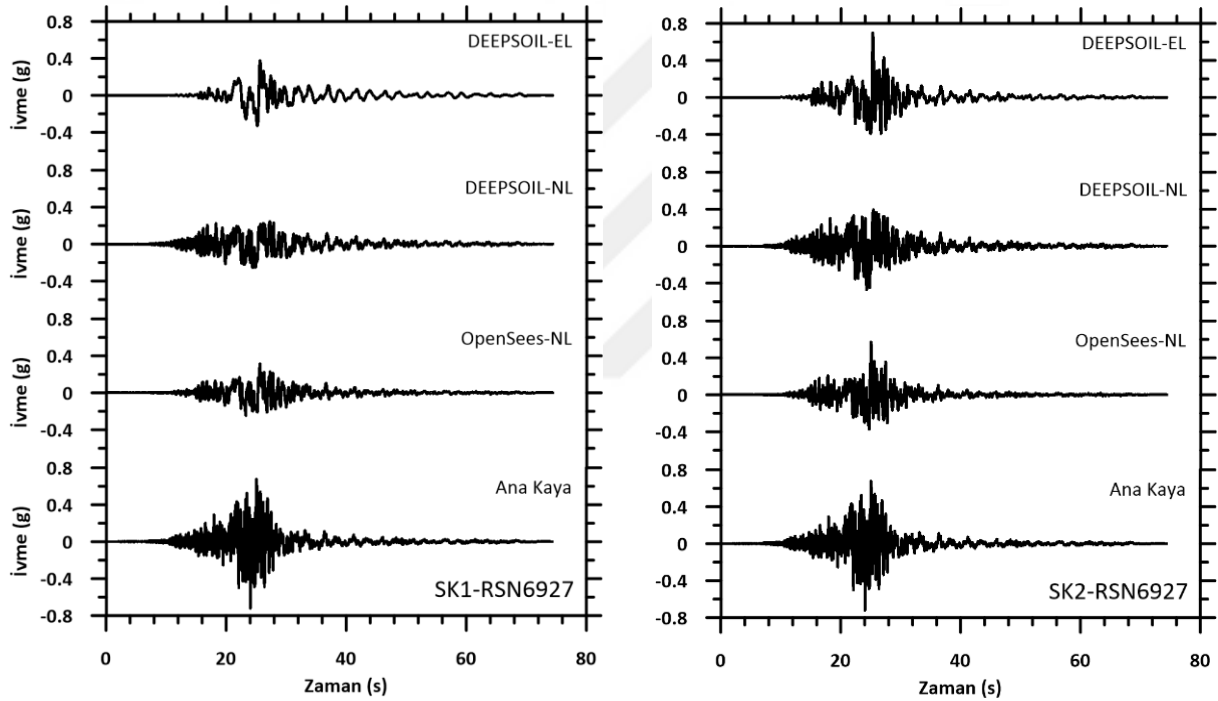
Şekil 7.34. RSN4107 PGA ölçeklendirmesiyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde on altıncı olarak RSN5827 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 46.5 saniyede 0.72g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 34.4 saniyede 0.56g, DEEPSOIL-NL analizi için 34.4 saniyede 0.35g, OPENSEES-NL analizi için 32.5 saniyede 0.32g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %22, DEEPSOIL-NL analizi için %51 ve OPENSEES-NL analizi için %56 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 34.6 saniyede 0.74g, DEEPSOIL-NL analizi için 34.2 saniyede 0.5g, OPENSEES-NL analizi için 32.0 saniyede 0.55g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %3 oranında büyütme, DEEPSOIL-NL analizi için %31 ve OPENSEES-NL analizi için %24 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.35).



Şekil 7.35. RSN5827 PGA ölçeklendirmesiyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde son olarak RSN6927 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 24.1 saniyede 0.72g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 25.6 saniyede 0.38g, DEEPSOIL-NL analizi için 24.3 saniyede 0.26g, OPENSEES-NL analizi için 25.7 saniyede 0.32g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %47, DEEPSOIL-NL analizi için %64 ve OPENSEES-NL analizi için %56 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 25.3 saniyede 0.7g, DEEPSOIL-NL analizi için 24.5 saniyede 0.47g, OPENSEES-NL analizi için 25.0 saniyede 0.57g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %3, DEEPSOIL-NL analizi için %35 ve OPENSEES-NL analizi için %21 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.36).



Şekil 7.36. RSN6927 PGA ölçeklendirmesiyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

PGA ölçeklendirmesi sonucu elde edilen ivme kayıtları ile yapılan analiz sonuçları orijinal ivme kayıtları ile yapılan analiz sonuçlarından daha yüksek çıkmıştır. Bunun temel nedeni, ölçeklendirme işlemi ile genliğin artırılmasıdır (Akkar ve Bommer, 2006). Özellikle yerel zemin sınıfının yumuşak zeminler olması durumunda, ölçeklendirme sonrası artan genlik değerleri, zemin tabakasının rezonans frekanslarına karşılık gelen periyotlarda spektral genliği daha da artırarak yapının dinamik davranışını belirgin biçimde etkilemektedir (Bard, 1999). Ayrıca, yüzey dalgalarının baskın olduğu kayıtlar üzerinde gerçekleştirilen PGA ölçeklendirmesi, düşük frekans bileşenlerinin etkisini artırmakta; bu da uzun periyotlu yapı sistemlerinde yüksek yer değiştirmelere neden olmaktadır (Boore, 2003). Bu etkileşimlerin bir sonucu olarak, ölçeklendirilmiş kayıtlarla elde edilen büyütme oranları, özellikle rezonansa yakın frekanslarda, orijinal kayıtlarla elde edilen değerlere kıyasla belirgin düzeyde artış göstermektedir (Rezaeian ve Der Kiureghian, 2010).

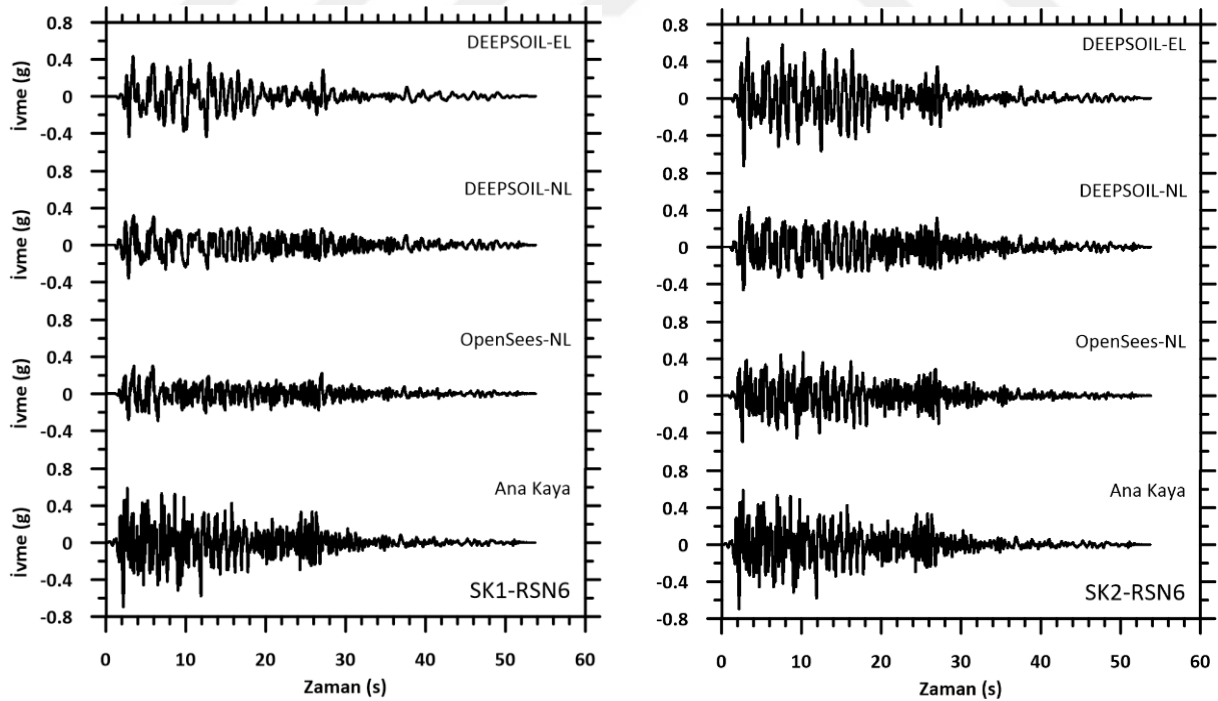
Orijinal ivme kayıtları ve PGA ölçeklendirmesi sonucu oluşan kayıtlar ile yapılan analiz sonucunda elde edilen maksimum ivmelerin karşılaştırılması Tablo 7.1’de verilmiştir.

Tablo 7.1. Orijinal ve PGA ölçeklendirmesi ile elde edilen deprem kayıtları ile yapılan analizlerden elde edilen maksimum ivme değerleri

	DEEPSOIL EL						DEEPSOIL NL						OPENSEES NL					
	SK1			SK2			SK1			SK2			SK1			SK2		
Deprem	Orijinal (g)	PGA Ölç. (g)	Değişim (%)	Orijinal (g)	PGA Ölç. (g)	Değişim (%)	Orijinal (g)	PGA Ölç. (g)	Değişim (%)	Orijinal (g)	PGA Ölç. (g)	Değişim (%)	Orijinal (g)	PGA Ölç. (g)	Değişim (%)	Orijinal (g)	PGA Ölç. (g)	Değişim (%)
RSN6	0.37	0.53	43	0.41	0.8	95	0.24	0.36	50	0.32	0.46	44	0.19	0.30	58	0.22	0.55	150
RSN20	0.25	0.50	100	0.21	0.51	143	0.17	0.33	94	0.23	0.47	104	0.23	0.80	248	0.17	0.91	435
RSN30	0.47	0.63	34	0.54	0.73	35	0.29	0.35	21	0.37	0.45	22	0.18	0.20	11	0.28	0.36	29
RSN95	0.46	0.64	39	0.46	0.85	85	0.27	0.36	33	0.38	0.52	37	0.19	0.24	26	0.3	0.61	103
RSN160	0.63	0.60	-5	0.80	0.77	-4	0.36	0.36	0	0.52	0.5	-4	0.26	0.25	-4	0.52	0.50	-4
RSN266	0.25	0.61	144	0.27	0.73	170	0.20	0.36	80	0.24	0.49	104	0.14	0.54	286	0.19	0.60	216
RSN461	0.37	0.58	57	0.55	0.71	29	0.27	0.34	26	0.38	0.5	32	0.19	0.32	68	0.34	0.60	76
RSN729	0.30	0.60	100	0.30	0.78	160	0.24	0.31	29	0.29	0.5	72	0.17	0.71	318	0.2	0.66	230
RSN1101	0.44	0.54	23	0.57	0.9	58	0.27	0.24	-11	0.39	0.39	0	0.26	0.52	100	0.4	0.69	73
RSN1176	0.31	0.47	52	0.41	0.72	75	0.23	0.34	48	0.34	0.45	32	0.18	0.45	150	0.26	0.58	123
RSN1605	0.42	0.51	21	0.61	0.69	13	0.33	0.35	6	0.47	0.49	4	0.28	0.42	50	0.49	0.56	14
RSN2752	0.19	0.46	142	0.26	0.6	131	0.15	0.32	113	0.23	0.47	104	0.11	0.33	200	0.18	0.40	122
RSN3754	0.42	0.68	62	0.50	0.93	86	0.28	0.31	11	0.36	0.49	36	0.21	0.34	62	0.32	0.61	91
RSN3965	0.45	0.52	16	0.56	0.69	23	0.30	0.32	7	0.37	0.42	14	0.28	0.49	75	0.38	0.59	55
RSN4107	0.55	0.56	2	0.85	0.86	1	0.29	0.27	-7	0.40	0.41	2	0.31	0.31	0	0.61	0.56	-8
RSN5827	0.48	0.56	17	0.62	0.74	19	0.32	0.35	9	0.43	0.5	16	0.27	0.32	19	0.48	0.55	15
RSN6927	0.45	0.38	-16	0.62	0.7	13	0.26	0.26	0	0.43	0.47	9	0.32	0.32	0	0.48	0.57	19

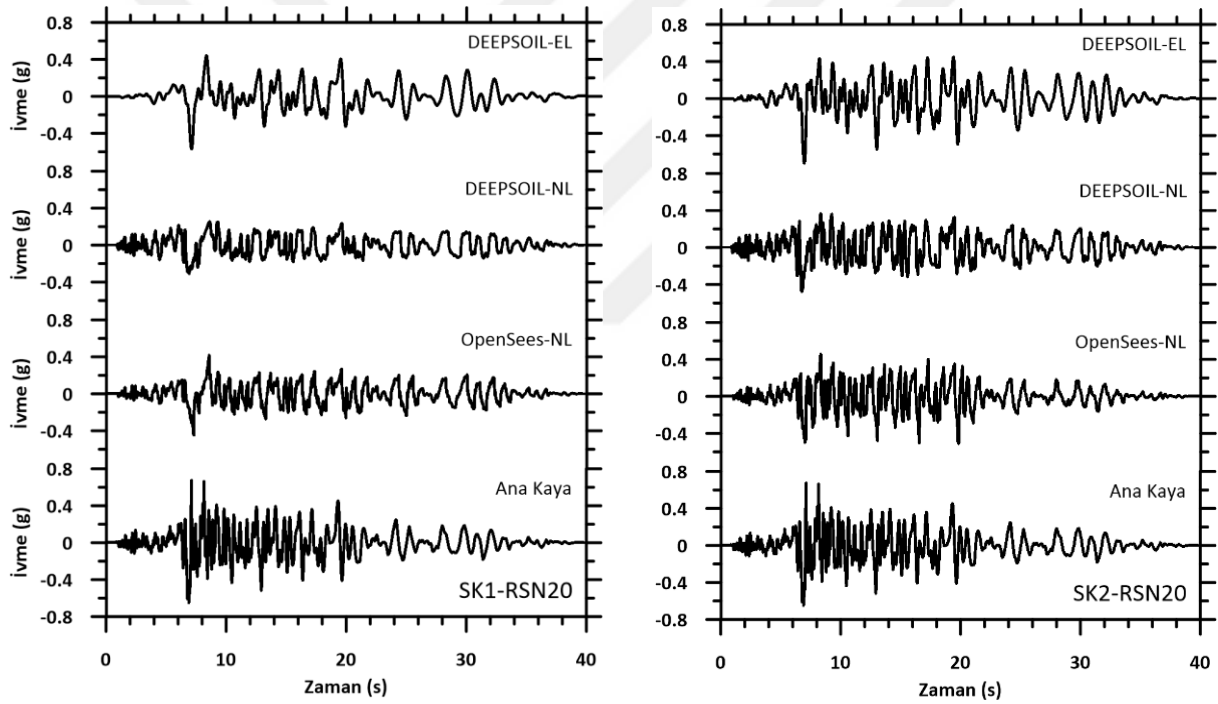
Zaman tanım alanında yapılan PGA ölçeklendirmesi ile elde edilen deprem kayıtları ile yapılan analizlerin ardından frekans tanım alanında yapılan spektral ölçeklendirme sonucu elde edilen ivme kayıtları kullanılarak SK1 ve SK2 sondaj kuyusunda gerçekleştirilen OPENSEES yazılımıyla 34 adet NL ve DEEPSOIL programıyla 34 adet EL ve 34 adet NL analizine ait yüzey ivme değerleri, Şekil 7.38-Şekil 7.53’de gösterilmiştir.

Spektral ölçeklendirme sonucu elde edilen veriler ile yapılan analizlerde ilk olarak RSN6 deprem verisi kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 2.2 saniyede 0.70g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 2,9 saniyede 0.44g, DEEPSOIL-NL analizi için 2.8 saniyede 0.36g, OPENSEES-NL analizi için 12.6 saniyede 0.3g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %37, DEEPSOIL-NL analizi için %49 ve OPENSEES-NL analizi için %57 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 2.7 saniyede 0.74g, DEEPSOIL-NL analizi için 2.7 saniyede 0.47g, OPENSEES-NL analizi için 2.6 saniyede 0.5g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %6 oranında büyütme, DEEPSOIL-NL analizi için %33 ve OPENSEES-NL analizi için %29 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.35).



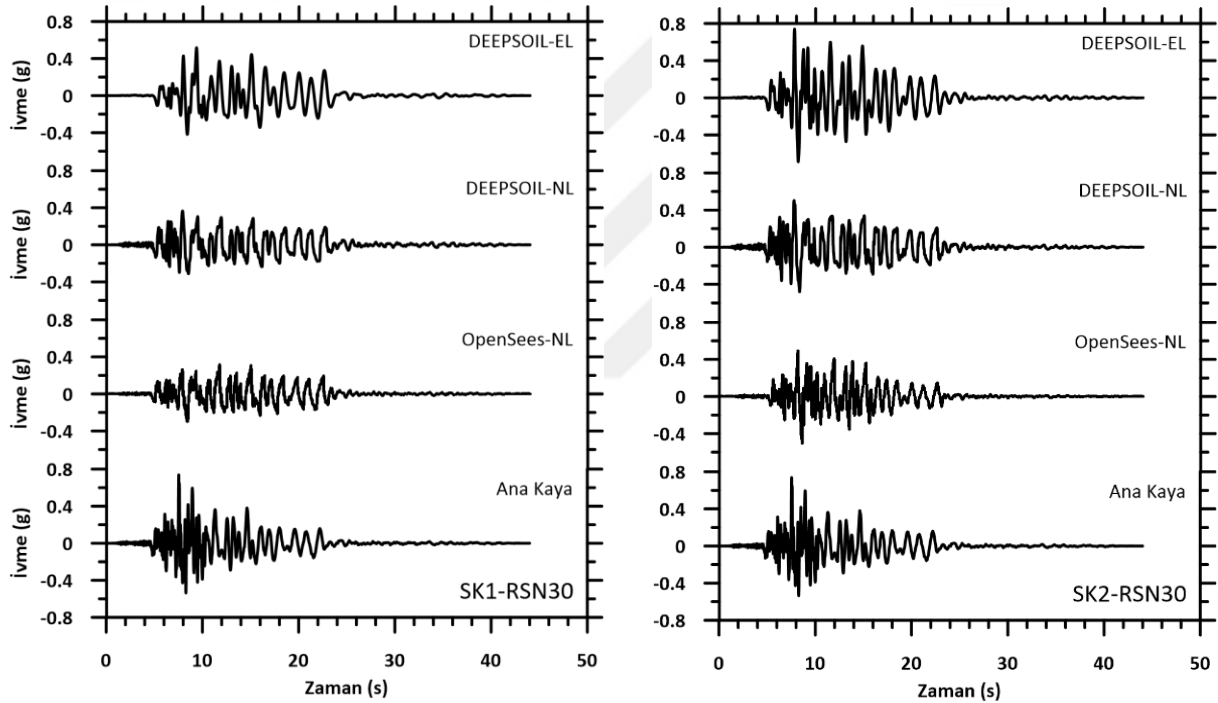
Şekil 7.37. RSN6 Spektral ölçeklendirmeye ile elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde ikinci olarak RSN20 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 7.1 saniyede 0.68g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 7.1 saniyede 0.57g, DEEPSOIL-NL analizi için 6.9 saniyede 0.31g, OPENSEES-NL analizi için 7.3 saniyede 0.45g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %16, DEEPSOIL-NL analizi için %54 ve OPENSEES-NL analizi için %34 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 6.9 saniyede 0.7g, DEEPSOIL-NL analizi için 6.7 saniyede 0.48g, OPENSEES-NL analizi için 19.8 saniyede 0.51g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %3 büyütme, DEEPSOIL-NL analizi için %29 ve OPENSEES-NL analizi için %25 ve oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.38).



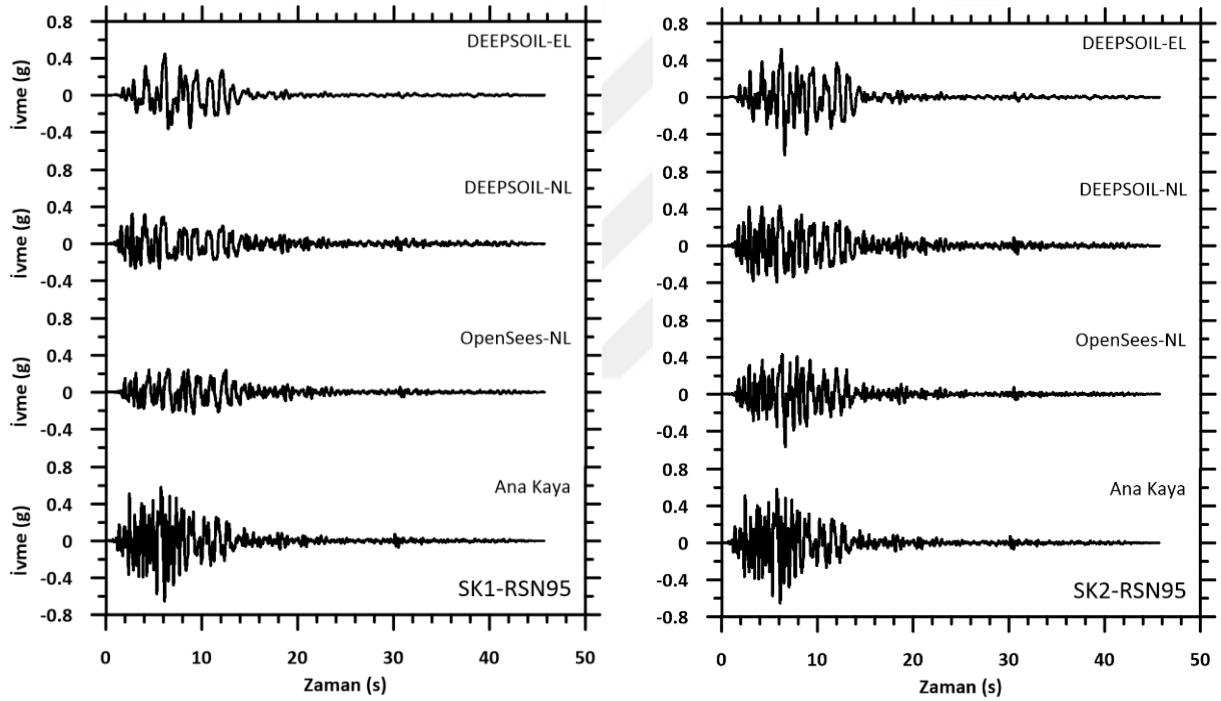
Şekil 7.38. RSN20 Spektral ölçeklendirmeyeyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde üçüncü olarak RSN30 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 7.5 saniyede 0.74g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 9.4 saniyede 0.52g, DEEPSOIL-NL analizi için 7.9 saniyede 0.37g, OPENSEES-NL analizi için 23.5 saniyede 0.32g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %30, DEEPSOIL-NL analizi için %50 ve OPENSEES-NL analizi için %57 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 7.8 saniyede 0.74g, DEEPSOIL-NL analizi için 7.8 saniyede 0.5g, OPENSEES-NL analizi için 8.6 saniyede 0.51g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi aynı kalmış, DEEPSOIL-NL analizi için %32 ve OPENSEES-NL analizi için %31 ve oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.39).



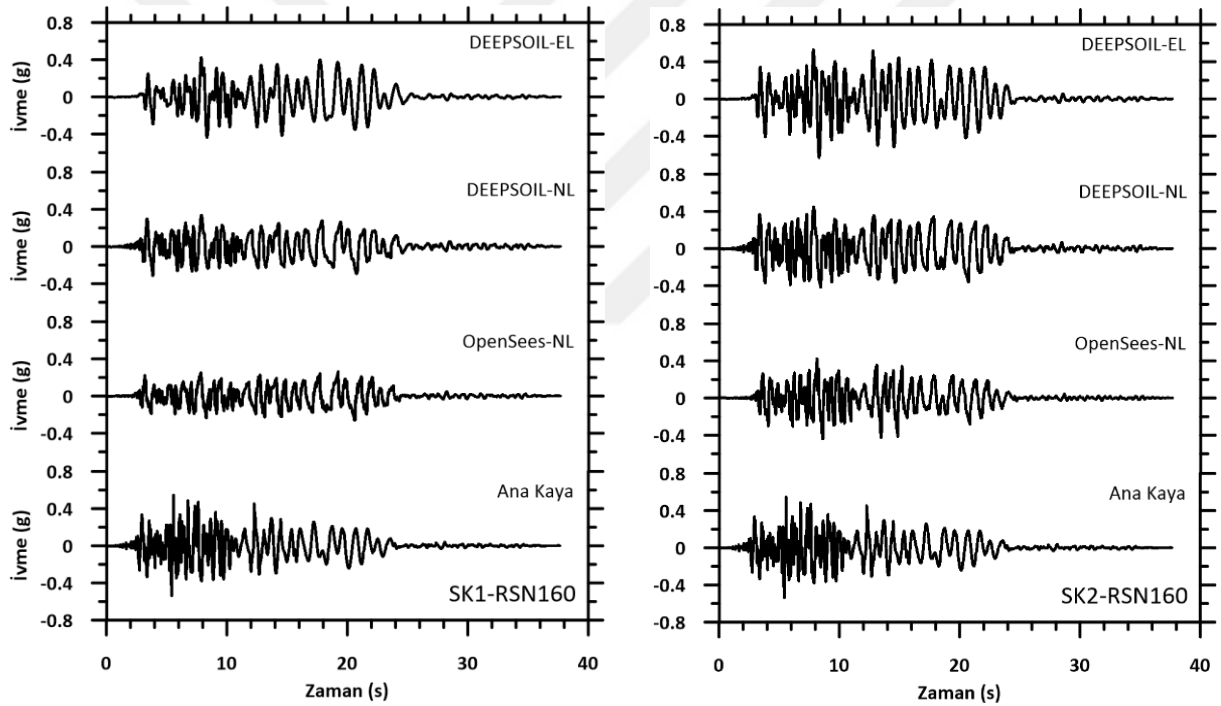
Şekil 7.39. RSN30 Spektral ölçeklendirmeyeyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde dördüncü olarak RSN95 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 6.1 saniyede 0.66g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 6.1 saniyede 0.45g, DEEPSOIL-NL analizi için 2.7 saniyede 0.32g, OPENSEES-NL analizi için 6.4 saniyede 0.25g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %32, DEEPSOIL-NL analizi için %52 ve OPENSEES-NL analizi için %62 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 6.6 saniyede 0.63g, DEEPSOIL-NL analizi için 6.1 saniyede 0.43g, OPENSEES-NL analizi için 6.6 saniyede 0.57g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %5, DEEPSOIL-NL analizi için %35 ve OPENSEES-NL analizi için %14 ve oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.40).



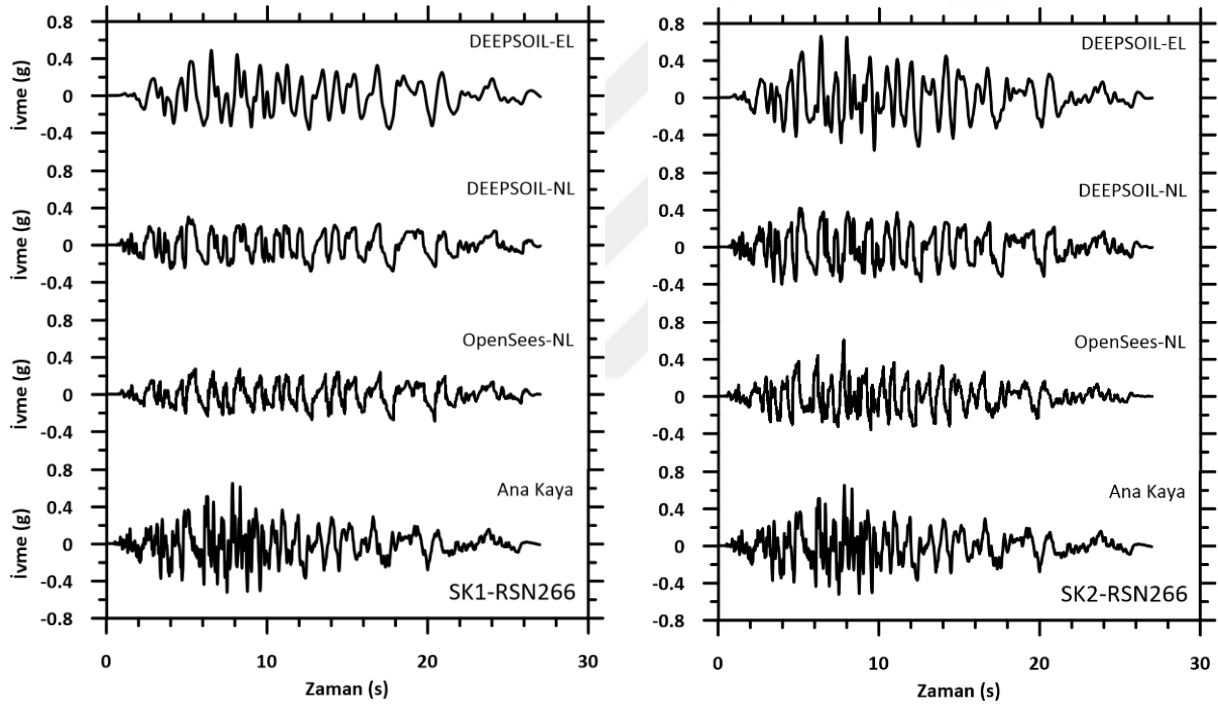
Şekil 7.40. RSN95 Spektral ölçeklendirmeyeyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde beşinci olarak RSN160 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 5.6 saniyede 0.54g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1'de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 8.3 saniyede 0.44g, DEEPSOIL-NL analizi için 7.9 saniyede 0.34g, OPENSEES-NL analizi için 19.2 saniyede 0.26g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %19, DEEPSOIL-NL analizi için %37 ve OPENSEES-NL analizi için %52 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2'de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 8.3 saniyede 0.63g, DEEPSOIL-NL analizi için 7.8 saniyede 0.45g, OPENSEES-NL analizi için 8.6 saniyede 0.44g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %17 oranında büyütme, DEEPSOIL-NL analizi için %17 ve OPENSEES-NL analizi için %19 ve oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.41).



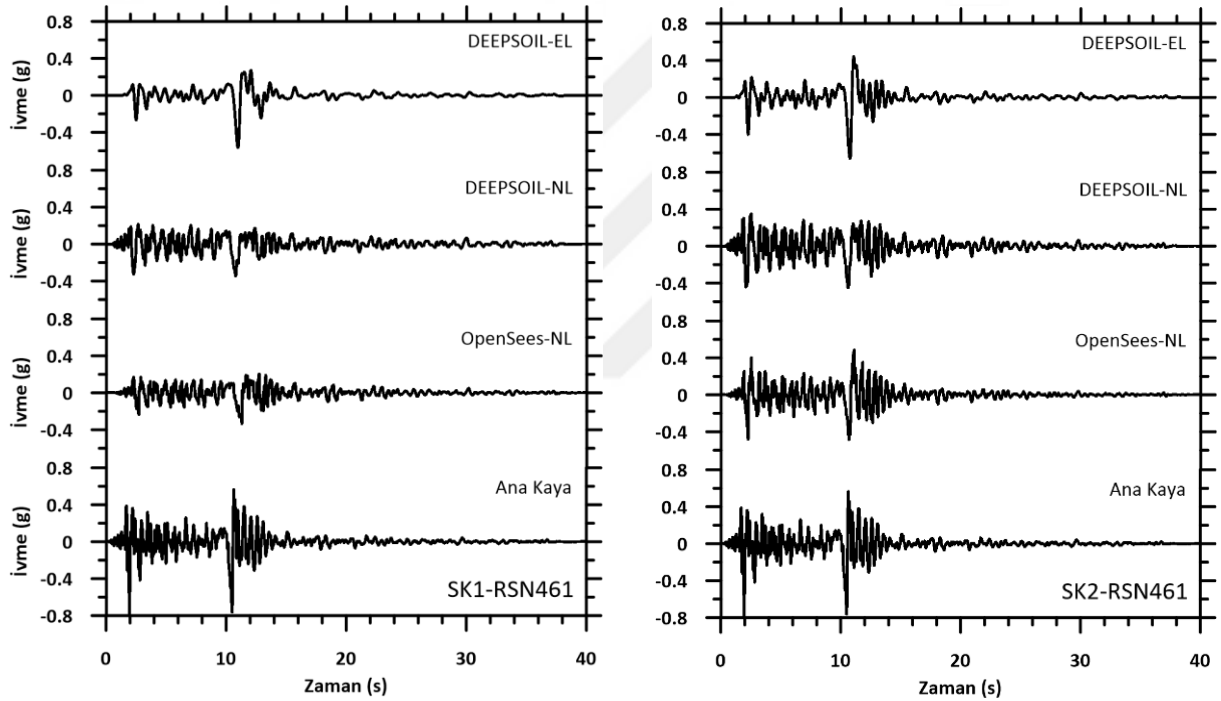
Şekil 7.41. RSN160 Spektral ölçeklendirmeyeyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde altıncı olarak RSN266 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 7.9 saniyede 0.66g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 6.5 saniyede 0.49g, DEEPSOIL-NL analizi için 5.1 saniyede 0.3g, OPENSEES-NL analizi için 20.4 saniyede 0.29g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %26, DEEPSOIL-NL analizi için %55 ve OPENSEES-NL analizi için %56 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 6.4 saniyede 0.66g, DEEPSOIL-NL analizi için 5.0 saniyede 0.42g, OPENSEES-NL analizi için 7.8 saniyede 0.61g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için aynı kalmış, DEEPSOIL-NL analizi için %36 ve OPENSEES-NL analizi için %9 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.42).



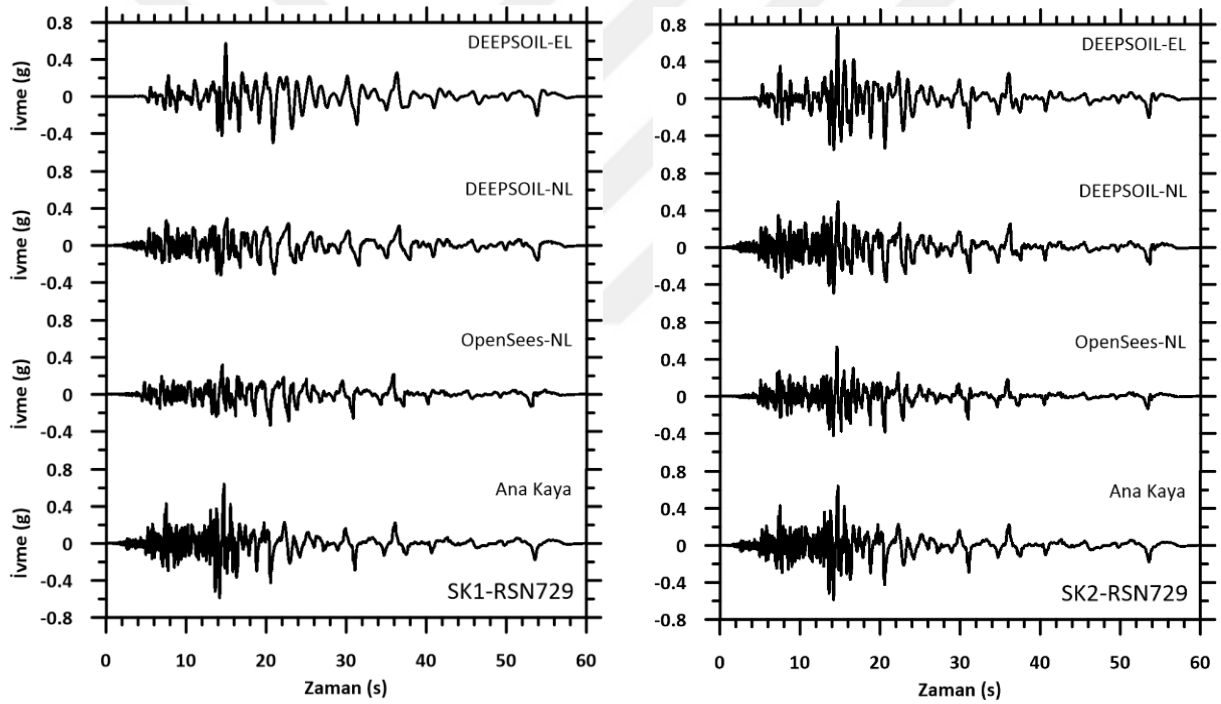
Şekil 7.42. RSN266 Spektral ölçeklendirmeyeyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde yedinci olarak RSN461 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 2.0 saniyede 0.78g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 11.0 saniyede 0.57g, DEEPSOIL-NL analizi için 10.8 saniyede 0.35g, OPENSEES-NL analizi için 11.3 saniyede 0.34g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %27, DEEPSOIL-NL analizi için %55 ve OPENSEES-NL analizi için %56 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 10.8 saniyede 0.66g, DEEPSOIL-NL analizi için 10.6 saniyede 0.45g, OPENSEES-NL analizi için 10.7 saniyede 0.49g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %15, DEEPSOIL-NL analizi için %42 ve OPENSEES-NL analizi için %37 ve oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.43).



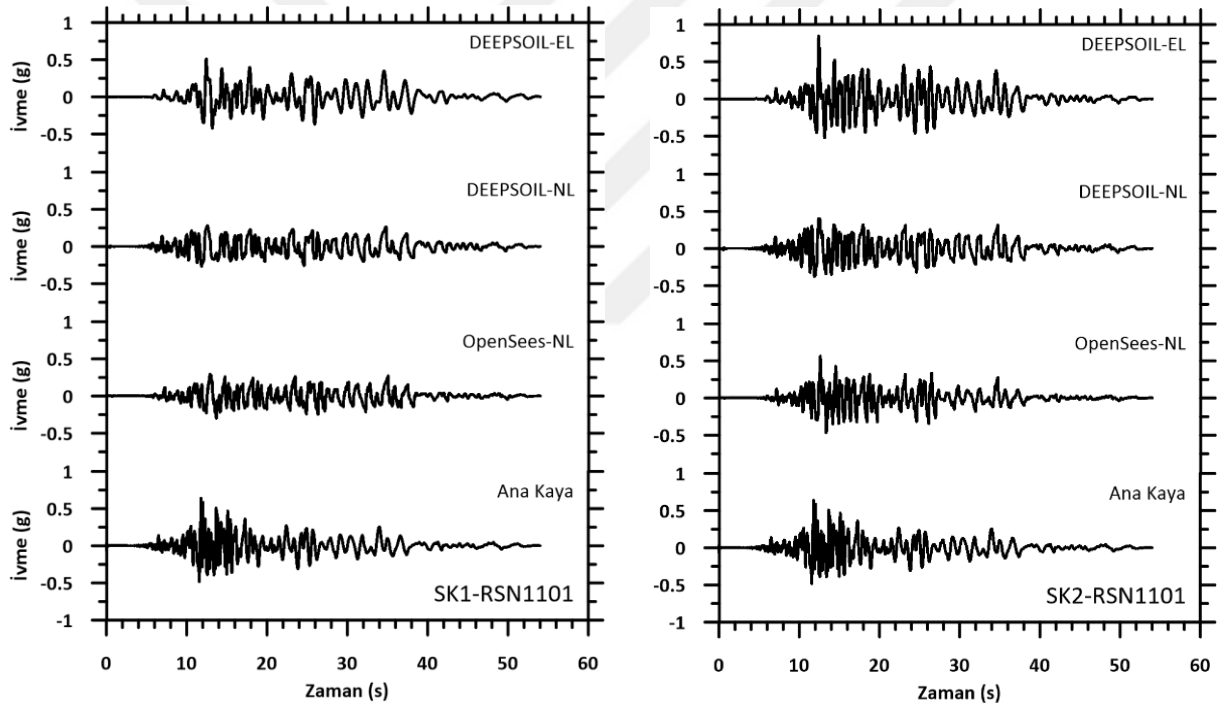
Şekil 7.43. RSN461 Spektral ölçeklendirmeyeyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde sekizinci olarak RSN729 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 14.7 saniyede 0.64g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1'de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 14.9 saniyede 0.57g, DEEPSOIL-NL analizi için 14.3 saniyede 0.32g, OPENSEES-NL analizi için 20.5 saniyede 0.34g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %11, DEEPSOIL-NL analizi için %50 ve OPENSEES-NL analizi için %47 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2'de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 14.7 saniyede 0.76g, DEEPSOIL-NL analizi için 14.7 saniyede 0.5g, OPENSEES-NL analizi için 14.5 saniyede 0.53g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %19 oranında büyütme, DEEPSOIL-NL analizi için %22 ve OPENSEES-NL analizi için %17 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.44).



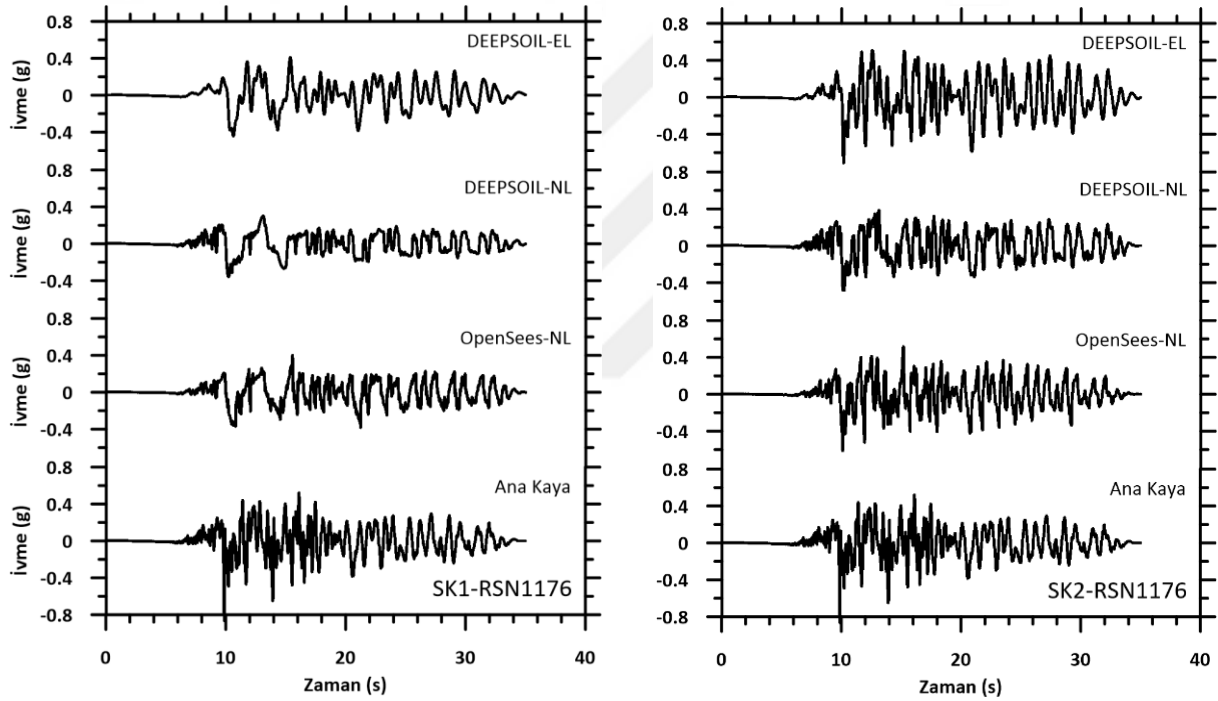
Şekil 7.44. RSN729 Spektral ölçeklendirmeye elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde dokuzuncu olarak RSN1101 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 11.8 saniyede 0.64g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 12.4 saniyede 0.51g, DEEPSOIL-NL analizi için 12.5 saniyede 0.28g, OPENSEES-NL analizi için 13.7 saniyede 0.3g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %15, DEEPSOIL-NL analizi için %56 ve OPENSEES-NL analizi için %53 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 12.4 saniyede 0.85g, DEEPSOIL-NL analizi için 12.4 saniyede 0.4g, OPENSEES-NL analizi için 12.6 saniyede 0.56g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %33 oranında büyütme, DEEPSOIL-NL analizi için %38 ve OPENSEES-NL analizi için %13 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.45).



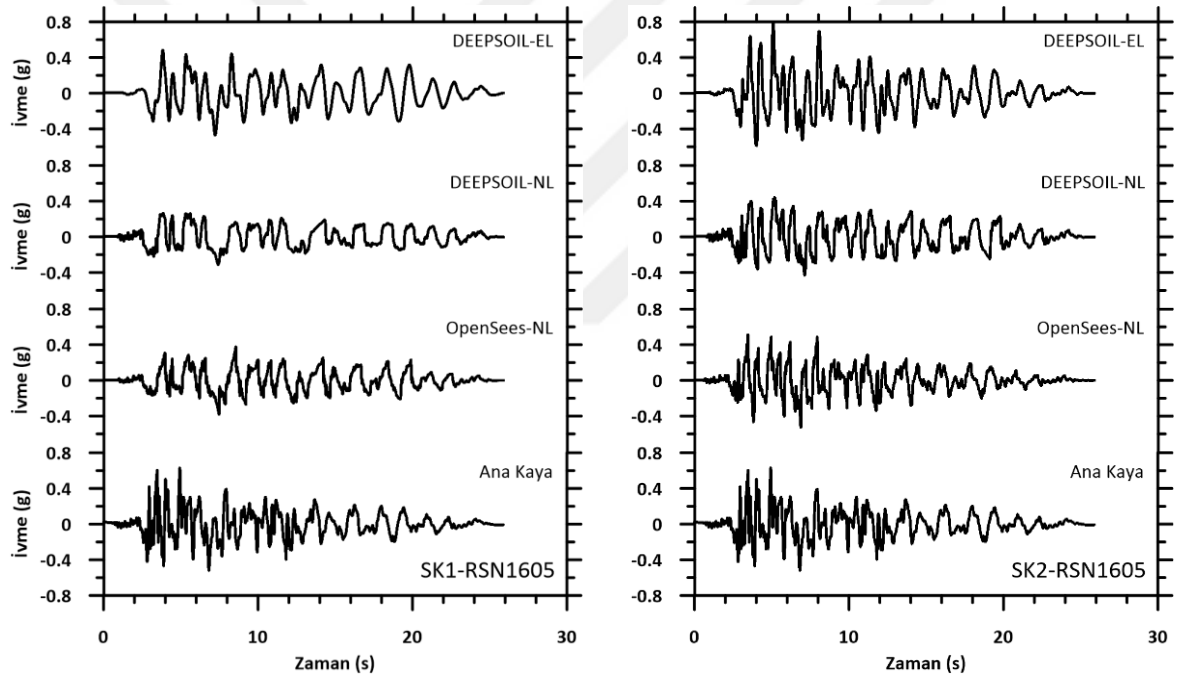
Şekil 7.45. RSN1101 Spektral ölçeklendirmeyeyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde onuncu olarak RSN1176 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 9.9 saniyede 0.87g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 10.6 saniyede 0.44g, DEEPSOIL-NL analizi için 10.2 saniyede 0.36g, OPENSEES-NL analizi için 15.5 saniyede 0.40g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %49, DEEPSOIL-NL analizi için %59 ve OPENSEES-NL analizi için %54 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 10.2 saniyede 0.71g, DEEPSOIL-NL analizi için 10.1 saniyede 0.49g, OPENSEES-NL analizi için 10.1 saniyede 0.61g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %18, DEEPSOIL-NL analizi için %44 ve OPENSEES-NL analizi için %30 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.46).



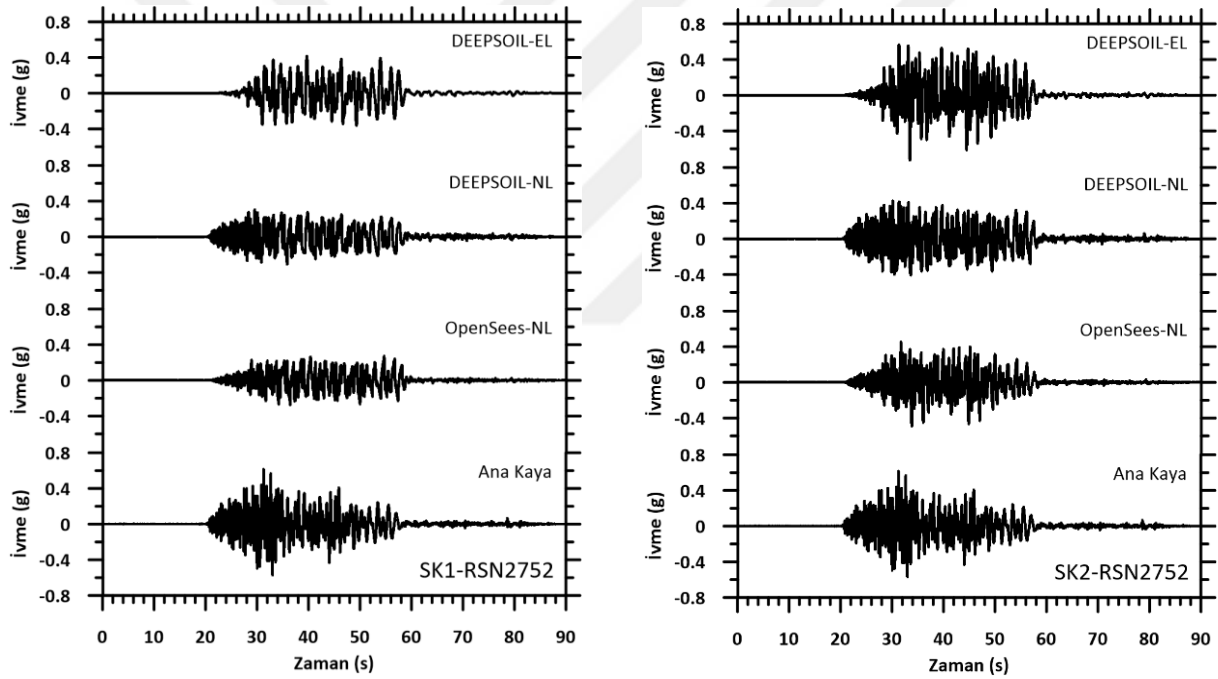
Şekil 7.46. RSN1176 Spektral ölçeklendirmeyeyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde on birinci olarak RSN1605 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 4.9 saniyede 0.63g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 3.8 saniyede 0.48g, DEEPSOIL-NL analizi için 7.4 saniyede 0.31g, OPENSEES-NL analizi için 7.5 saniyede 0.38g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %24, DEEPSOIL-NL analizi için %51 ve OPENSEES-NL analizi için %40 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 5.1 saniyede 0.8g, DEEPSOIL-NL analizi için 5.2 saniyede 0.44g, OPENSEES-NL analizi için 6.9 saniyede 0.53g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %27 oranında büyütme, DEEPSOIL-NL analizi için %30 ve OPENSEES-NL analizi için %16 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.47).



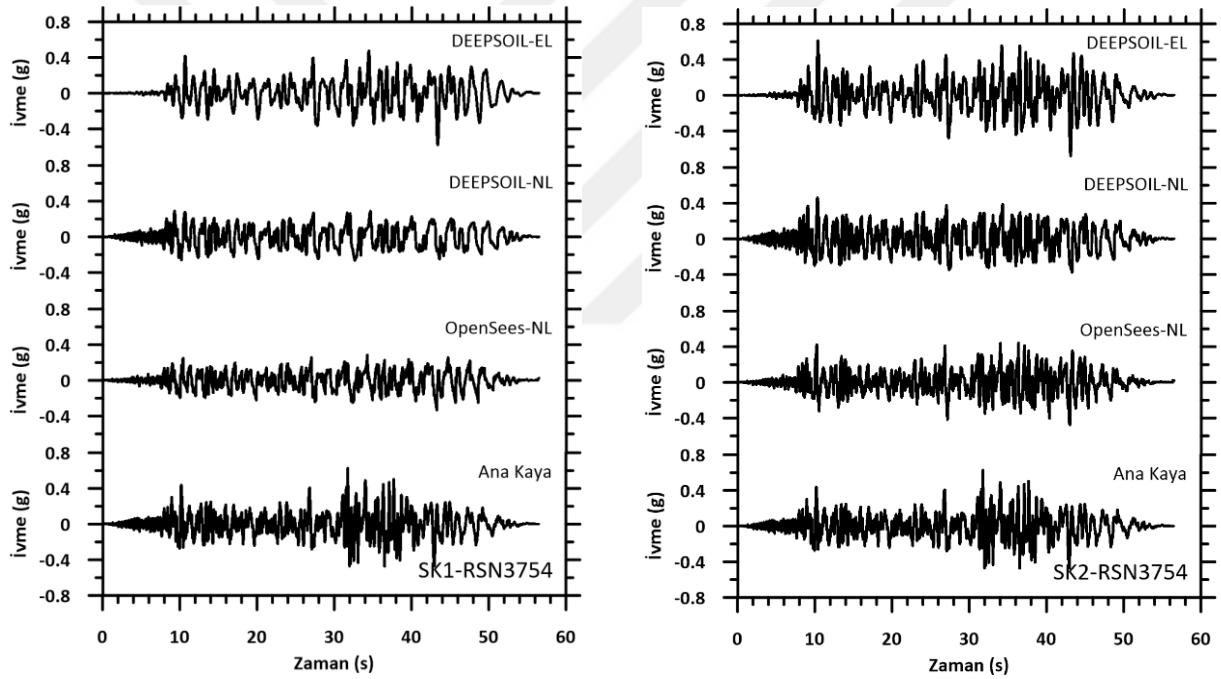
Şekil 7.47. RSN1605 Spektral ölçeklendirmeyeyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde on ikinci olarak RSN2752 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 31.3 saniyede 0.62g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 39.6 saniyede 0.41g, DEEPSOIL-NL analizi için 35.8 saniyede 0.31g, OPENSEES-NL analizi için 36.4 saniyede 0.28g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %34, DEEPSOIL-NL analizi için %50 ve OPENSEES-NL analizi için %55 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 33.4 saniyede 0.73g, DEEPSOIL-NL analizi için 30.1 saniyede 0.43g, OPENSEES-NL analizi için 33.8 saniyede 0.49g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %18 oranında büyütme, DEEPSOIL-NL analizi için %31 ve OPENSEES-NL analizi için %21 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.48).



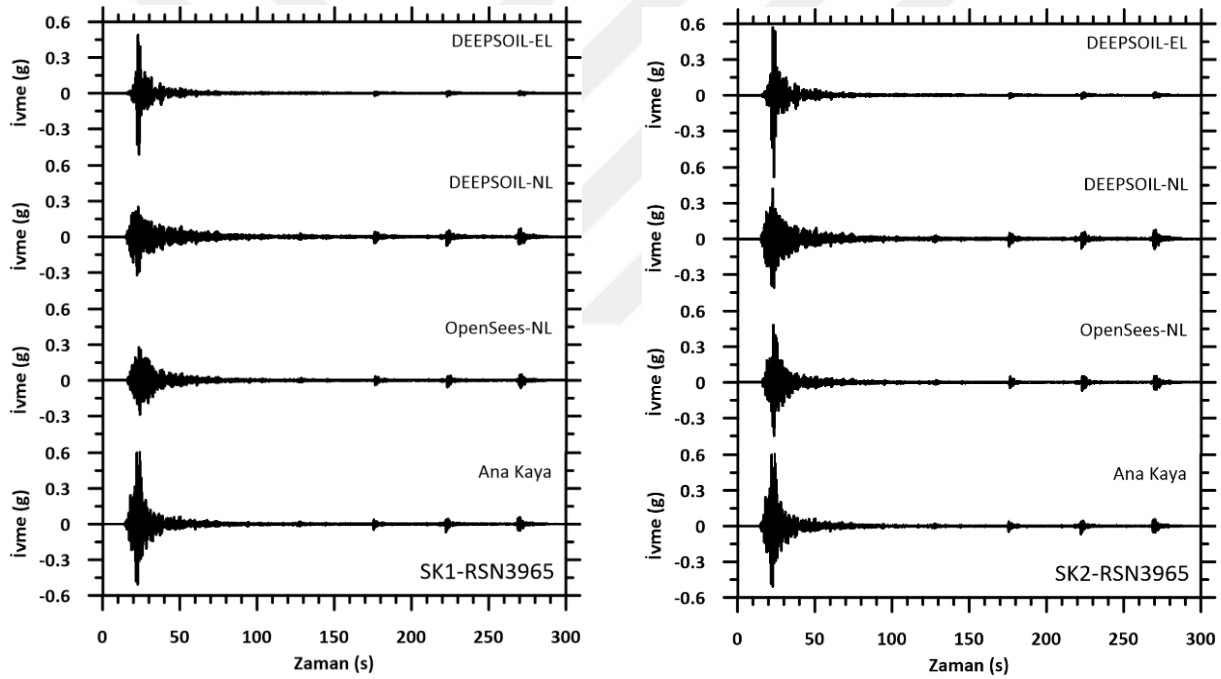
Şekil 7.48. RSN2752 Spektral ölçeklendirmeyeyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde on üçüncü olarak RSN3754 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 31.8 saniyede 0.63g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 43.4 saniyede 0.58g, DEEPSOIL-NL analizi için 9.3 saniyede 0.29g, OPENSEES-NL analizi için 43.2 saniyede 0.33g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %8, DEEPSOIL-NL analizi için %54 ve OPENSEES-NL analizi için %48 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 43.1 saniyede 0.68g, DEEPSOIL-NL analizi için 10.3 saniyede 0.46g, OPENSEES-NL analizi için 43.0 saniyede 0.48g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %8 oranında büyütme, DEEPSOIL-NL analizi için %27 ve OPENSEES-NL analizi için %24 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.49).



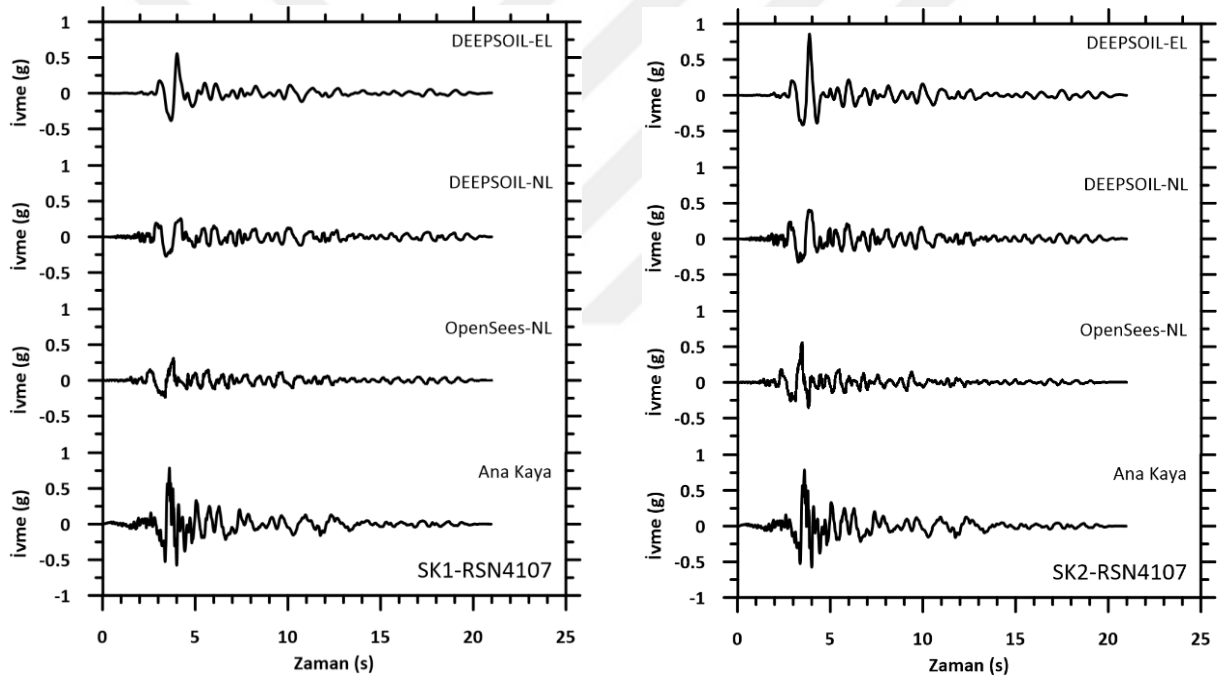
Şekil 7.49. RSN3754 Spektral ölçeklendirmeyeyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde on dördüncü olarak RSN3965 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 24.2 saniyede 0.60g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 24.0 saniyede 0.5g, DEEPSOIL-NL analizi için 24.7 saniyede 0.28g, OPENSEES-NL analizi için 23.9 saniyede 0.29g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %17, DEEPSOIL-NL analizi için %53 ve OPENSEES-NL analizi için %52 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 22.9 saniyede 0.55g, DEEPSOIL-NL analizi için 23.6 saniyede 0.45g, OPENSEES-NL analizi için 23.0 saniyede 0.48g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %8, DEEPSOIL-NL analizi için %25 ve OPENSEES-NL analizi için %20 ve oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.50).



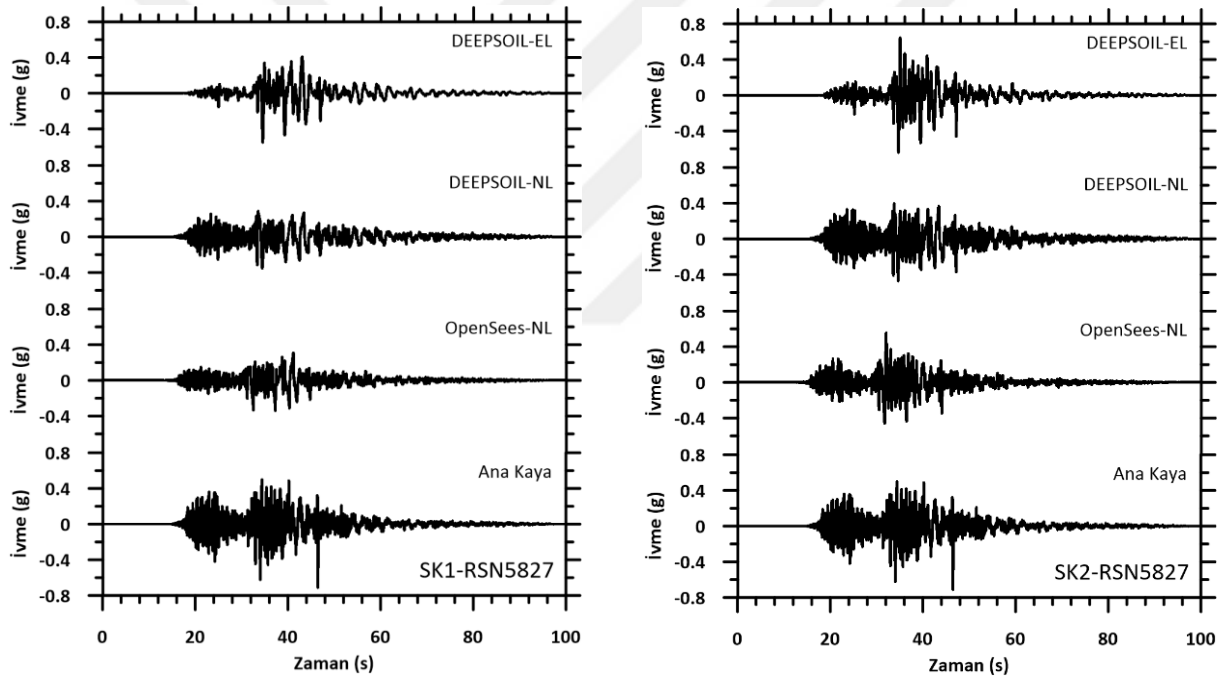
Şekil 7.50. RSN3965 Spektral ölçeklendirmeyeyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde on beşinci olarak RSN4107 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 3.6 saniyede 0.79g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 4.1 saniyede 0.62g, DEEPSOIL-NL analizi için 4.1 saniyede 0.28g, OPENSEES-NL analizi için 4.1 saniyede 0.39g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %22, DEEPSOIL-NL analizi için %65 ve OPENSEES-NL analizi için %51 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 4.0 saniyede 0.83g, DEEPSOIL-NL analizi için 3.9 saniyede 0.42g, OPENSEES-NL analizi için 3.8 saniyede 0.58g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %5 oranında büyütme, DEEPSOIL-NL analizi için %47 ve OPENSEES-NL analizi için %27 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.51).



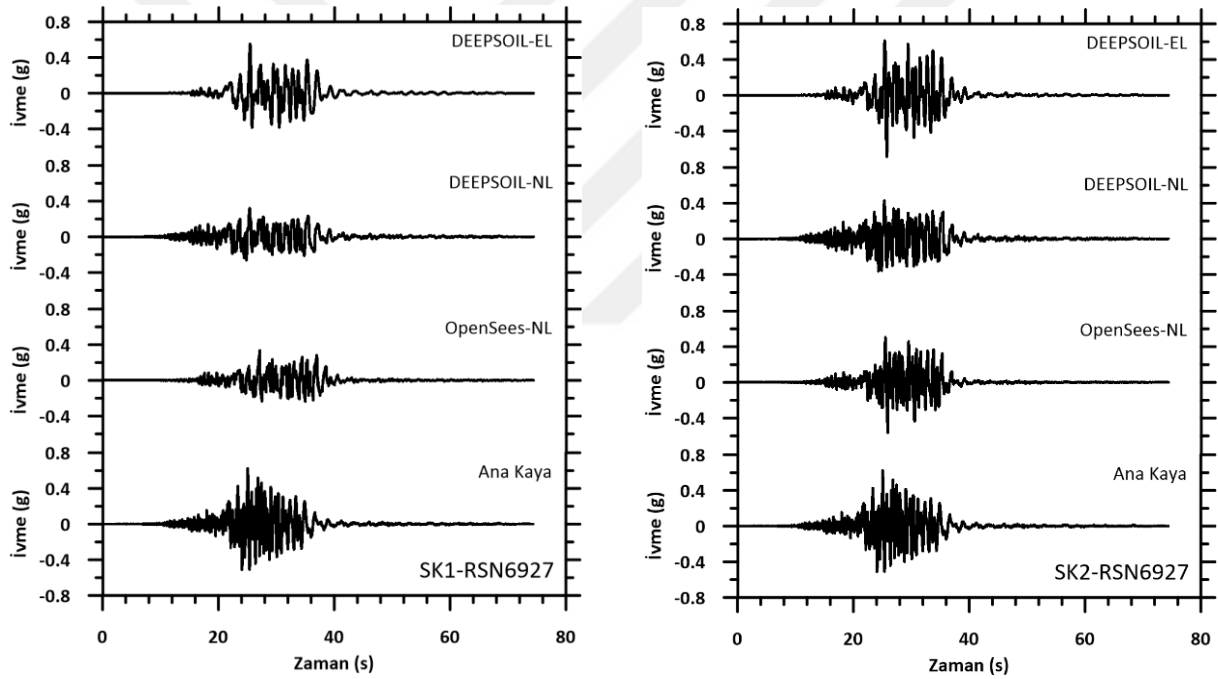
Şekil 7.51. RSN4107 Spektral ölçeklendirmeyeyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde on altıncı olarak RSN5827 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 46.5 saniyede 0.71g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 34.5 saniyede 0.55g, DEEPSOIL-NL analizi için 34.4 saniyede 0.36g, OPENSEES-NL analizi için 37.2 saniyede 0.34g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %23, DEEPSOIL-NL analizi için %49 ve OPENSEES-NL analizi için %52 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 34.7 saniyede 0.64g, DEEPSOIL-NL analizi için 34.6 saniyede 0.47g, OPENSEES-NL analizi için 32.0 saniyede 0.56g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %10, DEEPSOIL-NL analizi için %34 ve OPENSEES-NL analizi için %21 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.52).



Şekil 7.52. RSN5827 Spektral ölçeklendirmeyeyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Analizlerde son olarak RSN6927 depremine ait veriler kullanılmıştır. Ana kaya için PGA değeri 25.1 saniyede 0.62g olarak gerçekleşmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında SK1’de PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 25.4 saniyede 0.55g, DEEPSOIL-NL analizi için 25.3 saniyede 0.32g, OPENSEES-NL analizi için 27.1 saniyede 0.34g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi için %11, DEEPSOIL-NL analizi için %48 ve OPENSEES-NL analizi için %45 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. SK2’de ise PGA değerleri DEEPSOIL-EL analizi için 25.7 saniyede 0.69g, DEEPSOIL-NL analizi için 25.3 saniyede 0.43g, OPENSEES-NL analizi için 25.9 saniyede 0.57g olarak gerçekleşmiştir. Pik yüzey ivmesi ana kaya ivmesine göre DEEPSOIL-EL analizi %11 oranında büyütme, DEEPSOIL-NL analizi için %31 ve OPENSEES-NL analizi için %8 oranında küçültme olarak gerçekleşmiştir. Tüm analiz sonuçları ana kaya ile benzerlik göstermiştir (Şekil 7.53).



Şekil 7.53. RSN6927 Spektral ölçeklendirmeyeyle elde edilen deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analizleri sonucunda yüzeyde elde edilen ivme-zaman grafikleri

Orijinal ivme kayıtları ve spektral ölçeklendirme sonucu oluşan kayıtlar ile yapılan analiz sonucunda elde edilen maksimum ivmelerin karşılaştırılması Tablo 7.2’de verilmiştir.

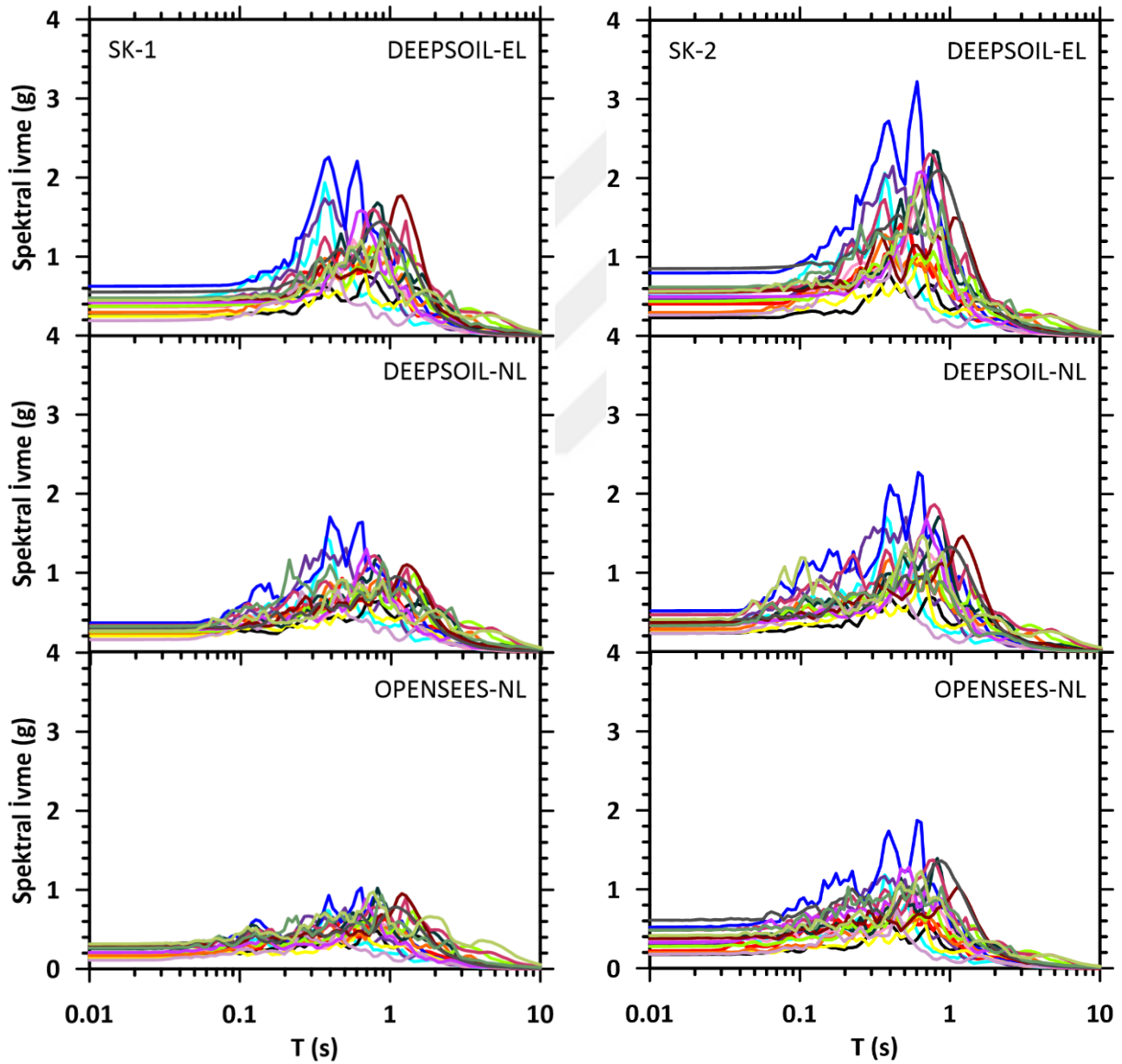
Tablo 7.2. Orijinal ve spektral ölçeklendirme ile elde edilen deprem kayıtları ile yapılan analizlerden elde edilen maksimum ivme değerleri

	DEEPSOIL EL						DEEPSOIL NL						OPENSEES NL					
	SK1			SK2			SK1			SK2			SK1			SK2		
Deprem	Orijinal (g)	Spektral Ölç. (g)	Değişim (%)	Orijinal (g)	Spektral Ölç. (g)	Değişim (%)	Orijinal (g)	Spektral Ölç. (g)	Değişim (%)	Orijinal (g)	Spektral Ölç. (g)	Değişim (%)	Orijinal (g)	Spektral Ölç. (g)	Değişim (%)	Orijinal (g)	Spektral Ölç. (g)	Değişim (%)
RSN6	0.37	0.44	19	0.41	0.74	80	0.24	0.36	50	0.32	0.47	47	0.19	0.30	58	0.22	0.50	127
RSN20	0.25	0.57	128	0.21	0.7	233	0.17	0.31	82	0.23	0.48	109	0.23	0.45	96	0.17	0.51	200
RSN30	0.47	0.52	11	0.54	0.74	37	0.29	0.37	26	0.37	0.5	35	0.18	0.32	78	0.28	0.51	82
RSN95	0.46	0.45	-2	0.46	0.63	37	0.27	0.32	19	0.38	0.43	13	0.19	0.25	32	0.3	0.57	90
RSN160	0.63	0.44	-30	0.80	0.63	-21	0.36	0.34	-6	0.52	0.45	-13	0.26	0.26	0	0.52	0.44	-15
RSN266	0.25	0.49	96	0.27	0.66	144	0.20	0.30	50	0.24	0.42	75	0.14	0.29	107	0.19	0.61	221
RSN461	0.37	0.57	54	0.55	0.66	20	0.27	0.35	30	0.38	0.45	18	0.19	0.34	79	0.34	0.49	44
RSN729	0.30	0.57	90	0.30	0.76	153	0.24	0.32	33	0.29	0.5	72	0.17	0.34	100	0.2	0.53	165
RSN1101	0.44	0.51	16	0.57	0.85	49	0.27	0.28	4	0.39	0.4	3	0.26	0.30	15	0.4	0.56	40
RSN1176	0.38	0.44	16	0.44	0.71	61	0.26	0.36	39	0.36	0.49	36	0.21	0.40	90	0.28	0.61	118
RSN1605	0.42	0.48	14	0.61	0.8	31	0.33	0.31	-6	0.47	0.44	-6	0.28	0.38	36	0.49	0.53	8
RSN2752	0.19	0.41	116	0.26	0.73	181	0.15	0.31	107	0.23	0.43	87	0.11	0.28	155	0.18	0.49	172
RSN3754	0.42	0.58	38	0.50	0.68	36	0.28	0.29	4	0.36	0.46	28	0.21	0.33	57	0.32	0.48	50
RSN3965	0.45	0.50	11	0.56	0.55	-2	0.30	0.28	-7	0.37	0.45	22	0.28	0.29	4	0.38	0.48	26
RSN4107	0.55	0.62	13	0.85	0.83	-2	0.29	0.28	-3	0.40	0.42	5	0.31	0.39	26	0.61	0.58	-5
RSN5827	0.48	0.55	15	0.62	0.64	3	0.32	0.36	13	0.43	0.47	9	0.27	0.34	26	0.48	0.56	17
RSN6927	0.45	0.55	22	0.62	0.69	11	0.26	0.32	23	0.43	0.43	0	0.32	0.34	6	0.48	0.57	19

7.2.2. Sahaya Özel Analiz Sonuçlarına Göre Oluşan Tepki Spektrumları

7.2.2.1. Orijinal İvme Kayıtlarına Göre Tepki Spektrumları

Bu bölümde, herhangi bir ölçekleme işlemi yapılmamış, orijinal deprem kayıtları esas alınarak DEEPSOIL programı ile gerçekleştirilen EL, NL analizleri ve OPENSEES yazılımı ile gerçekleştirilen NL analizleri kapsamında, spektral ivme değerleri elde edilmiştir. Analiz sürecinde, 17 farklı deprem kaydı kullanılarak spektral ivme-periyot ilişkileri ortaya konmuştur. Şekil 7.54'te, SK1 ve SK2 için EL ve NL analiz yöntemleriyle elde edilen spektral ivmeler karşılaştırmalı grafiklerle sunulmuştur.



Şekil 7.54. SK1 ve SK2 için 17 adet orijinal deprem kaydı kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerden elde edilen spektral ivme-periyot değerleri

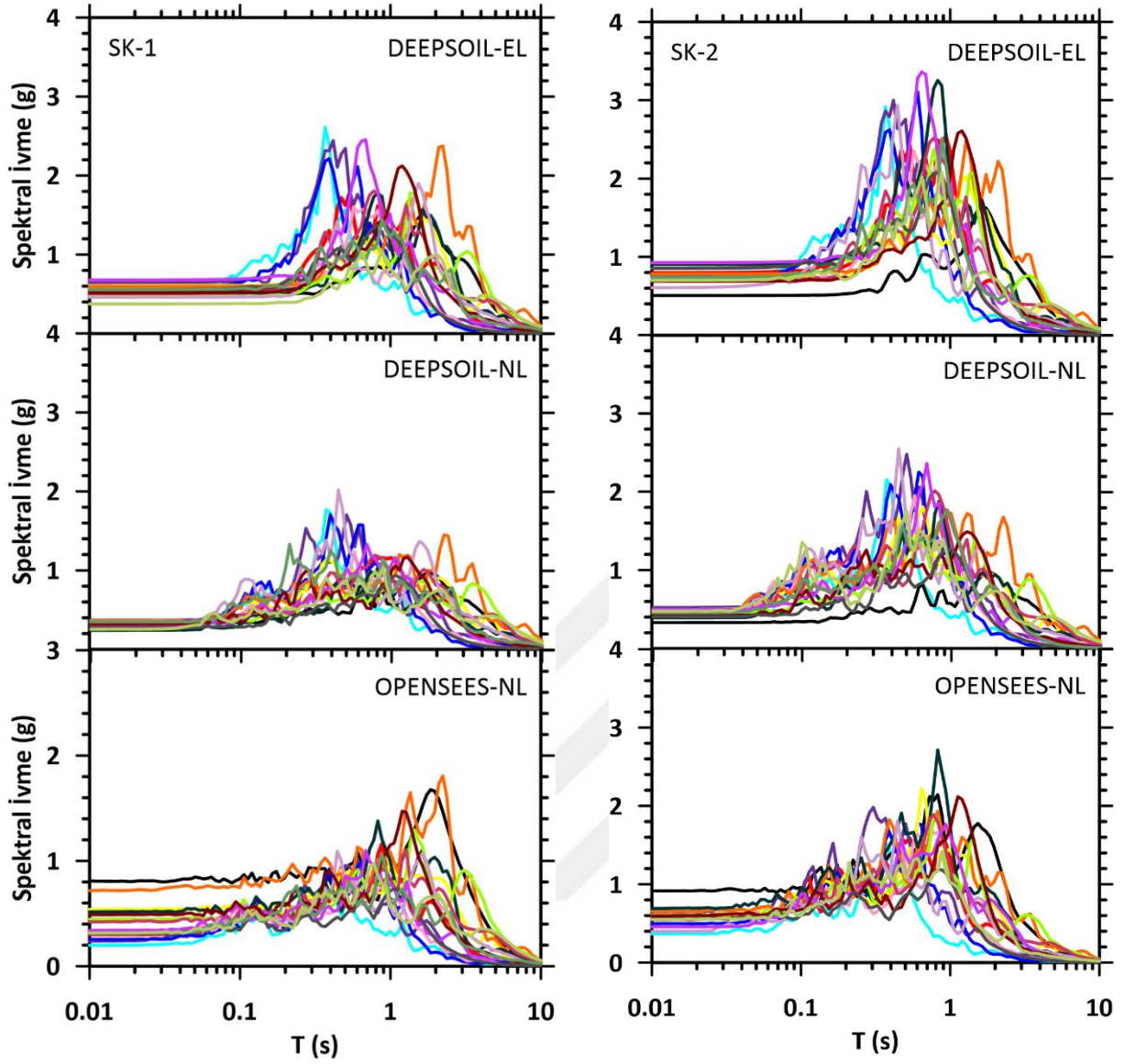
SK1 için yapılan analizlerde, DEEPSOIL-EL analiz yöntemine göre spektral pik ivmeler 0.4 saniyede 2.3g, DEEPSOIL-NL analizlerde 0.4 saniyede 1.7g ve OPENSEES-NL

analizlerde 0.6 saniyede 1.0g civarındaki değerler belirlenmiştir. SK2’de ise DEEPSOIL-EL analiz yöntemine göre spektral pik ivmeler 0.6 saniyede 3.2g olarak belirlenirken, DEEPSOIL-NL analizlerde 0.6 saniyede 2.3g ve OPENSEES-NL analizlerde ise 0.6 saniyede 1.9g civarındaki değerler tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, farklı analiz yöntemlerinin yapıların dinamik tepkilerini farklı şekilde etkileyebileceğini ve her iki analiz yönteminin de sismik davranışın değerlendirilmesinde önemli bir rol oynadığını göstermektedir.

Yapılan analizler sonucunda SK1’e göre daha rijit olan SK2’de spektral ivme değerleri daha yüksek çıkmıştır. Bu durum, yapının dinamik davranışını daha ayrıntılı bir şekilde anlamamıza olanak tanımaktadır. Rijitlik, bir yapının deformasyona karşı gösterdiği direnci ifade eder ve yapıların doğal frekanslarını doğrudan etkiler. Rijitlik arttıkça, yapının doğal frekansı yükselir, bu da daha yüksek frekanslarda titreşimlere yol açabilir. Yüksek frekanslar, genellikle daha büyük ivme değerleri ile ilişkilidir, çünkü yapı bu duruma daha sert bir şekilde tepki verir. Ayrıca, kayma dalgası hızındaki artış da dikkate alındığında, zemin katmanlarının taşıma kapasitesi ve esneklik özellikleri değişir, bu da yapının dinamik tepkisini etkiler. Kayma dalgası hızının artışı, zemin ve yapı arasındaki etkileşimi güçlendirir, dolayısıyla yapının sismik tepkisi daha belirgin hale gelir. Kayma dalgası hızının yükselmesi, zemin sertliğini artırarak, yapının titreşim modlarını ve frekanslarını etkiler, bu da spektral ivme değerlerinde artışa yol açabilir (Chopra, 2012; Priestley ve Kowalsky, 2007; Sabbagh vd., 2018). Sonuç olarak, rijitlik ve kayma dalgası hızındaki artış, yapının sismik davranışının daha sert ve hızlı tepki vermesine sebep olur ve bu durum ile spektral ivme değerlerinde yaşanan artışı açıklar.

7.2.2.2. Zaman Tanım Alanında Yapılan Ölçeklendirme ile Tepki Spektrumları

Bu bölümde ise analizler zaman tanım alanında yapılan ölçeklendirme sonucu elde edilen deprem kayıtları esas alınarak yapılmıştır. DEEPSOIL programı ile gerçekleştirilen EL, NL analizleri ve OPENSEES yazılımı ile gerçekleştirilen NL analizleri kapsamında, spektral ivme değerleri elde edilmiştir. Analiz sürecinde, 17 farklı deprem kaydı kullanılarak spektral ivme-periyot ilişkileri ortaya konmuştur. Şekil 7.55’te, SK1 ve SK2 için EL ve NL analiz yöntemleriyle elde edilen spektral ivmeler karşılaştırmalı grafiklerle sunulmuştur.



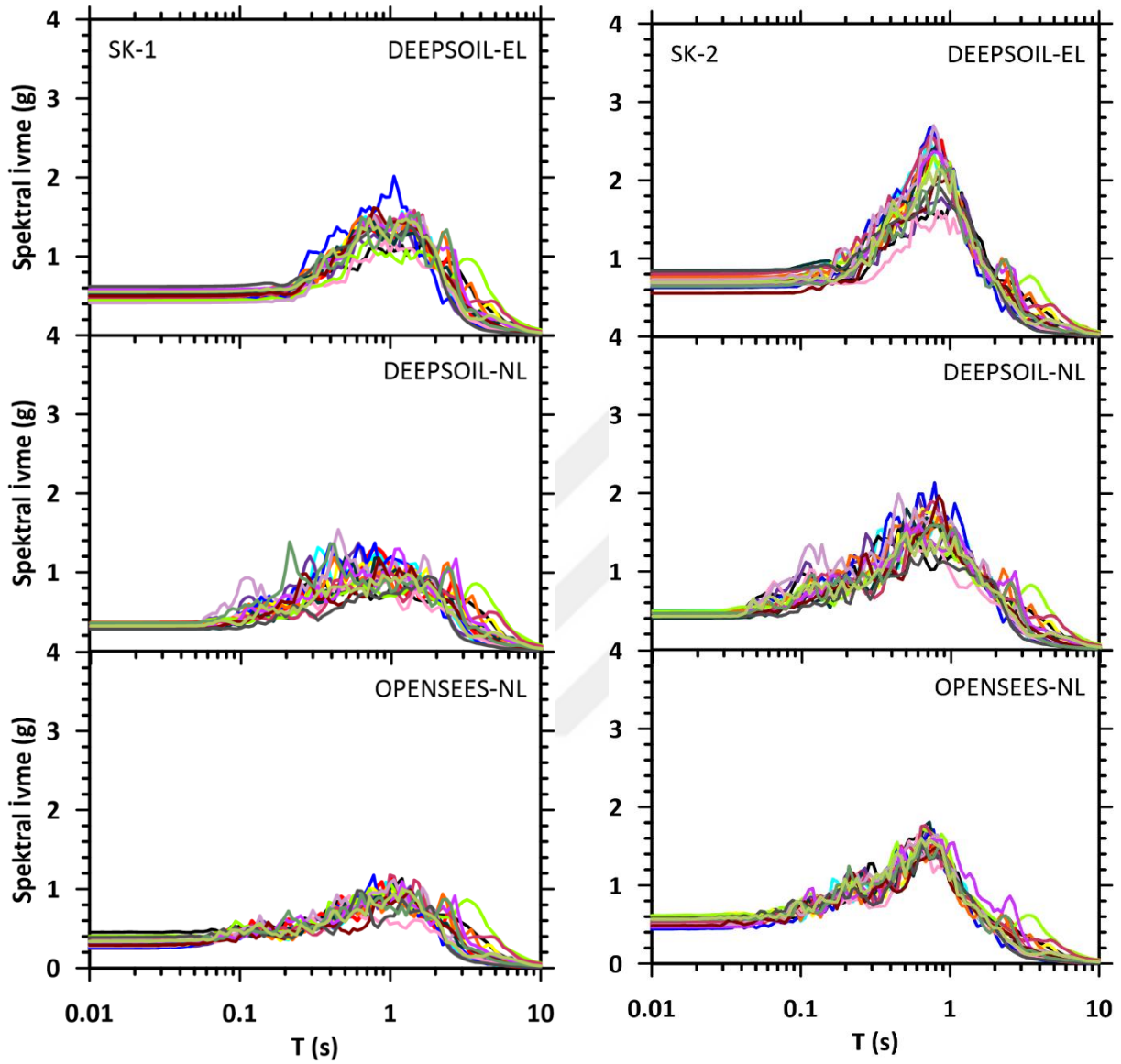
Şekil 7.55. SK1 ve SK2 için 17 adet zaman tanım alanında ölçeklendirilmiş deprem kaydı kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerden elde edilen spektral ivme-periyot değerleri

SK1 için yapılan analizlerde, DEEPSOIL-EL analiz yöntemine göre spektral pik ivmeler 0.4 saniyede 2.7g olarak belirlenirken, DEEPSOIL-NL analizlerde 0.45 saniyede 2.0g ve OPENSEES-NL analizlerde 2.2 saniyede 1.9g civarındaki değerler belirlenmiştir. SK2’de ise DEEPSOIL-EL analiz yöntemine göre spektral pik ivmeler 0.65 saniyede 3.4g olarak belirlenirken, DEEPSOIL-NL analizlerde 0.65 saniyede 2.5g ve OPENSEES-NL analizlerde 0.8 saniyede 2.7g civarındaki değerler tespit edilmiştir.

7.2.2.3. Frekans Tanım Alanında Yapılan Ölçeklendirme ile Tepki Spektrumları

Bu bölümde analizler zaman tanım alanında yapılan ölçeklendirme sonucu elde edilen deprem kayıtları esas alınarak yapılmıştır. DEEPSOIL programı ile gerçekleştirilen EL, NL analizleri ve OPENSEES yazılımı ile gerçekleştirilen NL analizleri kapsamında, spektral ivme

değerleri elde edilmiştir. Analiz sürecinde, 17 farklı deprem kaydı kullanılarak spektral ivme-periyot ilişkileri ortaya konmuştur. Şekil 7.56'da, SK1 ve SK2 için EL ve NL analiz yöntemleriyle elde edilen spektral ivmeler karşılaştırmalı grafiklerle sunulmuştur.



Şekil 7.56. SK1 ve SK2 için 17 adet frekans tanım alanında ölçeklendirilmiş deprem kaydı kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerden elde edilen spektral ivme-periyot değerleri

SK1 için yapılan analizlerde, DEEPSOIL-EL analiz yöntemine göre spektral pik ivmeler 1.05 saniyede 2.0g olarak belirlenirken, DEEPSOIL-NL analizlerde 0.45 saniyede 1.5g ve OPENSEES-NL analizlerde 3.4 saniyede 1.4g civarındaki değerler belirlenmiştir. SK2’de ise DEEPSOIL-EL analiz yöntemine göre spektral pik ivmeler 0.8 saniyede 2.7g olarak belirlenirken, DEEPSOIL-NL analizlerde 0.8 saniyede 2.1g ve OPENSEES-NL analizlerde 0.8 saniyede 1.8g civarındaki değerler tespit edilmiştir.

7.2.3. Sahaya Özel Zemin Büyütme Değerleri (Amplifikasyon Faktörü)

Zemin büyütmesi veya amplifikasyon, sismik yer hareketlerinin yerel zemin koşulları tarafından nasıl güçlendirildiğini tanımlayan önemli bir parametre olup, deprem mühendisliği ve yer hareketi analizlerinde kritik bir rol oynamaktadır (Kramer, 1996). Zemin büyütme değeri, bir zeminin sismik dalgaları ne kadar büyüttüğünü gösteren amplifikasyon faktörü ile ölçülür. Bu faktör, yerel zemin özelliklerine, zemin katmanlarının derinliğine, sıvılaşma potansiyeline ve kayma dalgası hızına bağlı olarak değişiklik gösterir (Dobry vd., 2000). Geoteknik mühendisliği bağlamında yapılan araştırmalar, çok katmanlı ve düşük rijitlikteki zeminlerin, sismik dalga etkisi altında genlik ve baskın periyotlarında, zemin parametrelerine bağlı olarak belirgin düzeyde büyütme etkisi sergilediğini göstermektedir. Bu durum, odak merkezinden uzak yerleşim alanlarında dahi yapısal sistemlerin yarı rezonans etkisi altında kalmasına ve buna bağlı olarak çeşitli hasar mekanizmalarının gelişmesine neden olabilmektedir. Yapılarda meydana gelen bu tür hasarların temelinde, yapıların doğal titreşim periyodu ile sismik dalgaların hâkim periyotlarının çakışması sonucu oluşan rezonans durumu yer almaktadır. Rezonans koşullarında yapının maruz kaldığı deplasman değerleri önemli ölçüde artış göstermektedir (Cassaro, 1987). Bu bağlamda, amplifikasyon katsayısı olarak da adlandırılan zemin büyütme faktörü, muhtemel depremler esnasında yapılaşmanın bulunduğu bölgelerde oluşabilecek yapısal zararların belirlenmesinde kritik bir parametre olarak değerlendirilmektedir. Sayısal olarak ifade edilen bu parametre, zemin büyütme oranı olarak tanımlanmakta olup, yüzeyde elde edilen tepki spektrumunun anakayadaki tepki spektrumuna oranı olarak hesaplanmaktadır.

Amplifikasyon faktörü, genellikle şu şekilde hesaplanır (7.1):

$$A = \frac{S_{a_{yüzey}}}{S_{a_{anakaya}}} \quad (7.1)$$

Burada;

A , amplifikasyon faktörünü,

$S_{a_{yüzey}}$, zemin yüzeyindeki spektral ivmeyi,

$S_{a_{anakaya}}$, ise ana kaya üzerindeki spektral ivmeyi ifade eder. Bu faktör, zemin üzerindeki sismik hareketin, ana kayaya göre ne kadar büyüdüğünü belirler (Borcherdt, 1994).

Zemin büyütmesinin değerini etkileyen faktörlerden ilk olarak zemin tipi sayılabilir. Zemin tipleri (örneğin, kum, kil, sıvılaşmaya meyilli zeminler, kaya) ve zemin katmanlarının

yapısı amplifikasyon faktörünü doğrudan etkileyen önemli unsurlardır (Stewart vd., 2001). Yumuşak zeminler, genellikle sismik enerjiyi daha fazla amplifike ederken, sert zeminler bu enerjiyi daha az büyütür. Özellikle, kalın yumuşak zemin katmanları, deprem sırasında önemli amplifikasyon değerlerine yol açabilir (Bozorgnia vd., 2014).

Zemin katmanlarının derinliği ve bileşimi, amplifikasyon faktörünün belirlenmesinde bir diğer önemli etkidir (Iwasaki vd., 1978). Derin ve homojen olmayan zeminlerde, amplifikasyon faktörü daha yüksek olabilir. Özellikle, kalın ve yumuşak zeminler sismik dalgaları daha fazla büyütebilir (Joyner ve Boore, 1981).

Sıvılaşmaya meyilli zeminler, özellikle büyük depremler sırasında sismik dalgaların amplifikasyonunu artırabilir (Tokimatsu ve Yoshimi, 1983). Sıvılaşma, zemin yüzeyindeki su seviyesinin yükselmesi ve zemin partiküllerinin kayması ile gerçekleşir, bu da zeminin taşıma kapasitesini ve sismik ivme değerlerini önemli ölçüde etkiler.

Zemin kayma dalgası hızı, amplifikasyon faktörünün belirlenmesinde kritik bir parametredir (Liu ve Tseng, 2001). Zemin kayma dalgası hızı düşük olan zeminler, genellikle daha fazla amplifikasyon gösterir. Zemin kayma dalgası hızı arttıkça, zemin büyütmesi azalır (Stewart vd., 2003).

Zemin büyütmesi, deprem dalgalarının frekansına bağlı olarak değişir. Yüksek frekanslı dalgalar (kısa periyotlar) daha az amplifike edilirken, düşük frekanslı dalgalar (uzun periyotlar) daha fazla amplifikasyon gösterir (Bozorgnia vd., 2007). Bu durum, farklı zemin türlerinin çeşitli frekanslardaki sismik dalgalar üzerindeki etkisini anlamada önemlidir.

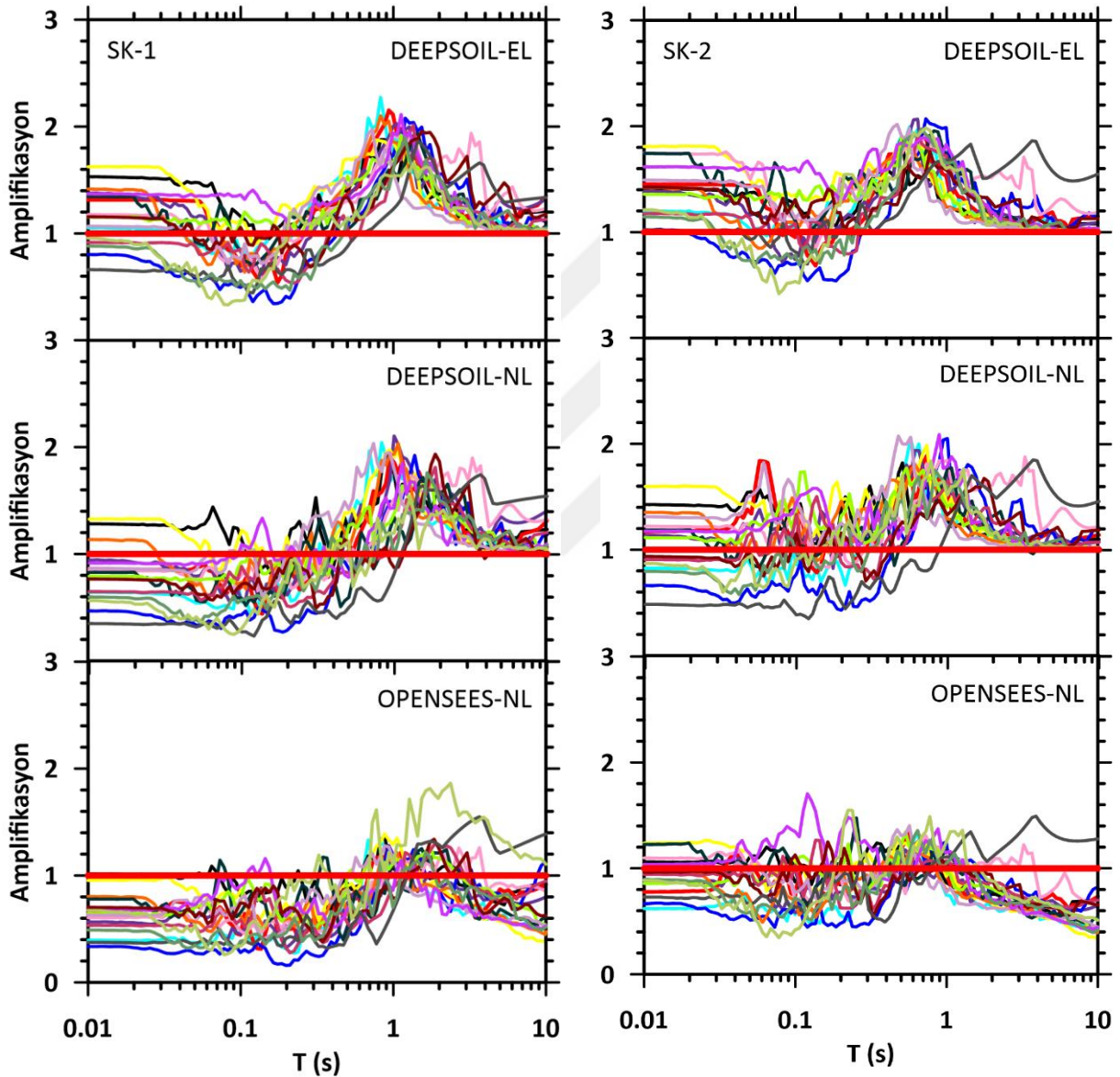
Zemin büyütmesi, deprem mühendisliğinde oldukça önemli bir parametre olup, özellikle zemin sınıflandırması, zemin iyileştirme ve sismik tasarım için temel veriler sağlar (Borcherdt, 1994). Yerel zemin koşullarına dayalı olarak yapılan analizler, zemin büyütmesinin etkilerini doğru bir şekilde değerlendirmeyi ve buna göre güvenli yapı tasarımlarını mümkün kılmaktadır. Örneğin, Tokyo'daki bazı bölgelerde amplifikasyon faktörlerinin 3.0'a kadar çıkması, yerel zemin koşullarının sismik dalgalar üzerindeki etkisinin büyüklüğünü göstermektedir. San Francisco gibi büyük şehirlerde ise amplifikasyon faktörleri 2.5-3.5 arasında değişmektedir (Stewart vd., 2001). İstanbul'da yapılan çalışmalar, özellikle yumuşak zeminlerde amplifikasyon faktörlerinin 1.5 ile 3.0 arasında değiştiğini göstermektedir (Yıldız vd., 2009).

Sonuç olarak, zemin büyütmesi ve amplifikasyon faktörü, yerel zemin koşullarının deprem etkilerini nasıl değiştirdiğini anlamada ve yapıların güvenliğini artırmada kritik bir

parametre olarak kabul edilmektedir (Bozorgnia vd., 2014). Bu faktörün doğru bir şekilde hesaplanması, sismik tasarımın güvenilirliğini artırmakta ve yapısal dayanıklılığın sağlanmasında önemli bir rol oynamaktadır.

7.2.3.1. Orijinal İvme Kayıtlarına Göre Amplifikasyon Faktörü

Orijinal deprem kayıtları ile yapılan analiz sonucunda hesaplanan amplifikasyon faktörü değerlerine ait grafik Şekil 7.57’de gösterilmiştir.



Şekil 7.57. SK1 ve SK2 için 17 adet orijinal deprem kaydı kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerden hesaplanan amplifikasyon faktörü değerleri

SK1 ve SK2’ye ilişkin gerçekleştirilen DEEPSOIL-EL, NL ve OPENSEES-NL analiz sonuçlarına göre, amplifikasyon faktörü değerleri Şekil 7.57’de verilmiştir. Bu analizlerde,

büyütme faktörünün 1.0 değerinin üzerine çıktığı periyot aralıklarında zemin kaynaklı büyütmenin ortaya çıktığı gözlemlenmiştir.

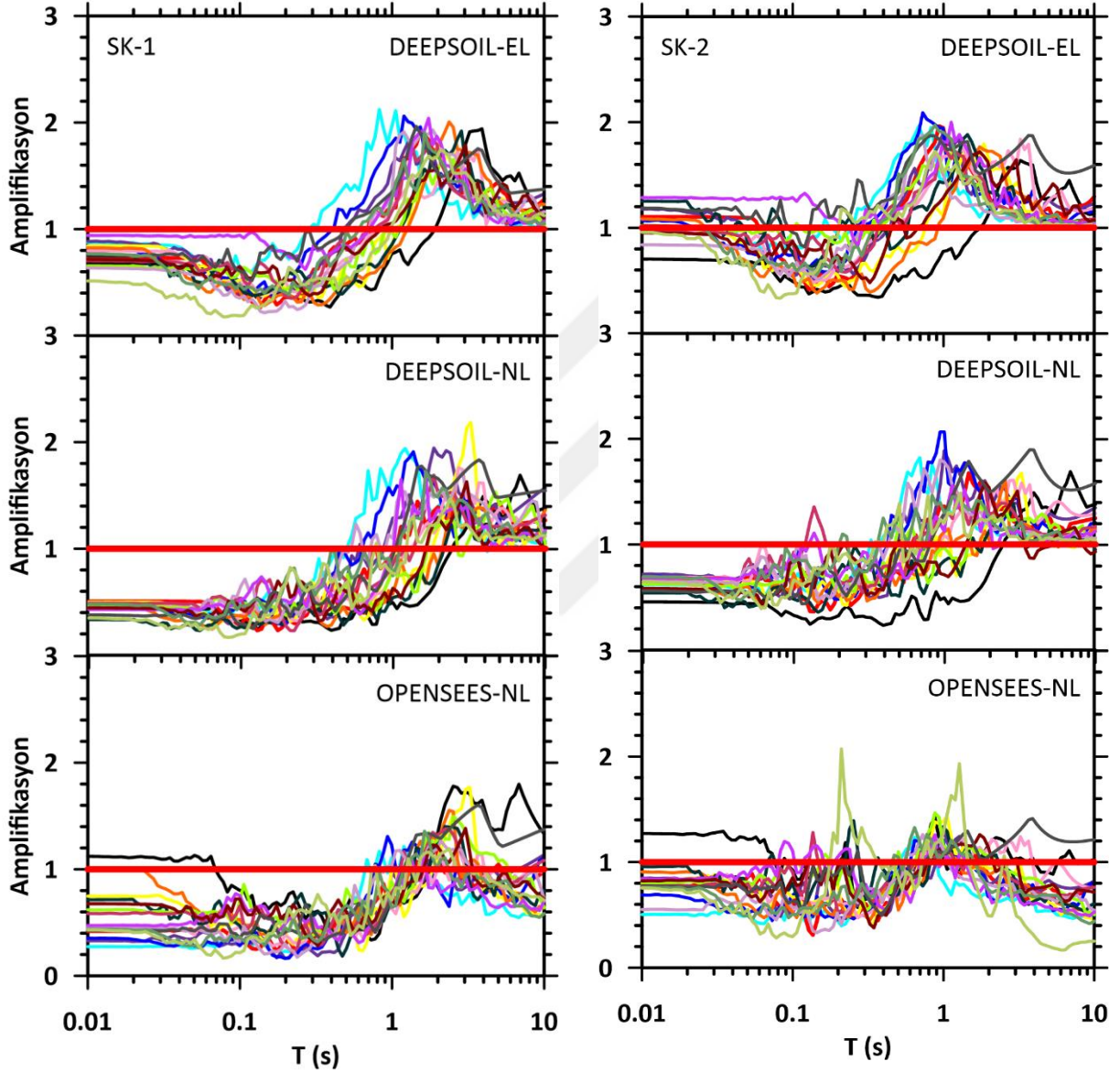
SK1’de, DEEPSOIL-EL analizi kapsamında değerlendirilen 17 farklı orijinal deprem kaydı dikkate alındığında, özellikle 0.8 saniye periyotta büyütme oranının 2.3’e kadar ulaştığı tespit edilmiştir. DEEPSOIL-NL analiz sonuçları ise EL analiz ile aynı eğilimde davranış göstererek 1 saniye periyotta 2.1 büyütme değerine ulaşmıştır. OPENSEES-NL analizi ise farklı bir eğilim sergilemiş iki deprem verisi dışında genel yoğunlaşma 1.0 ile 2.0 saniye periyotta gerçekleşmiş ve 1.3 büyütme değerine ulaşmıştır. 2. saniyede RSN6927 depremine ait büyütme faktörü 1.9 olarak gerçekleşmiştir.

SK2’de yapılan DEEPSOIL-EL analiz sonuçları incelendiğinde, 17 farklı orijinal deprem kaydının SK1 ile benzer özellik göstererek 1.0 saniye periyot değerinde büyütme oranının 2.0 olduğu belirlenmiştir. DEEPSOIL-NL analizinde ise 0.01-10.0 saniye periyot aralığında yoğunlaştığı, bu aralıkta büyütme oranının 2.0 civarında seyrettiği anlaşılmıştır. OPENSEES-NL analiz sonuçlarına göre 0.01-10.0 saniye periyot aralığında yoğunlaştığı, bu aralıkta büyütme oranının 1.2 ile 1.4 arasında seyrettiği anlaşılmıştır.

Belirgin bir şekilde fark olmasa da SK1’e göre daha yüksek rijitliğe sahip SK2’ye ait amplifikasyon faktörü değerleri daha düşük çıkmıştır. Zemin rijitliğinin artması, zeminin sismik dalgaları büyütme kapasitesini azaltarak amplifikasyon faktörü üzerinde doğrudan belirleyici rol oynamaktadır. Artan rijitlik, zeminin deformasyona karşı direncini yükselterek, gelen dalgaların yüzeye ulaştığında daha az genlikle iletilmesine neden olur. Benzer şekilde, kayma dalgası hızındaki artış da zeminin daha sağlam ve geçirgen bir yapıda olduğunu gösterir; bu durum sismik dalgaların yüzeye olan büyütme değerini sınırlandırır (Boore, 2004). Düşük V_s değerleri, genellikle yumuşak zeminleri temsil etmekte ve bu tür zeminlerde rezonans etkisi ile büyütme oranları önemli düzeylere ulaşmaktadır (Stewart vd., 2003). Buna karşılık, daha yüksek rijitliğe ve V_s değerine sahip zeminler, sismik enerjiyi daha az büyütme ile ilettiğinden dolayı yapıların sismik yüklerden görece daha az etkilenmesine katkı sağlamaktadır. Bu bağlamda, rijitlik ve kayma dalgası hızı, yerel zemin koşullarının değerlendirilmesinde ve sismik tehlike analizlerinde dikkate alınması gereken temel parametreler arasında yer almaktadır (Kawase ve Aki, 1990).

7.2.3.2. Zaman Tanım Alanında Yapılan Ölçeklendirmeye Göre Amplifikasyon Faktörü

Zaman tanım alanında yapılan ölçeklendirme sonucunda elde edilen deprem kayıtları ile yapılan analiz sonucunda hesaplanan amplifikasyon faktörü değerlerine ait grafik Şekil 7.58’de gösterilmiştir.



Şekil 7.58. SK1 ve SK2 için 17 adet zaman tanım alanında ölçeklendirmiş deprem kaydı kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerden hesaplanan amplifikasyon faktörü değerleri

SK1’de, DEEPSOIL-EL analizi kapsamında değerlendirilen 17 farklı zaman tanım alanında yapılan ölçeklendirme sonucu elde edilen deprem kaydı dikkate alındığında, özellikle 1.0 ile 10.0 saniye periyot aralığında büyütme oranının 2.1’e kadar ulaştığı tespit edilmiştir. DEEPSOIL-NL analiz sonuçları ise EL analiz ile aynı eğilimde davranış göstererek büyütme

oranı 2.2 değerine ulaşmıştır. OPENSEES-NL analizi ise kısmen benzer davranış sergilemiş 1.0 ile 10.0 saniye periyotta 1.8 büyütme değerine ulaşmıştır.

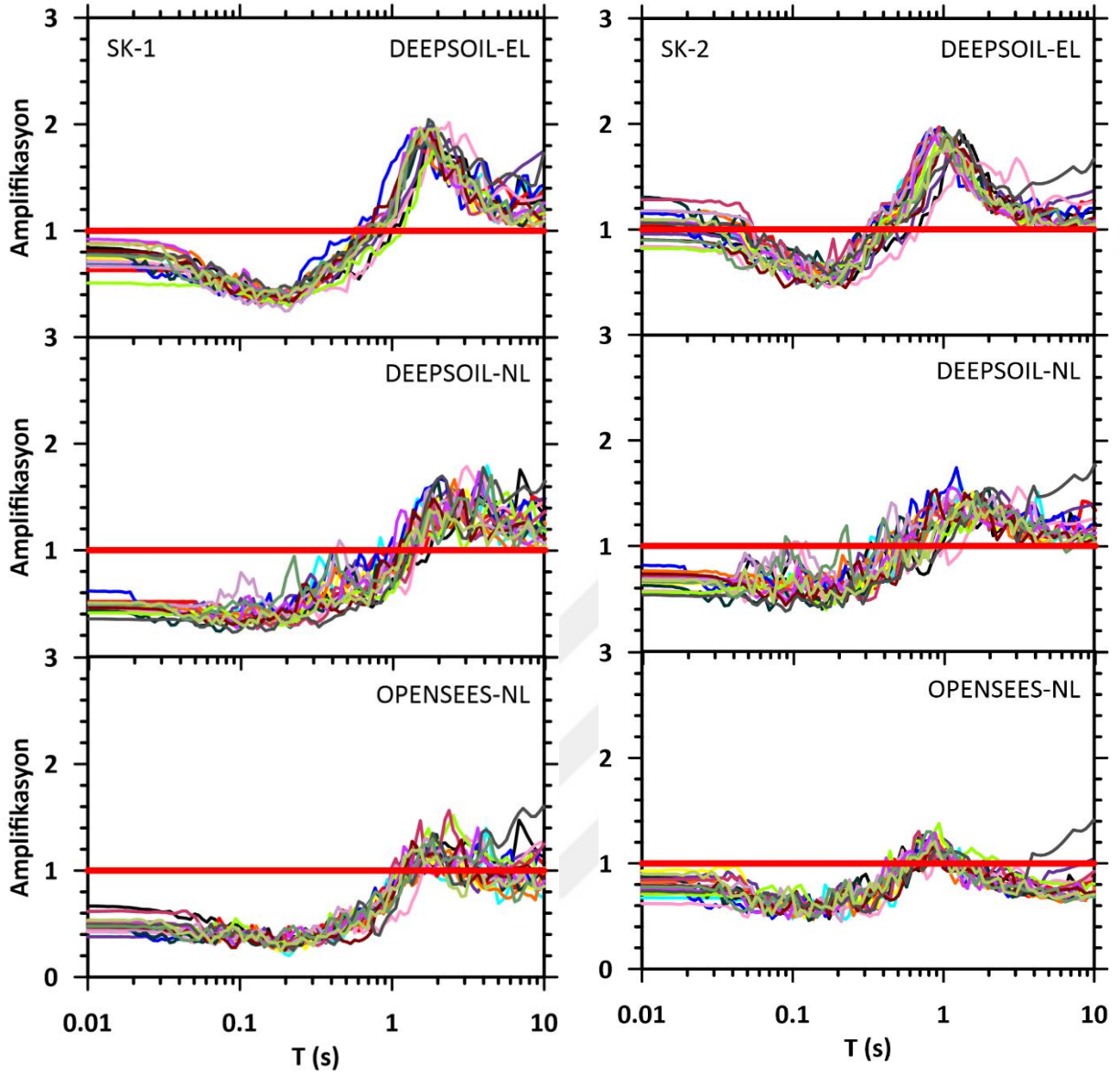
SK2’de yapılan DEEPSOIL-EL analiz sonuçları incelendiğinde, 17 farklı zaman tanım alanında yapılan ölçeklendirme sonucu elde edilen deprem kaydının SK1 ile benzer özellik göstererek 1.0 saniye periyot değerinde büyütme oranının 2.1 olduğu belirlenmiştir. DEEPSOIL-NL analizinde ise yine 1.0 saniye periyot değerinde büyütme oranı 2.1’e ulaşmıştır. OPENSEES-NL analiz sonuçlarına göre 0.01-10.0 saniye periyot aralığında yoğunlaştığı, bu aralıkta büyütme oranının bir deprem kaydı dışında 1.2 ile 1.4 arasında seyrettiği anlaşılmıştır. 0.2 ve 2.0 saniye periyotlarında bir deprem kaydında 2.1 gibi farklı pik büyütme değerlerinin meydana geldiği gözlemlenmiştir.

7.2.3.3. Frekans Tanım Alanında Yapılan Ölçeklendirmeye Göre Amplifikasyon Faktörü

Frekans tanım alanında yapılan ölçeklendirme sonucunda elde edilen deprem kayıtları ile yapılan analiz sonucunda hesaplanan amplifikasyon faktörü değerlerine ait grafik Şekil 7.59’da gösterilmiştir.

SK1’de, DEEPSOIL-EL analizi kapsamında değerlendirilen 17 farklı frekans tanım alanında yapılan ölçeklendirme sonucu elde edilen deprem kaydı dikkate alındığında, özellikle 2.0 saniye periyotunda büyütme oranının 2.1’e kadar ulaştığı tespit edilmiştir. DEEPSOIL-NL analiz sonuçları ise 2.0 ile 10.0 saniye periyot aralığında büyütme oranı 2.0 değerine ulaşmıştır. OPENSEES-NL analizi ise DEEPSOIL-NL analizi ile kısmen benzer davranış sergilemiş 1.0 ile 10.0 saniye periyotta 1.2 ile 1.6 aralığında büyütme değerlerine ulaşmıştır.

SK2’de yapılan DEEPSOIL-EL analiz sonuçları incelendiğinde, 17 farklı frekans tanım alanında yapılan ölçeklendirme sonucu elde edilen deprem kaydının SK1 ile benzer özellik göstererek 1.0 saniye periyot değerinde büyütme oranının 2.0 olduğu belirlenmiştir. DEEPSOIL-NL analizinde ise yoğunlaşmanın 0.7 ile 10.0 saniye periyot aralığında olduğu ve büyütme oranının 1.8’e ulaştığı belirlenmiştir. OPENSEES-NL analiz sonuçlarına göre 0.5-2.0 saniye periyot aralığında yoğunlaştığı, bu aralıkta büyütme oranının 1.4 değerine ulaştığı belirlenmiştir.



Şekil 7.59. SK1 ve SK2 için 17 adet frekans tanım alanında ölçeklendirmiş deprem kaydı kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerden hesaplanan amplifikasyon faktörü değerleri

7.2.4. EL ve NL Analizlerin Zemin Büyütme Faktörü Değerlerinin Karşılaştırılması

EL ve NL analizler, yapı-zemin sistemlerinin deprem etkisi altındaki davranışlarını değerlendirmede farklı seviyelerde doğruluk ve bilgi vermektedir. EL analizlerde, zemin ve yapının tüm bileşenlerinin lineer elastik özellik gösterdiği varsayılır; bu nedenle, bu analizler genel eğilimleri belirlemede ve hızlı hesaplama avantajı sunması açısından tercih edilir. Ancak bu yöntem, özellikle yüksek genlikli yer hareketlerinin neden olduğu plastik şekil değiştirmeleri ve enerji sönümünü yeterince temsil edemez (Chopra, 2012).

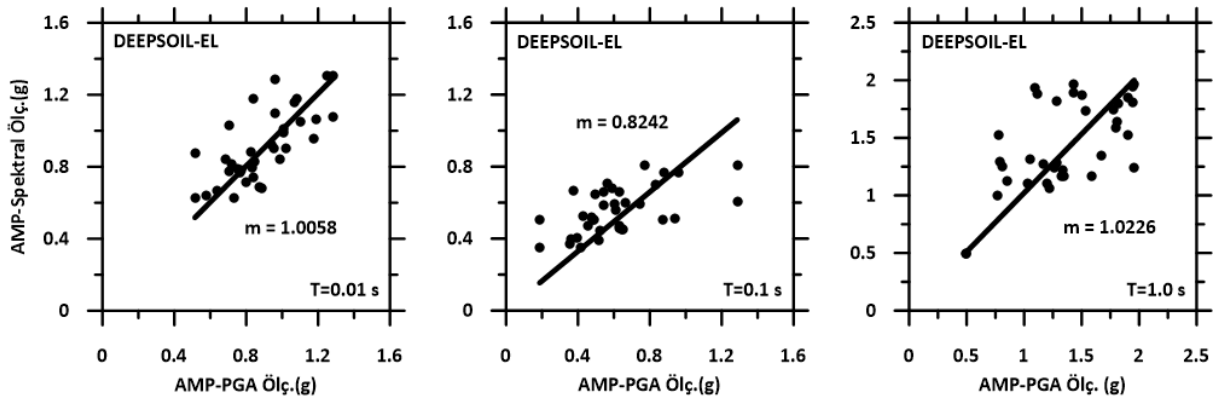
NL analizler ise malzeme davranışının elastik sınırlar dışında modellenmesine olanak tanıyarak, yapıların ve zemin ortamlarının gerçek davranışını daha doğru yansıtır. Bu analizler,

plastikleşme, rijitlikte azalma, enerji sönümü ve histeritik davranış gibi karmaşık fiziksel süreçleri dikkate alır. Özellikle yumuşak ve gevşek zeminlerde, meydana gelen kayma gerilmeleri-şekil değiştirme ilişkileri doğrusal olmaktan önemli ölçüde sapar. Bu nedenle, zeminlerin dinamik davranışını doğru bir şekilde temsil edebilmek adına, NL analizler kaçınılmaz hale gelir (Kramer, 1996).

EL analizlerin genellikle daha yüksek büyütme değerleri üretmesinin sebebi, yapının veya zeminin enerji sönümleme kapasitesinin dikkate alınmamasıdır. NL analizlerde ise, deformasyon kapasitesi ve enerji sönümü devreye girdiği için büyütme faktörleri belirli periyot aralıklarında daha düşük değerlere ulaşabilir (Hashash et al., 2010).

Bu çalışma kapsamında, iki farklı zemin profili bölgesinde gerçekleştirilen EL ve NL analizlerden elde edilen büyütme faktörü değerleri, yapı tasarımı açısından kritik öneme sahip olan $T=0.01s$, $T=0.1s$ ve $T=1.0s$ periyotlarında karşılaştırılmıştır. Bu üç periyot hem kısa hem orta hem de uzun periyotlu yapıların dinamik davranışlarının temsil edilebilmesi ve yüzey hareketinin karakterize edilebilmesi amacıyla seçilmiştir.

Yapı tasarımında dikkate alınan $T=0.01s$, $T=0.1s$ ve $T=1.0s$ periyotları için, EL ve NL analizlerle elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve bu değerlere ilişkin bulgular Şekil 7.60 ve 7.61’de sunulmuştur.



Şekil 7.60. EL analizlerde farklı periyot değerlerinde iki farklı ölçeklendirme ile büyütme faktörünün karşılaştırılması

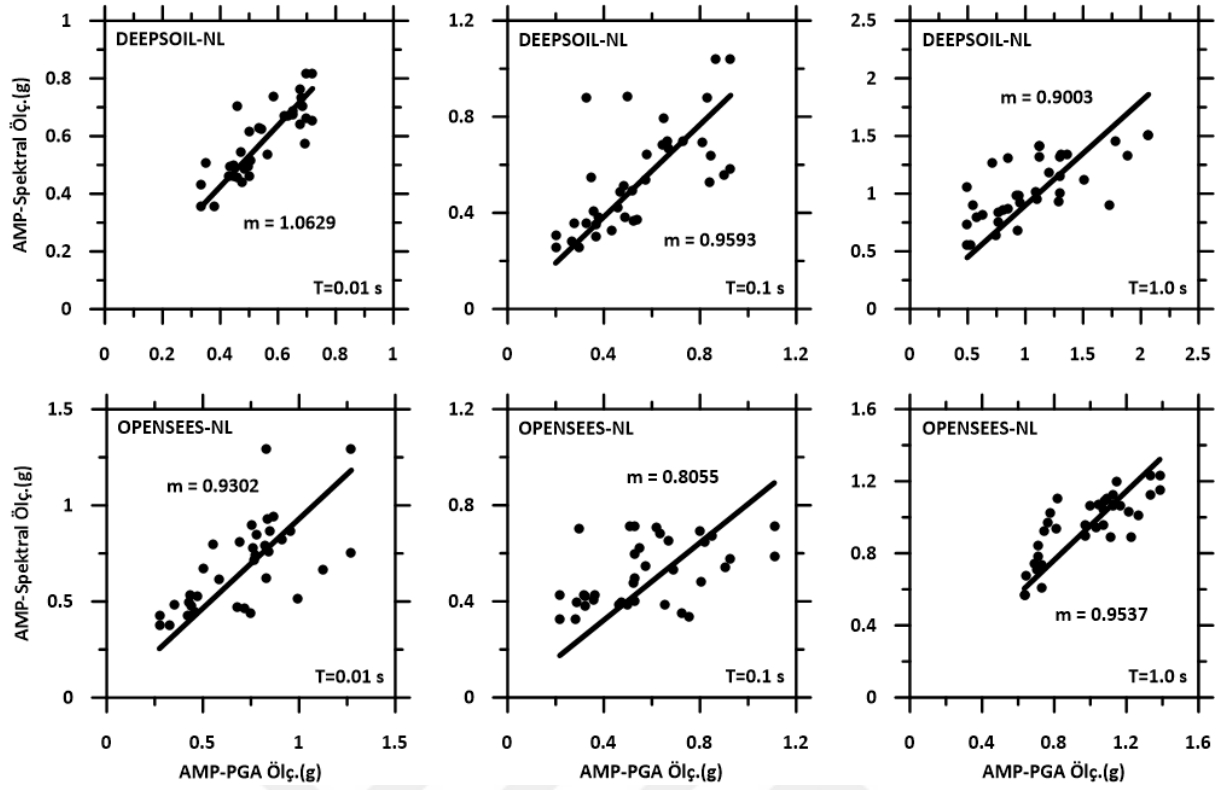
Şekil 7.60’da verilen karşılaştırmalı grafikler, EL kapsamında DEEPSOIL yazılımı ile elde edilen spektral büyütme değerlerinin, PGA esaslı ölçeklendirme ile spektral ölçeklendirme arasındaki ilişkinin periyot bazlı olarak incelendiğini göstermektedir. Grafiklerdeki doğrusal eğrinin eğim değeri (m), iki ölçekleme yöntemi arasındaki bağımlılık düzeyine işaret etmektedir.

$T=0.01s$ için elde edilen eğim değeri $m=1.0058$ olup birim değere oldukça yakındır. Bu durum, spektral ölçeklendirme ve PGA ölçeklendirme yöntemlerinin kısa periyot aralığında birbirine oldukça yakın sonuçlar verdiğini göstermektedir. Bu benzerlik, yapı davranışının ivme odaklı olduğu rijit sistemlerde her iki ölçeklendirme türünün de benzer güvenilirlik düzeyine sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

$T=0.1s$ periyodunda ise eğim değeri $m=0.8242$ olarak belirlenmiştir. Bu değer, spektral ölçeklendirme ile elde edilen spektral ivmelerin, PGA ölçeklendirmesine göre sistematik olarak daha düşük kaldığını göstermektedir. Orta periyot aralığına karşılık gelen bu değerler, spektral ölçeklendirme yönteminin bu periyotta daha düşük büyütme etkisi öngördüğünü ve dolayısıyla daha ekonomik tasarımlara olanak sağlayabileceğini işaret etmektedir. Ancak, bu avantaj güvenlik unsuru göz önünde bulundurulduğunda dezavantaja dönüşmektedir. Çünkü daha güvenli tarafta kalan yöntem PGA ölçeklendirmesi olarak belirlenmiştir.

$T=1.0s$ periyodunda ise eğim değeri $m=1.0226$ olarak elde edilmiştir. Bu, uzun periyotlarda da her iki ölçeklendirme yönteminin benzer davranış gösterme eğiliminde olduğunu belirtmektedir. Özellikle yüksek yapılarda ve süneklik kapasitesi yüksek sistemlerde uzun periyot davranışları kritik olduğundan, her iki yöntemle benzer sonuçlara ulaşılması, analiz güvenilirliğini artırmaktadır.

Şekil 7.61’de verilen grafikler, DEEPSOIL programı ve OPENSEES yazılımı ile gerçekleştirilmiş NL analizlerde, PGA ölçeklendirmesi ile spektral ölçeklendirme yaklaşımları arasında oluşan ilişkiyi ortaya koymaktadır. Her grafikte yer alan doğrusal eğrinin eğimi (m), iki ölçekleme yönteminin birbirine olan duyarlılığını sayısal olarak ifade etmektedir.



Şekil 7.61. NL analizlerde farklı periyot değerlerinde iki farklı ölçeklendirme ile büyütme faktörünün karşılaştırılması

T=0.01s için yapılan analizlerde, DEEPSOIL yazılımında elde edilen eğim değeri $m=1.0629$ iken, OPENSEES analizinde bu değer $m=0.9302$ olarak belirlenmiştir. Bu durum, kısa periyotlu titreşimlerde, DEEPSOIL ile yapılan spektral ölçekleme analizlerinin PGA ölçeklemeye kıyasla daha yüksek yüzey ivmeleri ürettiğini göstermektedir. OPENSEES sonuçları ise bu periyot düzeyinde daha düşük ve değerler üretmektedir.

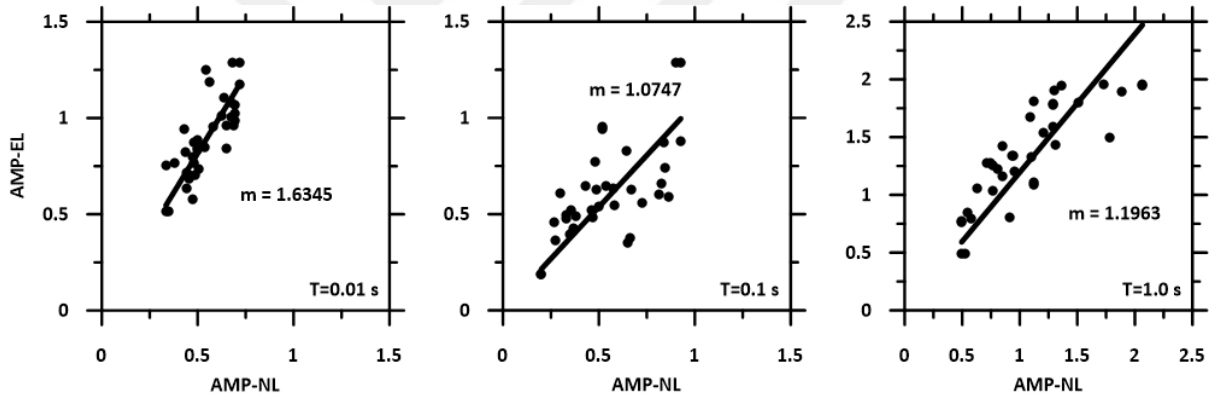
Orta periyot aralığı olan T=0.1s için, DEEPSOIL analizinde eğim $m=0.9593$ olarak hesaplanırken, OPENSEES analizinde bu değer $m=0.8055$ olarak daha düşüktür. Bu fark, özellikle spektral ölçeklemenin PGA'ya göre daha düşük ivme üretme eğiliminde olduğunu ve OPENSEES'in NL çözüm algoritmasının bu etkiyi daha da belirginleştirdiğini göstermektedir.

Uzun periyot için (T=1.0s) analiz edildiğinde, DEEPSOIL'de eğim $m=0.9003$ olarak tespit edilirken, OPENSEES analizlerinde bu değer $m=0.9537$ olarak belirlenmiştir. Her iki yazılımda da eğim değerleri bire oldukça yakın çıkmakta, bu da spektral ve PGA ölçekleme yöntemlerinin uzun periyotlu analizlerde benzer sonuçlar ürettiğine işaret etmektedir. Ancak, OPENSEES'in bu periyot düzeyinde daha tutarlı ve lineer bir ilişki sergilediği görülmektedir.

7.2.5. Ölçeklendirme Yöntemlerine Göre Zemin Büyütme Faktörlerinin Karşılaştırılması

Farklı ölçeklendirme yöntemlerinin zemin büyütme faktörleri üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla, EL ve NL analizlerden elde edilen büyütme faktörleri karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda, ivme-zaman serilerinin PGA ölçeklendirmesi ve spektral ölçeklendirme yöntemleri ile elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir. Üç farklı periyot değeri ($T=0.01s$, $0.1s$, $1.0s$) için oluşturulan grafikler (Şekil 7.62 ve Şekil 7.63) doğrultusunda, her iki yöntemin zemin büyütme faktörleri üzerindeki etkileri tartışılmıştır.

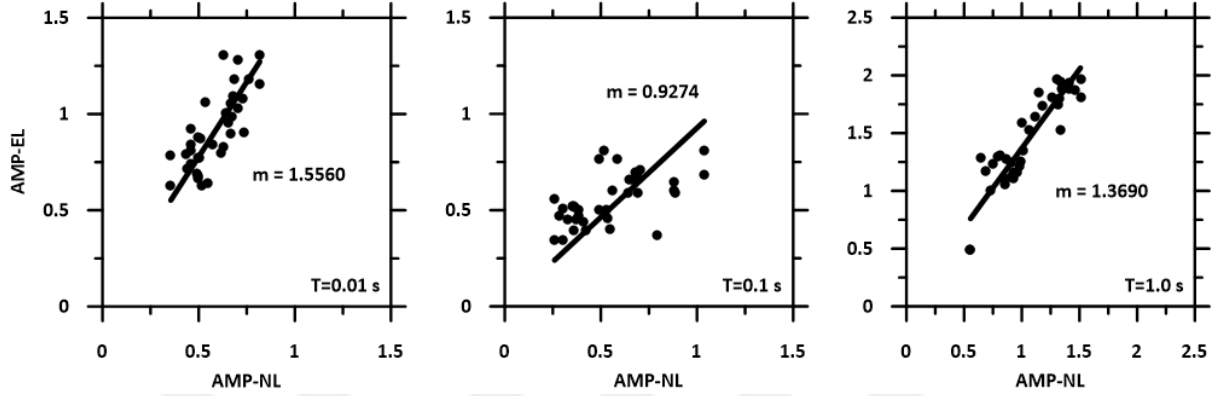
Zaman tanım alanında ölçeklendirilmiş deprem kayıtları kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerden elde edilen amplifikasyon değerlerinin karşılaştırmalı sonuçları, $T=0.01s$, $T=0.1s$ ve $T=1.0s$ periyotları için Şekil 7.62'de verilmiştir. Grafiklerde, EL analizlerinden elde edilen amplifikasyon değerlerinin NL analizlerine karşı olan değişimi ve bu ilişkiyi tanımlayan doğrusal eğim (m) yer almaktadır.



Şekil 7.62. Zaman tanım alanında yapılan NL ve EL analizlerin amplifikasyon faktörü değerlerinin karşılaştırılması

En kısa periyot olan $T=0.01s$ için amplifikasyon değeri $0.3-1.3$ aralığında, $m=1.6345$ olarak bulunmuş ve bu durum, EL analizlerinin NL analizlerine kıyasla daha yüksek amplifikasyon değerine sahip olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, düşük periyotlar için EL analizlerin daha güvenli tarafta olduğu görülmektedir. $T=0.1s$ periyodunda ise amplifikasyon değeri $0.2-1.3$ aralığında, m değeri 1.0747 olarak belirlenmiş ve genel olarak EL ve NL analizlerin benzer sonuçlar verdiği belirlenmiştir. $T=1.0s$ periyodunda ise amplifikasyon değeri $0.5-2.1$ aralığında, eğim $m=1.1963$ olarak belirlenmiştir. EL analizlerin uzun periyotlarda da NL analizlere kıyasla daha yüksek amplifikasyon değerleri verdiği görülmektedir. Bu nedenle EL analiz yöntemi ile elde edilen sonuçlar NL analiz yöntemi ile elde edilen sonuçlara göre daha güvenli tarafta kalmaktadır.

Frekans tanım alanında ölçeklendirilmiş deprem kayıtları kullanılarak gerçekleştirilen EL ve NL analizlerden elde edilen amplifikasyon değerlerinin karşılaştırması Şekil 7.63’de verilmiştir. $T=0.01s$, $T=0.1s$ ve $T=1.0s$ olmak üzere üç farklı periyotta yapılan karşılaştırmalarda, her bir periyot için EL ve NL analizlerinden hesaplanan amplifikasyon değerleri arasındaki ilişki, eğim (m) değeri ile değerlendirilmiştir.

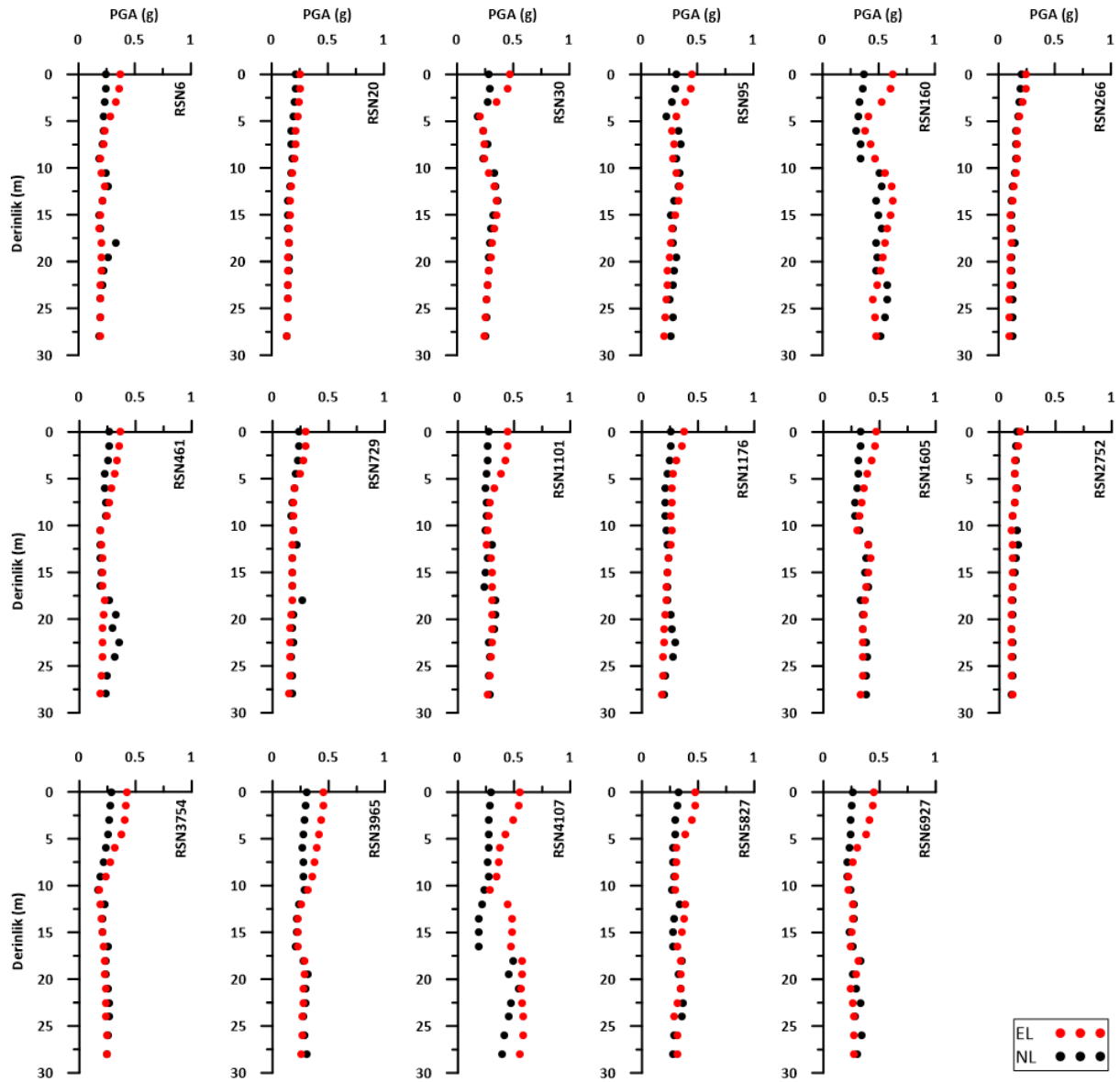


Şekil 7.63. Frekans tanım alanında yapılan NL ve EL analizlerin amplifikasyon faktörü değerlerinin karşılaştırılması

$T=0.01s$ periyodu için amplifikasyon değeri 0.4-1.3 aralığında, $m=1.5560$ değeri, EL analizlerinin NL analizlerine kıyasla daha yüksek amplifikasyon değerleri ürettiğini ve bu iki analiz yönteminin kısa periyotlar için yüksek bir korelasyon gösterdiğini ortaya koymaktadır. $T=0.1s$ periyodunda amplifikasyon değeri 0.3-1.0 aralığında, $m=0.9274$ değeri ile iki analiz yöntemi arasındaki davranış birbirine benzeme eğilimindedir. $T=1.0s$ periyodu için elde edilen amplifikasyon değeri 0.5-2.0 aralığında, $m=1.3690$ değeri ise uzun periyotlarda EL analizlerinin yine NL analizlerine göre daha yüksek amplifikasyonlar verdiğini göstermektedir. Kısa ve uzun periyotlarda EL analizlerin daha güvenli tarafta kaldığı görülmüştür.

7.2.6. Sahaya Özel Analizlerden Elde Edilen PGA ve Şekil Değiştirme Değerleri

Çalışma kapsamında her bir depremin orijinal verileri kullanılarak DEEPSOIL programı ile yapılan analizler neticesinde, derinliğe bağlı olarak ivme değişimi ve aynı zamanda derinliğe bağlı şekil değiştirme miktarındaki değişiklikler elde edilmiştir. SK1’de yapılan bu derinliğe bağlı değişimler Şekil 7.64 ve Şekil 7.65’te gösterilmiştir.



Şekil 7.64. SK1’de orijinal deprem kayıtları kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerde maksimum ivmenin derinliğe bağlı değişimi

İlk olarak, derinliğe bağlı ivme değişimleri incelendiğinde, anakaya tarafından sağlanan ivme değerleri, yüzeyde farklı deprem ivme kayıtlarına bağlı olarak sönümleme ve büyütme tabi tutulmuştur. Çalışma kapsamında SK1’de gerçekleştirilen 17 farklı deprem ivme kaydına ait EL ve NL analiz sonuçlarına göre, zemin profili boyunca değişen maksimum yer ivmesi (PGA) değerleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

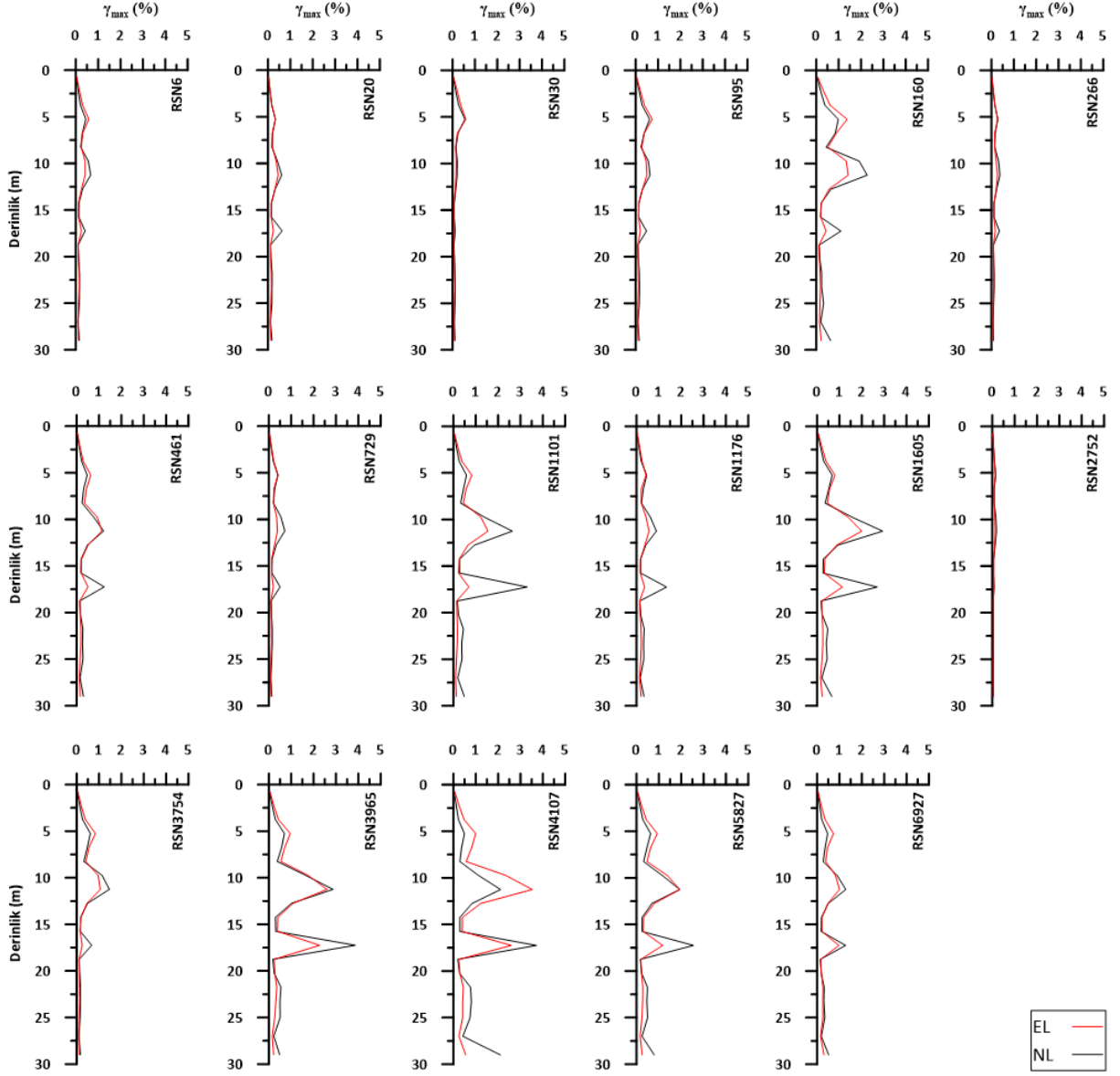
Analizler genel olarak değerlendirildiğinde, EL ve NL analiz sonuçlarının benzer çıktığı deprem kayıtları RSN20, RSN266, RSN729, RSN1176 ve RSN2752 olarak belirlenmiştir. Diğer taraftan yüzeye yakın tabakalarda (0-10m) bazı deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analiz sonuçları arasında belirgin farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle RSN6, RSN30, RSN95, RSN1101, RSN1605, RSN3754, RSN3965 ve RSN 6927 gibi deprem kayıtlarında,

yüzeydeki PGA değerleri EL analizde NL analizden daha yüksek olarak hesaplanmıştır. Tüm derinlik boyunca birbirleri ile farklı davranış gösteren deprem kayıtları ise RSN160, RSN461, RSN4107 ve RSN5827 olarak sıralanabilir.

Her iki analiz yönteminde de yüzeye doğru PGA değerlerinde genel bir artış eğilimi olduğu tespit edilmiştir. Zemin profili içerisinde, derin katmanlardan yüzeye doğru ilerleyen sismik dalgalar, farklı zemin özellikleri nedeniyle çeşitli değişimlere uğrar. Özellikle daha sert (yüksek rijitlikli) zeminlerden daha yumuşak (düşük rijitlikli) zemin tabakalarına geçerken, dalga hızı azalır. Bu azalma sonucu, enerjinin korunumu prensibi gereği dalga genliği artar. Dolayısıyla, bu süreç yüzeyde daha yüksek ivme değerlerinin oluşmasına yol açar.

Şekil 7.65'teki grafikler DEEPSOIL programı kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerinden elde edilen sonuçlara göre her bir deprem kaydı için maksimum şekil değiştirme değerlerinin derinlik boyunca değişimini göstermektedir.

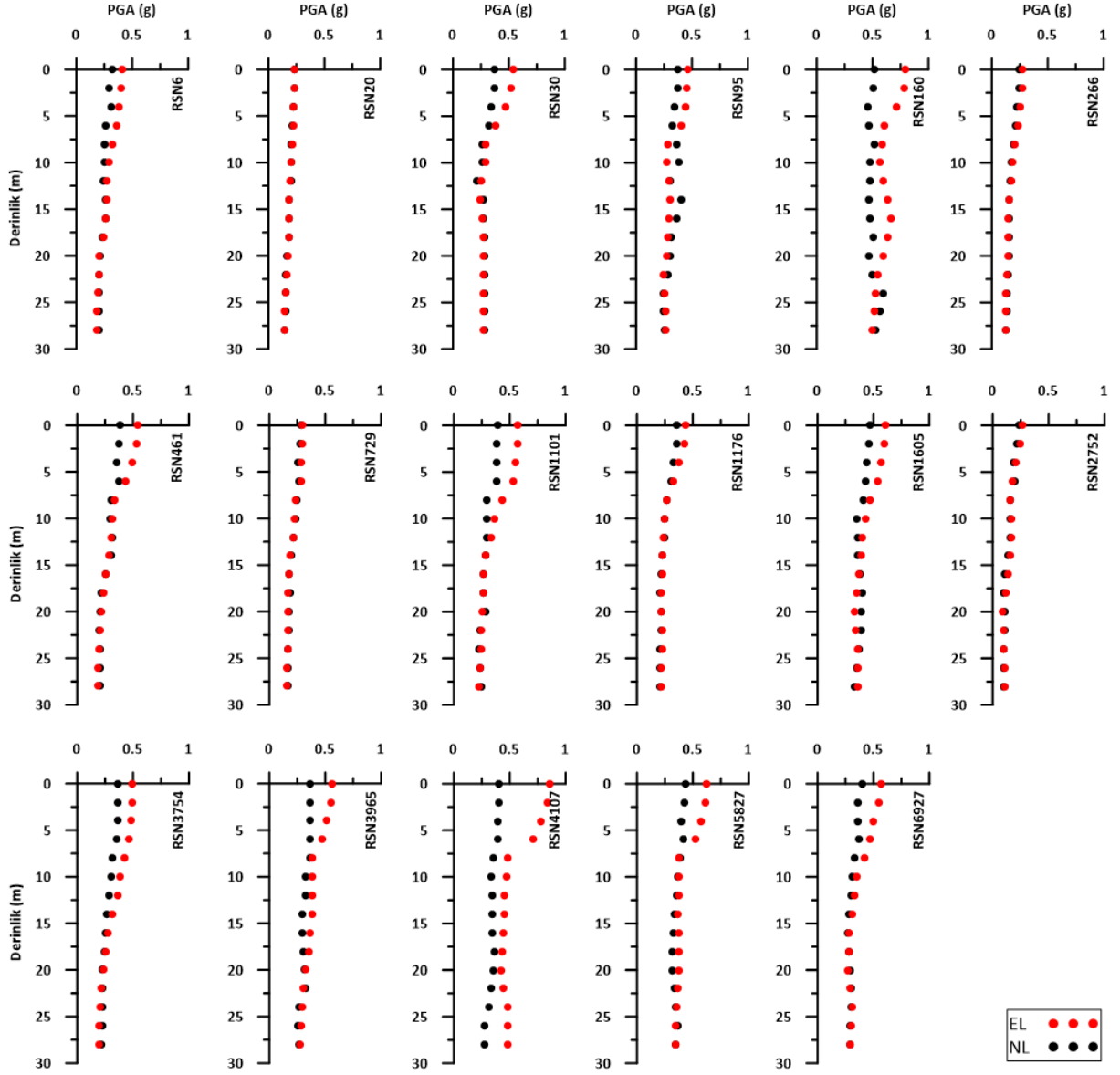
Genel olarak, her iki analiz yöntemi içinde maksimum şekil değiştirmeler 5m ile 20m arasında gözlemlenmiştir. RSN160, RSN461, RSN1101, RSN1605, RSN3754, RSN3965, RSN4107, RSN5827 ve RSN6927 deprem kayıtları ile yapılan analiz sonuçlarında maksimum şekil değiştirmeler %1'in üzerine çıkmıştır.



Şekil 7.65. SK1’de orijinal deprem kayıtları kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerde şekil değiştirmenin derinliğe bağlı değişimi

Orijinal deprem verileri kullanılarak SK2 için DEEPSOIL programı ile yapılan analizler neticesinde, derinliğe bağlı olarak ivme değişimi ve şekil değiştirme miktarındaki değişiklikler elde edilmiştir (Şekil 7.66 ve Şekil 7.67).

Çalışma kapsamında SK2 için gerçekleştirilen EL ve NL analiz sonuçlarına göre, zemin profili boyunca değişen maksimum yer ivmesi (PGA) değerleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.



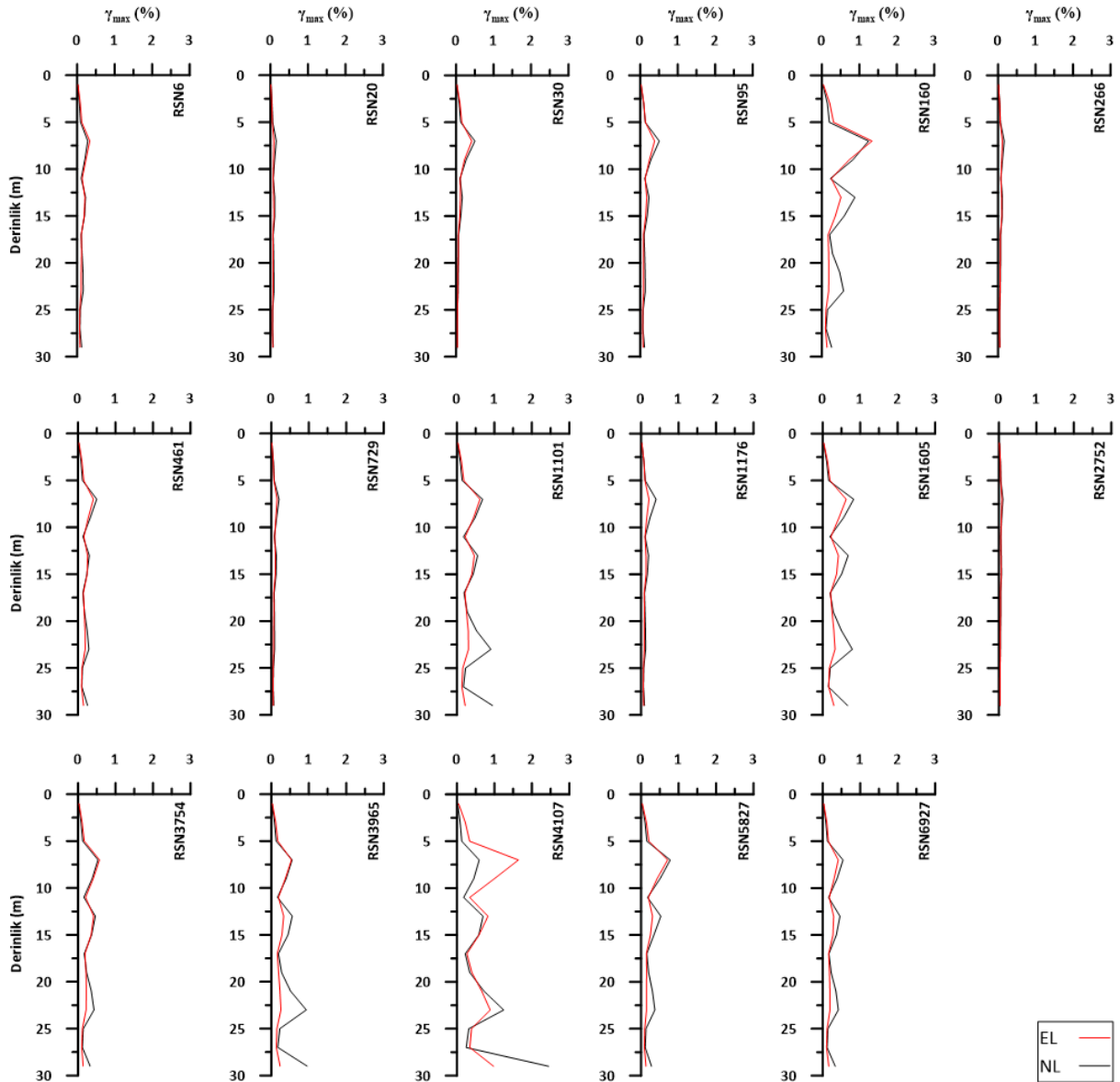
Şekil 7.66. SK2’de orijinal deprem kayıtları kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerde maksimum ivmenin derinliğe bağlı değişimi

Analizler genel olarak değerlendirildiğinde, EL ve NL analiz sonuçlarının benzer çıktığı deprem kayıtları RSN20, RSN95, RSN266, RSN729, RSN1176 ve RSN2752 olarak belirlenmiştir. Diğer taraftan yüzeye yakın tabakalarda (0-10m) bazı deprem kayıtları ile yapılan EL ve NL analiz sonuçları arasında belirgin farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle RSN6, RSN30, RSN461, RSN1101, RSN1605, RSN3754, RSN3965, RSN5827 ve RSN 6927 gibi deprem kayıtlarında, yüzeydeki PGA değerleri EL analizde NL analizden daha yüksek olarak hesaplanmıştır. Tüm derinlik boyunca birbirleri ile farklı davranış gösteren deprem kayıtları ise RSN160 ve RSN4107 olarak sıralanabilir.

Her iki analiz yönteminde de yüzeye doğru PGA değerlerinde genel bir artış eğilimi olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 7.67’de ise EL ve NL analizlerinden elde edilen sonuçlara göre her bir deprem kaydı için maksimum şekil değiştirme değerlerinin derinlik boyunca değişimi gösterilmektedir.

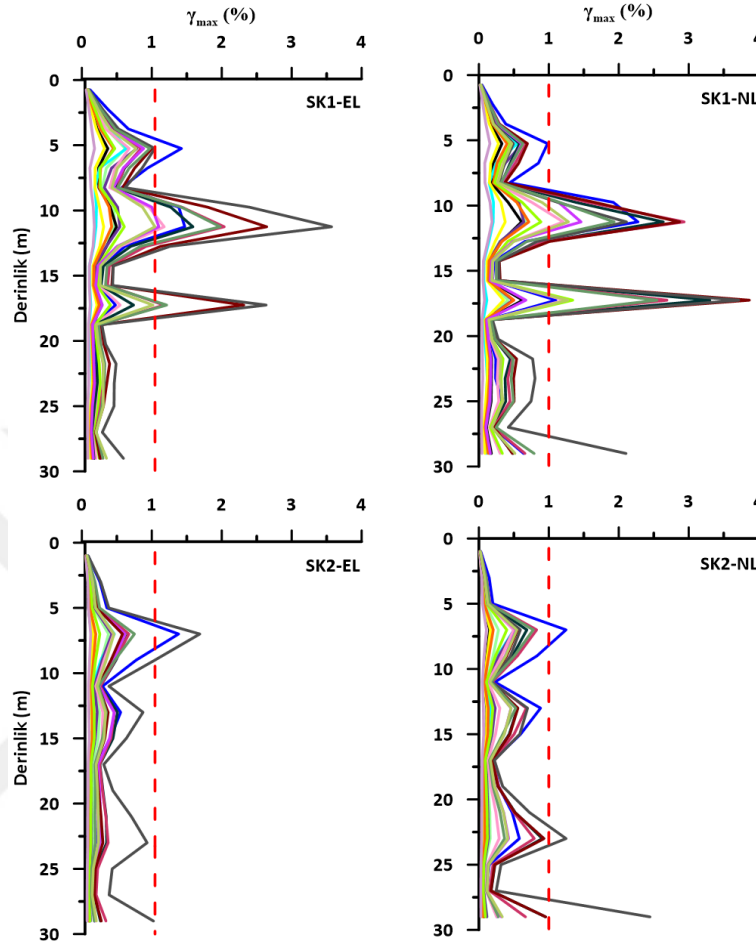
Genel olarak, her iki analiz yöntemi içinde maksimum şekil değiştirmeler 5m ile 25m arasında gözlemlenmiştir. RSN160 ve RSN4107 deprem kayıtları ile yapılan analiz sonuçlarında maksimum şekil değiştirmeler %1’in üzerine çıkmıştır. Maksimum şekil değiştirme değerleri SK2’de 2 kayıttta %1 değeri üzerine çıkarken bu sayı SK1 için 9 olarak gerçekleşmiştir. Bunun nedeninin SK2’nın SK1’den daha rijit olmasına bağlanabilir.



Şekil 7.67. SK2’de orijinal deprem kayıtları kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerde şekil değiştirmenin derinliğe bağlı değişimi

Şekil 7.68’de, SK1 ve SK2 zemin profilleri için gerçekleştirilen EL ve NL analizlerden elde edilen maksimum birim şekil değiştirme (γ_{max}) değerlerinin derinlik boyunca dağılımı

sunulmaktadır. Her bir renk, analizde kullanılan 17 farklı yer hareketi kaydına karşılık gelmektedir. Elde edilen sonuçlar, zemin davranışının hem derinlik hem de analiz türüne bağlı olarak önemli ölçüde farklılık gösterdiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 7.68. SK1 ve SK2’de orijinal deprem kayıtları kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerde şekil değiştirmenin derinliğe bağlı değişimi

SK1 profili için elde edilen EL analiz sonuçlarında, şekil değiştirmenin yüzeye yakın ilk 20 metrelik bölgede yoğunlaştığı ve γ_{max} değerlerinin 8 deprem kaydı için %1’in üzerine çıktığı görülmektedir. NL analizler ise şekil değiştirme dağılımında çok daha yaygın ve yüksek genlikli bir profil ortaya koymaktadır. SK1 profili için 5-20m derinlik aralığında γ_{max} değerleri bazı yer hareketleri için %3’ü aşmış, 12.5m civarında deformasyonun belirgin şekilde yoğunlaştığı gözlenmiştir. Özellikle 17.5m civarında maksimum şekil değiştirmeler görülmüştür. %1 maksimum şekil değiştirme değerini aşan kayıt sayısı 9 olarak gerçekleşmiştir.

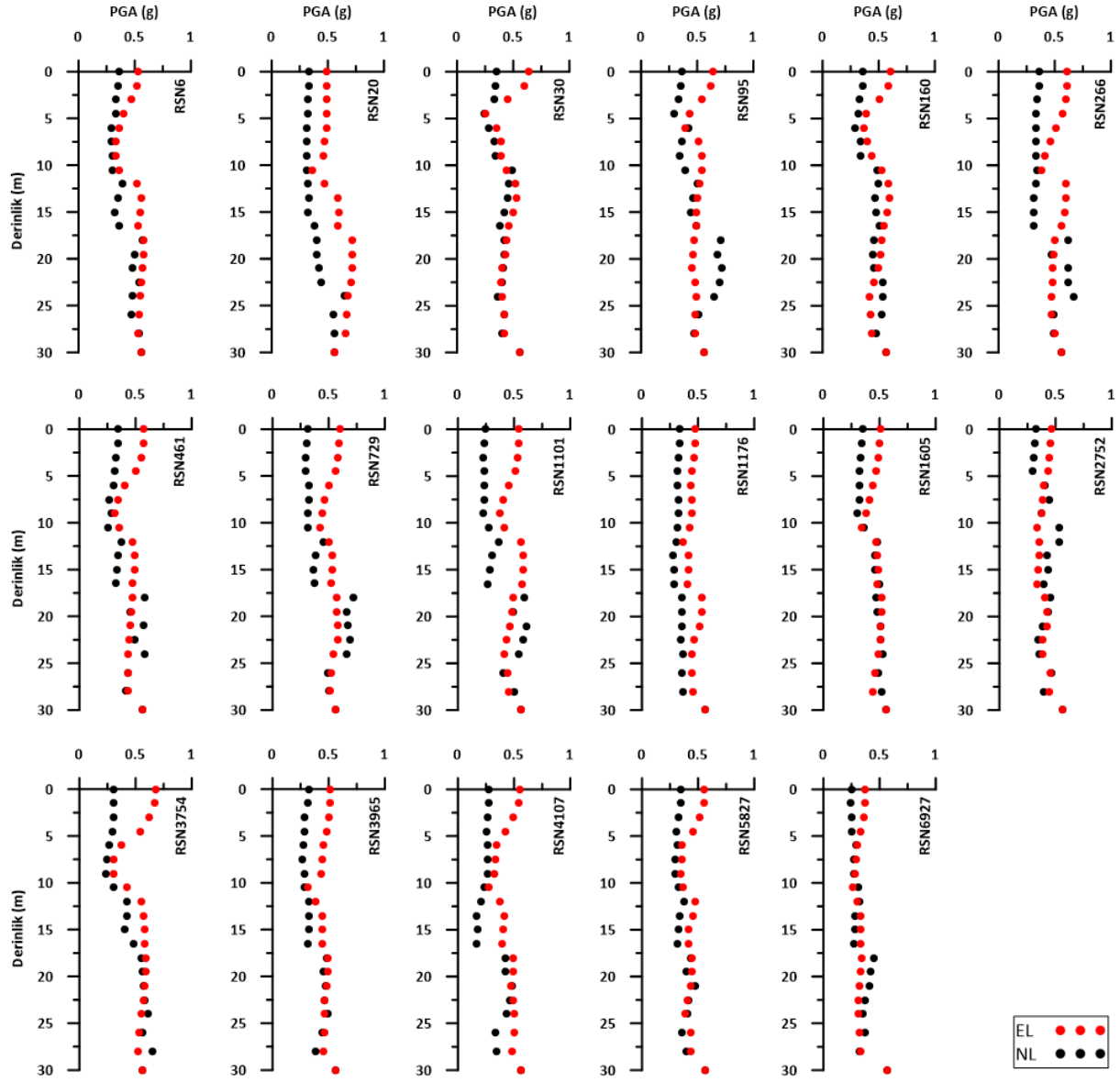
SK2 profiline ait sonuçlar, genel olarak daha düşük deformasyon seviyeleriyle karakterize edilmiştir. EL analizlerinde şekil değiştirme yüzeye yakın tabakalarda yoğunlaşırken, NL analizlerde γ_{max} değerlerinin nispeten daha derinlere yayılabildiği, ancak

genellikle %1 düzeyini aşmadığı görülmüştür. Bu durum, SK2 profilinin daha rijit bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, EL analizler zemin deformasyonunu yüzeye yakın yoğunlaştırırken, NL analizler deformasyonun derinlik boyunca daha yaygın olduğunu ortaya koymaktadır. Zemin büyütmesi etkilerinin daha doğru tahmin edilebilmesi adına, özellikle yumuşak ve kalın zemin profillerinde NL analizlerin tercih edilmesi gerektiği ortaya konmuştur.

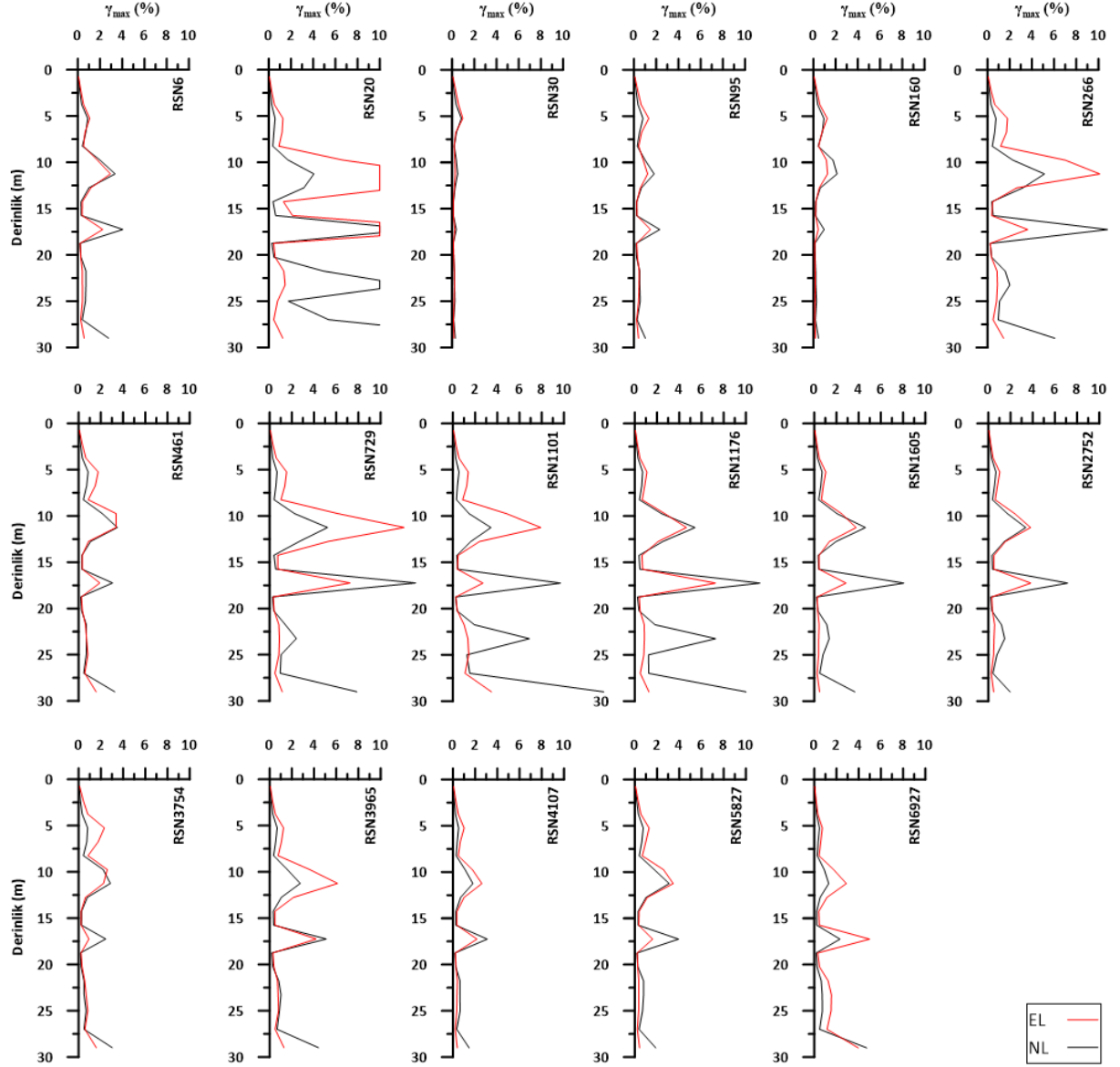
Zaman tanım alanında yapılan ölçeklendirme sonucu oluşan kayıtlar kullanılarak DEEPSOIL programı ile yapılan analizler neticesinde, derinliğe bağlı olarak ivme değişimi ve aynı zamanda derinliğe bağlı şekil değiştirme miktarındaki değişiklikler elde edilmiştir. SK1 sondaj noktasında yapılan bu derinliğe bağlı değişimler Şekil 7.69 ve Şekil 7.70'de gösterilmiştir.

Zaman tanım alanında yapılan ölçeklendirme işlemi sonrasında elde edilen deprem kayıtları kullanılarak gerçekleştirilen EL ve NL analizlere ait PGA'nın derinlik boyunca değişimi Şekil 7.69'da verilmiştir. Öncelikle derinliğe bağlı olarak ivme değişimleri incelendiğinde 0.56g olan anakayadan gelen ivme değerinin yüzeyde farklı deprem ivme kayıtlarında sönümlenme ve büyütmeyle maruz kalmıştır. EL analiz sonuçlarına göre, yüzeye doğru ilerledikçe PGA değerlerinde belirgin bir artış gözlenmiştir. Buna karşılık, NL analizlerde, bazı kayıtlarda yüzeye doğru PGA değerlerinde artışın sınırlı kaldığı, hatta belirli derinliklerde PGA'nın azaldığı tespit edilmiştir. Bu azalma, zeminin NL davranış sergilemesi sonucunda, enerjinin histeritik sönüm mekanizmaları ve zeminin yumuşamasına bağlı olarak sismik dalga büyütmesinin kısıtlanması ile açıklanabilir. Elde edilen bu sonuçlar, NL zemin davranışının, deprem dalgalarının yüzeyde oluşturduğu ivme büyüklüğünü önemli ölçüde etkileyebileceğini ve EL analizlere kıyasla daha gerçekçi sonuçlar üretebileceğini göstermektedir.



Şekil 7.69. SK1’de PGA ölçeklendirme ile elde edilen deprem kayıtları kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerde maksimum ivmenin derinliğe bağlı değişimi

Zaman tanım alanında ölçeklendirme uygulanarak elde edilen deprem kayıtları kullanılarak gerçekleştirilen EL ve NL analizlere ait şekil değiştirme-derinlik dağılımları Şekil 7.70’de verilmiştir. EL ve NL analizlerde şekil değiştirme değerlerinin bazı deprem kayıtları için (RSN30, RSN95, RSN160) düşük değerlerde kalırken çoğu deprem kaydı için yüksek değerler çıkmıştır. RSN20, RSN266, RSN729, RSN1101 ve RSN1176 deprem kayıtları için maksimum şekil değiştirmeler %10’un üzerine çıkmıştır.

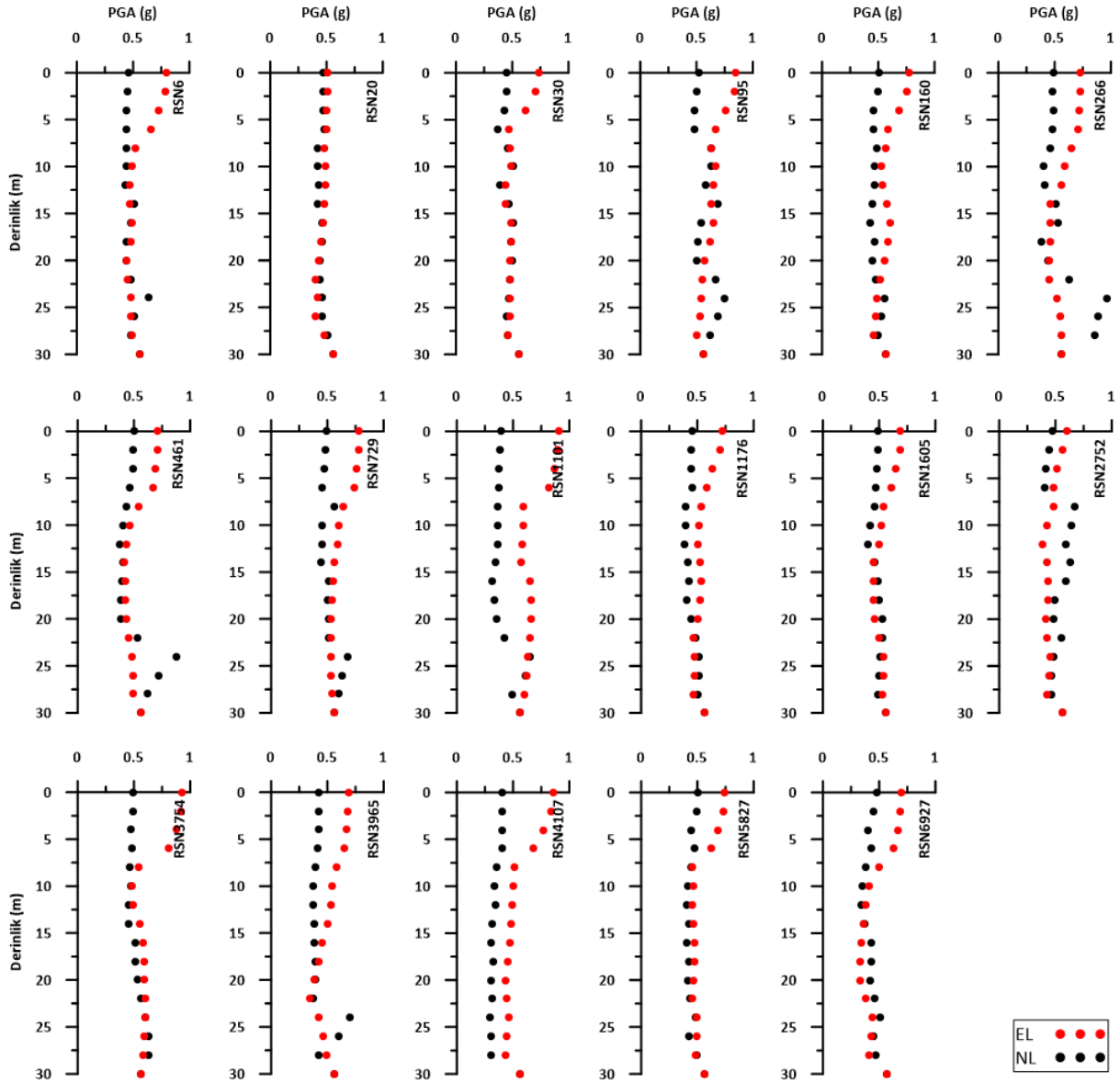


Şekil 7.70. SK1’de PGA ölçeklendirme ile elde edilen deprem kayıtları kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerde şekil değiştirmenin derinliğe bağlı değişimi

Zaman tanım alanında yapılan ölçeklendirme ile elde edilen deprem verileri kullanılarak SK2 için DEEPSOIL programı ile yapılan analizler neticesinde, derinliğe bağlı olarak ivme değişimi ve şekil değiştirme miktarındaki değişiklikler elde edilmiştir (Şekil 7.71 ve Şekil 7.72).

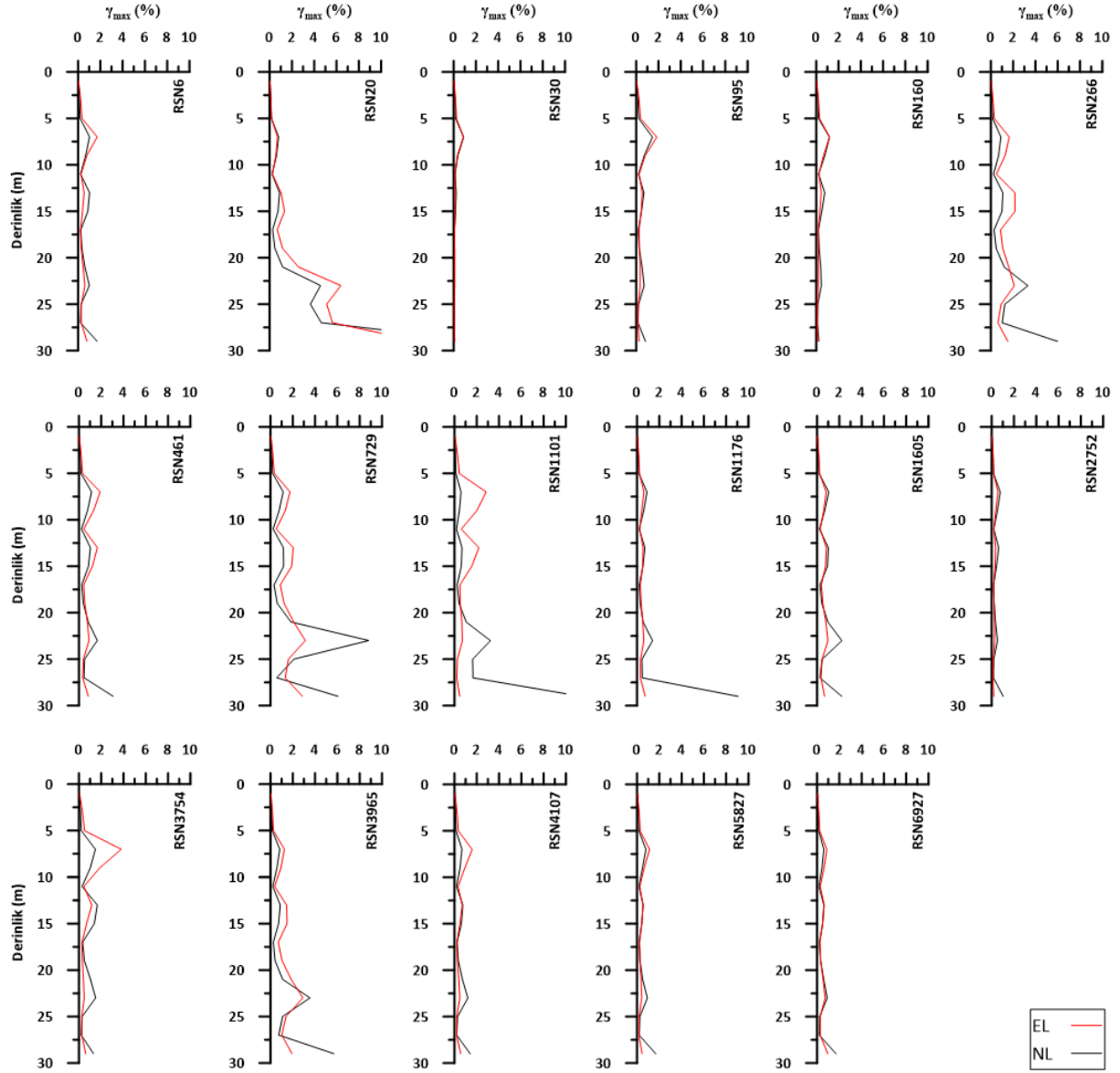
Zaman tanım alanında yapılan ölçeklendirme işlemi sonrasında elde edilen deprem kayıtları kullanılarak gerçekleştirilen EL ve NL analizlere ait PGA’nın derinlik boyunca değişimi Şekil 7.71’de verilmiştir. EL analiz sonuçlarına göre, yüzeye doğru ilerledikçe PGA değerlerinde belirgin bir artış gözlenmiştir. Buna karşılık, NL analizlerde, bazı kayıtlarda yüzeye doğru PGA değerlerinde artışın sınırlı kaldığı, hatta belirli derinliklerde PGA’nın

azaldığı tespit edilmiştir. Bu açıdan SK2 sondajı SK1 sondajı ile aynı eğilimde bir davranış gösterse de SK2 sondajı verileri daha düzgün bir dağılım göstermiştir.



Şekil 7.71. SK2’de PGA ölçeklendirme ile elde edilen deprem kayıtları kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerde maksimum ivmenin derinliğe bağlı değişimi

Zaman tanım alanında ölçeklendirme uygulanarak elde edilen deprem kayıtları kullanılarak gerçekleştirilen EL ve NL analizlere ait şekil değiştirme-derinlik dağılımları Şekil 7.72’de verilmiştir. EL ve NL analizlerde şekil değiştirme değerlerinin çoğu deprem kayıtları için (RSN6, RSN30, RSN95, RSN160, RSN461, RSN2752, RSN4107, RSN5827 ve RSN6927) düşük değerlerde kalırken bazı deprem kayıtları için %5-%10 aralığında kalmıştır (RSN266, RSN729, RSN1176 ve RSN3965). RSN20 ve RSN1101 deprem kayıtları için maksimum şekil değiştirmeler %10’un üzerine çıkmıştır.



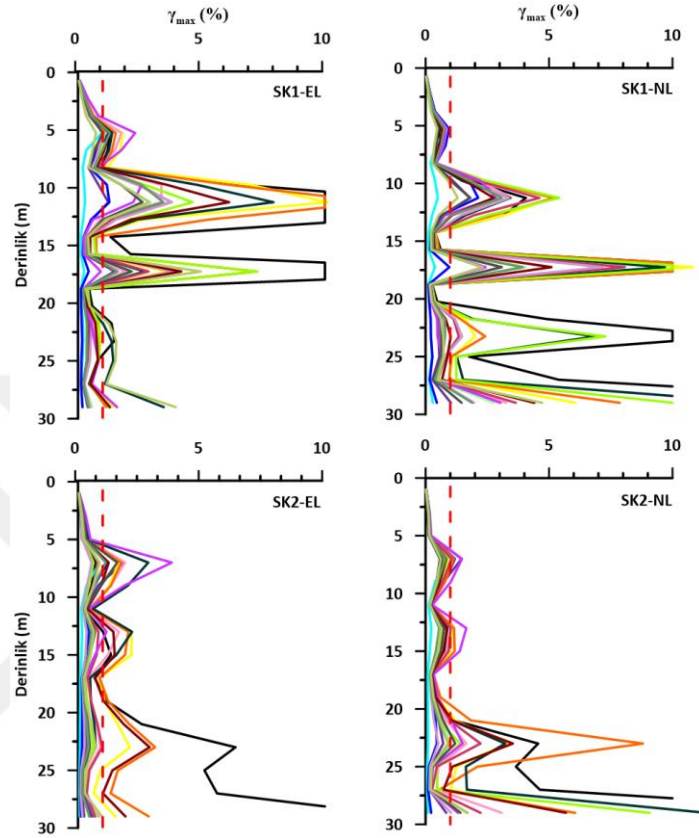
Şekil 7.72. SK2’de PGA ölçeklendirme ile elde edilen deprem kayıtları kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerde şekil değiştirmenin derinliğe bağlı değişimi

Şekil 7.73’te, SK1 ve SK2 zemin profilleri için gerçekleştirilen EL ve NL analizlerden elde edilen maksimum birim şekil değiştirme (γ_{max}) değerlerinin derinlik boyunca dağılımı sunulmaktadır.

SK1 profili için elde edilen EL analiz sonuçlarında, şekil değiştirmenin yüzeye yakın ilk 10-20 metrelik bölgede yoğunlaştığı ve γ_{max} değerlerinin 16 deprem kaydı için %1’in üzerine çıktığı görülmektedir.

NL analizler ise şekil değiştirme dağılımında çok daha yaygın ve yüksek genlik değerlerinde bir profil ortaya koymaktadır. SK1 profili için 5-30m derinlik aralığında γ_{max} değerlerinin belirgin şekilde yoğunlaştığı gözlenmiştir.

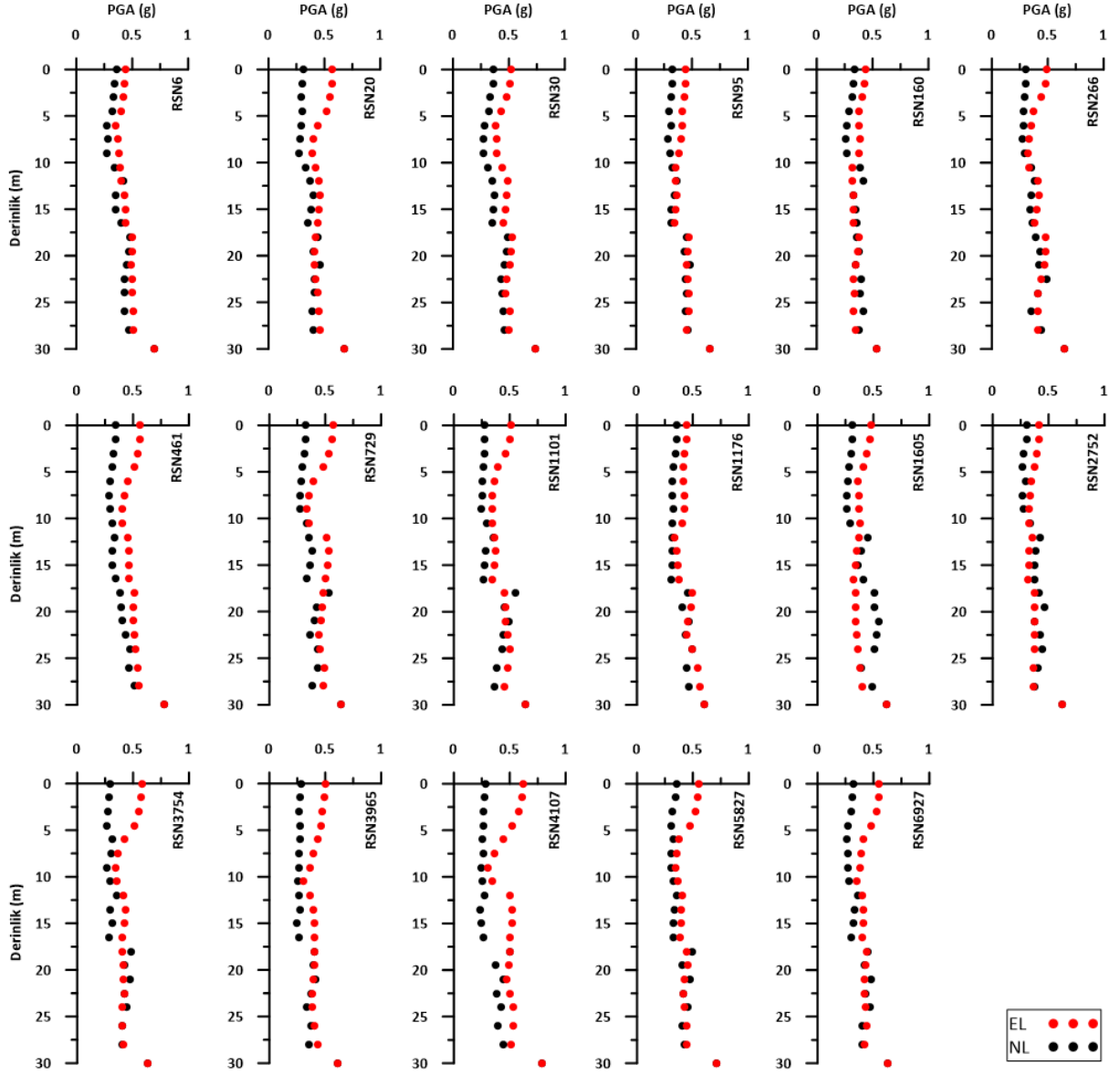
SK2 profiline ait sonuçlar, genel olarak SK1 profiline göre daha düşük deformasyon seviyeleriyle karakterize edilmiştir. Hem EL hem de NL analizlerinde şekil değiştirme tüm derinlik boyunca bir dalgalanma sergilerken maksimum değerler 20-30m derinliğinde görülmüştür.



Şekil 7.73. SK1 ve SK2 sondajlarında PGA ölçeklendirme ile elde edilen deprem kayıtları kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerde şekil değiştirmenin derinliğe bağlı değişimi

Frekans tanım alanında yapılan ölçeklendirme sonucu oluşan kayıtlar kullanılarak DEEPSOIL programı ile yapılan analizler neticesinde, derinliğe bağlı olarak ivme değişimi ve aynı zamanda derinliğe bağlı şekil değiştirme miktarındaki değişiklikler elde edilmiştir.

Frekans tanım alanında yapılan ölçeklendirme işlemi sonrasında elde edilen deprem kayıtları kullanılarak SK1 profili için gerçekleştirilen EL ve NL analizlere ait PGA'nın derinlik boyunca değişimi Şekil 7.74'de verilmiştir. Öncelikle derinliğe bağlı olarak ivme değişimleri incelendiğinde EL ve NL analiz sonuçları RSN6, RSN30, RSN95, RSN160, RSN260, RSN461 ve RSN1176 depremlerinde büyük benzerliklerin olduğu görülmüştür. Genel olarak PGA değerlerinde tabandan yüzeye doğru gidildikçe küçültme görülmüştür ve EL analiz sonuçları NL analiz sonuçlarından daha yüksek çıkmıştır.

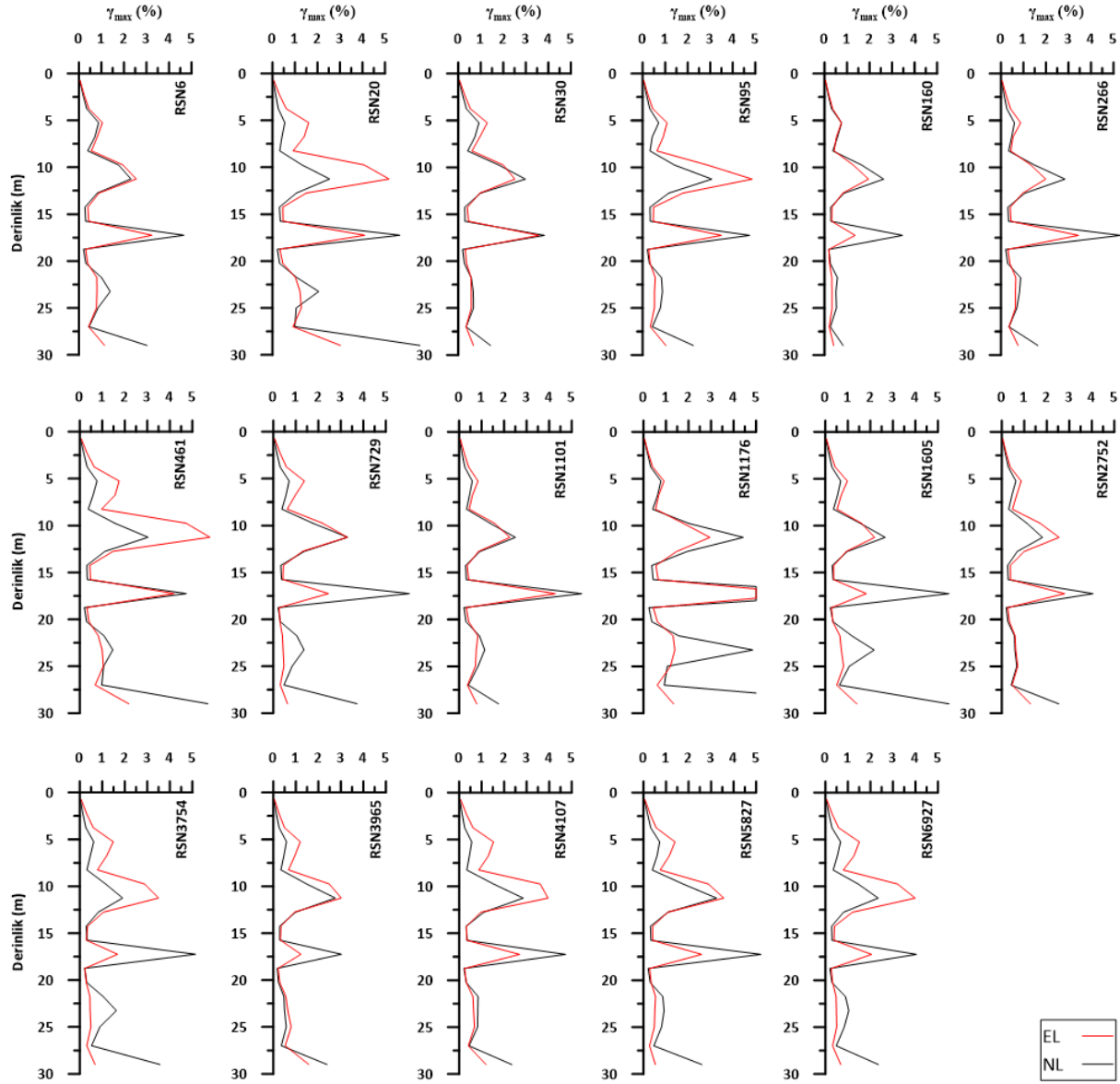


Şekil 7.74. SK1’de spektral ölçeklendirme ile elde edilen deprem kayıtları kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerde maksimum ivmenin derinliğe bağlı değişimi

Frekans tanım alanında ölçeklendirme uygulanarak elde edilen deprem kayıtları kullanılarak gerçekleştirilen EL ve NL analizlere ait şekil değiştirme-derinlik dağılımları Şekil 7.75’te verilmiştir. EL ve NL analizlerde maksimum şekil değiştirme değerlerinin çoğu deprem kayıtları için %5 değerini aşmazken RSN20, RSN266, RSN461, RSN729, RSN1101, RSN1176 ve RSN1605 deprem kaydı içi %5 şekil değiştirme değerini aşmıştır. Maksimum şekil değiştirmeler genel olarak 10-20m aralığında gerçekleşmiştir.

Analiz sonuçları, özellikle zemin profilinin daha derin seviyelerinde (yaklaşık 15-30m arası), EL ve NL analiz yöntemleri arasında belirgin farklılıklar oluştuğunu göstermektedir. NL analizler, bu derinliklerde EL analizlere kıyasla genellikle daha yüksek şekil değiştirme değerleri üretmiştir. Buna karşılık, yüzeye yakın sığ tabakalarda (0-10m aralığında) EL ve NL

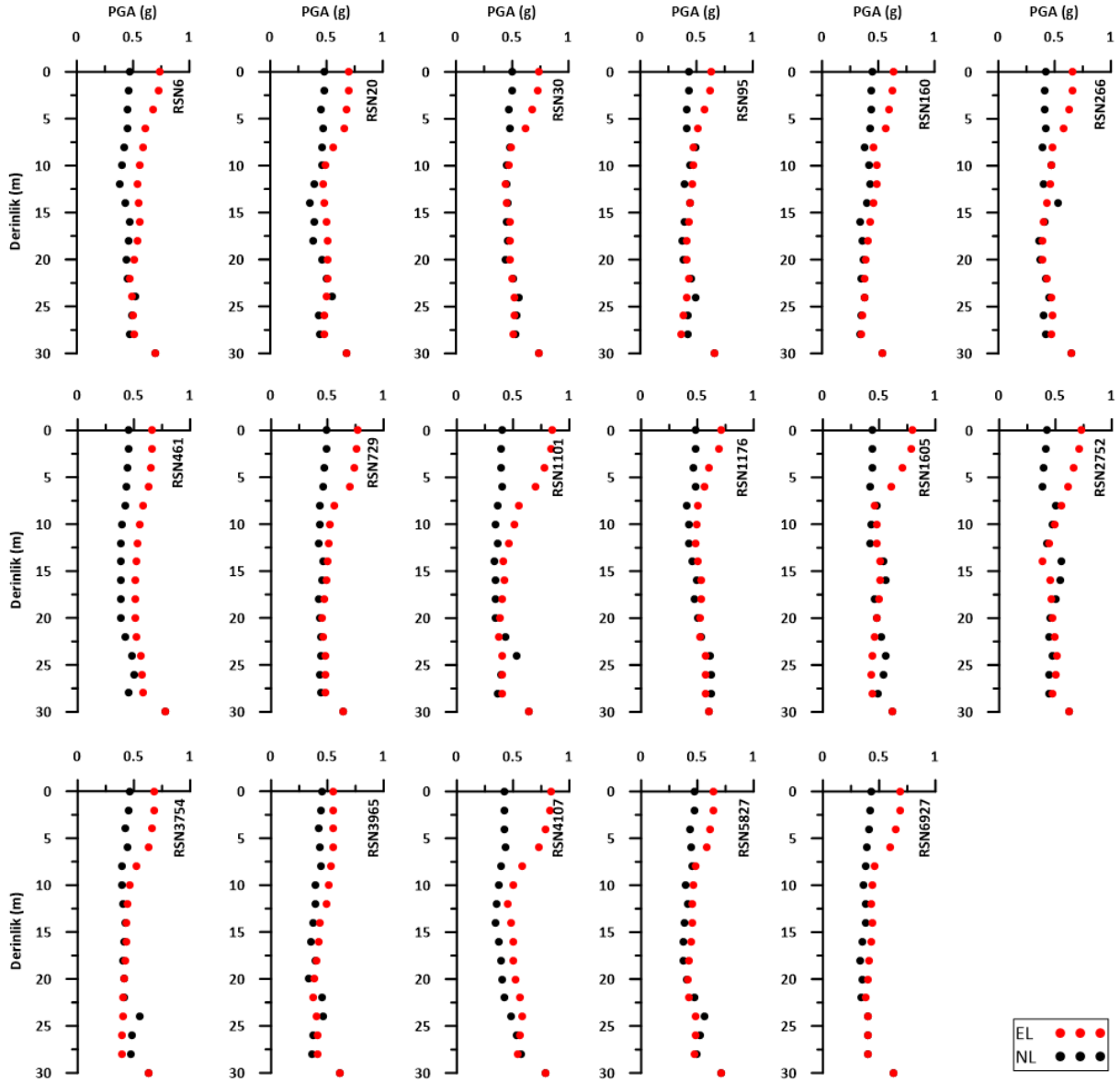
analiz sonuçları birbiriyle daha uyumlu çıkmış, şekil değiştirme değerleri büyük oranda örtüşmüştür.



Şekil 7.75. SK1’de spektral ölçeklendirme ile elde edilen deprem kayıtları kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerde şekil değiştirmenin derinliğe bağlı değişimi

Frekans tanım alanında yapılan ölçeklendirme işlemi sonrasında elde edilen deprem kayıtları kullanılarak SK2 profili için gerçekleştirilen EL ve NL analizlere ait PGA’nın derinlik boyunca değişimi Şekil 7.76’da verilmiştir. Öncelikle derinliğe bağlı olarak ivme değişimleri incelendiğinde EL ve NL analiz sonuçları RSN6, RSN461 ve RSN1176 depremlerinde büyük benzerliklerin olduğu görülmüştür. Bazı depremlerde (RSN20, RSN30, RSN95, RSN160, RSN266, RSN729, RSN1605, RSN2752, RSN3754 ve RSN6927) ise yüzeyden ilk 10m’de bir farklılık gözlenmiş derinlere inildikçe iki analiz türünde aynı eğilimde davranış sergilemişlerdir. Genel olarak PGA değerlerinde tabandan yüzeye doğru gidildikçe küçültme

görülmüştür ve EL analiz sonuçları NL analiz sonuçlarından daha yüksek çıkmıştır. Yüzeyde NL analizlerin tamamında büyütme gerçekleşirken EL analizlerde bazı depremlerde büyütme bazı depremlerde ise küçültme gerçekleşmiştir.

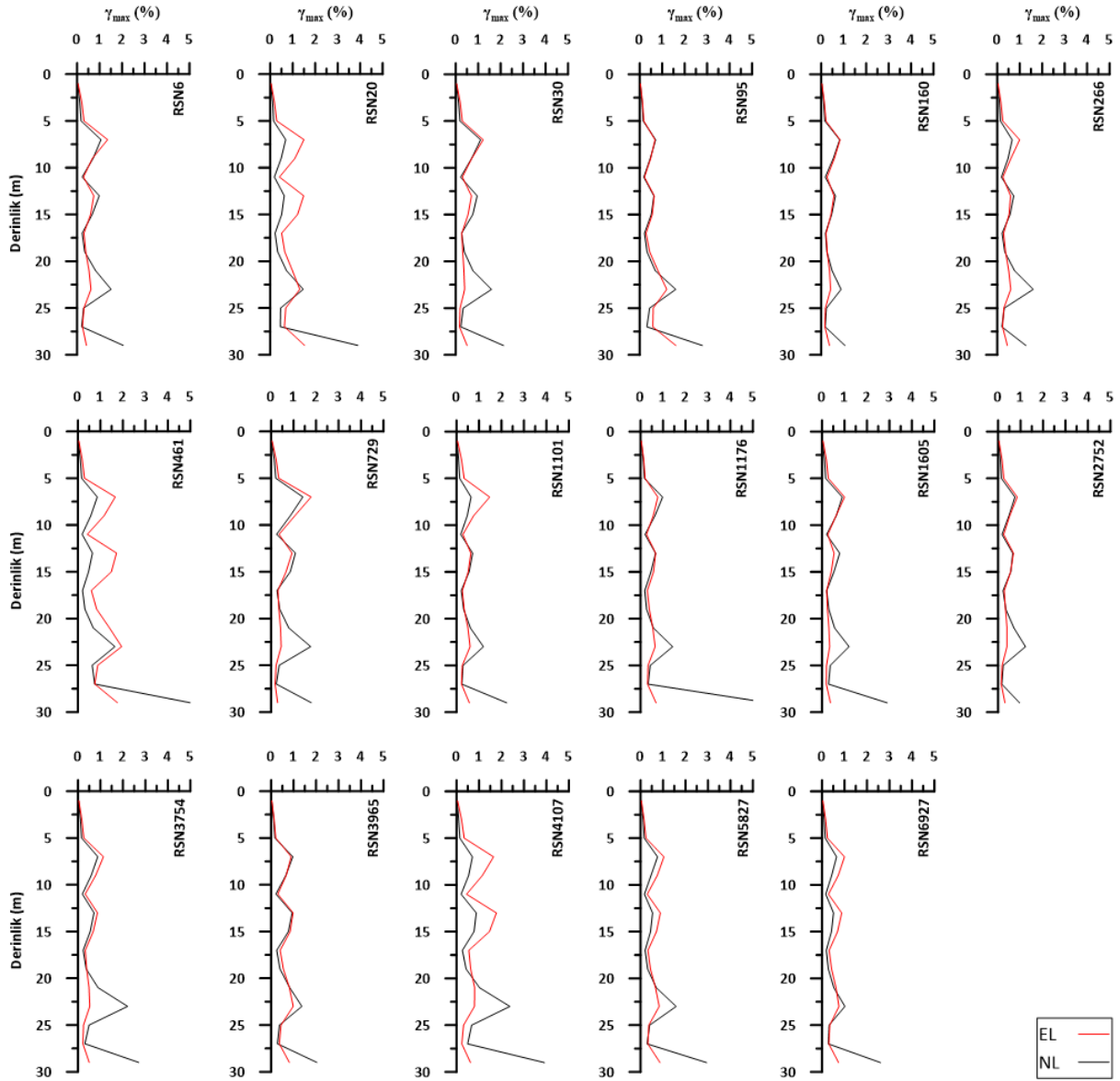


Şekil 7.76. SK2’de spektral ölçeklendirme ile elde edilen deprem kayıtları kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerde maksimum ivmenin derinliğe bağlı değişimi

Şekil 7.77’de, SK1 profiline göre daha rijit zemin özelliklerine sahip olan SK2 profiline ilişkin EL ve NL analizlerle elde edilen şekil değiştirme değerlerinin derinlik boyunca değişimi sunulmaktadır. Grafik incelendiğinde, genel olarak şekil değiştirme düzeylerinin SK1 profiline kıyasla önemli ölçüde daha düşük olduğu ve EL ile NL analiz sonuçlarının birbirine oldukça yakınsadığı gözlemlenmektedir.

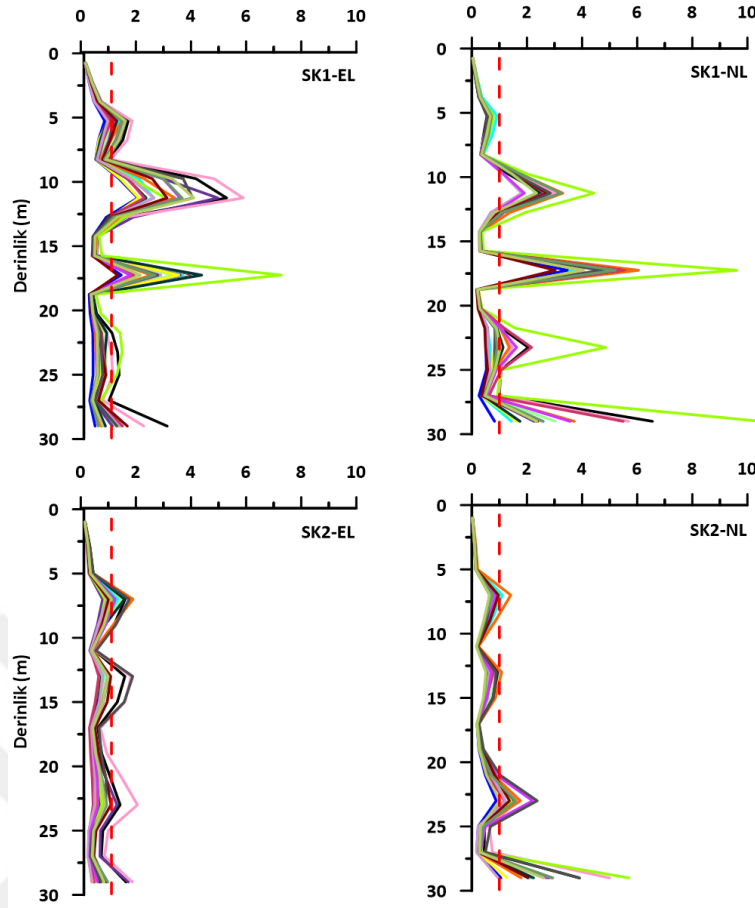
SK2 profilinin daha rijit yapısı, gelen sismik dalgaların zemin içinde daha az şekil değiştirmeye neden olmasına yol açmakta, bu da hem EL hem NL analizlerde benzer deformasyon profillerinin elde edilmesine katkı sağlamaktadır.

Ancak grafikler detaylı incelendiğinde, yaklaşık 0-20m derinlik aralığında, NL analizlerin EL analizlere büyük oranda örtüştüğü 20-30m aralığında NL analizlerin EL analizlere kıyasla kısmen daha büyük şekil değiştirme değerleri verdiği görülmektedir.



Şekil 7.77. SK2’de spektral ölçeklendirme ile elde edilen deprem kayıtları kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerde şekil değiştirmenin derinliğe bağlı değişimi

Şekil 7.78’de, SK1 ve SK2 zemin profilleri için gerçekleştirilen EL ve NL analizlerden elde edilen maksimum birim şekil değiştirme (γ_{max}) değerlerinin derinlik boyunca dağılımı sunulmaktadır.



Şekil 7.78. SK1 ve SK2 sondajlarında spektral ölçeklendirme ile elde edilen deprem kayıtları kullanılarak yapılan EL ve NL analizlerde şekil değiştirmenin derinliğe bağlı değişimi

SK1 profili için elde edilen EL analiz sonuçlarında, şekil değiştirmenin yüzeye yakın ilk 10-20 metrelik bölgede yoğunlaştığı ve $\gamma_{\max}$ değerlerinin 16 deprem kaydı için %1'in üzerine çıktığı görülmektedir.

NL analizler ise şekil değiştirme dağılımında çok daha yaygın ve yüksek genlik değerlerinde bir profil ortaya koymaktadır. SK1 profili için 5-30m derinlik aralığında $\gamma_{\max}$ değerlerinin belirgin şekilde yoğunlaştığı gözlenmiştir. Yine NL analiz içinde maksimum şekil değiştirmenin 16 deprem kaydında %1'in üzerine çıktığı görülmektedir.

SK2 profiline ait sonuçlar, genel olarak SK1 profiline göre daha düşük deformasyon seviyeleriyle karakterize edilmiştir. Hem EL hem de NL analizlerinde şekil değiştirme tüm derinlik boyunca bir dalgalanma sergilerken maksimum değerler 20-30m derinliğinde görülmüştür.

7.2.7. Spektral Parametrelerin TBDY 2018'e Göre Performansının Değerlendirilmesi

Zemin büyütmesi, sismik dalgaların yer yüzeyine ulaşırken zemin tarafından arttırılması olayıdır. Bu etki, özellikle deprem sırasında yapıların davranışını doğrudan etkilemektedir. Depremler sırasında zemin hareketinin genliğinin ve hızının yerel zemin koşullarına göre değişmesi, yapıların güvenliğini tehdit etmektedir. Bu nedenle, zemin büyütmesinin doğru bir şekilde analiz edilmesi, sismik tasarımda kritik bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Türkiye’de inşaat sektörü için geçerli olan TBDY 2018, zemin sınıflarına dayalı olarak yapıların performansını belirlemektedir. Bu bölümde, zemin büyütmesinin TBDY 2018’e göre yapının performansının nasıl değerlendirileceği ele alınacaktır.

Zemin büyütmesi, yer hareketlerinin zemin tarafından nasıl arttığına bir göstergesidir. Sismik dalgaların yer yüzeyine kadar geldiğinde hızları ve genlikleri zemin türüne, derinliğine ve sıvılaşma gibi özelliklerine bağlı olarak değişir. Zemin büyütmesinin etkisi, özellikle düşük frekanslı dalgalar için belirgin hale gelir. Bu dalgalar, zemin sınıfı ve yapının derinliğine göre farklı oranlarda büyür. Bu açıdan, zemin büyütme analizi, depremdeki zemin hareketinin yapıya olan etkilerini anlamada hayati önem taşır.

TBDY 2018, Türkiye’deki yapıların deprem güvenliğini sağlamak amacıyla geliştirilmiş bir yönetmeliktir. Bu yönetmelik, zemin büyütmesinin etkilerini sismik tasarımda dikkate almayı zorunlu kılar. Yönetmeliğe göre, zemin sınıfları ve büyütme faktörleri kullanılarak yapıların performansı belirlenir. TBDY 2018, zeminin türüne göre ivme ve yer hareketi değişikliklerini göz önünde bulundurur. Zemin büyütmesinin etkileri, yapıların tasarımında performans seviyelerinin belirlenmesine yardımcı olur. Yönetmelik, farklı zemin sınıfları için belirli ivme ve yer hareketi düzeylerine sahip güvenlik faktörleri sunarak, zemin büyütmesinin yapılar üzerindeki etkilerini minimize etmeyi hedefler.

Zemin büyütmesinin yapı üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi, sismik performans analizlerinin önemli bir parçasıdır. Performans değerlendirmesi, zeminin ve yapının depremdeki davranışını doğru bir şekilde tahmin etmeye yönelik bir analiz sürecidir. Bu süreçte, EL ve NL analiz yöntemleri kullanılarak, zemin büyütmesinin farklı derinliklerdeki etkileri gözlemlenir. Zemin büyütmesinin, özellikle derin zeminlerde, yapının dayanıklılığına olan etkileri göz önüne alınarak tasarım yapılır. TBDY 2018’de belirtilen performans seviyeleri (A, B, C seviyeleri) doğrultusunda, zemin büyütmesinin yapıyı nasıl etkilediği farklı senaryolarla değerlendirilebilir.

Farklı yapı tiplerinin zemin büyütmesinden nasıl etkilendiği de önemli bir konudur. Yüksek binalar, düşük katlı yapılar, köprüler gibi farklı yapı tiplerinin zemin büyütmesinden alacağı etkiler, zeminin özelliklerine bağlı olarak değişiklik gösterir. TBDY 2018'e göre, farklı yapı tipleri için belirlenen performans kriterleri, zeminin büyütme etkisiyle birlikte değerlendirilir. Örneğin, yüksek binalar zemin büyütmesinin etkisiyle daha fazla titreşim alabilirken, düşük katlı yapılar bu etkiye daha az duyarlıdır. Bu yüzden, zemin büyütmesinin her bir yapı tipine olan etkisi ayrı ayrı incelenmeli ve performans değerlendirmesi buna göre yapılmalıdır.

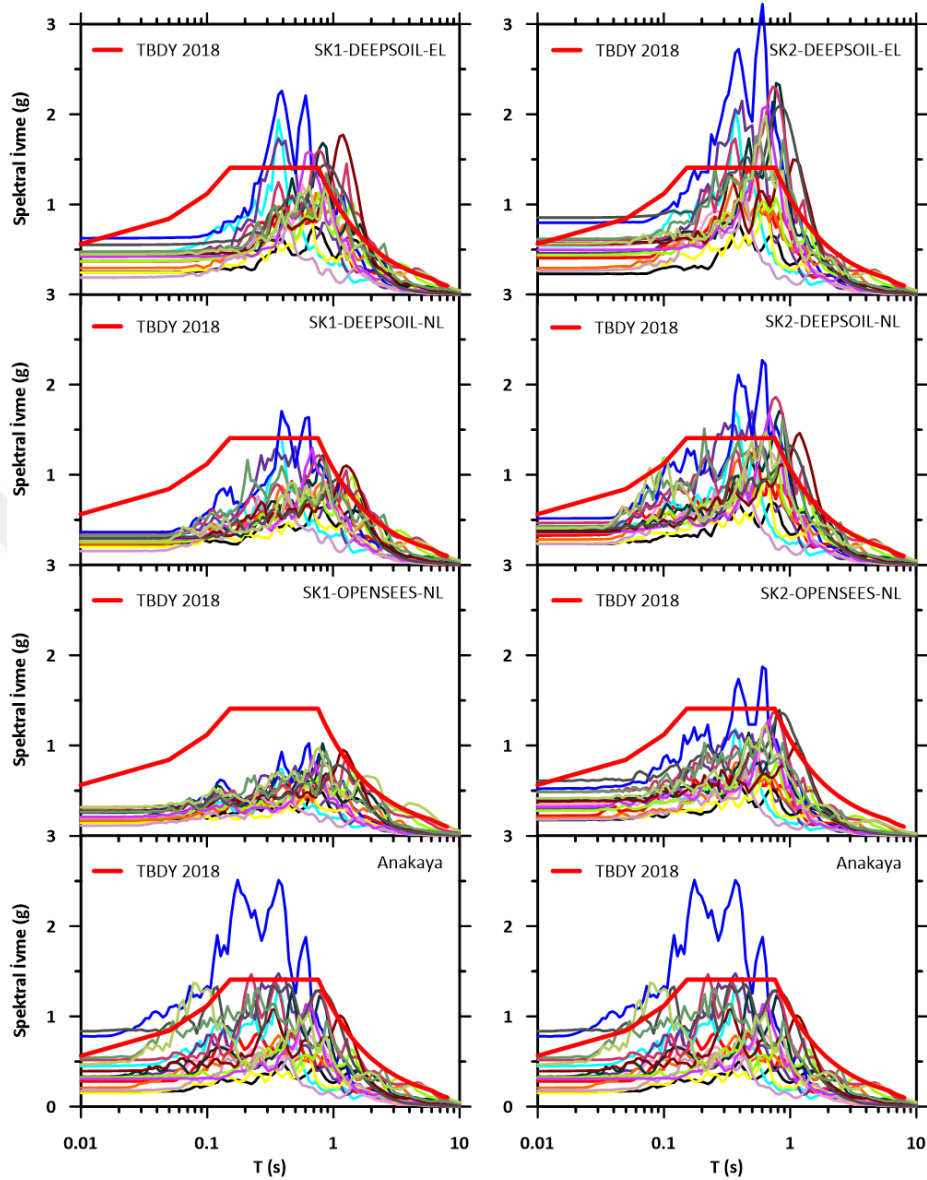
TBDY 2018, sismik tasarımda zemin büyütmesinin etkisini hesaplarken kullanılan parametreleri belirler. Zemin amplifikasyon faktörleri ve ivme verileri, sismik performansı etkileyen temel parametrelerdendir. Bu parametreler, zemin türüne ve zemin sınıfına göre değişir. TBDY 2018'de, zemin büyütmesinin sismik tasarımdaki rolü, bu parametrelerin doğru bir şekilde hesaplanarak yapının güvenliğini sağlamaktadır. Ayrıca, zemin büyütmesinin farklı frekanslardaki tepkilerinin incelenmesi, yapının davranışını daha doğru bir şekilde öngörmeye olanak tanır.

Zemin büyütmesinin analizi, yapının depremdeki performansını doğru bir şekilde değerlendirmek için oldukça önemlidir. TBDY 2018, zemin büyütmesinin etkilerini göz önünde bulundurarak, yapıların güvenliğini arttırmayı hedeflemektedir. Zemin sınıflarına dayalı olarak yapılan performans değerlendirmeleri, yapıların zemin koşullarına göre optimize edilmesini sağlar. Ancak, zemin büyütmesinin etkilerinin daha doğru bir şekilde modellenmesi ve analiz edilmesi, mühendislik uygulamalarında hala geliştirilmesi gereken bir alandır. Bu bağlamda, NL analizler ve daha ayrıntılı zemin büyütmesi hesaplamaları, gelecekteki yapısal tasarımlarda önemli rol oynayacaktır.

Bu kapsamda sahaya özel gerçekleştirilen 2 adet sondaj kuyusu ile 17 farklı deprem ivme kaydından elde edilen veriler kullanılarak orijinal ve iki farklı ölçeklendirme yöntemiyle elde edilen deprem kayıtları ile zemin büyütme analizleri DEEPSOIL-EL, DEEPSOIL-NL ve OPENSEES-NL yöntemi ile yapılmış ve yüzey tepki spektrumları elde edilmiştir. Elde edilen tepki spektrumları, TBDY 2018'in bölgeye özel interaktif web uygulaması aracılığıyla önerdiği tepki spektrumu ile karşılaştırılmıştır.

Çalışma kapsamında, 2 adet sondaj noktasından elde edilen verilerle yapılan analizler incelenmiş DEEPSOIL-EL, DEEPSOIL-NL ve OPENSEES-NL analiz sonuçları ile TBDY

2018'in bölgeye önerdiği spektrum zarfı karşılaştırılmıştır. SK1 ve SK2'de, orijinal deprem kayıtları ile elde edilen yüzey tepki spektrumları Şekil 7.79'da gösterilmiştir.

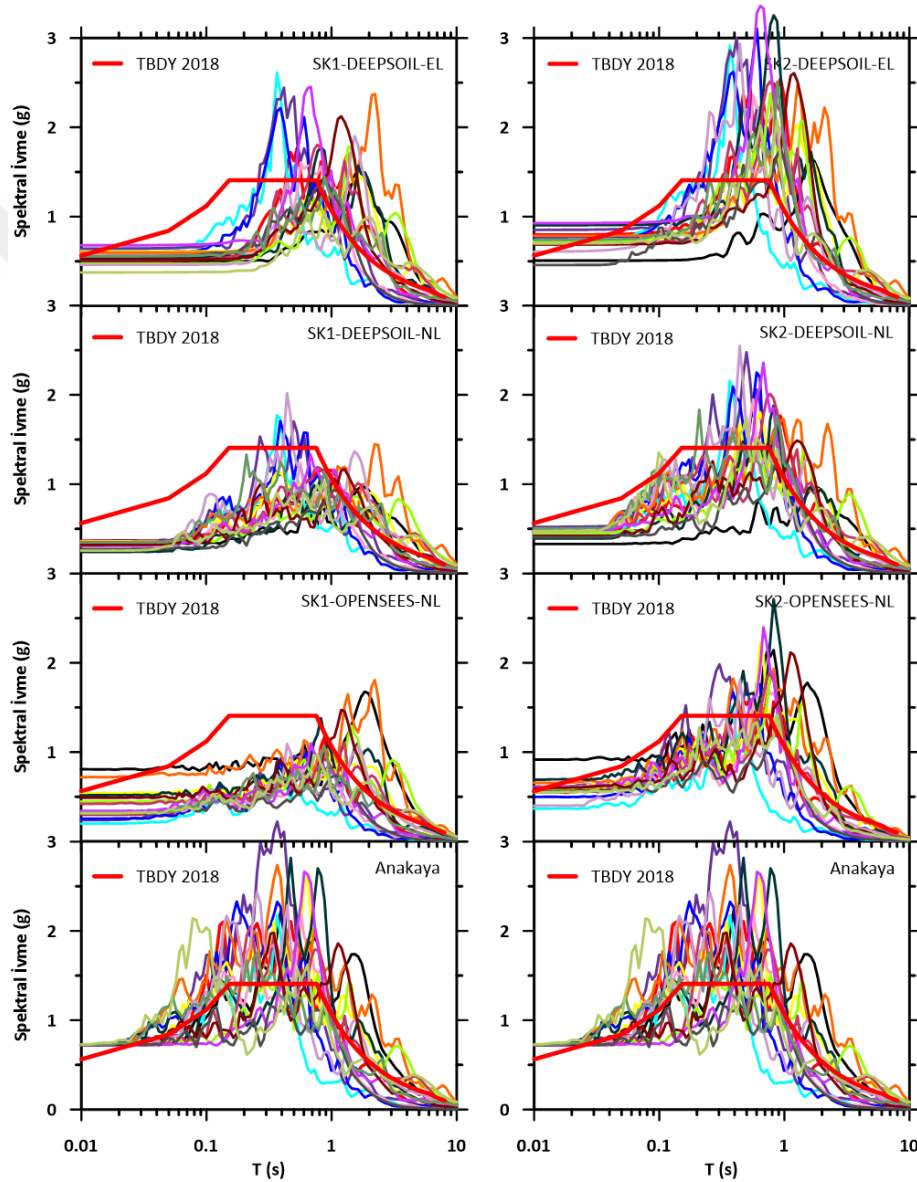


Şekil 7.79. SK1 ve SK2'de orijinal deprem verileri kullanılarak EL ve NL analizleri spektrum parametrelerinin TBDY 2018'le karşılaştırılması

SK1 için Şekil 7.79 incelendiğinde, DEEPSOIL-EL analizinde 0.2s periyot değeri itibarı ile TBDY 2018'in önerdiği spektrum zarfı aşılmaya başlamıştır. Bu analizde maksimum spektral ivme değeri 0.4s periyot değerinde 2.3g olarak gerçekleşmiştir. DEEPSOIL-EL analizde, DEEPSOIL-NL ve OPENSEES-NL analizlere kıyasla yüzeyde belirgin bir artış olduğu tespit edilmiştir. DEEPSOIL-NL ve OPENSEES-NL spektral ivmeler incelendiğinde hemen hemen TBDY 2018'in önerdiği spektrum zarfı altında kaldığı belirlenmiştir. TBDY 2018 spektrum zarfı özellikle OPENSEES-NL spektrum değerlerini tamamen kapsamaktadır. SK2 ise SK1 ile hemen hemen aynı davranışı göstermekte sadece spektral ivme değerleri bir

miktar daha yüksek çıkmıştır. Bunun sebebinin ise SK2'nin SK1'den daha rijit olmasıdır. SK2 DEEPSOIL-EL analizde en yüksek spektral ivme değeri 0.6s periyot değerinde 3.2g olarak gerçekleşmiştir. DEEPSOIL-NL analizinde SK1 için 1.7g olan maksimum spektral ivme SK2 için 2.3g olarak gerçekleşmiştir. Yine OPENSEES-NL analizi için spektral ivme değerlerine bakıldığında SK1 için 1.0g olurken SK2 için 1.9g olarak gerçekleşmiştir.

Zaman tanım alanında yapılan ölçeklendirme ile elde edilen EL-NL analiz sonuçları Şekil 7.80'de gösterilmiştir.



Şekil 7.80. SK1 ve SK2 sondajlarında PGA ölçeklendirme ile elde edilen deprem verileri kullanılarak EL ve NL analizleri spektrum parametrelerinin TB DY 2018'le karşılaştırılması

PGA ölçeklendirmesi kullanılarak normalize edilen 17 farklı yer hareketi, iki farklı zemin profili (SK1 ve SK2) için hem EL hem de NL analizler kapsamında değerlendirilmiştir;

analizler DEEPSOIL ve OPENSEES yazılımları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, anakaya düzeyinde elde edilen spektral ivme eğrileri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Tüm analizler, TBDY 2018 tasarım spektrumu ile birlikte değerlendirilmiştir.

SK1 profiline ait EL analiz sonuçlarına bakıldığında, $T=0.2s$ periyot değerinden itibaren spektral ivme değerlerinin TBDY 2018 spektrumunun üzerine çıktığı ve bu bölgede belirgin bir zemin büyütme etkisinin olduğu görülmektedir. NL analizlerde ise plastikleşme ve enerji sönümüne bağlı olarak spektral ivme değerlerinde düşüş gözlenmiş, bazı kayıtların spektrumun altında kaldığı belirlenmiştir. Bu durum, NL davranışın özellikle kısa periyotlu bileşenlerde sönümleyici etkisini ortaya koymaktadır (Kramer, 1996; Hashash vd., 2017).

SK2 profiline ait sonuçlar incelendiğinde, EL analizlerin SK1'e göre daha yüksek ivme değerleri verdiği ve büyütme etkileri oluşturduğu ve çoğu kaydın spektral ivmesinin TBDY 2018 spektrumunu aştığı görülmüştür. NL analizlerde ise EL'e kıyasla daha geniş bir yayılım ve daha düşük spektral değerler gözlenmiş, fakat büyütme etkisi büyük ölçüde korunmuştur.

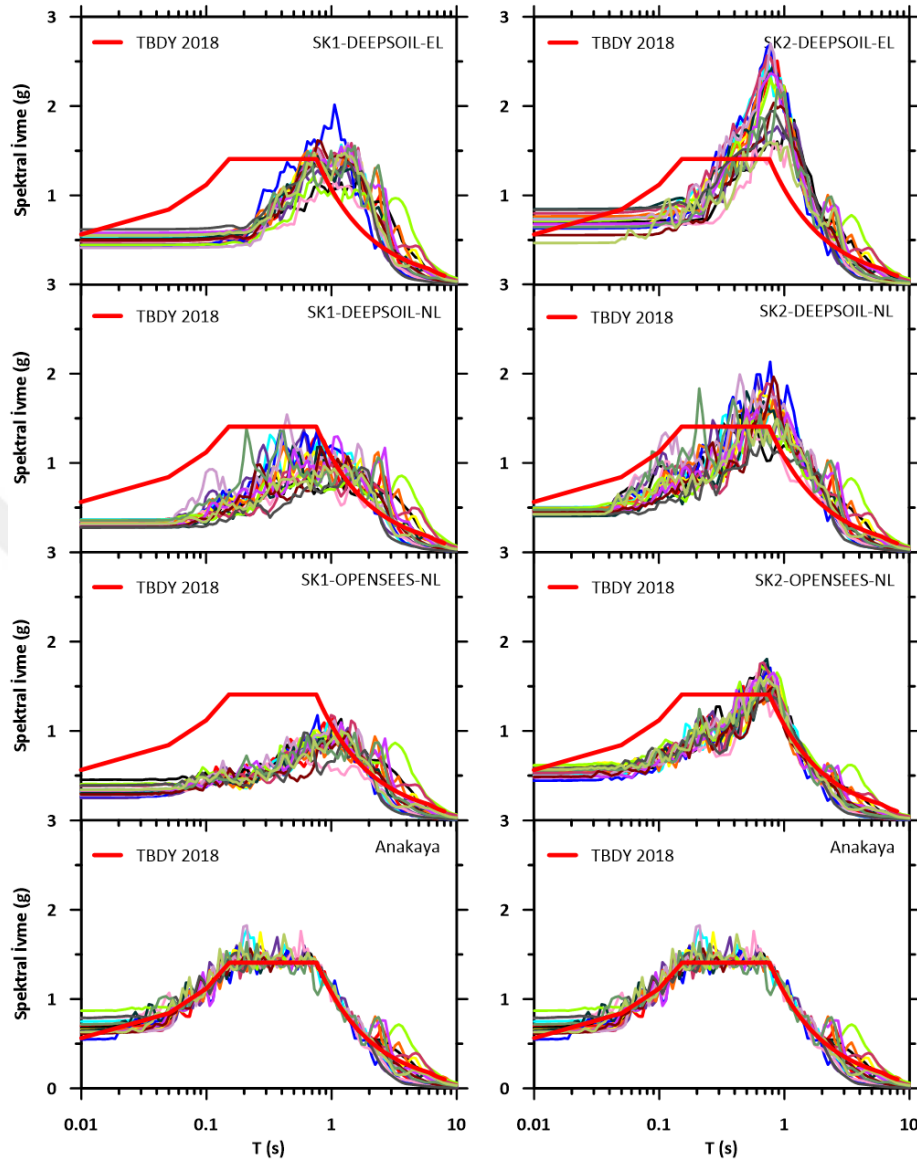
OPENSEES yazılımı ile yapılan NL analizlerde, DEEPSOIL sonuçlarına kıyasla daha yaygın ve düşük frekanslı büyütme davranışları dikkat çekmektedir. Bu farklılık, analizlerde kullanılan modellerin ve sönümleme yaklaşımlarının farklılığından kaynaklanmaktadır. Özellikle SK2 profilinde OPENSEES sonuçlarının bazı periyotlarda tasarım spektrumunun üzerine çıktığı görülmektedir.

Anakaya profiline ait sonuçlar incelendiğinde ise, spektral ivme değerlerinin tüm analiz türlerinde diğer zemin profillerine kıyasla daha düşük olduğu gözlenmiştir. Bu durum, yüzeyde gözlemlenen büyütme etkisinin doğrudan zemin profilinden kaynaklandığını göstermektedir. TBDY 2018 tasarım spektrumunun anakaya profili için genel olarak güvenli tarafta kaldığı söylenebilir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, EL analizlerin zemin büyütmesini olduğundan fazla yansıttığı, buna karşın NL analizlerin daha gerçekçi büyütme değerleri sunduğu görülmektedir. Bununla birlikte, PGA ölçeklendirmesinin spektral içeriği göz ardı etmesi nedeniyle, belirli periyot aralıklarında zemin tepkisini temsil etmede yetersiz kalabileceği düşünülmektedir. Bu bulgular, spektral uyumlu ölçeklendirme yöntemlerinin zemin profili etkilerini değerlendirmede daha uygun olabileceğini desteklemektedir.

Spektral ölçekleme yöntemi ile hedef tasarım spektrumuna uyumlu hale getirilen anakaya kayıtlar kullanılarak, SK1 ve SK2 zemin profillerinde DEEPSOIL-EL, DEEPSOIL-NL, OPENSEES-NL analizleriyle yüzeyde elde edilen spektral ivme değerleri Şekil 7.81

üzerinden değerlendirilmiştir. Karşılaştırmalarda referans olarak TBDY 2018 tasarım spektrumu dikkate alınmıştır.



Şekil 7.81. SK1 ve SK2’de spektral ölçeklendirme ile elde edilen deprem verileri kullanılarak EL ve NL analizleri spektrum parametrelerinin TBDY 2018’le karşılaştırılması

Genel olarak anakaya kayıtlarının spektral ölçekleme ile TBDY 2018 tasarım spektrumuna oldukça yaklaştığı gözlemlenmektedir. Yüzeyde ise, spektral büyütmenin özellikle 0.1s ile 1.0s arası periyotlarda yoğunlaştığı ve bu aralıkta spektral ivme değerlerinde anlamlı artışlar meydana geldiği görülmektedir. EL analizlerde, NL analizlere göre daha yüksek spektral ivme tepkileri elde edilmiştir. NL analizlerde ise plastikleşme, rijitlik kaybı ve enerji sönümü gibi doğrusal olmayan etkiler sonucunda büyütme miktarının bastırıldığı ve daha gerçekçi tepkiler elde edildiği saptanmıştır (Kramer, 1996).

SK1 ve SK2 zemin profilleri dikkate alındığında, SK2 profilinin daha rijit bir zemin yapısına sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, özellikle kısa periyot aralığında elde edilen spektral ivme genliklerinin SK2 profili için daha yüksek olmasına neden olmaktadır. Rijitliğin artmasıyla birlikte, zemin sisteminin doğal periyodu kısalmakta ve yüksek frekanslı bileşenlere karşı daha duyarlı hale gelmektedir.

EL analiz sonuçları incelendiğinde, her iki zemin profili için de spektral ivme değerlerinin periyot arttıkça azaldığı gözlemlenmektedir. Bu beklenen bir durum olup, elastik analizlerde sistemin enerjiyi sönümleme kapasitesi sınırlıdır. SK2 profili için elde edilen eğrilerin daha sivri ve yüksek genlikli olması, rijit zeminlerin karakteristik davranışını yansıtmaktadır.

NL analizlerde ise, plastikleşme, rijitlik kaybı ve enerji sönümü gibi etkiler nedeniyle spektral ivme değerlerinde belirgin bir azalma gözlemlenmektedir. Bu durum, özellikle düşük rijitliğe sahip SK1 profili için daha yaygındır. NL analizler ile elde edilen eğriler daha yayvan ve düşük genliklidir; bu da enerjinin daha etkin sönümlendiğini ve sistemin daha büyük deformasyonlara izin verdiğini göstermektedir.

Kullanılan yazılım bazlı olarak incelendiğinde, DEEPSOIL-NL ve OPENSEES-NL analizleri genel olarak benzer bir trend sunmakla birlikte, OPENSEES analizlerinde bazı periyot aralıklarında daha düşük spektral ivme tepkileri elde edilmiştir. Bu farklılık, iki yazılımda tercih edilen sayısal çözüm yöntemleri, histeritik modellemeler gibi farklılıkların olmasından kaynaklanmaktadır (Vucetic & Dobry, 1991).

Sonuç olarak, spektral ölçeklendirme ile anakaya seviyesinde yapılan analizler, zemin profili rijitliği ve analiz yöntemi farklılıklarının yüzeyde oluşan spektral ivmeler üzerinde önemli etkiler yarattığını ortaya koymaktadır. Bu durum, mühendislik tasarımlarında hem zemin profilinin özelliklerinin hem de analiz yaklaşımının dikkatle seçilmesi gerektiğini göstermektedir.

8. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, sahaya özel zemin davranışının belirlenmesine yönelik analizler gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla düşük plastisiteli kil zeminlerin dinamik davranışı deneysel olarak belirlenmiş ve zemin büyütmesi nümerik yöntemler kullanılarak detaylı şekilde incelenmiştir. Eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analiz yöntemleri orijinal deprem kayıtlarıyla, zaman tanım alanında ve frekans tanım alanında ölçeklendirilmiş deprem kayıtlarıyla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Analizler, zemin büyütmesinin düşük plastisiteli killeri üzerinde, özellikle sismik dalga frekansı, zemin özellikleri ve zemin davranış modellemesine bağlı olarak önemli farklılıklar gösterebileceğini ortaya koymuştur.

Bu kapsamda ilk aşamada, sahadan iki farklı sondaj noktasından örselenmemiş zemin örnekleri temin edilmiştir. Öncelikle zeminlerin fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Sonrasında her bir zemin için kayma modülü-birim şekil değiştirme ve sönüm oranı-birim şekil değiştirme eğrileri rezonant kolon ve dinamik burulmalı kesme deneyleri kullanılarak belirlenmiştir.

İkinci aşamada, deprem bölgelerine özgü sismik tehlikenin doğru bir şekilde temsil edilebilmesi için deprem kayıtları seçilmiştir. Sahaya özel analizlerin yapılabilmesi için bölgenin sismotektonik özelliklerini temsil edebilecek nitelikte TBDY 2018’de belirtilen en az 11 deprem kaydı seçme şartını sağlayacak şekilde 17 farklı deprem ivme kaydı seçilmiştir. Bu kayıtlar PGA ve spektral ölçeklendirme yöntemleriyle analizlere hazırlanmıştır.

Üçüncü ve son aşamada, DEEPSOIL yazılımı kullanılarak 204 adet sahaya özel EL ve NL, OPENSEES yazılımında oluşturulan kod ile de 102 adet NL zemin büyütme analizleri gerçekleştirilmiş olup, toplamda 306 adet durum değerlendirilmiştir.

Yapılan tez çalışmasının sonuçları aşağıdaki şekilde özetlenmiştir;

➤ Çalışma kapsamında 2 farklı sondaj noktasından temin edilen numuneler üzerinde fiziksel ve dinamik deneyler yapılmıştır. Fiziksel deneyler sonucunda zemin sınıfları düşük plastisiteli kil olarak belirlenmiştir. Dinamik deneylerde zeminlerin dinamik parametreleri belirlenmiştir.

➤ 2 farklı sondaj profili için seçilen 17 farklı deprem ivme kaydına göre yüzeyde oluşan ivme-zaman ilişkileri elde edilmiş ve belirgin düzeyde değişimlerin meydana geldiği görülmüştür. Bazı deprem kayıtlarında büyütme görülürken bazı deprem kayıtlarında küçültme görülmüştür.

➤ Zemin yüzeyinde spektral ivme-periyot ilişkilerini gösteren grafikler elde edilmiştir. EL ve NL analiz yöntemlerine göre ayrı ayrı değerlendirmeler yapılmış pik spektral ivme değerlerinin çoğunlukla 0.1-1.0 saniye periyot aralığında yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. PGA ile ölçeklendirilmiş deprem kayıtlarıyla yapılan analizlerden elde edilen spektral ivmeler orijinal deprem kayıtları ile elde edilen spektral ivmelerden daha büyük değerler verirken, spektral ölçeklendirilmiş deprem kayıtları ile yapılan analizler, PGA ile ölçeklendirilmiş deprem kayıtları ile yapılan analizlerden daha küçük değerler vermiştir.

➤ Spektral ivme-periyot grafiklerinden zemin profillerinde maksimum spektral ivmelerin NL analizler için geniş bir periyot aralığında dağıldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, tek bir baskın periyodun varlığından ziyade, çoklu ve yaygın bir hâkim periyot aralığının mevcut olduğunu göstermiştir. Bu durum, yapı ile zemin doğal periyotlarının çakışması halinde meydana gelecek rezonans etkisini artırır.

➤ Hesaplanan büyütme faktörü (amplifikasyon) değerlerine göre EL yöntemiyle elde edilen yüzey pik ivme değerlerinin, NL analizlerdeki karşılıklarından daha yüksek seviyelere ulaştığı gözlemlenmiştir. PGA ve spektral ölçeklendirilmesinde, EL analiziyle elde edilen zemin büyütme faktörlerinin, NL analiziyle elde edilen zemin büyütme faktörlerine kıyasla daha yüksek olduğu elde edilmiştir.

➤ $T=0.01$, $T=0.1$ ve $T=1.0$ saniyeye karşılık gelen zemin büyütme faktörleri karşılaştırıldığında EL analiz yöntemine göre DEEPSOIL programı kullanıldığında kısa ve uzun periyotlarda her iki ölçeklendirme yönteminin benzer güvenilirlikte olduğu, orta periyotta ise PGA ölçeklendirme yönteminin daha güvenli tarafta kaldığı görülmüştür. NL analiz yöntemine göre DEEPSOIL programı kullanıldığında kısa periyotta spektral ölçeklendirme yöntemi güvenli tarafta kalırken orta ve uzun periyotlarda PGA ölçeklendirme yöntemi güvenli tarafta kalmıştır. OPENSEES ile yapılan analizlerde ise PGA ölçeklendirme yöntemi daha güvenli tarafta kalmıştır.

➤ PGA ölçeklendirme yöntemi ile elde edilen EL ve NL analizleri arasındaki eğrinin eğimi değerlendirildiğinde tüm periyot seviyelerinde EL analiz güvenli tarafta kalmıştır. Spektral ölçeklendirme yöntemi ile elde edilen EL ve NL analizleri arasındaki eğrinin eğimi değerlendirildiğinde kısa ve uzun periyotta EL analizler güvenli tarafta kalırken, orta periyotta NL analizler güvenli tarafta kalmıştır.

➤ Maksimum ivme değerleri ve şekil değiştirmelerin derinlik ile değişimi karşılaştırıldığında, orijinal deprem kayıtları ile yapılan analizlerde maksimum ivmeler EL ve

NL analizlerde derinlik değişimi ile aynı eğilimde davranış göstermişlerdir. Bu eğilim PGA ölçeklendirme yöntemiyle elde edilen ivme kayıtları ile yapılan analizlerde biraz farklılık göstermiş ancak spektral ölçeklendirme yöntemiyle elde edilen ivme kayıtları ile yapılan analizlerde aynı kalmıştır. Derinlik ile şekil değiştirmeler arasında yapılan karşılaştırmada ise orijinal deprem kayıtlarının kullanıldığı analizlerde %1 şekil değiştirme değerini geçen deprem sayısı, PGA ve spektral ölçeklendirme yöntemleriyle elde edilen deprem kayıtlarının kullanıldığı analizlerden daha az sayıdadır.

➤ Sahaya özel gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen yüzey tepki spektrumları, 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği ile karşılaştırılmıştır. Orijinal ve ölçeklendirilmiş deprem kayıtları ile EL ve NL analiz yöntemlerine göre ayrı ayrı değerlendirmeler yapılmış pik spektral ivme değerleri EL analizlerde aynı değeri verirken NL analizlerde pik spektral ivme değeri spektral ölçeklendirme yöntemi ile yapılan analizde daha büyük değer vermiştir. Ayrıca her iki ölçeklendirme yöntemi ile yapılan EL ve NL analizlerden elde edilen spektral ivme değerleri, tüm deprem kayıtları için birbirine yakın fakat farklı değerler vermiştir. Bu farkların temelinde TBDY 2018'in geniş alanları temsil eden istatistiksel veri havuzuna dayalı zarf spektrumlar önermesi yatmaktadır. Bundan dolayı, yerel zemin koşullarının dinamik özelliklerini doğrudan yansıtan sahaya özel analizler, mühendislik tasarımlarında daha gerçekçi ve güvenilir girdiler sağlayarak, bölgeye özęü performans değerlendirmelerinin daha sağlıklı yapılmasına olanak tanımaktadır.

Genel olarak çalışma sonuçları, deprem bölgelerinde gerçekleştirilecek mühendislik tasarımları açısından sahaya özel yapılan zemin analizlerinin kritik öneme sahip olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle, yerel zemin koşullarının dinamik davranışının doğru bir şekilde belirlenebilmesi amacıyla, arazi deneylerinin yapılması ve örselenmemiş zemin numunelerinin laboratuvar ortamında deneylerinin yapılması, güvenilir parametrelerin elde edilmesini sağlamak adına etkili ve gerekli bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda düşük plastisiteli killerde zemin büyütmesinin modellenmesinde kullanılan yöntemlerin seçimi, yerel zemin koşullarının özellikleri, analiz yöntemi ve girdi hareketlerinin özelliklerinin doğru ve güvenilir bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Bu tez çalışması ile, özellikle düşük plastisiteli killi zeminlerin üzerine inşa edilecek yapıların tasarımında yerel zemin etkisi analizlerinin önemi vurgulanmaktadır. Ayrıca, böyle bir çalışma daha fazla deprem verisi ve daha fazla sismik ölçümlerle desteklenmiş sondaj noktaları ile yerleşim yerlerinde yapılması planlanan mikrobölgeleme çalışmalarını oluşturacak verilerin elde edilmesine katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- AASHTO. (1996). Standard specification for highway bridges, USA.
- Abrahamson, N. A. (1993). Non-Stationary Spectral Matching Program RSPMATCH, User Manual, July 16.
- Abrahamson, N. A., & Silva, W. J. (1997). Empirical Response Spectral Attenuation Relations for Shallow Crustal Earthquakes. *Seismological Research Letters*, 68 (1): 94-109. <https://doi.org/10.1785/gssrl.68.1.94>.
- Adampira, M., Alielahi, H., Panji, M. & Koohsari, H. (2014). Comparison of equivalent linear and nonlinear methods in seismic analysis of liquefiable site response due to nearfault incident waves: a case study. *Arab J Geosci*;8(5):3103–18
- 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., Yniesta, S., Shafiee, A., Stewart, J. P., ve Brandenburg, 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
- Ahmad, I., Waseem, M., Abbas, M. & Ayub, U. (2015). Evaluation of Shear Wave Velocity Correlations and Development of New Correlation Using Cross-hole Data, *International Journal of Georesources and Environment*, 1(1): 42-51.
- Ahn, S., Ryou, J., Ahn, K., Lee, C., Lee, J. & Jung, J. (2021). Evaluation of Dynamic Properties of Sodium-Alginate-Reinforced Soil Using A Resonant-Column Test, *Materials*, 14, 2743.
- Akdoğan, P. (2019). *Dynamic Soil Amplification In Saturated Soil Profiles Using Effective Stress Based Nonlinear Methods*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Akın, M. (2009). *Seismic Microzonation of Erbaa (Tokat-Turkey) Located Along Eastern Segment of The North Anatolian Fault Zone (NAFZ)*, Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği, 416s.
- Aksu, B. (2014). *Erzurum Şehir Merkezinde Kuzey Güney Doğrultulu Bir Hat Boyunca Yer Alan Yapı Stoğunun, Zemin ve Yapı Periyodu Açısından Değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Akkar, S., & Bommer, J. J. (2006). Influence of long-period filter cut-off on elastic spectral displacements. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 35(9), 1145-1166. <https://doi.org/10.1002/eqe.571>
- Alla, P. (2009). *Dynamic behavior of unsaturated soils, Louisiana*, Master of Science Thesis, Louisiana State University, USA.
- Altun, S., & Ansal, A. (2003). Tekrarlı yükler altında kumların gerilme-şekil değiştirme özellikleri, *itüdergisi*, 2 (4), 25-34.
- Altun, S. (2004). Suya doymuş kumların drenajsız koşullardaki davranışının tekrarlı yükler altında burulmalı kesme deney aleti ile incelenmesi, *DEÜ Fen ve Mühendislik Dergisi*, 6 (1), 139-152
- Altun, S., & Ansal, A. (2004). Kumlarda dinamik kayma modülünün belirlenmesi, *Türkiye İnşaat Müh. XVII. Teknik Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, İstanbul, 403-406.
- Altun, S., & Göktepe, A.B. (2006). Dependence of dynamic shear modulus of uniform sands on stress level and density, *Civil Engineering and Environmental Systems*, 23 (2), 101-116.
- Ambraseys, N. N., Douglas, J., Sarma, S. K., & Smit, P. M. (2005). Equations for the Estimation of Strong Ground Motions from Shallow Crustal Earthquakes Using Data from Europe

- and the Middle East: Horizontal Peak Ground Acceleration and Spectral Acceleration. *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 3. <https://doi.org/10.1007/s10518-005-0183-0>.
- Amini, P. F. & Noorzad, R. (2018). Energy-based evaluation of liquefaction of fiber-reinforced sand using cyclic triaxial testing, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 104, 45-53.
- Ancheta, T. D., Darragh, R. B., Stewart, J. P., Seyhan, E., Silva, W. J., Chiou, B. S. J., Wooddell, K. E. vd. (2014). NGA-West2 Database. *Earthquake Spectra*, 30 (3): 989-1005. <https://doi.org/10.1193/070913EQS197M>
- Andrus, R.D., & Stokoe, K.H. (2000). Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1, 1015-1025.
- 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. M. & Tuncan, M. (1989). Consolidation in Clays Due to Cyclic Stresses, *Proceedings 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 3-6.
- Ashmawy, A. K. & Drnevich, V. P. (1994). A General Dynamic Model for the Resonant Column/Quasi-Static Torsional Shear Apparatus, *Geotechnical Testing Journal*, 17(3): 337-348.
- Aslan, Ö. (2015). 13 Mart 1992 Erzincan Depremi Yapısal Hasarları Üzerinde Yerel Zemin Koşullarının Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- ASTM, D5311 / D5311M (2013). Standard test method for load controlled cyclic triaxial strength of soil, USA, ASTM International.
- Ateş, A. (1999). Düzce Depreminde Zemin Yapı Rezonans Uyuşumuna Bağlı Oluşan Yapı Hasarlarının Araştırılması. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi. 4. 911-925.
- Aydinoğlu, M. N. (2003). An Incremental Response Spectrum Analysis Procedure Based on Inelastic Spectral Displacements for Multi-Mode Seismic Performance Evaluation. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1 (1): 3-36. <https://doi.org/10.1023/A:1024853326383>.
- Banerjee, S., & Balaji, P. (2018). Effect of Anisotropy on Cyclic Properties of Chennai Marine Clay. *Int J Geosynth Gr Eng*, 4, 1-11.
- Bard, P. Y. (1999). Microtremor measurements: A tool for site effect estimation? In *The Effects of Surface Geology on Seismic Motion*. 1, 1251-1279. Balkema
- Bartake, P.P., & Singh, D.N. (2007). Studies on the determination of shear wave velocity in sands, *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*, 2 (1), 41-49.
- Basa, F., Yurdakul, M.E., Sariaslan, R., & Osmañelebioğlu, F. (1998). Sakarya İlinin Çevre Jeolojisi ve Doğal Kaynaklar, Rapor No:10195, MTA
- Baxter, C.D.P., Bradshaw, A.S., Green, R.A., & Wang, J.H. (2008). Correlation between cyclic resistance and shear-wave velocity for providence silts," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE*, 134 (1), 37-46.
- Bedr, S., Mezouar, N., Verrucci, L., & Lanzo, G. (2019). Investigation on Shear Modulus and Damping Ratio of Algiers Marls Under Cyclic and Dynamic Loading Conditions. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78, 2473–93.
- Bilge, H.T., & Çetin, K.Ö. (2011). Suya doymuş kumlu zeminlerin tekrarlı boşluk suyu basıncı gelişim davranışlarının modellenmesi, *1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, Ankara, 1-8.
- 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.
- Bommer, J. J. & Acevedo, A. B. (2004). The Use of Real Earthquake Accelerograms as Input to Dynamic Analysis. *Journal of Earthquake Engineering*, 8 (January 2015): 43-91. <https://doi.org/10.1080/13632460409350521>.
- Bommer, J. J., Scott, S. G. & Sarma, S. K. (2000). Hazard-Consistent Earthquake Scenarios. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19 (4): 219-31. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(00\)00012-9](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(00)00012-9).
- Boore, D. M. (2003). Simulation of ground motion using the stochastic method. *Pure and Applied Geophysics*, 160(3-4), 635-676. <https://doi.org/10.1007/PL00012553>
- Boore, D. M. (2004). Can site response be predicted. *Journal of Earthquake Engineering*, 8(sup1), 1-41. <https://doi.org/10.1142/S1363246904001068>
- Boore, D. M. (2005). SMSIM Fortran Programs for Simulating Ground Motions from Earthquakes. Revision, 1–59.
- Borcherdt, R. D. (1994). Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and results). *Earthquake Spectra*, 10(4), 617-633.
- Bouferra, R., Benseddiq, N. & Shahrour, I. (2007). Saturation and preloading effects on the cyclic behavior of sand, *International Journal of Geomechanics*, 7(5), 396-401.
- Bozorgnia, Y., vd. (2014). *Earthquake Engineering: From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering*. CRC Press.
- Brady A.G. (1980). An Investigation of the Miyagi-Ken-Oki, Japan, Earthquake of June 12, 1978, *US Dept. of Commerce, National Bureau of Standards*.
- Brandes, H.G. (2003). *Geotechnical and foundation aspects*. In: Chen, W-F, Scawthorn, C., (eds.), *Earthquake Engineering Handbook*, CRC Press, Chapter 7, 61.
- Brown, S.F., Lashine, A.K.F. & Hyde, A.F.L. (1975). Repeated Load Triaxial Testing of a Silty Clay, *Geotechnique*, 25(1): 95-114.
- Builes, M., Garcia, E., & Riveros, C.A. (2008). Dynamic and static measurements of small strain moduli of Toyoura sand, *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, 43, 86-101.
- Cabalar, A.F. (2010). Applications of the oedometer, triaxial and resonant column tests to the study of micaceous sands, *Engineering Geology*, 112, 21-28.
- Cai, Y., Gu, C., Wang, J., Juang, C. H., Xu, C. & Hu, X. (2012). One-way cyclic triaxial behavior of saturated clay: comparison between constant and variable confining pressure, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(5), 797-809.
- California Strong Motion Instrumentation Program (CSMIP). (2018). Retrieved March 20, from <http://www.consrv.ca.gov/cgs/smip/Pages/about.aspx>.
- Campbell, K. W., & Bozorgnia, Y. (2008). NGA Ground Motion Model for the Geometric Mean Horizontal Component of PGA, PGV, PGD and 5% Damped Linear Elastic Response Spectra for Periods Ranging from 0.01 to 10 S. *Earthquake Spectra*, 24 (1): 139-71. <https://doi.org/10.1193/1.2857546>.
- Cao, Y.L. & Law, K.T. (1992). Energy Dissipation and Dynamic Behaviour of Clay Under Cyclic Loading”, *Canadian Geotechnical Journal*, 29: 103-111.
- Carlton, B., & Tokimatsu, K. (2016). Comparison of equivalent linear and nonlinear site response analysis results and model to estimate maximum shear strain. *Earthquake Engineering Research Institute*, 32 (3) 1867-1887.
- Carraro, J. A. H. & Prezzi, M. (2007). A New Slurry-Based Method of Preparation of Specimens of Sand Containing Fines, *Geotechnical Testing Journal*, 31(1): 1-11.
- Cascante, G., Santamarina, C., & Yassir, N. (1998). Flexural excitation in a standard torsional-resonant column device, *Can. Geotech. Journal*, 35, 478-490.
- Cassaro, M. A., & Romero E. M. (1987). *The Mexico City Earthquake-1985*, ASCE, New York.

- Celep, Z., & Kumbasar, N. (1996). *Deprem mühendisliğine giriş*, İTÜ Yayınları, İstanbul, 2004.
- Kramer, S.L., *Geotechnical earthquake engineering*, Prentice Hall, New Jersey.
- Charney, F. A. (2008). Unintended consequences of modeling damping in structures. *Journal of Structural Engineering*, 134(4), 581-592. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2008\)134:4\(581\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:4(581))
- Chaudhary, S., Kuwano, J., Hashimoto, S., Hayano, Y., & Nakamura, Y. (2002). Effects of initial fabric and shearing direction on cyclic deformation characteristics of sand, *Soils and Foundations*, 42 (1), 147-157.
- Chen, W. F. & Scawthorn, C. (2003). *Earthquake Engineering Handbook*. Taylor & Francis Group.
- Cherian, A. C. & Kumar, J. (2016). Effects of vibration cycles on shear modulus and damping of sand using resonant column tests, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(12), 06016015.
- Chiaro, G., Koseki, J. & Sato, T. (2012). Effects of initial static shear on liquefaction and large deformation properties of loose saturated Toyoura sand in undrained cyclic torsional shear test, *Soils and Foundations*, 52(3), 498-510.
- Chopra, A. K. (2012). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering (4th ed.)*. Pearson.
- Chopra, A. K. (2017). *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering*. Pearson.
- Chritakos, G. (2003). Soil behaviour under dynamic loading conditions: experimental procedures and statistical trends, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 17, 175-190.
- Clough, R. W., & Penzien, J. (2003). *Dynamics of Structures (3rd ed.)*. Computers and Structures, Inc.
- Çabalar, A.F., & Cevik, A. (2009). Modelling damping ratio and shear modulus of sand-mica mixtures using neural networks, *Engineering Geology*, 104, 31-40.
- Çokar, T. (2012). *Çayırova Kampüsü Zemininin Eşdeğer Lineer Analiz Yöntemi Kullanılarak Davranış Analizlerinin Değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
- Da Fonseca, A. V., Soares, M. & Fourie, A. B. (2015). Cyclic DSS tests for the evaluation of stress densification effects in liquefaction assessment, *Soil Dynamics Earthquake Engineering*, 75, 98-111.
- Darcy, H. (1856). Les fontaines publiques de la ville de Dijon: exposition et application, *Victor Dalmont*, Paris.
- Das, B.M. & Ramana, G.V. (2010). *Principles of soil dynamics*, Cengage Learning, Stamford.
- Das, B. M. & Luo, Z. (2016). *Principles Of Soil Dynamics*, Cengage Learning.
- Dikmen, S. U., & Ghaboussi, J. (1984). Effective stress analysis of seismic response and liquefaction: theory. *Journal of Geotechnical Engineering*, 110(5), 628-644.
- Dobry, R., vd. (2000). Effect of soil conditions on site response to earthquake motions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(6), 494-500.
- Drnevich, V. P., Hardin, B. O. & Shippy, D. J. (1978). Modulus and Damping of Soils by the Resonant-Column Method, *Dynamic Geotechnical Testing*, ASTM International.
- Drnevich, V. P. (1985). Recent Developments in Resonant Column Testing, *Richart Commemorative Lectures*, ASCE, 79-107.
- Drnevich, V. P., Werden, S., Ashlock, J. C. ve Hall, J. R. (2014). Applications of the New Approach to Resonant Column Testing, *Geotechnical Testing Journal*, 38(1): 23-39.
- Drnevich, V. P. (2017). A Relationship Between Modulus and Damping Provides for Simple, Unified Modeling of Both, *Geotechnical Frontiers*, 48-60.

- Dudzinski, P. A. (2019). Method for predicting dynamic shear strength in soils–Part I: Proposal for a new criterion, *Journal of Terramechanics*, 86, 31-37.
- Dudzinski, P. A. (2019). Stefanow, D., “Method for predicting dynamic shear strength in soils- Part II: Validation of the new criterion using an innovative test device”, *Journal of Terramechanics*, 86, 39-46.
- Elgamal, A., Yang, Z., Parra, E., & Ragheb, A. (2002). Modeling of cyclic mobility in saturated cohesionless soils. *International Journal of Plasticity*, 18(6), 833-860.
- Elghazouli, A. Y., & Richard, J. P. (2011). Seismic Design of Buildings to Eurocode 8. *Noise Control Engineering Journal*, Vol. 59. <https://doi.org/10.3397/1.3532782>.
- Elibol, B., & Erken, A. (2005). Doygun, kısmi doygun ve kuru kum numunelerin dinamik davranışlarının incelenmesi, *Antalya Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Kongresi*, Antalya, 1-11.
- 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.
- Erdik, M., Şeşetyan, K. & Demircioğlu, M. B. (2006). Kıyı ve Liman Yapıları, Demiryolları, Hava Meydanları İnşaatlarına İlişkin Deprem Teknik Yönetmeliği, Ulaştırma Bakanlığı Demiryolları, Limanlar ve Havameydanları İnşaatı Genel Müdürlüğü, Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü.
- Erken, A. & Ülker, B. M. C. (2007). Effect of Cyclic Loading on Monotonic Shear Strength of Fine-grained Soils, *Engineering Geology*, 89: 243-257.
- Eskişar, T. (2008). *İzmir Körfezi Kuzey Kıyılarının Zemin Özelliklerinin ve Geoteknik Sorunlarının İncelenmesi*, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Fahjan, Y. M. (2008). Selection and Scaling of Real Earthquake Accelerograms to Fit the Turkish Design Spectra. *Technical Journal of Turkish Chamber of Civil Engineers*, 19 (SPEC. ISS.): 1231–50.
- Fırat, S., & Demir, M. (2016). Adapazarı Bölgesi Zemin Büyütme Faktörünün İncelenmesi. *Türk Bilim Araştırma Vakfı*. 9(3). 1-9.
- Frost, J. D. & Drnevich, V. P. (1994). Towards Standardization of Torsional Shear Testing, *Dynamic Geotechnical Testing II, ASTM International*, 1213: 276- 276.
- Frost, J. D. & Park, J. Y. (2003). A Critical Assessment of the Moist Tamping Technique, *Geotechnical Testing Journal*, 26(1): 57-70.
- Garcia, S.R., Romo, M.P., & Nazuno, J.F. (2013). Characterization of ground motions using recurrence plots, *Geofísica Internacional*. 52(3):209-227.
- Gasparre, A. (2005). *Advanced Laboratory Characterisation Of London Clay*, Master of Science Thesis, University of London, London
- Georgiannou, N., Tsomokos, A., & Stavrou, K. (2008). Monotonic and cyclic behaviour of sand under torsional loading, *Geotechnique*, 58 (2), 13-124.
- Ghahramani, A., Dehghani, M., Habibagahi, G., & Berrill, J. (2000). Liquefaction potential by torsional shear, *12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zeland, 1-6.
- Gilbert, P. A. (1984). Investigation of Density Variation in Triaxial Test Specimens of Cohesionless Soil Subjected to Cyclic and Monotonic Loading”, *Vicksburg: US Army Corps of Engineering*, USA (1984).

- Guo, L., Wang, J., Cai, Y., Liu, H., Gao, Y. & Sun, H. (2013). Undrained deformation behavior of saturated soft clay under long-term cyclic loading, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 50, 28-37.
- Gupta, I D. (2002). The State of the Art in Seismic Hazard Analysis. *ISSET Journal of Earthquake Technology*, 39 (4): 311–46.
- Güler, E. (2021). *Zeminlerin Dinamik Özelliklerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi ve Zemin Büyütme Analizlerinin Yapılması*, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Güler, E., & Afacan, K.B. (2020). Düşük Deformasyon Seviyelerinde Kumların Dinamik Özelliklerinin Resonant Kolon Deneyi Yardımıyla Belirlenmesi, *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7 (2); 572-580.
- Gürbüz, A., & Kazancı, N. (2017). Dünya’da ve Türkiye’de Kuvaterner Jeolojisi Haritalarının Hazırlanması ve Karşılaşılan Sorunlar. *Türkiye Jeoloji Bülteni*. 60 (2017) 665-699.
- Hadge, W.E. (1997). *A relationship between the drained and undrained cyclic behavior of sand*, Master of Science Thesis, Massachusetts Institute of Technology, USA.
- Hancock, J. & Bommer, J. J. (2006). A State-of-Knowledge Review of the Influence of Strong-Motion Duration on Structural Damage. *Earthquake Spectra*, 22 (3): 827–45. <https://doi.org/10.1193/1.2220576>.
- Hardin, B. O. & Black, W. L. (1968). Vibration Modulus of Normally Consolidated Clay, *Journal of Soil Mechanics and Foundations Div.*
- Hardin, B. O. & Drnevich, V. P. (1972a). Shear Modulus and Damping in Soils: Measurement and Parameter Effects, *Journal of Soil Mechanics and Foundations Div.*, 98(SM6).
- Hardin, B. O. & Drnevich, V. P. (1972b). Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves, *Journal of Soil Mechanics and Foundations Div.*, 98(SM7).
- Harman, E., & Küyük, H. S. (2016). Sakarya ili için olasılığa dayalı sismik tehlike analizi *Engin. SAÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 20:23–31
- Hashash, Y. M. A., Phillips, C., & Groholski, D. R. (2010). Recent Advances in Non-Linear Site Response Analysis, *5th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, May 24-29, San Diego, Paper no. OSP 4.
- Hashash, Y. M. A. (2017). Musgrove, M. I., Harmon, J. A., Groholski, D. R., Phillips, C. A., ve Park, D. DEEPSOIL 7.0, user manual. Urbana, IL: University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Haşal M. E. (2009). *Topoğrafik Düzensizliklerin Zemin Büyütmesine Etkisi*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Herece, E., & Akay, E. (2003). Kuzey Anadolu Fay Atlası, KAF Boyu Jeoloji Haritası- (Sapanca-Dokurcan), MTA (Maden Tetkik Arama)
- Hoyos, L. R., Suescún-Florez, E. A. & Puppala, A. J. (2015). Stiffness of intermediate unsaturated soil from simultaneous suction-controlled resonant column and bender element testing, *Engineering Geology*, 188, 10-28.
- Hu, X., Zhang, Y., Guo, L., Wang, J., Cai, Y., Fu, H. & Cai, Y. (2018). Cyclic behavior of saturated soft clay under stress path with bidirectional shear stresses, *Soil Dynamics Earthquake Engineering*, 104, 319-328.
- Huang, X., Cai, X., Bo, J., Li, S., & Qi, W. (2021). Experimental study of the influence of gradation on the dynamic properties of centerline tailings sand, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 151,106993.
- Humphries, W. K. & Wahls, H. E. (1968). Stress History Effects on Dynamic Modulus of Clay, *Journal of Soil Mechanics and Foundations Div.* 94(SM2): 371-389.
- Hussain, M. & Sachan, A. (2019). Dynamic characteristics of natural kutch sandy soils”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 125, 105717.

- Hutton, L. K. & Boore, D. M. (1987). The Ml Scale in Southern California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 77 (6): 2074–94.
- Hwang, S. K. (1997). *Dynamic Properties of Natural Soils*, Ph. D. Thesis, The University of Texas, Austin.
- Hyde, A. F. L. & Ward, S. J. (1986). The Effect of Cyclic Loading on the Undrained Shear Strength of a Silty Clay, *Marine Geotechnology*, 6(3): 299-314.
- Iida, K. (1938). The Velocity of Elastic Waves in Sand. Bull. Earthq. Res. Inst., *University of Tokyo*, 16: 131-144.
- Iida, K. (1940). On the Elastic Properties of Soil, Particularly in Relation to Its Water Content, *Bull. Earthquake Res. Inst.*, 18: 675-691.
- Iervolino, I., Manfredi, G. & Cosenza, E., (2006). Ground Motion Duration Effects on Nonlinear Seismic Response. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 3,5 (1): 21–38. <https://doi.org/10.1002/eqe.529>.
- 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.
- Ishibashi, I., & Zhang, X. (1993). Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay, *Soils and Foundations*, 33 (1), 182-191.
- Ishihara, K. (1996). *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*, Oxford Engineering Science Series, Oxford University Press, Oxford.
- Ishihara, K. (2003). *Soil behavior in earthquake geotechnics*, Clarendon Press, Oxford.
- Italian Accelerometric Archive (ITACA)., (2020). Retrieved June 15, 2020 from <http://itaca.mi.ingv.it/>
- Ivsic, T. (2006). A model for presentation of seismic pore water pressures, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26, 191-199.
- Iwasaki, T., vd. (1978). Microzonation for liquefaction potential using geotechnical data. *Soils and Foundations*, 18(1), 56-67.
- İyisan, H., & Haşal, M.E. (2011). Zemin büyütmesi ve yerel koşulların spektral ivmeye etkisi, *İTÜ dergisi Mühendislik*, 10(4), 47-56.
- İyisan, R. (1994). *Geoteknik özelliklerin belirlenmesinde sismik ve penetrasyon deneylerinin karşılaştırılması*. (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Jeofizik Bülteni, TMMOB Jeofizik Mühendisleri Odası [Erişim 02.01.2025, https://icerik.jeofizik.org.tr/uploads/portal/resimler/ekler/9e9dda471b0c838_ek.pdf]
- Joyner & Albert, T. F. Chen, (1975). Depremde Doğrusal Olmayan. Zemin Davranışının Hesaplanması, *BSSA*, Vol. 65 No.5 s. 1315-1336.
- Joyner, W. B., & Boore, D. M. (1981). The effect of local geology on ground motion. *Seismological Society of America Bulletin*, 71(5), 1591-1603.
- Kale, P. (2008). *Yerel Arazi Etkilerinin Bir ve İki Boyutlu Analizlerle İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kallioglou, P., Tika T., & Pitilakis, K. (2008). Shear modulus and damping ratio of cohesive soils, *Journal of Earthquake Engineering*, 12, 879-913.
- Kang, X., Ge, L., Chang, K. T. & Kwok, A. O. L. (2015). Strain-controlled cyclic simple shear tests on sand with radial strain measurements, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(4), 04015169.
- Kaptan, K., & Tezcan, S. (2012), Deprem Dalgalarının Zemin Büyütmesi Üzerine Örnekler, *Türk Bilim Araştırma Vakfı*. 5(4). 17-32.
- Kara H. B. (1990). *Normal Konsolide Killerin Tekrarlı Yükler Etkisi Altındaki Davranışı*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Kagawa, T., Irikura, K., & Somerville, P. G. (2004). Differences in Ground Motion and Fault Rupture Process between the Surface and Buried Rupture Earthquakes. *Earth Planets and Space*, 56 (1): 3–14. <https://doi.org/10.1186/BF03352486>.

Kawase, H., & Aki, K. (1990). Topography effect at the critical SV-wave incidence: Possible explanation of damage pattern by the Whittier Narrows earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 80(1), 1–22.

Khan, Z. H., Cascante, G., El Naggar, M. H. & Lai, C. G. (2008). Measurement of frequency-dependent dynamic properties of soils using the resonant column device, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(9), 1319-1326.

Khan, A., El 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.

Khanbabazadeh, H. (2014). *Anakaya Eğiminin Zemin Büyütmesine Etkisi*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Khosravi, A. & McCartney, J. S. (2011). Resonant column test for unsaturated soils with suction–saturation control, *Geotechnical Testing Journal*, 34(6), 730-739.

Kim, U., Kim, D. & Zhuang, L. (2016). Influence of Fines Content on the Undrained Cyclic Shear Strength of Sand–Clay Mixtures, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 83: 124-134.

Koçer, M., Nakipoğlu, A., Öztürk, B., Al-Hagri, M.G., & Arslan, M H. (2018). Deprem Kuvvetine Esas Spektral İvme Değerlerinin TBDY 2018 ve TDY 2007’ye göre Karşılaştırılması, *Selçuk-Teknik Dergisi* Cilt 17, Sayı:2-2018, ISSN 1302-6178.

Koester, J. P. (1994). The Influence of Fine Type and Content on Cyclic Strength, *Ground Failures Under Seismic Conditions, Geotechnical Special Publication*, 44: 330- 345.

Kokusho, T. (1980). Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range," *Soils and Foundations*, 20 (2), 305-312.

Kong, G. Q., Zhou, L. D., Wang, Z. T., Yang, G. & Li, H. (2016). Shear modulus and damping ratios of transparent soil manufactured by fused quartz, *Materials Letters*, 182, 257-259.

Konrad, J. M. & Wagg, B. T. (1993). Undrained Cyclic Loading of Anisotropically Consolidated Clayey Silts, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 119(5): 929-949.

Koseki, J., Kawakami, S., Nagayama, H., Sato, T., Hayano, K., & Torimitsu, M. (1999). Liquefaction tests of Toyoura sand measuring change of quasi-elastic deformation properties, *Bulletin Earthquake Resistat Structure Reearch Center*, 32, 47-60.

Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice–Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics, Prentice-Hall, New Jersey.

Kramer, S. L. & Stewart, J. P. (2025), *Geotechnical Earthquake Engineering Second Edition*, CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, LLC, Boca Raton.

Kuerbis, R. & Vaid, Y. P. (1988). Sand Sample Preparation-The Slurry Deposition Method, *Soils and Foundations*, 28(4): 107-118.

Kumar, J., & Madhusudhan, B.N. (2010). A note on the measurement of travel times using bender and extender elements, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30, 630-634.

Ladd, R.S. (1978). Preparing test specimens using undercompaction, *Geotechnical Testing Journal*, 1 (1), pp. 16-23.

Lade, P. V. (2016). Triaxial Testing of Soils, *John Wiley and Sons*, India.

Lanzo, G., & Delia, B. (2003). Cyclic properties of Toyoura sand at small to medium strains in simple shear test, *Rivista Italiana di Geotecnica*, 2, 79-83.

Lee, K. L. & Fitton, J. A. (1969). Factors Affecting the Cyclic Loading Strength of Soil, *Vibration Effects of Earthquakes on Soils and Foundations. ASTM International*, 71-75.

Lee, C.J., & Huang, H.Y. (2007). Wave velocities and their relation to fabric evolution during the shearing of sands, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27, 1-13.

Lentini, V. & Castelli, F. (2017). Resonant column and torsional shear tests for the evaluation of the shear modulus and damping ratio of soil, *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1906, No. 1, p. 190003). AIP Publishing.

Li, Y., Yang, Y., Yu, H. S. & Roberts, G.,(2016). Monotonic direct simple shear tests on sand under multidirectional loading, *International Journal of Geomechanics*, 17(1), 04016038.

Ling, X. Z., Zhang, F., Li, Q. L., An, L. S. & Wang, J. H. (2015). Dynamic shear modulus and damping ratio of frozen compacted sand subjected to freeze–thaw cycle under multi-stage cyclic loading, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 76, 111-121.

Liu, H., & Tseng, M. H. (2001). Site-specific evaluation of site amplification and earthquake motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30(1), 13-32.

Liu, J., Cui, Y., Liu, X., & Chang, D. (2020). Dynamic characteristics of warm frozen soil under direct shear test-comparison with dynamic triaxial test, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 133, 106114.

Luh G. (1980). *An Experimental Study of The Dynamic Behavior of Soils*, Ph. D. Thesis, The University of Wisconsin, Madison.

Luna, R. & Jadi, H. (2000). Determination of dynamic soil properties using geophysical methods, *Proceedings Of The First International Conference On The Application Of Geophysical And Ndt Methodologies To Transportation Facilities And Infrastructure*, St. Louis, MO

Mandokhail, S. J., Rehman, K., Baloch, Z., Sadiq, S. & Kakar, M. G. (2018). Effect of the confining method on the cyclic undrained behaviours of sand, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.

Markowska-Lech, K. (2008). The determination of shear modulus in overconsolidated cohesive soils, *Foundations of Civil and Environmental Engineering*, 12, 61-71.

Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M. H., & Fenves, G. L. (2007). OpenSees Command Language Manual. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

Meidani, M., Shafiee, A., Habibagahi, G., Jafari, M.K., Mohri, Y., Ghahramani, A., & Chang, C.S. (2008). Granule shape effect on the shear modulus and damping ratio of mixed gravel and clay, *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering*, 32 (B5), 501-518.

Mendoza, M. J. & Auvinet, G. (1988). The Mexico Earthquake of September 19, 1985-Behavior of Building Foundations in Mexico City, *Earthquake Spectra*, 4(4): 835-853.

Mirshekari, M., & Ghayoomi, M. (2015), Simplified Equivalent Linear and Nonlinear Site Response Analysis of Partially Saturated Soil Layers. *IFCEE* 2015.doi:10.1061/9780784479087.197.

Miura, S. & Toki, S. (1982). A Sample Preparation Method and Its Effect on Static and Cyclic Deformation-Strength Properties of Sand, *Soils and Foundation*, 22(1): 61-77.

Moldenhauer, H. H. & Polito, C. P. (2018). Energy dissipation and pore pressure generation in stress and strain-controlled cyclic triaxial tests, *Geotechnical Testing Journal*, 42(4).

Molina-Gomez, F., Viana da Fonseca, A., Ferreira, C., & Camacho-Tauta, J. (2020). Dynamic properties of two historically liquefiable sands in the Lisbon area, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 132, 106101.

Montoya, B. M., DeJong, J. T. & Boulanger, R. W. (2013). Dynamic response of liquefiable sand improved by microbial-induced calcite precipitation, *Géotechnique*, 63(4), 302.

- Morsy, A. M., Salem, M. A., & Elmamoulouk, 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.
- Mortezaie, A. R. & Vucetic, M. (2013). Effect of frequency and vertical stress on cyclic degradation and pore water pressure in clay in the NGI simple shear device, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(10), 1727-1737.
- Mulilis, J. P., Seed H. B., Chan, C. K., Mitchell, J. K., & Arulanandan, K. (1977). Effects of Sample Preparation on Sample Preparation, *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 103(Gt2): 91-108.
- Naeim, F. (2001). *The Seismic Design Handbook*. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- Naeini, S. A. & Baziar, M. H. (2000). Effect of Sample Preparation on Steady State, *Geotechnical Measurements: Lab and Field*, 16-29.
- Ng, C. W. W. & Zhou, C. (2014). Cyclic behaviour of an unsaturated silt at various suctions and temperatures, *Géotechnique*, 64(9), 709-720.
- NEHRP Federal Emergency Management Agency. (2015). *Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures-Volume I: Part 1 Provisions, Part 2 Commentary-FEMA P.1050-1*, Washington, D.C.
- Nikitas, G., Arany, L., Aingaran, S., Vimalan, J. & Bhattacharya, S. (2017). Predicting long term performance of offshore wind turbines using cyclic simple shear apparatus, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 92, 678-683
- Ohsaki, Y. (1976), *Spectral Analysis of Earthquake Wave* (Janponca) (Türkçe Çeviren Muzaffer İpek) s:209-268.
- Okur, D. V. & Ansal, A. (2009). Tekrarlı Yük Etkisinde Kil Zeminlerin Lineer Olmayan Elastik Davranışı, *Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskişehir Osmangazi University*, 22(1): 169-185.
- Okur, D.V. (2002). *Farklı dinamik gerilme genlikleri altında ince daneli zeminlerin gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet davranışları*, Doktora Tezi, İTÜ, İstanbul.
- Okur, V., Altun, S., & Ansal, A. (2007). İnce daneli zeminlerde çevrimsel şekil değiştirme, *Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, İstanbul, 199-208.
- Onur, M.I., Tuncan, M. & Tuncan, A. (2014). An experimental study for determining the shear modulus of Toyoura sand, *Second European Conference on Earthquake Engineering And Seismology*, İstanbul, 1-7.
- Onur, M.I, Umu S.U., Okur, D.V., Tuncan, M., & Tuncan, A. (2012). An experimental comparison between the shear and the plane waves by using resonant column test, 22. *International Offshore and Polar Engineering Conference*, Rhodes, 865-870.
- O'reilly, M. P., Brown, S. F. & Overy, R. F., (1991), Cyclic Loading of Silty Clay with Drainage Periods, *Geotechnical Engineering*, 117(2): 354-362.
- Orense, R.P., Hyodo, M., & Kaneko, T. (2012). Dynamic deformation characteristics of pumice sand, *2012 NZSEE Annual Technical Conference*, Christchurch, 1-8.
- Osinov, V. (1998). Theoretical investigation of large-amplitude waves in granular soils, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 17, 13-28.
- Özaydin, K. (1982). *Zemin Dinamiği*, Deprem Mühendisliği Türk Milli Komitesi Yayınları, İstanbul.
- Özaydın, K. (2016). *Zemin Dinamiği*. Deprem Mühendisliği Türk Milli Komitesi
- Özaydın, K. (2011). *Zemin Mekaniği*: Birsen Yayınevi.
- Özkan Y. M. (2017). *Zemin Dinamiğine Giriş*, Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara.
- Papadopolou, A., Kallioglou, P., Tika, T., Papadopoulos, S., & Batum, E. (2010). Liquefaction resistance of silty sands and dynamic properties of cohesive soils from Düzce, Turkey, *Journal of Earthquake Engineering*, 14, 351-362.

Park, D. (1998). *Evaluation of Dynamic Soil Properties; Strain Amplitude Effects on Shear Modulus and Damping Ratio*, Ph. D. Thesis, Cornell University, New York.

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

Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER). (2019). Retrieved June 10, 2019 from <http://www.peer.berkeley.edu/smcat/search.html>.

Parra, E. (1996). *Numerical modeling of liquefaction and lateral ground deformation including cyclic mobility and dilation response in soil systems*. Doktora tezi, Rensselaer Polytechnic Institute.

Patel, A., Bartake, P.P., & Singh, D.N. (2008). An empirical relationship for determining shear wave velocity in granular materials accounting for grain morphology, *Geotechnical Testing Journal*, 32 (1), 1-10.

Polito, C.P. (1999). *The effects of non-plastic and plastic fines on the liquefaction of sandy soils*, Doctor of Philosophy Thesis, Virginia Polytechnic Institute, USA.

Polito, C.P., Green, R.A., & Lee, J. (2008). Pore pressure generation models for sands and silty soils subjected to cyclic loading, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1, 1490-1500.

Priestley, M. J. N., Calvi, G. M., & Kowalsky, M. J. (2007). *Displacement-Based Seismic Design of Structures*. IUSS Press.

Pruiksma, J. P. (2016). Nonlinear and equivalent linear site response analysis for the groningen area. TNO Report, TNO 2016 R10460, 1-30.

Raoul, J., Sedlacek, G. & Tsionis, G. (2012). *Eurocode 8: Seismic Design of Buildings Worked Examples*. <https://doi.org/10.2788/91658>.

Rezaeian, S., & Der Kiureghian, A. (2010). Simulation of synthetic ground motions for specified earthquake and site characteristics. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 39(10), 1155–1180. <https://doi.org/10.1002/eqe.995>

Richter, S., & Huber, G. (2004). Time-dependent behavior of fine-grained model material in resonant column experiments, *Granular Matter*, 6, 195-206.

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

Sabbagh, M., & Faris, M. (2018). Effect of Soil-Structure Interaction on the Seismic Response of Buildings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 114, 463-475. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.05.007>

Sakarya Üniversitesi Sakarya Meslek Yüksekokulu Deprem Araştırma ve Yer Hareketleri (Sismoloji) Resmi Web Sitesi, 2015, <http://www.sismo.sakarya.edu.tr>.

Sas, W., Gabryś, K., Soból, E. & Szymański, A. (2016). Nonlinear Dynamic Properties of Silty Clay from Warsaw Area, *Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW Land Reclamation*, 48(3): 201-220.

Sanin, M., & Wijewickreme, D. (2006). Cyclic shear response of channel-fill fraser river delta silt, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26, 854-869.

Santos, J.A. & Correia, A.G. (2000). Shear modulus of soils under cyclic loading at small and medium strain level, *12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zeland, 1-8.

Schneider J.A., Hoyos Jr, L.P., Mayne, W., Macari, E.J., & Rix, G.J. (1999). Field and laboratory measurements of dynamic shear modulus of Piedmont residual soils, *ASCE Geotechnical Special Publication*, 92, 12-25.

Seed, H. B. (1987). Design Problems in Soil Liquefaction, *Journal of Geotechnical Engineering*, 113(8): 827-845.

- Seed, H. B., vd. (2003). Site effects on ground motion and their role in earthquake hazard analysis. *Earthquake Spectra*, 19(2), 275-296.
- Selçuk, M. E., Kılıç, H., & Özaydın, K. (2007). Comparison of linear and non-linear site response analysis of deep soils. *Sixth National Conference on Earthquake Engineering*. Istanbul, 187-198.
- Seyhan, E., & Stewart, J. P. (2014). Semi-empirical nonlinear site amplification from NGA-West2 data and simulations. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1241–1256. <https://doi.org/10.1193/081712EQS245M>
- Sitharam, T.G., Govindaraju, L., & Sridharan, A. (2004). Dynamic properties and liquefaction potential of soils, *Current Science Special Section: Geotechnics and Earthquake Hazards*, 87 (10), 1370-1378.
- Stafford, P. J., Strasser, F. O. & Bommer, J. J. (2008). An Evaluation of the Applicability of the NGA Models to Ground-Motion Prediction in the Euro-Mediterranean Region. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6 (2): 149–77. <https://doi.org/10.1007/s10518-007-9053-2>.
- Stein, E. R., & Wysession, M. (2003). An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure. Oxford: Blackwell Science. *Geological Magazine*.140(6):733-734. doi:10.1017/S0016756803318837
- Stewart, J. P., vd. (2001). Ground motion amplification in the Sacramento, California, region. *Earthquake Spectra*, 17(3), 465-488.
- Stewart, J. P., Seed, R. B., & Idriss, I. M. (2003). *Earthquake ground motion amplification*. Earthquake Engineering Research Institute.
- Strong-motion Seismograph Networks (K-Net, KiK-Net). (2020). Retrieved April 12, 2020 from <https://www.kyoshin.bosai.go.jp/>
- Suazo, G., Fourie, A., Doherty, J. & Hasan, A. (2016). Effects of confining stress, density and initial static shear stress on the cyclic shear response of finegrained unclassified tailings, *Géotechnique*, 66(5), 401-412.
- Sugano, T. & Yanagisawa, E. (1992). Cyclic undrained shear behavior of sand under surface wave stress conditions, *Earthquake Engineering Tenth World Conference*, Rotterdam, 1323-1328.
- Sun, J., Gong, M. & Tao, X. (2013). Dynamic Shear Modulus of Undisturbed Soil Under Different Consolidation Ratios and Its Effects on Surface Ground Motion, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 12(4): 561-568.
- Sykora, D.W. (1987). *Examination of existing shear wave velocity and shear modulus correlations in soils*, Department of the Army, Washington, USA.
- Şener, A., Özmen, M., Kaya, Z., & Erken, A. (2007). The behavior of soils in dynamic triaxial and torsional shear test systems, 2. *Geoteknik Sempoiumu Bildiriler Kitabı*, Adana, 359-371.
- Taiebat, M., Jeremic, B., Dafalias, Y.F., & Kaynia, A.M. Cheng, Z. (2010). Propagation of seismic waves through liquefied soils, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30, 236-257.
- Tatsuoka, F., Iwasaki, T., Yoshida, S., Fukushima, S., & Sudo, H. (1979). Shear modulus and damping by drained tests on clean sand specimens reconstituted by various methods, *Soils and Foundations*, 19 (1), 39-54.
- TBDY. (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Ankara.
- Teachavorasinskun, S., Thongchim, P., & Lukkunaparasit, P. (2002). Shear modulus and damping of soft Bangkok clays, *Geotech. Journal*, 39, 1201-1208.
- Tekin, İ. (2012). The North Anatolian Fault. Springer Reference. https://doi.org/10.1007/springerreference_225340

Terauchi, T., Altun, S., Erken, A., & Yasuda, S. (1998). Burulmalı dinamik deney sistemiyle sıvılaşma deneyleri, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Yedinci Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı*, İstanbul, 584-591.

Terzaghi, K. (1925). *Erdbaumechanik Auf Bodenphysikalischer Grundlage*, F. Deuticke, Leipzig.

Terzaghi, K. (1925). Principles of soil mechanics, IV-Settlement and consolidation of clay, *Engineering News-Record*, 95(3): 874-878.

Tipi, Ç. (2010). *Zeminlerin dinamik mukavemet özelliklerinin belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri

Tokimatsu, K., & Yoshimi, Y. (1983). Evaluation of liquefaction potential by one-dimensional shear wave analysis. *Soils and Foundations*, 23(4), 50-63.

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

Trifunac, M. D. (1989). Threshold Magnitudes Which Cause the Ground Motion Exceeding the Values Expected during the next 50 Years in a Metropolitan Area. *Geofizika*.

Tsai, C., Lin, C., Dashti, S., & Kirkwood, P. (2021). Influence of centrifuge container boundaries and loading characteristics on evaluation of dynamic properties in dry sand, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 142, 106567.

Tso, W. K., Zhu, T. J. & Heidebrecht, A. C. (1992). Engineering Implication of Ground Motion A/V Ratio. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 11 (3): 133-44. [https://doi.org/10.1016/0267-7261\(92\)90027-B](https://doi.org/10.1016/0267-7261(92)90027-B).

Türkiye ve Yakın Çevresi Deprem Etkinliği, Boğaziçi Üniversitesi, [Erişim: 02.09.2024, <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/wp-content/uploads/2014/08/2023.png>]

United States Geological Survey (USGS). (2020), Retrieved June 15, 2020 from <http://www.usgs.gov/>

Ural, N. (2008). *İnce Daneli Zeminlerde Kil Oranının Sıvılaşmaya Etkisi*, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Utest Malzeme Test Cihazları [Erişim: 02.11.2024, <http://www.utest.com.tr/tr/20365/Tam-Otomatik-Resonant-Kolon-ve-BurgusalKesmeSistemi>]

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.

Ülker, M. B. C. (2004). *Siltli ve killi zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışı*, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Ens., İstanbul.

Üsküloğlu, Ö. (2010). *17 Ağustos 1999 İzmit-Gölcük Depreminin (Mw=7.4) Yalova'da Oluşturduğu İvme Değerlerinin Tahmin Edilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Vardanega, P. J. & Bolton, M. D. (2013). Stiffness of clays and silts: Normalizing shear modulus and shear strain, *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(9), 1575-1589.

Vieira, C. S., Lopes, M. D. L. & Caldeira, L. M. (2013). Sand-geotextile interface characterisation through monotonic and cyclic direct shear tests, *Geosynthetics International*, 20(1), 26-38.

Villacreses, J. P., Caicedo, B., Caro, S., & Yezpez, F. (2020). A novel procedure to determine shear dynamic modulus and damping ratio for partial saturated compacted fine-grained soils *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 131, 106029, (2020).

Vucetic, M., & Dobry, R. (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response. *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(1), 89-107. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1991\)117:1\(89\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1991)117:1(89))

Vucetic, M., Lanzo, G., & Doroudian, M. (1998). Damping at small strains in cyclic simple shear test, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124 (7), 585-597.

Wang, G.X., & Kuwano, J. (1999). Modelling of strain dependency of shear modulus and damping of clayey sand, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 18, 463-471.

Wang, J., Guo, L., Cai, Y., Xu, C. & Gu, C. (2013). Strain and Pore Pressure Development on Soft Marine Clay in Triaxial Tests with a Large Number of Cycles, *Ocean Engineering*, 74: 125-132.

Wang, H., Sato, T., Koseki, J., Chiaro, G. & Tian, J. T. (2016). A system to measure volume change of unsaturated soils in undrained cyclic triaxial tests, *Geotechnical Testing Journal*, 39, 39(4), 532-542.

Werden, S. K., Drnevich, V. P., Hall, J. R., Hankour, C., Conlee, C. T. & Marr, W. A. (2013). New Approach to Resonant Column Testing, *Geotechnical Testing Journal*, 36(2): 169-177.

Whitman, R. V. (1970). The Response of Soils to Dynamic Loadings, *Massachusetts Inst. Of Tech. Cambridge Dept. of Civil Engineering, Report 26*, England.

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

Yamada, S., Hyodo, M., Orense, R. P., Dinesh, S. V. & Hyodo, T. (2008). Straindependent dynamic properties of remolded sand-clay mixtures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(7), 972-981.

Yang, J., Savidis, S., & Roemer, M. (2004). Evaluating liquefaction strength of partially saturated sand, *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130 (9), 975-979.

Yang, J. (2006). Frequency-dependent amplification of unsaturated surface soil layer, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132, 526-531.

Yang, Z., Elgamal, A., & Parra, E. (2003). A computational model for cyclic mobility and associated shear deformation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(12), 1119-1127.

Yang, Z., Zhang, L., Ling, X., Li, G., Tu, Z., & Shi, W. (2019). Experimental study on the dynamic behavior of expansive soil in slopes under freeze-thaw cycles, *Cold Regions Science and Technology*, 163, 27-33.

Yasuhara, K., Hirao, K. & Hyde, A. F. (1992). Effects of Cyclic Loading on Undrained Strength and Compressibility of Clay, *Soils and Foundations*, 32(1): 100-116.

Yasuhara, K. & Toyota N. (1997). Effect of Initial Static Shear Stress on Post-Cyclic Degradation of Plastic Silt, *13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Zurich 439-442.

Yasuhara, K., Murakami, S., Song, B. W., Yokokawa, S. & Hyde, A. F. L. (2003). Post-cyclic Degradation of Strength and Stiffness for Low Plasticity Silt, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(8): 756-769.

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

Yıldız, M., vd. (2009). Zemin büyütme analizleri ve İstanbul örneği. *Journal of Earthquake Engineering*, 10(4), 453-465.

Youn, J., Choo, Y.W., & Kim, D.S. (2008). Measurement of small-strain shear modulus G_{max} of dry and saturated sands by bender element, resonant column, and torsional shear tests, *Can. Geotech. Journal*, 45, 1426-1438.

Yu, S & Shan, Y. (2017). Experimental comparison and study on small-strain damping of remolded saturated soft Clay, *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(5), 2479-2483.

Yunmin, C., Han, K., & Ren-peng, C. (2005). Correlation of shear wave velocity with liquefaction resistance based on laboratory tests, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25, 461-469.

Zhang J. (2004). *Characterizing The Dynamic Properties of South Carolina Soils For Ground Motion Evaluation*, Ph. D. Thesis, The Graduate School of Clemson University, Clemson.

Zhang, D., Li, Q., Liu, E., Liu, X., Zhang, G., & Song, B. (2019). Dynamic properties of frozen silty soils with different coarse-grained contents subjected to cyclic triaxial loading, *Cold Regions Science and Technology*, 157, 64-85.

Zhou, Y., & Chen, Y. (2005). Influence of seismic cyclic loading history on small strain shear modulus of saturated sands, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25, 341-353.

Zhao, J. X., & Xu, H. (2013). V_{s30} and Site Period as Site-Effect Parameters in Response Spectral Ground-Motion Prediction Equations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103 (1): 1–18. <https://doi.org/10.1785/0120110251>.

Zhao, G., Yan, H., Yan, Y., Gao, S., Fan, D., He, Y., & Wang, Y. (2020). Experimental study on the dynamic properties of lime-solidified soft soil under cyclic loading, *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 671.

Zhuang, H., Wang, R., Chen, G., Miao, Y. & Zhao, K. (2018). Shear modulus reduction of saturated sand under large liquefaction-induced deformation in cyclic torsional shear tests, *Engineering Geology*, 240, 110-122.