Zemin Büyütmesinin TBDY Tarafından Parametrik Olarak Elde Edilmesi

Melis Ersoy

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2025

Parametric Evaluation of Site Amplification According to TBDY

Melis Ersoy

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of .Civil Engineering

January 2025

Zemin Büyütmesinin TBDY Tarafından Parametrik Olarak Elde Edilmesi

Melis Ersoy

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Geoteknik Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

Danışman: Doç. Dr. Kamil Bekir AFACAN

Ocak 2025

ONAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Melis Ersoy'un YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Zemin Büyütmesinin TBDY Tarafından Parametrik Olarak Elde Edilmesi" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Kamil Bekir AFACAN
İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:
Üye: Doç. Dr. Kamil Bekir Afacan
Üye: Dr. Öğr. Üyesi Eren Balaban
Üye: Prof. Dr. Derviş Volkan Okur

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

Prof. Dr. ....
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Kamil Bekir AFACAN danışmanlığında hazırlamış olduğum "Zemin Büyütmesinin TBDY Tarafından Parametrik Olarak Elde Edilmesi" başlıklı Yüksek Lisans tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 29/01/2025

Melis Ersoy

İmza

ÖZET

Geoteknik deprem mühendisliğinde, sahaya özel yer hareketi tepkilerinin doğru tahmini, etkili tasarım ve risk azaltma için kritik öneme sahiptir. Yumuşak zeminler, düşük kayma mukavemeti ve yüksek sıkıştırılabilirlik özellikleri nedeniyle depremler sırasında sismik dalgalarla karmaşık etkileşimler sergileyerek yer hareketlerini büyütebilir ve yapısal kırılganlıkları artırabilir. Bu çalışma, saha verileri ve sayısal modelleme kullanarak, yumuşak zeminlerin saha tepkisi üzerinde yer hareketlerini ölçeklendirme yöntemlerinin etkisini incelemiştir. Spektral eşleştirme ve Tepe Yer İvmesi (PGA) eşleştirme yöntemlerinin karşılaştırıldığı analizlerde, spektral eşleştirmenin hedef tepki spektrumu ile uyum sağlayarak daha ayrıntılı bir sismik tepki sunduğu, PGA eşleştirmenin ise basitlik ve hesaplama verimliliği açısından avantajlı olduğu, ancak frekansa bağlı etkileri tam yansıtamadığı görülmüştür. kullanılarak yapılan eşdeğer lineer ve lineer olmayan analizler, PGA'nın saha tepkisini etkileyen temel bir parametre olduğunu, ancak frekans içeriği ve sarsıntı süresi gibi faktörlerin de saha tepkisi üzerinde önemli rol oynadığını ortaya koymuştur. Daha yüksek frekanslı bileşenlerin sismik kuvvetleri şiddetlendirdiği, uzun süreli sarsıntıların ise zemin deformasyonlarını artırarak oturma ve sıvılaşma riskini yükselttiği belirlenmiştir. Bu bulgular, özellikle deprem mühendislerine sismik risk değerlendirme süreçlerinde önemli bir rehberlik sunmaktadır. Çalışma, yumuşak zeminlerin dinamik davranışını anlamada ve sismik tasarım stratejilerini iyileştirmede kullanılan ölçeklendirme yöntemlerinin seçiminde dikkat edilmesi gereken hususları vurgulamaktadır. Ayrıca, spektral eşleştirmenin daha ayrıntılı bir sismik temsil sağladığı durumlarda tercih edilmesi gerektiğini, ancak basitlik ve hızın ön planda olduğu uygulamalarda PGA eşleştirmenin de yeterli bir çözüm sunabileceğini göstermektedir. Sonuç olarak, bu çalışma, yumuşak zeminlerin sismik davranışını anlamaya yönelik önemli katkılar sağlarken, depreme dayanıklı ve güvenilir yapı tasarımı için gereken kapsamlı bilgiyi sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: PGA, Yumuşak Zeminler, Saha Tepkisi, Sismik Risk Değerlendirmesi, Ölçeklendirme, Sahaya Özel Analiz, Deprem Karakteristikleri.

SUMMARY

In geotechnical earthquake engineering, accurately predicting site-specific ground motion responses is crucial for effective design and risk mitigation. Soft soils, due to their low shear strength and high compressibility, exhibit complex interactions with seismic waves during earthquakes, which can amplify ground motion and increase structural vulnerability. This study investigates the effects of ground motion scaling methods on the site response of soft soils using both field data and numerical modeling. The analysis compares spectral matching and Peak Ground Acceleration (PGA) matching methods. It is observed that spectral matching, by aligning with the target response spectrum, provides a more detailed seismic response, while PGA matching offers advantages in terms of simplicity and computational efficiency, though it may not fully capture frequency-dependent effects. Equivalent linear and nonlinear analyses conducted using these methods reveal that PGA is a key parameter influencing site response, although factors such as frequency content and shaking duration also play significant roles. Higher frequency components were found to intensify seismic forces, while longer-duration shaking tended to increase ground deformation, leading to greater settlement and liquefaction risks. These findings offer valuable guidance, particularly for earthquake engineers involved in seismic risk assessment processes. The study emphasizes the importance of considering scaling methods when understanding the dynamic behavior of soft soils and improving seismic design strategies. Furthermore, it suggests that spectral matching should be preferred when a more detailed seismic representation is required, while PGA matching may still provide an adequate solution in cases where simplicity and speed are prioritized. Ultimately, this research contributes to a deeper understanding of the seismic behavior of soft soils and provides essential information for the design of earthquake-resistant and reliable structures.

Keywords: PGA, Soft Soils, Site Response, Seismic Risk Assessment, Scaling, Site Specific Analysis, Earthquake Characteristics.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans ve lisans eğitimim boyunca beni destekleyen, bilgilerini benimle paylaşan ve geoteknik bilim dalını seçmemde büyük etkileri olan akademik olarak örnek aldığım değerli danışman hocam Doç. Dr. Kâmil Bekir AFACAN'a en içten saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tüm hayatım boyunca desteklerini ve güvenlerini benden hiç esirgemeyen her koşulda bana sunabildikleri tüm imkanları sunan, eğitim hayatım boyunca beni hep teşvik eden sevgili babam Ekrem ERSOY ve annem Nuray ERSOY'a teşekkür ederim.

Beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan ve varlığını hep hissettiğim ilk öğretmenim ve kız kardeşim Ezgi ERSOY'a sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreç boyunca her zorlukta yanımda olan ve bana istediğim herşeyi başarabileceğime inandıran erkek arkadaşım Fatih Oğuzhan EKMEN'e sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans ve iş hayatını birlikte yürütmeme destek veren SELKA ailesine teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET ... vi
SUMMARY ... vii
TEŞEKKÜR ... viii
İÇİNDEKİLER ... ix
ŞEKİLLER DİZİNİ ... xi
ÇİZELGELER DİZİNİ ... xv
1. GİRİŞ ve AMAÇ ... 1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI ... 3
3. BÖLGENİN JEOLOJİSİ VE DEPREMSELLİĞİ ... 10
3.1. Türkiye'nin Depremselliği ... 10
4.KURAMSAL TEMELLER ... 11
4.1.Yer Hareketi Parametreleri ... 11
4.1.1.Genlik parametreleri ... 12
4.1.1.1.Pik ivme ... 13
4.1.1.2.Pik hız ... 14
4.1.1.3.Pik yer değiştirme ... 15
4.1.2. Frekans içeriği ve spektral parametreler ... 15
4.1.2.1. Fourier spektrumu ... 16
4.1.2.1. Tepki spektrumu ... 16
4.1.3. Yer hareketi süresi ... 18
4.1.4. Depremlerin karakteristik özellikleri ... 18
4.1.4.1. Arias şiddeti (arias ıntensity, IA) ... 19
4.1.4.2. Karakteristik yoğunluk (characteristic ıntensity, IC) ... 20
4.1.4.3.Toplam mutlak hız (cumulative absolute velocity, CAV) ... 20
4.1.4.4. Housner yoğunluğu (housner ıntensity, HI) ... 20
4.1.4.5. Baskın periyot (predominant period) ... 21
4.1.5.Amplifikasyon ... 21
4.2. Zemin Davranış Analizlerinde Kullanılan Parametreler ... 22
4.2.1. Sönümleme oranı (D) ve kayma modülünün (G) belirlenmesi ... 22
4.3.Sahaya Özel Dinamik Analiz ... 26
4.4.Deprem Yönetmelikleri ... 29

İÇİNDEKİLER

Sayfa

4.4.1.Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) 30
4.4.1.1. Tasarım spektral ivme katsayıları 30
4.4.1.2. Yatay elastik tasarım spektrumu 31
4.4.1.3. Düşey elastik tasarım spektrumu 32
4.4.2.ASCE 7 (Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures) 33
4.4.3. Eurocode 8 (Design of structures for earthquake resistance) 35
4.4.3.1. Yatay elastik tasarım spektrumu 35
4.4.3.2. Düşey elastik tasarım spektrumu 38
4.4.4.Yönetmeliklerin kıyaslanması 38
5.MATERYAL VE YÖNTEM 44
5.1. Deepsoil 44
5.1.1. Doğrusal olmayan analiz (NL) 44
5.1.2. Eşdeğer doğrusal analiz (EL) 45
5.1.3. Darendeli (2001) 46
5.2. SeismoSignal 46
5.3.SeismoMatch 47
5.4. Çalışmada Kullanılan Zemin Özellikleri 47
5.5.Analizlerde Kullanılan Deprem Kayıtlarının Seçimi ve Ölçeklendirilmesi 48
6. BULGULAR VE TARTIŞMA 54
6.1. Anakayada Oluşan İvme Değerleri 54
6.2. Yüzey Davranışının Elde Edilmesi 70
6.3. Spektral İvme Değerlendirmesi 89
6.4. Zemin Büyütme Değerlendirmesi (Amplifikasyon Faktörü) 93
6.5. Eşdeğer Doğrusal Analiz Sonuçlarının Doğrusal Olmayan Analizler ile Karşılaştırılması 97
7.SONUÇ VE ÖNERİLER 104
KAYNAKLAR DİZİNİ 106

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

4.1. Loma Prieta depremine ait ivme-hız-yer değiştirme grafikleri 13
4.2. Loma Prieta depremine ait ivme-zaman grafiğine ait pik ivme 14
4.3. Loma Prieta depremine ait hız-zaman grafiğine ait pik hız..... 14
4.4. Loma Prieta depremine ait deplasman-zaman grafiğine ait pik yer değiştirme 15
4.5. Loma Prieta depremine ait Fourier genlik spektrumu 17
4.6. Tanjant (G_{tan}) ve sekant (G_{sec}) kayma modülleri 23
4.7. Maksimum kayma modülü (G_{max}) ve sönümleme oranı (D) 24
4.8. Vucetic ve Dobry, 1991'e göre kil zeminler için kayma modülü azalım eğrisi 26
4.9. AFAD tarafından sunulan yerel tasarım spektrum ekranı (AFAD, 2024). 28
4.10. Türkiye deprem tehlike haritasının yıllara göre değişimi (AFAD, 2024) 28
4.11. Yatay Elastik Tasarım Spektrumu (TBDY,2018) 31
4.12. Düşey Elastik Tasarım Spektrumu (TBDY,2018)..... 32
4.13. Tasarım Tepki Spektrumu (ASCE,2002) 34
4.14. Elastik Tepki Spektrumunun Şekli (Eurocode 8) 35
4.15. Zemin türleri A'dan E'ye kadar önerilen Tip 1 elastik tepki spektrumları (%5 sönümleme için) (Eurocode 8)..... 37
4.16. Zemin türleri A'dan E'ye kadar önerilen Tip 1 elastik tepki spektrumları (%5 sönümleme için) (Eurocode 8)..... 37
4.17. ASCE-2002 ve TBDY-2018 F_s ve F_a (kısa periyot bölgesi) karşılaştırması..... 39
4.18. ASCE-2002 ve TBDY-2018 F_1 (1.0 saniye periyot) karşılaştırması 39
4.19. ASCE-2002 ve TBDY-2018 S_{DS} karşılaştırması..... 41
4.20. ASCE-2002 ve TBDY-2018 S_{D1} karşılaştırması..... 42
5.1. Fay Çeşitleri..... 48
5.2. Kuzey Anadolu fay zonu 49
5.3. Loma Prieta orijinal ivme 51
5.4. Loma Prieta PGA'ya göre ölçeklendirilmiş ivme 51
5.5. Loma Prieta spektraya göre ölçeklendirilmiş ivme 52
5.6. Loma Prieta Yüzey İvme Kayıtları..... 52
5.7. Loma Prieta PGA'ya göre Ölçekli Yüzey İvme Kayıtları..... 53

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

5.8. Loma Prieta Spektraya göre Ölçekli Yüzey İvme Kayıtları 53

6.1 Orijinal ivmeler: a) RSN4040, b) RSN825, c) RSN313, d) RSN6906, e) RSN1617, f) RSN821, g) RSN125, h) RSN126, ı) RSN160, i) RSN285, j) RSN5657, k) RSN1120, l) RSN779, m) RSN4456, n) RSN4219, o) RSN1063, ö) RSN139, p) RSN3968..... 58

6.2: Orijinal İvmeler İçin Spektra Uyuşumu 59

6.3. PGA'ya göre Ölçekli İvmeler: a) RSN4040, b) RSN825, c) RSN313, d) RSN6906, e) RSN1617, f) RSN821, g) RSN125, h) RSN126, ı) RSN160, i) RSN285, j) RSN5657, k) RSN1120, l) RSN779, m) RSN4456, n) RSN4219, o) RSN1063, ö) RSN139, p) RSN3968. 64

6.4: PGA'ya göre Ölçekli İvmeler İçin Spektra Uyuşumu..... 64

6.5. Spektraya göre Ölçekli İvmeler: a) RSN4040, b) RSN825, c) RSN313, d) RSN6906, e) RSN1617, f) RSN821, g) RSN125, h) RSN126, ı) RSN160, i) RSN285, j) RSN5657, k) RSN1120, l) RSN779, m) RSN4456, n) RSN4219, o) RSN1063, ö) RSN139, p) RSN3968. 69

6.6: Spektraya göre Ölçekli İvme Spektra Uyuşumu 70

6.7. Orijinal İvmeler Kullanılarak Eşdeğer Doğrusal Ve Doğrusal Olmayan (Nonlinear) Analizlerle Elde Edilen Yüzey İvme Kayıtları: a) RSN4040, b) RSN825, c) RSN313, d) RSN6906, e) RSN1617, f) RSN821, g) RSN125, h) RSN126, ı) RSN160, i) RSN285, j) RSN5657, k) RSN1120, l) RSN779, m) RSN4456, n) RSN4219, o) RSN1063, ö) RSN139, p) RSN3968. 75

6.8. PGA'ya göre Ölçekli İvmeler Kullanılarak Eşdeğer Doğrusal Ve Doğrusal Olmayan (Nonlinear) Analizlerle Elde Edilen Yüzey İvme Kayıtları: a) RSN4040, b) RSN825, c) RSN313, d) RSN6906, e) RSN1617, f) RSN821, g) RSN125, h) RSN126, ı) RSN160, i) RSN285, j) RSN5657, k) RSN1120, l) RSN779, m) RSN4456, n) RSN4219, o) RSN1063, ö) RSN139, p) RSN3968. 81

6.9. Spektraya göre Ölçekli İvmeler Kullanılarak Eşdeğer Doğrusal Ve Doğrusal Olmayan (Nonlinear) Analizlerle Elde Edilen Yüzey İvme Kayıtları: a) RSN4040, b) RSN825, c) RSN313, d) RSN6906, e) RSN1617, f) RSN821, g) RSN125, h) RSN126, ı) RSN160, i) RSN285, j) RSN5657, k) RSN1120, l) RSN779, m) RSN4456, n) RSN4219, o) RSN1063, ö) RSN139, p) RSN3968.... 87

6.10. Orijinal İvmeler Kullanılarak Doğrusal Olmayan (Nonlinear) Analizlerle Elde Edilen Spektral İvme-Periyot Değerleri 89

6.11. Orijinal İvmeler Kullanılarak Eşdeğer Doğrusal Analizlerle Elde Edilen Spektral İvme-Periyot Değerleri 90

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

6.12. PGA'ya göre Ölçekli İvmeler Kullanılarak Doğrusal Olmayan (Nonlinear) Analizlerle Elde Edilen Spektral İvme-Periyot Değerleri 90

6.13. PGA'ya göre Ölçekli İvmeler Kullanılarak Eşdeğer Doğrusal Analizlerle Elde Edilen Spektral İvme-Periyot Değerleri 91

6.14. Spektraya göre Ölçekli İvmeler Kullanılarak Doğrusal Olmayan (Nonlinear) Analizlerle Elde Edilen Spektral İvme-Periyot Değerleri 92

6.15. Spektraya göre Ölçekli İvmeler Kullanılarak Eşdeğer Doğrusal Analizlerle Elde Edilen Spektral İvme-Periyot Değerleri 92

6.16. Orijinal İvmeler Kullanılarak Eşdeğer Doğrusal Analizlerle Elde Edilen Amplifikasyon Faktörü (Büyütme) Değerleri 93

6.17. Orijinal İvmeler Kullanılarak Doğrusal Olmayan (Nonlinear) Analizlerle Elde Edilen Amplifikasyon Faktörü (Büyütme) Değerleri 94

6.18. PGA'ya göre Ölçekli İvmeler Kullanılarak Eşdeğer Doğrusal Analizlerle Elde Edilen Amplifikasyon Faktörü (Büyütme) Değerleri 95

6.19. PGA'ya göre Ölçekli İvmeler Kullanılarak Doğrusal Olmayan (Nonlinear) Analizlerle Elde Edilen Amplifikasyon Faktörü (Büyütme) Değerleri 95

6.20. Spektraya göre Ölçekli İvmeler Kullanılarak Eşdeğer Doğrusal Analizlerle Elde Edilen Amplifikasyon Faktörü (Büyütme) Değerleri 96

6.21. Spektraya göre Ölçekli İvmeler Kullanılarak Doğrusal Olmayan (Nonlinear) Analizlerle Elde Edilen Amplifikasyon Faktörü (Büyütme) Değerleri 96

6.22. Orijinal Yüzey İvme Kayıtlarının T=0.01 saniyede PSA değerlerinin ve Deprem Karakteristiklerinin Kıyaslanması 98

6.23. Orijinal Yüzey İvme Kayıtlarının T=0.1 saniyede PSA değerlerinin ve Deprem Karakteristiklerinin Kıyaslanması 99

6.24. Orijinal Yüzey İvme Kayıtlarının T=1 saniyede PSA değerlerinin ve Deprem Karakteristiklerinin Kıyaslanması 99

6.25. PGA'ya göre Ölçekli Yüzey İvme Kayıtlarının T=0.01 saniyede PSA değerlerinin ve Deprem Karakteristiklerinin Kıyaslanması 100

6.26. PGA'ya göre Ölçekli Yüzey İvme Kayıtlarının T=0.1 saniyede PSA değerlerinin ve Deprem Karakteristiklerinin Kıyaslanması 100

6.27. PGA'ya göre Ölçekli Yüzey İvme Kayıtlarının T=1 saniyede PSA değerlerinin ve Deprem Karakteristiklerinin Kıyaslanması 101

6.28. Spektraya göre Ölçekli Yüzey İvme Kayıtlarının T=0.01 saniyede PSA değerlerinin ve Deprem Karakteristiklerinin Kıyaslanması 102

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

6.29. Spektraya göre Ölçekli Yüzey İvme Kayıtlarının T=0.1 saniyede PSA değerlerinin ve Deprem Karakteristiklerinin Kıyaslanması 102

6.30. Spektraya göre Ölçekli Yüzey İvme Kayıtlarının T=1 saniyede PSA değerlerinin ve Deprem Karakteristiklerinin Kıyaslanması..... 103

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge **Sayfa**

4.1. Deprem Kayıtları Kıyaslanması 19
4.2. Yerel Zemin Sınıfları (TBDY,2018). 27
4.3. Yerel Zemin Etki Katsayıları (TBDY,2018) 31
4.4. Zemin Sınıfına ve Haritalanmış Kısa Periyot Maksimum Göz Önüne Alınan Deprem Spektral İvmesine Bağlı Olarak Fa Değerleri (ASCE,2002) 33
4.5. Zemin Sınıfına ve Haritalanmış 1 Saniye Periyot Maksimum Göz Önüne Alınan Deprem Spektral İvmesine Bağlı Olarak F_v Değerleri (ASCE,2002) 34
4.6. Önerilen Tip I Elastik Tepki Spektrumunu Tanımlayan Parametrelerin Değerleri (Eurocode 8) 36
4.7. Önerilen Tip 2 Elastik Tepki Spektrumunu Tanımlayan Parametrelerin Değerleri (Eurocode 8) 37
4.8. Düşey elastik tepki spektrumunu tanımlayan parametrelerin önerilen değerleri (Eurocode 8) 38
4.9. TBDY-2018 yönetmelik düzenlerine göre hesaplanan S_{DS} değerleri..... 41
4.10. ASCE-2002 yönetmelik düzenlerine göre hesaplanan S_{DS} değerleri 41
4.11. TBDY-2018 yönetmelik düzenlerine göre hesaplanan S_{D1} değerleri..... 42
4.12. ASCE-2002 yönetmelik düzenlerine göre hesaplanan S_{D1} değerleri 42
5.1. PEER veri tabanın temin edilen deprem kayıtları 49
5.2. SeismoSignal programından temin edilen deprem özellikleri..... 50
6.1. Orijinal Anakaya İvme Kayıtları ve Orijinal Yüzey İvme Kayıtları Kıyaslanması 76
6.2. PGA'ya göre Ölçekli Anakaya ve Orijinal Yüzey İvme Kayıtları Kıyaslanması 82
6.3. Spektraya göre Ölçekli Anakaya ve Orijinal Yüzey İvme Kayıtları Kıyaslanması 88

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
M_W:	Deprem büyüklüğü
PGA:	Pik yer ivmesi
PGV:	Pik yer hızı
PGD:	Pik yer deplasmanı
S_a:	Spektral ivme
S_v:	Spektral hız
S_d:	Spektral yer değiştirme
G_{max}:	Maksimum kayma modülü
D:	Sönümleme oranı
S_S:	Kısa dönem spektral tepki katsayısı
S_1:	Uzun dönem spektral tepki katsayısı
F_S:	Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı
F_1:	1.0 saniye periyot için yerel zemin etki katsayısı
S_{DS}:	Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı
S_{D1}:	1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı
T:	Periyot
NL:	Doğrusal olmayan analiz
EL:	Eşdeğer doğrusal analiz
PSA:	Tasarım tepki spektrumu

Kısaltmalar	**Açıklama**
m	Metre
Max	Maksimum
PEER	Pacific Earthquake Engineering Research
PSHA	Olasılıksal sismik tehlike analizi
sn	Saniye
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018
UHS	Eşdeğer tehlike spektrumu

1. GİRİŞ ve AMAÇ

Türkiye, aktif fay hatları üzerinde yer aldığı için sık sık büyük depremler yaşamaktadır. 1999 yılında İzmit'te meydana gelen 7.4 büyüklüğündeki deprem, yaklaşık 17.000 kişinin ölümüne ve büyük maddi hasara yol açmıştır. 2011 yılında Van ilinde meydana gelen 7.2 büyüklüğündeki deprem ise 600'den fazla can kaybına ve büyük yıkıma neden olmuştur. 30 Ekim 2020'de İzmir'de gerçekleşen 7.0 büyüklüğündeki depremde ise 114 kişi hayatını kaybetmiş ve 1000'den fazla bina hasar görmüştür. Daha yakın bir tarihte Kahramanmaraş'da 6 Şubat 2023 tarihinde Türkiye tarihindeki en yıkıcı depremlerden birini yaşamıştır. Bu büyük felaket, 7.8 ve 7.5 büyüklüğündeki iki ayrı depremle başlamıştır. Kahramanmaraş merkezli olan bu depremler, başta Kahramanmaraş ve çevresindeki iller olmak üzere geniş bir bölgeyi etkileyerek büyük can ve mal kaybına yol açmıştır. Depremler, 10 ilde ciddi yıkımlara sebep olmuş ve çok sayıda bina çökmüştür.

Sismik dalgalar, deprem kaynağından başlayarak zemin katmanlarında farklı hızlarla ilerler. Yüzeye ulaştıklarında titreşimlere neden olurlar. Bu titreşimlerin şiddeti ve süresi, depremin büyüklüğü, kaynağın uzaklığı, ortamın fiziksel özellikleri ve zemin karakteristikleri gibi faktörlere bağlıdır. Anakaya üzerinde hareket etmeye başlayan sismik dalgalar, farklı özelliklere sahip gevşek zemin tabakalarında da ilerlemeye devam eder. Bu zemin tabakalarının özellikleri, yüzeyde gözlemlenen titreşim hareketlerinin özelliklerini belirler. Bazı zemin tabakaları sismik dalgaları sönümlerken, bazıları da bu dalgaları büyütme eğilimindedir. Zemin büyütmesi, genliklerin artışı şeklinde kendini gösterir. (Yalçınkaya, 2010)

Deprem mühendisliği, depremler sırasında yapıların güvenliğini sağlamak için zemin davranışını ve zemin-yapı etkileşimini analiz eder. Yerel zemin özellikleri, tekrarlı yükleme ve deprem sırasında oluşan yer ivmesi genlikleri ile frekans içerikleri, yapıların davranışını etkiler. Bu nedenle, zemin tabakalarının deprem sırasındaki ve sonrasındaki davranışlarını belirlemek, sağlam yapılar tasarlamak için önemlidir.

Ülkemizdeki Bina Deprem Yönetmelikleri, yerel zemin koşullarına göre yapıların depreme dayanıklı tasarlanması için 1975'te başlamış ve zamanla gelişmiştir. 2018 tarihli

TBDY, önceki yönetmeliklere göre yerel zemin sınıflarının belirlenmesini ve deprem yer hareketi spektrumlarının yapının konumu, faya uzaklığı ve zemin özelliklerine göre hesaplanmasını öngörmüştür. ZF zemin sınıfı için sahaya özel zemin analizlerinin yapılması zorunlu hale getirilmiş, diğer zemin sınıfları için de önerilmiştir. Ayrıca, diğer ülkelerdeki yönetmeliklerde de deprem ivme kayıtlarının seçimi, ölçeklendirilmesi ve tasarım spektrum eğrilerinin elde edilmesi detaylı şekilde belirtilmiştir.

Bu tez çalışmasında Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY2018) deprem etkisi altında güvenli bir tasarım amacıyla incelenmiştir. Çalışma esnasında birçok aşamadan oluşan bir boyutlu yer tepki analiz programı DeepSoil kullanılarak sahaya özel sismik ölçeklendirme yöntemleri ile birlikte analizler gerçekleştirilmiştir. Sahaya özel sismik ölçeklendirme, yerel zemin koşulları, deprem büyüklüğü ve fay hattına uzaklık gibi faktörleri dikkate alarak, yapıların depremde maruz kalacağı sismik etkileri doğru bir şekilde belirlemeyi amaçlamaktadır. Bu süreç, yapıların güvenli bir şekilde analiz edilmesini ve yerel yönetmeliklere uygun olarak tasarlanmasını sağlar. Bu çalışmada, spektral eşleştirme ve PGA eşleştirme gibi yöntemler incelenerek, farklı ivme kayıtları eşdeğer lineer ve lineer olmayan yaklaşımlarla analiz edilerek en gerçekçi sismik etkiler belirlenmeye çalışılmıştır.

Ayrıca farklı ülkelerden seçilen 18 depremde tek kıyasın PGA olamayacağı keşfedilmiştir. PGA (maksimum ivme) ve diğer deprem parametreleri, özellikle yumuşak zeminlerde yapı güvenliğini doğrudan etkileyen kritik faktörlerdir. Yüksek PGA seviyeleri, zeminde deformasyon ve sıvılaşma riskini artırarak yapıların kayma, oturma veya tamamen çökme gibi ciddi sorunlarla karşılaşmasına neden olabilir. Yumuşak zeminlerin doğal frekansları, zemin türüne ve özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Eğer bu frekanslar deprem dalgalarının frekanslarıyla çakışırsa, rezonans etkisi oluşur ve bu durum yapıların maruz kaldığı yükleri önemli ölçüde artırarak daha büyük hasarlara yol açabilir. Özellikle yüksek binalar, köprüler ve altyapı sistemleri bu etkilerden daha fazla zarar görebilir. Bu nedenle saha analizleri, zeminin deprem karşısındaki tepkisini anlamak, sıvılaşma riskini belirlemek ve rezonans etkilerini değerlendirmek açısından büyük önem taşımaktadır. Yapı güvenliğini sağlamak ve olası hasarları en aza indirmek için mühendisler, bu saha çalışmalarından elde edilen verileri dikkate alarak uygun zemin iyileştirme tekniklerini ve yapı tasarım kriterlerini belirlemelidir. Böylece deprem sırasında yapıların daha dayanıklı olması sağlanabilir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Li vd. (2022) tarafından yapılan çalışmada , yumuşak zeminlerin sismik çökme davranışı, OpenSees yazılımı kullanılarak doğrusal olmayan dinamik sonlu elemanlar analizi ile incelenmiştir. Farklı özelliklere sahip zemin hareketlerinin, yumuşak zemin üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları, yüksek zirve ivme (PGA) değerlerinin zemin çökme düzeyini artırdığını, sismik çökme derinliğini büyüttüğünü ve yüzeydeki hasar oranını ciddi şekilde yükselttiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, zemin hareketlerinin frekans karakteristiklerinin de sismik çökme üzerinde kritik bir rol oynadığı bulunmuştur. Özellikle düşük frekanslı veya yüksek genlikli hareketlerin, zemin alanının doğal frekansına yakın bir frekans içeriği taşıması durumunda rezonans etkisi nedeniyle daha büyük sismik çökme deformasyonlarına yol açtığı tespit edilmiştir. Bu bulgular, yumuşak zeminlerin deprem yükleri altındaki davranışını daha iyi anlamamıza yardımcı olmakta ve deprem bölgelerinde zemin özelliklerinin dikkate alınmasının önemini vurgulamaktadır. Ayrıca, bu tür analizler, özellikle deprem riski yüksek bölgelerde yapılacak yapıların tasarımında ve zemin iyileştirme yöntemlerinin belirlenmesinde önemli bir rehber sunmaktadır.

Graizer vd. (2009) tarafından yapılan çalışmada, sığ kabuk depremlerinden kaynaklanan yatay yer hareketlerinin 5% sönümlü psödospektral ivme (SA) değerlerini tahmin etmek için PGA (zirve yer ivmesi) tabanlı yeni bir model geliştirilmiştir. Model, moment büyüklüğü, fay mesafesi ve V_{S30} (üst 30 m'deki kayma dalgası hızı) gibi parametrelerle çalışır, PGA'yı ölçekleme faktörü olarak entegre eder ve geleneksel katsayı tablolarını ortadan kaldırarak uygulamayı kolaylaştırır. NGA veri tabanına dayanan bu model, 2003 San Simeon ve 2004 Parkfield depremleri gibi verilerle desteklenmiştir. PGA zayıflama modellerinden bağımsız olan model, deprem kayıtlarından tepki spektrumlarının tahmin edilmesini sağlar.

Li vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada, zemin sahaları için olasılıksal sismik tehlike analizi (PSHA) gerçekleştirilmiştir. Amaç, doğru zemin Eşdeğer Tehlike Spektrumu ve bununla ilişkili sismik tehlike eğrilerini elde etmektir. Bu süreçte, zemin parametrelerindeki farklılıklar, zeminin doğrusal olmayan tepkileri ve vektör değerli saha yanıt analizleri dikkate alınarak, PSHA'ya dahil edilmiştir. Çalışmada, örnek bir zemin

sahası üzerinde yapılan analizlerde, zemin parametrelerindeki varyasyonların ve zemin doğrusal olmayan özelliklerinin, elde edilen UHS ve sismik tehlike eğrileri üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Bu bağlamda, zeminin farklı özellikleri, zemin hareketlerine verdiği tepkiler ve saha yanıtları, sismik tehlike değerlendirmeleri için kritik parametreler olarak incelenmiştir. Böylece, zemin sahalarının sismik risklerinin daha doğru bir şekilde hesaplanması sağlanarak, mühendislik uygulamaları için daha güvenilir sonuçlar elde edilmesi hedeflenmiştir.

Apriadi vd. (2024) tarafından yapılan çalışmada , değişken zirve yer ivmesi (PGA) değerleri, havza şekli, derinlik ve genişlik parametreleri ile zemin yüzeyindeki farklı gözlem noktalarındaki spektral ivme arasındaki ilişki ayrıntılı bir şekilde incelenmiş ve rapor edilmiştir. Çalışmanın amacı, çeşitli zemin hareketi koşullarında zemin yüzeyindeki spektral ivme değişimlerini etkileyen faktörleri araştırmaktır. Bu çerçevede, havza geometrisi, zemin derinliği ve genişliği gibi faktörlerin, yer hareketlerinin spektral tepkisi üzerindeki etkileri ele alınmıştır. Elde edilen bulgulara dayanarak, bu faktörlerin spektral ivme hesaplamalarına nasıl dahil edileceğine dair bir dizi ölçekleme faktörü geliştirilmiştir. Bu faktörler, özellikle 1-D analizlere dayalı olarak oluşturulan mevcut sismik tehlike haritalarından elde edilen spektral ivme hesaplamalarında kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Önerilen ölçekleme faktörleri, yerel zemin koşulları ve havza şeklinin sismik hareket üzerindeki etkilerini daha doğru bir biçimde yansıtarak, sismik tehlike analizlerinde daha hassas ve güvenilir sonuçlar elde edilmesine katkı sağlayacaktır. Bu yaklaşım, özellikle deprem riski yüksek olan bölgelerde yapı tasarımlarının daha sağlam ve güvenli bir şekilde yapılmasına olanak tanıyacaktır.

Hashash vd. (2015) çalışmalarında, zeminlerin ortalama V_s profilleri ampirik korelasyonlar kullanılarak tahmin edilmesiyle ilgilenmişlerdir. Zemin dinamik özellikleri ve yayımlanmış modül azaltma ve sönümleme eğrileri ile birlikte, zemin indeks özelliklerine dayanan plastiklik modeli parametreleriyle belirlenmiştir. Hesaplanan ve ölçülen yatay kaymalar, ivmeler, kesme deformasyonları, spektral ivmeler ve arias yoğunlukları sunulmuş ve bu değerlerin ortalama artışlar ve varyanslar açısından karşılaştırılması yapılmıştır. Elde edilen bulgular, zeminlerin deprem gibi dinamik yükler altındaki davranışlarını daha iyi anlamaya yardımcı olmuş ve mühendislik uygulamaları için önemli veriler sunmuştur.

Al Atik ve Abrahamson (2010) çalışmalarında, yapıların doğrusal olmayan dinamik analizlerinde sismik etkiler genellikle, tepki spektrumları belirli bir hedef tepki spektrumu ile uyumlu olan ivme zaman serileri şeklinde tanımlamışlardır. Bu çalışmada, gerçekçi tasarım ivme zaman serileri oluşturmak amacıyla kullanılan zaman alanı spektral eşleştirme yöntemi incelenmektedir. Mevcut ivme kayıtlarını değiştirme sürecinde zemin hareketinin durağan olmayan özelliklerini koruyan yeni ve geliştirilmiş bir düzenleme fonksiyonu tanıtılmıştır. Bu yeni düzenleme dalga formu, sayısal çözümlerin kararlılığını, etkinliğini ve hızını artırırken, elde edilen hız ve yer değiştirme zaman serilerinde oluşabilecek sapmaları da engellemektedir.

Chen vd. (2009) tarafından yapılan araştırmada, Yangtze Nehri'nin alt havzasında bulunan Nanjing, Yancheng, Changzhou, Taizhou, Qidong ve Şanghay'daki derin yumuşak zemin sahaları üzerinde kapsamlı bir sismik analiz gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, bu sahaların deprem etkilerine verdiği tepkiler incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Taft, El Centro ve Northridge depremlerine ait ivme kayıtları, zemin hareketlerini simüle etmek amacıyla kullanılmış olup, bu depremlerin tepe ivme değerleri sırasıyla 0.35 m/s^2, 0.70 m/s^2 ve 0.98 m/s^2 olarak belirlenmiştir. Farklı ivme seviyeleri ve girdi hareketleri dikkate alınarak toplam 54 farklı senaryo analiz edilmiş, her saha için yerel sismik etkiler detaylandırılmıştır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, yumuşak zeminlerin deprem dalgalarına karşı gösterdiği tepkiler hakkında genel ilkeler belirlenmiş ve bu tür zeminlerde oluşabilecek riskler daha iyi anlaşılmıştır.

Prasad ve Vijayendra (2017) tarafından yapılan araştırmada, yer karakterizasyonunun önemi çeşitli örneklerle ele alınmakta ve yazarlar önceki araştırmalarını özetlemektedir. Örneğin, 2001 Bhuj depreminde, merkez üssünden uzak olan Ahmedabad'daki binalar üzerinde yapılan incelemelerde, rezonans etkisi ve zemin hareketindeki amplifikasyonun, 100'den fazla binanın hasar görmesinde başlıca etkenler olduğu ortaya konmuştur. Çalışma, zemin tabanının doğal frekansının daha doğru bir şekilde belirlenmesinin gerekliliğine dikkat çekmektedir ve bu doğruluğun sismik hasarın önlenmesinde önemli rol oynayacağı vurgulanmaktadır.

Rahnama ve Krawinkler (1993) tarafından yapılan araştırmada, güçlü yer hareketlerinin yapıların sismik talepleri üzerindeki etkilerini daha iyi anlayabilmek amacıyla

yeni yöntemler geliştirmeyi amaçlamaktadır. Çalışma, özellikle yapıların rijitlik ve dayanım kayıplarının yanı sıra yer yüzeyi jeolojisinin deprem anındaki etkilerini detaylı bir şekilde incelemiştir. Yapıların performansını etkileyen başlıca faktörler arasında zemin hareketleri ve bu hareketlere bağlı olarak gelişen histeretik özellikler yer almaktadır. Yumuşak zeminlerin etkileri, zemin hareketleri verileri ve basitleştirilmiş zemin kolon modelleri kullanılarak analiz edilmiştir. Bu analizler, zemin periyoduna bağlı olarak toprak modifikasyon fonksiyonlarının geliştirilmesini sağlamıştır. Çalışma, özellikle yumuşak zeminlerdeki yapıların elastik ve elastik olmayan yer değiştirme taleplerinin tahmin edilmesinde kullanılabilecek modeller sunmaktadır. Elde edilen sonuçlar, sismik riskin doğru bir şekilde değerlendirilmesine yardımcı olarak, yapıların tasarımında ve yerel zemin koşullarına göre yapılacak iyileştirmelerde önemli bir rehber sunmaktadır.

FAHJAN (2008) tarafından yapılan araştırmada, Z1, Z2, Z3 ve Z4 yerel zemin sınıfları için Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) veritabanından seçilen 10 zaman tanım alanı kaydıyla ölçeklendirme faktörleri incelenmiştir. Ölçeklendirme yöntemi kullanılarak, belirli bir periyot aralığında, DBYBHY 2007 yönetmeliğine uygun zaman tanım alanı kayıtları elde edilmiştir. Bu işlem, farklı zemin sınıflarındaki sismik tepkileri daha iyi analiz edebilmek ve yerel zemin koşullarına uygun dinamik modelleme sağlamak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen kayıtlar, sismik tasarım ve analiz süreçlerinde kullanılmak üzere yerel zemin sınıflarının etkilerini değerlendirmek için önemli bir kaynak oluşturmuştur.

Liu vd. (2024) çalışmalarında, Arias Yoğunluğu Uyumlama (AIF) ve PGA düzeltme algoritmaları kullanılarak, maksimum yer ivmesi (PGA) ve arias yoğunluğu seviyelerinin sabit tutulmasını sağlayan yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntem, spektral eşleştirme tekniğiyle karşılaştırılmış ve yapısal sismik analizlerde hedef spektrumla uyumlu ve ölçeklenmiş ivme kayıtlarının elde edilmesi hedeflenmiştir. Yapılan karşılaştırmalar ve testler sonucunda, önerilen yöntem başarılı bir performans sergilemiş ve ivme kayıtlarının doğru şekilde ölçeklendirilip hedef spektrumla uyumlu hale getirilmesinin, yapıların sismik analizlerinde etkili bir yöntem sunduğu belirlenmiştir.

Demir vd. (2023) çalışmalarında, farklı kat yüksekliğindeki binaların çeşitli zemin sınıflarında spektral eşleşmeli yer hareketi seçimi stratejilerinin sismik tepkileri üzerindeki

etkileri incelemişlerdir. Sonuçlar, spektral eşleştirmenin, yer hareketlerinin spektral ivme değerlerinin yayılımını kontrol etmede etkili olduğunu ve yerel zemin koşullarına göre ivme kayıtlarının doğru şekilde seçilmesinin, yapısal sismik analizlerin doğruluğunu artırarak, yapıların güvenliğini ve dayanıklılığını güçlendirdiğini göstermektedir.

Ha ve Han (2015) tarafından yapılan bu çalışma, hedef tepki spektrumu ortalaması, varyansı ve korelasyon yapılarıyla uyumlu yer hareketlerini bir yer hareketi kütüphanesinden seçmek için basit ve etkili bir yöntem geliştirmektedir. Yöntem, kavramsal olarak kolay anlaşılır ve doğrudan uygulanabilir bir yapıya sahiptir. Seçim işlemi, istenilen sayıda yer hareketinin, birinciden sonuncuya kadar sıralı olarak belirlenmesiyle gerçekleştirilmektedir. Önerilen yöntemin doğruluğu ve tutarlılığı, seçilen yer hareketlerinin geleneksel yöntemlerle elde edilenlerle karşılaştırılması yoluyla değerlendirilmiştir. Sonuçlar, yöntemin yalnızca hedef spektrumla uyum sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda korelasyon yapısını da doğru bir şekilde temsil ettiğini göstermektedir. Ayrıca, çalışma, yer hareketi seçimi ve korelasyon yapılarının çerçevelerin sismik tepkileri üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu vurgulamaktadır. Bu bulgu, doğru yer hareketi seçiminin ve korelasyon yapısının, sismik analizlerde yapı performansını daha iyi tahmin etmek için kritik olduğunu ortaya koymaktadır.

Zhang vd. (2021) tarafından yapılan araştırmada, spektral eşleştirme yöntemi küçük değişikliklerle iyileştirilerek spektral uyum artırılmıştır. Önerilen yöntem, yüksek doğrulukla birden fazla dayanıklılık süresi ivme fonksiyonu (ETAF) üretmeyi sağlar ve yalnızca bir ETAF ile sismik performans analizlerinde yeterli doğruluğa ulaşılmasını mümkün kılar. Ayrıca, gerçek yer hareketlerinden elde edilen ortalama ivme spektrumlarıyla uyum sağlama yeteneği, daha güvenilir ve doğru sismik analizler yapılmasına olanak tanır.

Adekristi ve Eatherton (2015) çalışmalarında, deprem yer hareketlerinin zaman alanında spektral eşleştirilmesi için yeni bir yöntem önermektedirler. Bu yöntem, hedef spektrumla uyum sağlamak için ivme zaman tarihine dalga paketleri ekleyerek çalışmaktadır. Dalga paketlerinin eklenmesi, yer hareketlerinin spektral özelliklerini hedef spektrumla uyumlu hale getirmeyi amaçlamaktadır. Ancak, bu işlem bazen istenmeyen sonuçlara yol açabilir. Örneğin, dalga paketlerinin eklenmesiyle tepe yanıtının zamanlamasında kaymalar meydana gelebilir veya farklı zamanlarda ikinci bir tepe

oluşabilir. Bu durumu önlemek amacıyla Broyden güncellemesi kullanılmakta ve böylece ikinci tepenin oluşması engellenmektedir. Sonuç olarak, önerilen yöntem, hedef spektrumla uyum sağlarken spektral durağanlık, enerji gelişimi ve orijinal zaman tarihinin frekans içeriğini yeterli bir şekilde korumayı başarmaktadır. Bu, yöntemin güvenilir ve doğru sonuçlar ürettiğini göstermektedir.

Zhao vd. (2022) tarafından yapılan araştırmada, yapıların sismik analiz ve tasarımında spektral eşleştirilmiş yer hareketlerinin seçimi için yaygın olarak kullanılan Kare Hata Toplamı (SSE) yönteminin sınırlamaları ele alınmıştır. Bu sınırlamaları aşmak amacıyla, araştırmacılar Siamese Konvolüsyonel Sinir Ağları (SCNN) tabanlı yeni bir yöntem geliştirmiştir. A, B, C ve D sınıfı ivme tasarım spektrumları kullanılarak her sınıf için 40 örnekle yapılan deneylerde, SCNN yöntemi ile oldukça tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, bu yeni yöntem, SSE tabanlı yaklaşımlara kıyasla daha düşük bir standart sapma ile daha güvenilir ve doğrusal sonuçlar sunmuştur. Bu geliştirilmiş yöntem, yapıların sismik performansının değerlendirilmesinde daha doğru yer hareketi verilerinin seçilmesine imkan tanımaktadır.

Manfredi vd. (2022), bu çalışmada, İtalya'daki farklı bina tiplerinin kırılganlık eğrilerini belirlemek için kullanılan "Select & Match (S&M)" aracının tanıtımı yapılmaktadır. S&M, sismik tehlikeyi temsil eden ivme kayıtlarını seçmek ve bunları spektral olarak eşleştirmek için geliştirilmiş bir araçtır. Çalışmada, dört katlı betonarme bina modeli üzerinde doğrusal olmayan dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, spektral eşleştirilmiş ivme kayıtlarının kırılganlık eğrilerinde daha düşük standart sapma ve daha yüksek güvenilirlik sağladığını göstermektedir. Bu bulgular, S&M aracının bina kırılganlık analizlerinde etkili ve güvenilir sonuçlar elde edilmesine katkı sağladığını ortaya koymaktadır.

Kurniawandy vd. (2023) çalışmalarında, Endonezya'dan elde edilen yer hareketi verilerinin yetersiz olması nedeniyle, yedi çift deprem kaydı ile iki farklı modifikasyon yöntemini uygulamışlardır: genlik ölçekleme ve spektral eşleştirme. Genlik ölçekleme yöntemi, ivme kayıtlarının genliklerini hedef spektrumla uyumlu hale getirmeyi amaçlarken, spektral eşleştirme, yer hareketlerini hedef yanıt spektrumlarına ve pik yer ivmesi (PGA) değerlerine daha iyi adapte etmek için kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, spektral

eşleştirmenin yer hareketi verilerini hedef spektrumlarla ve PGA ile daha iyi uyum sağladığını ortaya koymuştur. Bu nedenle, dinamik analizlerde daha doğru ve güvenilir sonuçlar elde edebilmek için spektral eşleştirme yönteminin tercih edilmesi önerilmektedir.

O'Donnell vd. (2011) çalışmalarında, yer hareketi seçimi ve ölçeklendirme, zaman tanım alanında analiz gerektiren sismik risk değerlendirmelerinin en kritik bileşenlerinden biri olduğunu tartışmışlardır. Ancak, mevcut yapı yönetmeliklerinde bu konuya dair net bir rehber sunulmaması, tasarımda genellikle öznel kararların alınmasına neden olmaktadır. Şimdiye kadarki araştırmalar genellikle tek serbestlik dereceli sistemlere odaklanmış ve çoğunlukla sayısal simülasyonlarla sınırlı kalmıştır; deneysel doğrulama için veri bulunmamaktadır. Bu çalışma, seçilen yer hareketi ölçeklendirme yöntemlerini, yeniden yapılandırılabilir doğrusal elastik ve doğrusal olmayan çok katlı bina modelleri üzerinde yapılan küçük ölçekli sarsma masası deneyleriyle deneysel olarak incelemektedir. Araştırma, doğrusal olmayan tepki analizleri için güvenilir talep tahminlerini geliştirebilecek rehber ve yöntemlerin oluşturulmasını hedeflemektedir. Bu makalede, araştırma sürecine genel bir bakış sunulmakta ve doğrusal elastik dinamik tepkilere dayalı ön bulgular paylaşılmaktadır.

İncelenen çalışmalar göz önüne alınarak deprem kayıtlarının ölçeklendirilmesi ve zemin analizi üzerine yapılan çalışmalar, spektral eşleştirme ve yüzey pik ivmesi (PGA) gibi yöntemlere odaklandığı sonucuna varılabilir. PGA, yumuşak zeminlerin saha analizlerinde kritik bir öneme sahip olup, yüksek değerleri zeminlerde deformasyon ve sıvılaşma risklerini artırarak yapı güvenliğini tehdit edebilir. Bu kapsamda, farklı ivme kayıtlarının eşdeğer lineer ve lineer olmayan yaklaşımlar ile analiz edilmesi, en gerçekçi sismik etkinin belirlenmesine ve zemin iyileştirme yöntemlerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

3. BÖLGENİN JEOLOJİSİ VE DEPREMSELLİĞİ

Deprem, yer kabuğu içerisinde biriken elastik potansiyel enerjinin ani bir şekilde serbest kalması sonucu meydana gelen, yer kabuğunda sismik dalgalar aracılığıyla yayılan ve yeryüzünde sarsıntılara neden olan doğal bir olaydır. Bu süreç, genellikle fay hatları boyunca gerçekleşen hareketler sonucu ortaya çıkmaktadır ve zemin ile yapı sistemleri üzerinde dinamik etkiler oluşturmaktadır.

Geoteknik mühendisliği, zeminin mekanik özelliklerini ve özellikle kritik koşullar altındaki davranışlarını inceleyen bir inşaat mühendisliği disiplinidir. Bu alan, yapı ile zemin arasındaki etkileşimden kaynaklanabilecek potansiyel sorunları belirleyerek bu sorunlara yönelik çözümler geliştirmeyi amaçlamaktadır. Geoteknik mühendisliğinin bir alt dalı olan geoteknik deprem mühendisliği, yapıların temel zemini ve çevresinin depreme karşı dayanıklılığını analiz etmeyi ve bu doğrultuda uygun tasarım yöntemlerini geliştirmeyi hedeflemektedir. Bu disiplin, depreme dayanıklı yapıların projelendirilmesi sürecinde hayati bir rol oynamaktadır. Etkin bir tasarım için deprem karakteristikleri, zemin özellikleri ve yapı davranışlarının ayrıntılı bir şekilde anlaşılması ve değerlendirilmesi esastır.

3.1. Türkiye'nin Depremselliği

Türkiye'nin bulunduğu konum, Alp-Himalaya deprem kuşağı gibi aktif deprem kuşaklarının bir parçası olması nedeniyle büyük bir önem arz etmektedir. Bu durum, Türkiye'yi yüksek sismik risk altındaki bölgelerden biri haline getirmektedir. Bu bağlamda, geoteknik mühendisliği, özellikle de geoteknik deprem mühendisliği, yapı güvenliği ve dayanıklılığı açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu disiplin, zemin davranışlarının depreme karşı analizini yaparak yapıların temel güvenliğini sağlamak için gerekli tasarım ve uygulama çözümlerini sunmaktadır.

4.KURAMSAL TEMELLER

Zeminlerin dinamik özellikleri, yapıların deprem yükleri altındaki davranışlarını anlamak ve güvenli tasarımlar gerçekleştirmek için kritik bir rol oynamaktadır. Deprem sırasında zeminler, elastik ve plastik deformasyonlar sergileyerek yapıların taşıdığı yükleri ve titreşim karakteristiklerini doğrudan etkilemektedir. Zeminlerin dinamik davranışı; sismik dalga yayılımı, sönüm oranı, kayma modülü ve plastik deformasyon gibi faktörlerle tanımlanır. Bu özellikler, zemin tipine, boşluk oranına, nem içeriğine ve gerilme geçmişine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Zeminlerin dinamik özelliklerini doğru bir şekilde anlamak, sismik tepkilerin tahmin edilmesi, zemin-yapı etkileşiminin değerlendirilmesi ve yapıların güvenilir bir şekilde tasarlanması açısından temel bir gerekliliktir.

Mühendislik yapıları, genellikle yer kabuğu üzerinde inşa edilen karmaşık temel sistemlerinden oluşmaktadır. Bu yapıların güvenliğini ve dayanıklılığını sağlamak için, inşaat mühendisleri zeminin özelliklerini detaylı bir şekilde incelemek zorundadır. Bu incelemeler, zemin parametrelerinin ve farklı gerilme koşullarında zeminin nasıl bir davranış sergileyeceğinin anlaşılmasını amaçlamaktadır. Bu süreçte, zemin parametreleri ile yapı davranışları arasındaki ilişkiyi doğru bir şekilde anlamak ve değerlendirmek, yapı güvenliği açısından kritik bir öneme sahiptir. Tasarımda kullanılan ivmelerde deprem karakteristik özelliklerinin de göz önünde bulundurulması gerektiği not edilmelidir. Pik ivme (g), büyüklük (M_w), en büyük hız (cm/sec), en büyük deplasman (cm), arias yoğunluğu, karakteristik yoğunluk, toplam mutlak hız (cm/sec), housner yoğunluğu (cm), baskın periyot (sec) ve anlamlı süre (sec) bu karakteristiklerden bazılarıdır.

4.1.Yer Hareketi Parametreleri

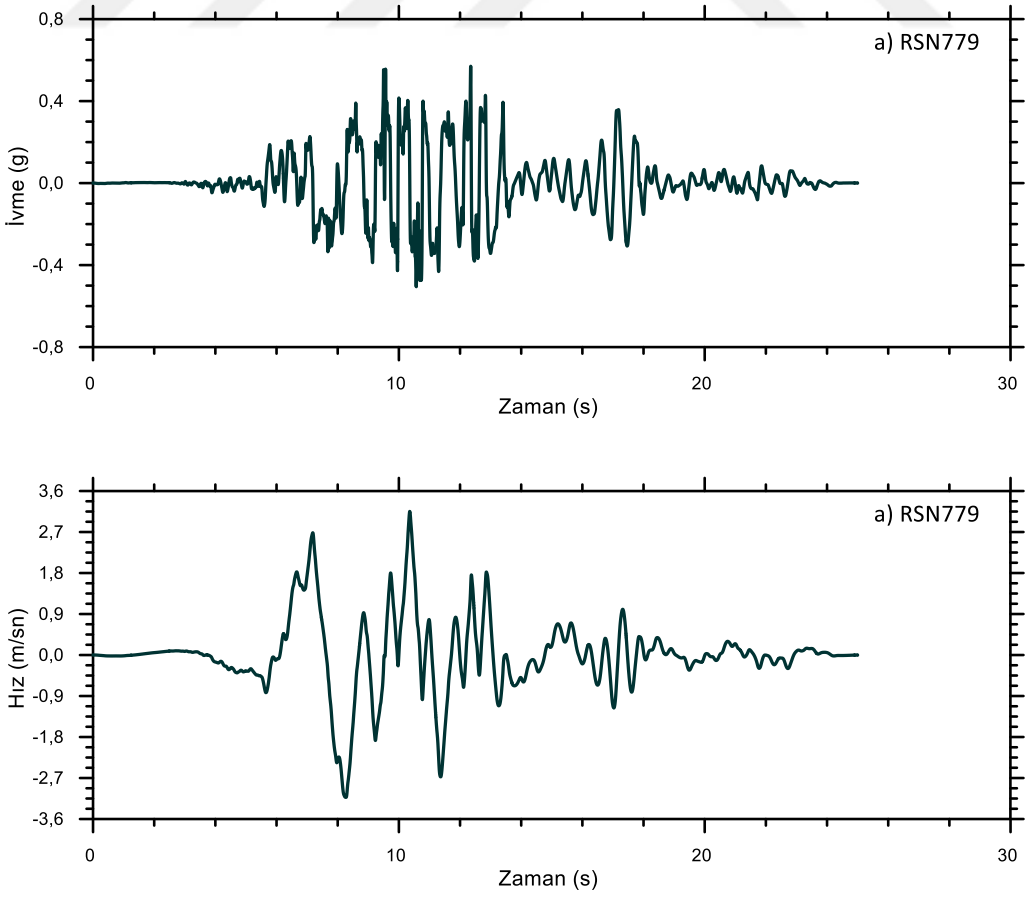
Yer hareketi nedeniyle oluşan depremlerin karakteristik özelliklerinin belirlenmesi ve zeminlerin davranışının bu parametreler üzerinden değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Yer hareketi, genlik, frekans içeriği ve süre gibi üç ana özellik üzerinden incelenmektedir. Bu parametreler, deprem hareketinin önemli bileşenlerini yansıtarak, zeminin ve yapının tepki verme şekillerini anlamaya yardımcı olmaktadır. Yer hareketi genlik, frekans içeriği ve süre olmak üzere üç temel parametre ile tanımlanmaktadır. Bu üç

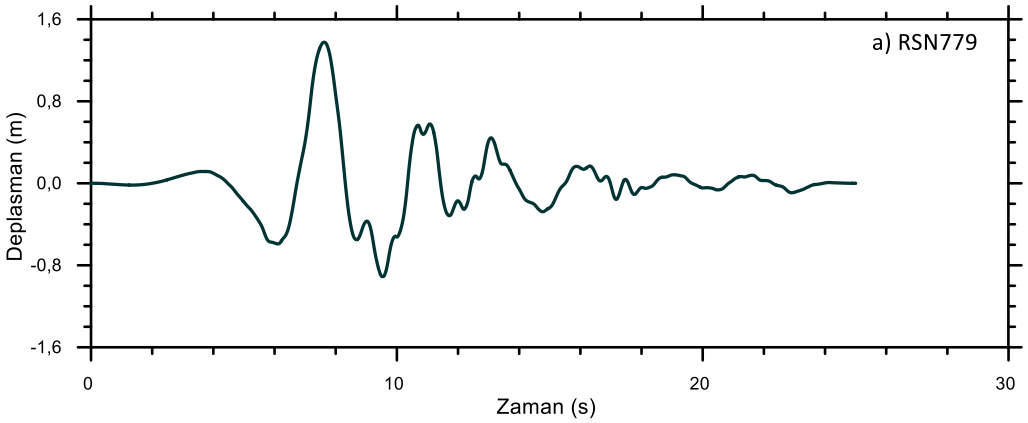
parametre, depremin zemin üzerindeki etkilerinin daha doğru bir şekilde tahmin edilmesine olanak tanımaktadır (Kramer, 1996).

4.1.1.Genlik parametreleri

Deprem mühendisliğinde genlik, bir deprem sırasında yer hareketinin büyüklüğünü ifade eden temel bir özelliktir. Depremin yer yüzeyinde veya belirli bir noktada oluşturduğu maksimum salınımların (ivme, hız veya yer değiştirme gibi) ölçüsüdür.

İvme-zaman**,** hız-zaman, ve yer değiştirme-zaman grafiklerini elde etmek için deprem sırasında ölçülen yer hareketi verilerini kullanmak gerekmektedir. Bu grafikler genellikle sismik veri analizi yazılımları veya matematiksel işlem yöntemleriyle oluşturulmaktadır. Deprem kayıt istasyonlarında kaydedilen ivme-zaman grafikleri ve buna bağlı olarak türev/integral işlemleri kullanılarak elde edilen hız, yer değiştirme-zaman grafiklerine örnek olarak Loma Prieta depremine ait grafikler Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

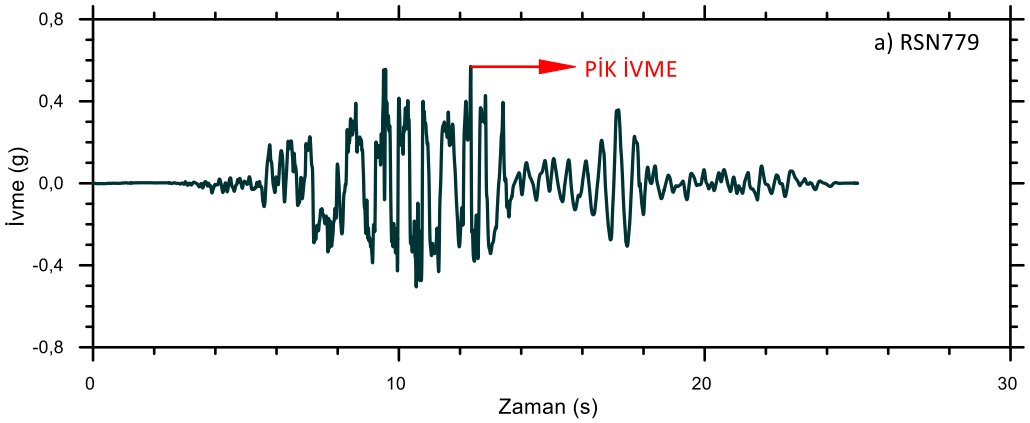




Şekil 4.1. Loma Prieta depremine ait ivme-hız-yer değiştirme grafikleri

4.1.1.1.Pik ivme

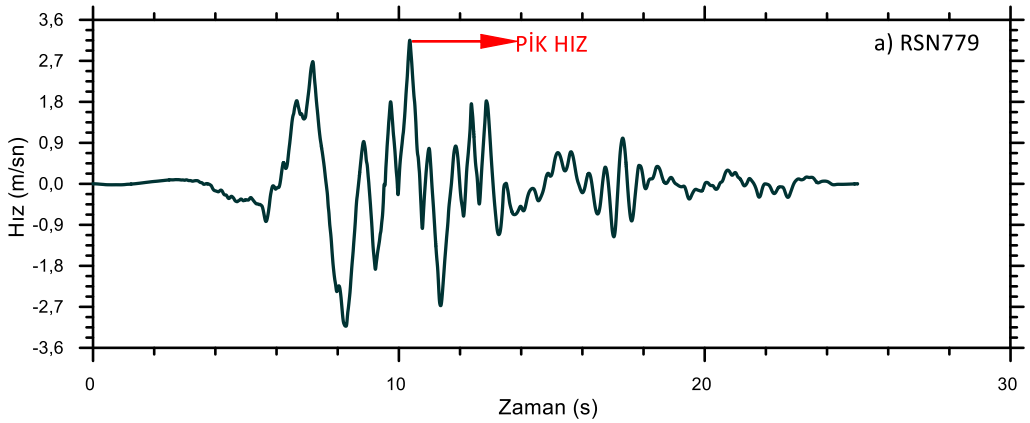
Deprem mühendisliğinde pik ivme**,** zemin hareketinin bir deprem sırasında ulaştığı en yüksek ivme değerini ifade etmektedir. Genellikle PGA (Peak Ground Acceleration) olarak adlandırılmalıdır. Deprem mühendisliğinde yer hareketlerinin şiddetini değerlendirmek, yapıların depreme dayanıklı tasarımını yapmak ve zemin davranışını analiz etmek için kritik bir parametredir. Depremlerde yer hareketini tanımlamak amacıyla genellikle yatay hareketler dikkate alınmaktadır. Bunun temel nedeni, yatay hareketlerin yapı üzerinde oluşturduğu etkilerin, düşey hareketlere kıyasla genellikle daha belirgin ve yıkıcı olmasıdır. Bazı deprem kayıtları tek bir pik değere sahip olurken, bazı kayıtlarsa birden fazla pik değer gösterebilir. Yüksek pik ivmeli bir yer hareketi genellikle düşük pik ivmeli bir hareketten daha yıkıcıdır. Aynı şekilde birden fazla pik değere sahip depremlerin tek pik değere sahip depremlere kıyasla da daha yıkıcı olabilmektedir. Ancak pik ivmenin büyüklüğü kadar, süresi de yer hareketinin etkilerini değerlendirmede oldukça kritik bir rol oynamaktadır (Kramer, 1996). Bu kıyaslamalara dayanarak PGA değerinin deprem etkilerini gözlemlemek adına yetersiz olduğunu, diğer karakteristik özelliklerin de göz önüne alınması gerektiği sonucuna varılabilir. Seçilen Loma Prieta deprem kaydına ait ivme zaman grafiği Şekil 4.2'de sunulmuş olup pik ivmesi 0.57 g olarak görülmektedir.



Şekil 4.2. Loma Prieta depremine ait ivme-zaman grafiğine ait pik ivme

4.1.1.2.Pik hız

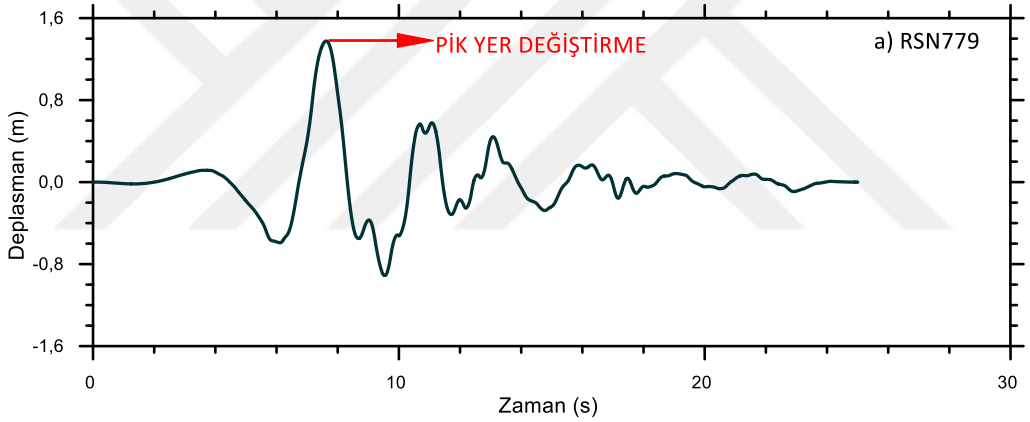
Deprem mühendisliğinde pik hız, zemin hareketinin belirli bir deprem sırasında ulaştığı en yüksek hız değerini ifade etmektedir. Genellikle Pik Zemin Hızı (PGV - Peak Ground Velocity) olarak adlandırılır ve zemin titreşimlerinin şiddetini ölçmek için kullanılmaktadır. Pik hız, yapıların dinamik davranışlarını anlamak, zemin deformasyonlarını değerlendirmek ve yapı tasarımında olası hasarları öngörmek için önemli bir parametredir. Daha yüksek pik hız değerleri, genellikle daha büyük enerji taşıyan ve yapılar üzerinde daha yıkıcı etkiler oluşturan depremleri işaret etmektedir. Seçilen Loma Prieta deprem kaydına ait hız zaman grafiği Şekil 4.3'de sunulmuş olup pik hızı 3.15 m/sn olarak görülmektedir.



Şekil 4.3. Loma Prieta depremine ait hız-zaman grafiğine ait pik hız

4.1.1.3.Pik yer değiştirme

Pik yer değiştirme, bir deprem sırasında zemin hareketinin ulaştığı en yüksek yer değiştirme değerini ifade etmektedir. Zemin hareketinin düşük frekanslı bileşenleriyle ilişkilidir ve genellikle metre veya santimetre cinsinden ölçülmektedir. Pik yer değiştirme, özellikle uzun süreli salınımların veya büyük ölçekli yapıların (örneğin köprüler veya barajlar) dinamik davranışlarının değerlendirilmesinde önem taşımaktadır. Ancak, diğer yer hareketi parametreleri olan pik ivme (PGA) ve pik hız (PGV) kadar yaygın kullanılmamaktadır. Bu parametrelerin her birinin farklı frekans içeriklerine duyarlı olup ve yapısal hasarların değerlendirilmesinde farklı roller oynamıştır (Kramer, 1996). Seçilen Loma Prieta deprem kaydına ait deplasman zaman grafiği Şekil 4.4'de sunulmuş olup pik yer değiştirmesi 1.38 m olarak görülmektedir.



Şekil 4.4. Loma Prieta depremine ait deplasman-zaman grafiğine ait pik yer değiştirme

4.1.2.Frekans içeriği ve spektral parametreler

Frekans içeriği, bir yer hareketinin farklı frekanslardaki titreşim bileşenlerinin dağılımını ifade etmektedir. Depremler, düşük ve yüksek frekanslı hareketleri içermektedir; düşük frekanslar uzun süreli, yüksek frekanslar ise ani ve kuvvetli etkiler yaratmaktadır. Yapıların tasarımında, bu frekans içeriği dikkate alınarak, yapının hangi frekanslara duyarlı olduğu göz önünde bulundurularak dayanıklılığı artırılmaktadır.

Kramer (1996) tarafından yapılan değerlendirmelere göre, yer hareketi parametreleri olan pik ivme (PGA), pik hız (PGV) ve pik yer değiştirme (PGD), farklı frekans içeriklerine

duyarlıdır ve yapısal hasarları farklı şekilde etkiler. PGA, yüksek frekanslı hareketlere duyarlı olup kısa periyotlu, rijit yapılar üzerindeki ani kuvvetleri analiz etmektedir. PGV, orta frekanslı hareketleri dikkate alarak yapıların dinamik tepkilerini ve sönümleme kapasitesini değerlendirir, genellikle esnek yapılar için önemlidir. PGD ise düşük frekanslı hareketlere duyarlıdır ve büyük ölçekli yapıların kalıcı deformasyonlarını ölçmektedir. Bu parametreler, yapıların sismik tasarımında birlikte değerlendirilerek daha doğru sonuçlar elde edilmektedir.

4.1.2.1.Fourier spektrumu

Fourier spektrumu, harmonik hareketin frekans, genlik ve faz bileşenlerinin toplamı olarak tanımlanır. Bu, bir yer hareketinin zamanla değişen bileşenlerini anlamak için kullanılmaktadır.

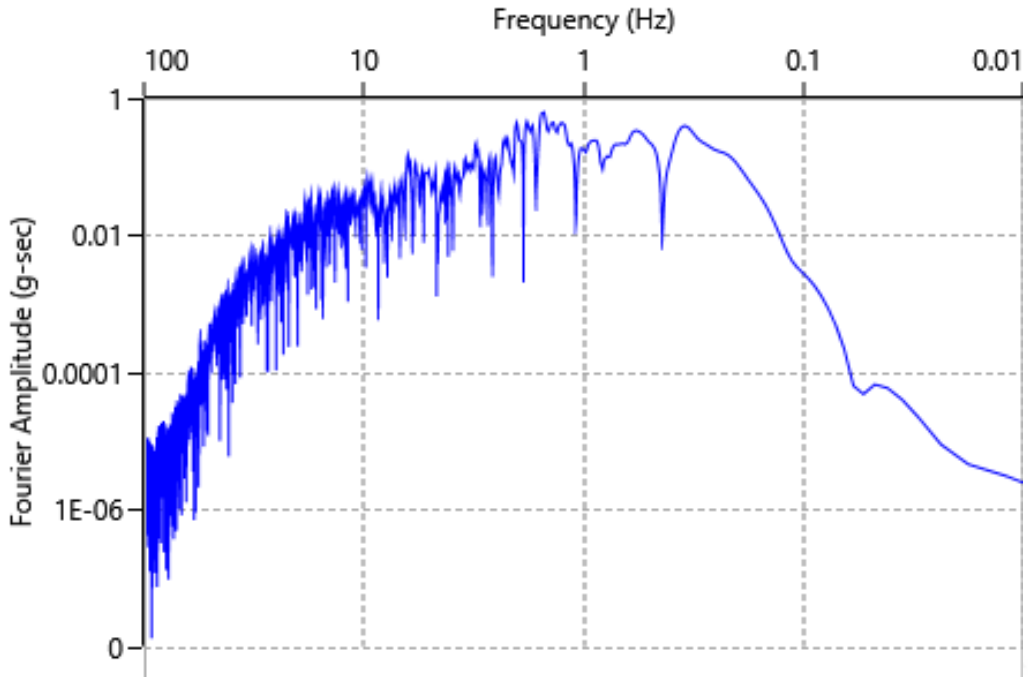
Fourier genlik spektrumu, bir yer hareketinin farklı frekanslardaki genliklerini gösteren bir grafiktir. Fourier dönüşümü ile zamanla değişen bir sinyal, frekans bileşenlerine ayrılır ve her frekansın genliği belirlenmektedir. Bu spektrum, hareketin hangi frekansta yoğunlaştığını ve bu frekansların etkisini anlamaya yardımcı olur. Dar bir spektrum, daha düzgün hareketi, geniş bir spektrum ise daha karmaşık ve değişken hareketi ifade etmektedir.

Deprem sırasında oluşan yer hareketinin yüksek frekanslı bileşenleri, kısa sürede gerçekleşen ani sarsıntılara neden olurken, düşük frekanslı bileşenler daha uzun süreli ve büyük salınımlar yaratmaktadır. Fourier spektrumu, bu frekans bileşenlerinin gücünü gösteren bir grafik sunar ve hangi frekansların daha etkili olduğunu belirler. Bu, özellikle yapıların tasarımında önemlidir, çünkü her yapının kendine ait bir doğal frekansı vardır ve zemindeki frekanslar bu doğal frekansa yakınsa, yapı daha büyük hasar görebilir. Fourier spektrumu, deprem analizlerinde zemin hareketlerinin dinamik etkilerini doğru şekilde değerlendirebilmek için kritik bir araçtır.

4.1.2.1.Tepki spektrumu

Tepki spektrumları, deprem mühendisliğinde, bir yapının veya sistemin farklı frekansta bir deprem hareketine verdiği tepkiyi belirlemek için kullanılan bir yöntemdir. Bu

spektrumlar, genellikle tek dereceli serbestlikli (TDS) sistemler için, yapının doğal frekansı ve sönüm oranı göz önünde bulundurularak oluşturulmaktadır. Tepki spektrumu, belirli bir yer hareketine karşı yapının ivme, hız ve yer değiştirme gibi tepkilerinin maksimum değerlerini göstermektedir.



Şekil 4.5. Loma Prieta depremine ait Fourier genlik spektrumu

Tepki spektrumu, yapının farklı frekanslardaki salınımlarını inceleyerek, her frekansta meydana gelen en yüksek tepkilerin grafiksel bir temsilini sunar. Bu spektrum, yapının hangi frekansta daha büyük bir tepki vereceğini ve bu frekansların depremdeki etkilerini ortaya koymaktadır. Tepki spektrumları, tasarım aşamasında yapının sismik yükler karşısındaki performansını değerlendirmek için çok önemlidir.

Tepki spektrumunun içerdiği başlıca parametreler şunlardır:

- Spektral ivme (S_a): Yapıya iletilebilecek en yüksek ivmeyi ifade etmekte olup sismik kuvvetlerin büyüklüğünü belirlemektedir.
- Spektral hız (S_v): Yapıya aktarılacak maksimum enerjiyi göstermektedir ve yapının deformasyon yeteneğini değerlendirir.

- Spektral yer değiştirme (S_d): Yapıda meydana gelecek maksimum deplasman değerini tanımlamaktadır ve yapının elastik sınırlarını aşmaması için kullanılmaktadır.

Bu spektral parametreler, yapıların deprem güvenliğini sağlamak ve doğru mühendislik tasarımları yapmak için kritik bir rol oynamaktadır. Loma Prieta depreminin Fourier genlik spektrumu Şekil 4.5'te verilmiştir.

4.1.3.Yer hareketi süresi

Depremlerin, yani kuvvetli yer hareketlerinin süresi, biriken enerjinin boşalması için gereken zamanla doğrudan ilişkilidir. Faylar boyunca biriken enerji, deprem anında hızla serbest kalır ve bu enerji salınımı, yer yüzeyinde titreşimlere yol açmaktadır. Eğer bu süreç uzun süre devam ederse, yer hareketinin etkisi daha fazla süreyle hissedilir ve bu da yapıların daha fazla sarsılmasına, dolayısıyla depremin neden olduğu hasarın artmasına neden olmaktadır. Uzun süreli yer hareketi, yapıların daha fazla deformasyona uğramasına, temellerin yer değiştirmesine ve yapısal bütünlüğün bozulmasına yol açabilir. Bu nedenle, yer hareketi süresi, depremin yıkıcı etkileri üzerinde önemli bir rol oynamaktadır.

Yapılan çalışmalar, daha küçük maksimum ivmeye sahip kuvvetli yer hareketlerinin, uzun süreli etkileri nedeniyle, daha büyük ivmeye ancak kısa süreye sahip yer hareketlerinden daha fazla hasara yol açabileceğini ortaya koymaktadır (Elnashai ve Sarno, 2008).

4.1.4.Depremlerin karakteristik özellikleri

Tasarımda kullanılan ivmelerin değerlendirilmesinde yalnızca PGA değerine odaklamak doğru bir yaklaşım değildir. Sürenin yanı sıra kayıtların diğer önemli karakteristik özelliklerinin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Deprem kaydı seçimi sırasında PGA değerleri yaklaşık olan 3 farklı kayıt seçilmiş olup, birden fazla karakteristik özelliklerinde farklılıklar görülmektedir. En küçük PGA değeri 0.463 ile RSN4456 iken RSN160 en büyük pik ivmeye sahip olan kayıt olarak

gözlemlenmiştir. Ancak durum böyleyken kayıtların en büyük hız ve en büyük yer değiştirme değerleri bu orantı ile devam etmemektedir. Arias şiddeti 3.988, 7.913 ve 4.562 olarak hesaplanmış, Housner yoğunluğu ise 175.938, 414.974 ve 152.006 olarak bulunmuştur. Bu değerlendirmeye göre deprem karakteristiklerinin dikkate alınması not edilmelidir.

Çizelge 4.1. Deprem Kayıtları Kıyaslanması

Kullanılan Kayıt Özellikleri	"Imperial Valley-06"	"Loma Prieta"	"Montenergo _Yugoslavia"
RSN	160	779	4456
En Büyük İvme (g)	0.599	0.57	0.463
En Büyük Hız (cm/sec)	46.75	96.095	38.647
En Büyük Deplasman (cm)	20.219	41.949	6.543
Arias Şiddeti (m/s)	3.988	7.913	4.562
Karakteristik Yoğunluk	0.146	0.271	0.152
Toplam Mutlak Hız (cm/sec)	1486.616	2234.875	1920.52
Housner Yoğunluğu (cm)	175.938	414.974	152.006
Baskın Periyot (s)	0.42	0.7	0.44
Anlamlı Süre (s)	0.484	0.8	0.514

4.1.4.1.Arias şiddeti (arias ıntensity, IA)

Bir ivme kaydından elde edilen ve ivmenin karesinin zamanla integraliyle orantılı olan bir yer hareketi ölçütüdür. Çoğunlukla hız birimleriyle (saniye başına metre ya da saniye başına santimetre) ifade edilmektedir. Bu ölçüt, yer hareketinin enerji yoğunluğunu yansıtarak, zemin ile yapı üzerindeki sismik etkinin büyüklüğünü belirlemede kullanılmaktadır. Arias yapıların tüm doğal periyotları ile uyumlu bir şiddet parametresi önermiştir. Bu parametre Denklem 4.1'de tanımlanmaktadır:

$$I(t) = \frac{\Pi}{2g}\int_0^t a^2(\tau)\,dt \tag{4.1}$$

$$IA = I(t_d)t_d = t_{95} - t_5 \tag{4.2}$$

Denklem 4.2'de IA Arias şiddeti, g yerçekimi ivmesi, t_d arias şiddetinin anlamlı süresini ifade etmektedir.

4.1.4.2.Karakteristik yoğunluk (characteristic ıntensity, IC)

Bir yer hareketinin veya depremin özelliklerinin yoğunluğunu tanımlamaktadır. Depremin genlik, süre ve frekans içeriği gibi parametrelerin birleşimiyle, yapıların deprem etkisi altındaki davranışını anlamaya yardımcı olur. Bu parametre, sismik tasarım ve zemin-yapı etkileşimini inceleyen çalışmalarda kullanılmaktadır.

$$\text{Ic} = a_{rms}^{1.5}.\, t_d^{0.5} \tag{4.3}$$

Denklem 4.3'de Ic karakteristik şiddeti, a kaydın ivme-zaman serisini, t_d depremin anlamlı olduğu aralığı ifade etmektedir. Anlamlı süre ise Arias şiddetinde de tanımlandığı üzere kaydın %5 ve %95 aralığındaki süreyi kapsamaktadır.

4.1.4.3.Toplam mutlak hız (cumulative absolute velocity, CAV)

Bir yer hareketinin ivmesinin mutlak değerinin zamanla integrali alınarak elde edilen bir parametredir. Deprem mühendisliğinde, yapıların yer hareketlerine karşı gösterdiği tepkiyi ve hareketin enerjik etkisini değerlendirmek için kullanılmaktadır.

$$\text{CAV} = \int_0^{\text{t}} |a(t)|\, dt \tag{4.4}$$

Denklem 4.4'de $|a(t)|$ ivme bileşenlerinin mutlak değeri, t, toplam kayıt süresini tanımlamaktadır.

4.1.4.4.Housner yoğunluğu (housner ıntensity, HI)

Bir deprem kaydının enerjik etkisini ölçen önemli bir parametredir. Bu yoğunluk, deprem sırasında ivmenin zamanla integrali alınarak hesaplanır ve yer hareketinin yapı üzerindeki potansiyel etkilerini değerlendirmede kullanılmaktadır. Housner Yoğunluğu,

yapıların dinamik yanıtlarını ve maruz kaldığı toplam sismik enerjiyi belirlemek için kritik bir ölçüttür.

Matematiksel olarak, ivmenin karelerinin zamanla entegrali alınarak hesaplanmaktadır ve genellikle birim uzunluk başına enerji ölçütü olarak ifade edilmektedir. Bu parametre, yapıların dayanıklılığını değerlendirmek ve sismik risk analizleri yapmak için kullanılır, çünkü deprem süresince yer hareketinin tüm etkisini yansıtarak yapının maruz kaldığı toplam enerjiyi göstermektedir.

4.1.4.5.Baskın periyot (predominant period)

%5 sönüm oranıyla hesaplanan ivme tepki (response) spektrumunda, en büyük spektral ivmenin meydana geldiği periyot değeri olarak ifade edilmektedir. Bu periyot, yapının veya sistemin doğal frekansına yakın olan ve deprem sırasında en güçlü yanıtı gösterdiği periyot olarak önemlidir. Baskın periyot, yapıların sismik davranışını anlamak ve tasarımda doğru parametreler kullanmak için kritik bir ölçüttür.

4.1.5.Amplifikasyon

Yer sarsıntısı, zemin hızlanması ile ölçülmektedir ve bölgeye özgü jeolojik, jeomorfolojik ve yapısal özellikler, depremi daha güçlü hissettirebilir. Bu duruma "amplifikasyon etkisi" denmektedir. Amplifikasyon, zemin tarafından deprem dalgalarının güçlendirilmesiyle oluşur. Özellikle yumuşak ve gevşek zeminler, deprem dalgalarını daha fazla büyüterek zemin hızlanmasını artırır ve bu da depremin şiddetini artırabilir. Bu etki, düşük şiddetli depremlerde bile güçlü sarsıntılara yol açabilir. Bu nedenle, deprem mühendisliğinde amplifikasyon etkisi, güvenli yapı tasarımı için önemli bir faktör olarak dikkate alınmalıdır. Amplifikasyon değeri şu şekilde hesaplanmaktadır (Denklem 4.5):

$$\text{Amplifikasyon} = \frac{\text{Yüzey Spektral İvmesi}}{\text{Anakaya Spektral İvmesi}} \tag{4.5}$$

4.2.Zemin Davranış Analizlerinde Kullanılan Parametreler

Zemin davranış analizleri, zeminin farklı yükleme koşullarındaki tepkisini anlamak ve mühendislik tasarımlarında bu bilgileri kullanmak için yapılan çalışmalardır. Özellikle depremlerde zemin davranışının farklılaşması, sıvılaşma riski ve zemin büyütmesi gibi faktörler büyük yapısal hasarlara yol açabilir. Bu analizler, zeminin kayma modülü, sönüm oranı ve gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri gibi özelliklerini inceleyerek riskleri belirler ve minimize eder.

Deprem dalgalarının zemin tabakalarında büyütülmesi veya sönümlenmesi gibi etkiler, yapı güvenliği açısından kritik öneme sahiptir. Sahaya özgü tasarım spektrumlarının geliştirilmesi, zemin-yapı etkileşiminin optimize edilmesi ve sıvılaşma gibi risklerin önceden belirlenmesi, bu analizlerin temel amaçları arasındadır. Sonuç olarak, zemin davranış analizleri, yapı güvenliğini artırmak ve deprem gibi doğal afetlerde can ve mal kayıplarını en aza indirmek için vazgeçilmezdir.

4.2.1.Sönümleme oranı (D) ve kayma modülünün (G) belirlenmesi

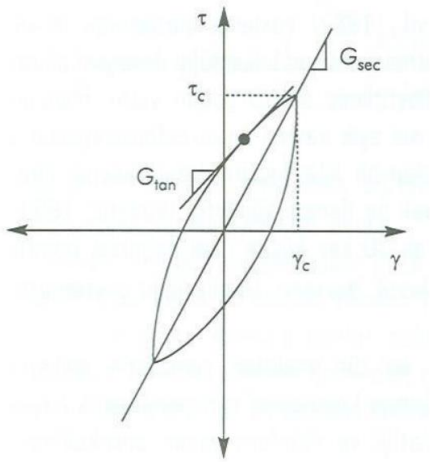
Depremler gibi dinamik hareketler, zemin ve yapılara tekrarlı yüklemeler uygulamaktadır. Bu etkileri anlamak için zeminlerin dinamik parametrelerini belirlemek önemlidir. Bu parametreler, sahada ve laboratuvar ortamında yapılan çeşitli deneylerle ölçülmektedir. Bazı deneyler ampirik ilişkilere dayanırken, diğerleri zemin davranışını doğrudan modelleyerek sonuç verir. Bu analizler, zeminlerin deprem gibi dinamik yükler altındaki performansını doğru bir şekilde değerlendirmeye yardımcı olmaktadır. Tekrarlı yükler etkisiyle zeminde oluşan şekil değiştirmeler, kayma modülü ve sönümleme oranı gibi değişken parametreleri zemin davranış analizinin temel bileşenleri haline getirmektedir.

Deprem sırasında zemin üzerinde oluşan tekrarlı yükler, zemin davranışının doğrusal olmadığı şeklinde kabul edilmektedir. Doğrusal olmayan bu davranışta, histeretik gerilme-şekil değiştirme etkileri, yani sönümleme ve kayma modülü göz önünde bulundurulur. Bu tür bir zemin davranışı gerçekçi bir yaklaşım sunar ve zemin tepkilerini daha doğru bir şekilde modellemeye imkan tanır (Bolisetti vd., 2014).

Şekil 4.6'da omurga eğrisi olarak bilinen eğri gözükmektedir. Bu eğri, malzemenin ya da zeminin dinamik yükler altında gösterdiği deformasyon ve enerji kaybını temsil etmektedir. Histeresis ilmeği eğrisinin önemli iki parametresi, halkanın eğimi ve genişliğidir.

1) Halkanın Eğimi: Halkanın eğimi, zeminin rijitliğini temsil etmektedir. Yükleme ve boşaltma sırasında zeminin gösterdiği direnç, bu eğimin ne kadar dik olduğuna bağlıdır. Eğimin büyüklüğü, tanjant kayma modülü (G_{tan}) ile ilişkilidir. Tanjant kayma modülü, yükleme ve boşaltma döngüsünde zemin ya da malzemenin anlık rijitliğini tanımlamaktadır.

2) Genişlik ve Sekant Kayma Modülü: Histeresis eğrisinin genişliği, zemin veya malzemenin şekil değiştirme kapasitesini göstermektedir. Halkanın tamamındaki kayma modülü değeri, döngünün başından sonuna kadar değişir. Bu nedenle, döngü boyunca ortalama kayma modülü, sekant kayma modülü (G_{sec}) olarak adlandırılır. G_{sec}, döngü boyunca değişen değerlerin ortalamasıdır ve sistemin genel rijitliğini temsil etmektedir.



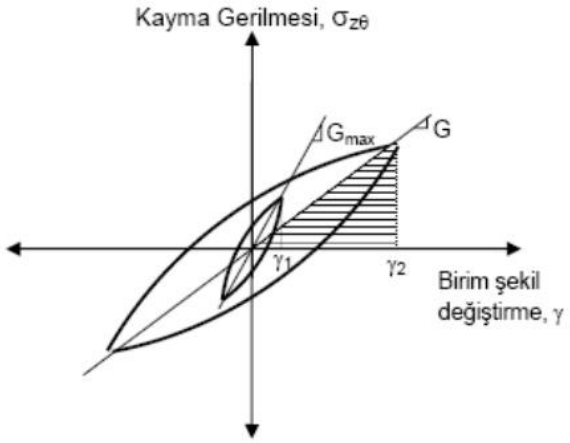
Şekil 4.6. Tanjant (G_{tan}) ve sekant (G_{sec}) kayma modülleri

Denklem 4.6'da gösterildiği üzere τ_c kayma gerilmesini, γ_c ise kayma birim deformasyon genliklerini tanımlamaktadır.

$$G_{sec} = \tau_c / \gamma_c \quad (4.6)$$

Sonuç olarak, histeresis ilmeğindeki eğim (G_{tan}) ve genişlik, zemin davranışını ve enerji kaybını belirleyen önemli parametrelerdir.

G_{max} Şekil 4.7'de omurga eğrisine orijinden teğet geçen doğrunun eğimi olarak tanımlanmaktadır. Sönümleme oranı ise histeresis ilmeği alanının, histeresis ilmeği alanını oluşturan doğrunun altında kalan üçgenin alanına oranı olarak tanımlanabilmektedir.



Şekil 4.7. Maksimum kayma modülü (G_{max}) ve sönümleme oranı (D)

Maksimum kayma modülü (G_{max}), zemin veya malzemenin ilk elastik tepki gösterdiği en yüksek rijitlik değerini ifade etmektedir. Bu parametre, lineer ve lineer olmayan elastik zemin davranışının karakterizasyonunda kullanılır ve genellikle arazi veya laboratuvar ortamında kayma dalgası hızından hesaplanır (Richart, vd., 1970; Vigianni, 1991; De Alba ve Baldwin, 1991; Youn, vd., 2008; Umu, 2013). Denklem 4.7'de ρ zeminin yoğunluğunu, V_S ise hızını tanımlamaktadır.

$$G_{max} = \rho V_S^2 \quad (4.7)$$

Sönümleme oranı (D) ise, bu döngülerde kaybolan enerji miktarını göstermektedir ve zemin davranışının dinamik yükler altındaki etkisini anlamada önemli bir parametredir. Denklem 4.8'de W_D histeresis ilmeğinin alanını, W_S taralı üçgenin alanını tanımlamaktadır.

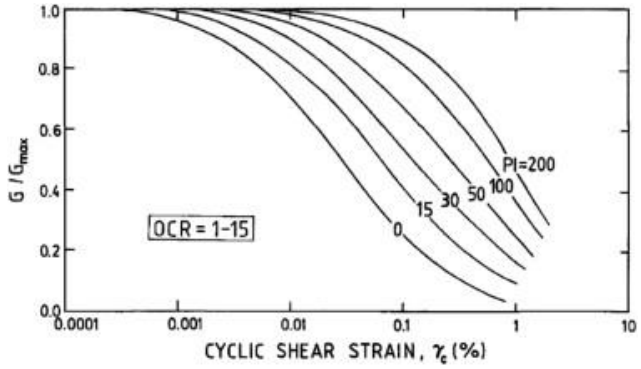
$$D = \frac{W_D}{4\pi W_S} \tag{4.8}$$

Eşdeğer doğrusal zemin modellerinde, kayma modülü oranı (G/G_{max}) deformasyona bağlı olarak değişmektedir. Deformasyon arttıkça, kayma modülü oranı azalırken, zemin elasto-plastik davranış sergilemektedir. Ayrıca, deformasyon arttıkça sönüm oranı da belirli bir seviyeden sonra artmaktadır. Bu ilişki, zeminlerin dinamik yükler altındaki davranışını anlamak için önemlidir.

Eşdeğer doğrusal modelde, G_{sec} (sekant kayma modülü) ve sönüm oranı gibi parametreler doğrusal özelliklere sahip kabul edilir. Bu modellerde, uygulanan yük kalktığında zemin deformasyonlarının sıfıra dönmesi varsayılmaktadır. Ancak, gerçek dünyada dinamik yükler altında zeminlerde kalıcı deformasyonlar meydana gelebilir. Eşdeğer doğrusal model, bu durumu dikkate alarak daha gerçekçi sonuçlar sağlayabilir. Zemin davranış analizlerinde, bu modelle belirlenen modül azaltma ve sönümleme eğrileri temel parametreler olarak kullanılmaktadır (Hanumantharao ve Ramana, 2008).

Başlangıç kayma modülü ($G_{max}= G_0$) değerinin artan birim kayma şekil değiştirmesi ile değişimi, genellikle normalize edilmiş boyutsuz parametreler cinsinden Şekil 4.8 'dekine benzer eğriler ile tanımlanır (Dobry ve Vucetic, 1987; Vucetic ve Dobry, 1991; Sun vd., 1988; Seed ve Idriss, 1991). Darendeli, (2001) zeminlerin değişen dane çeşidine ve plastisite indisine göre farklı modül azalım eğrileri önermiştir.

Sönümleme oranı (D), bir zeminin dinamik yükler altındaki enerji kaybını ve titreşimleri ne kadar sönümlendirdiğini gösteren bir parametredir. Sönümleme oranı, zemin davranışını ve yapıların dinamik tepkisini etkileyen önemli bir parametre olup çeşitli faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Plastisite indeksi yüksek zeminlerde, kalıcı deformasyonlar daha fazla meydana gelir ve bu durum daha düşük sönümleme oranlarına yol açar (Vucetic ve Dobry, 1991).



Şekil 4.8. Vucetic ve Dobry, 1991'e göre kil zeminler için kayma modülü azalım eğrisi

4.3.Sahaya Özel Dinamik Analiz

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY 2018), Türkiye'deki yapıların depreme dayanıklı tasarımı, inşası ve değerlendirilmesi için hazırlanmış temel bir düzenlemedir ve 1 Ocak 2019'da yürürlüğe girmiştir. Bu yönetmelik, binaların deprem güvenliği için zemin ve yapı davranışlarını dikkate almaktadır. Yerel zemin koşullarının detaylı tanımlanması, deprem performans analizleri ve geoteknik parametrelerin raporlanması gibi unsurlar yönetmeliğin temel bileşenleridir. Türkiye'nin yenilenen deprem tehlike haritasına dayalı olarak, yönetmelik farklı yapı tiplerine (betonarme, çelik, ahşap, yığma vb.) özel kriterler, zemin ve temel tasarım esasları sunmaktadır. Ayrıca, sıvılaşma ve taşıma gücü gibi parametreler ile sismik izolatörler gibi özel sistemlerin kullanımı ve mevcut yapıların güçlendirilmesine yönelik prosedürler de içermektedir. TBDY 2018, yerel zemin sınıflarının daha ayrıntılı belirlenmesini ve deprem yer hareketi spektrumlarının yapının konumu, fay uzaklığı ve zemin özelliklerine göre hesaplanmasını öngörmektedir. Sahaya özel analizlerle yapı güvenliğini artırmayı amaçlamaktadır.

TBDY 2018 (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018) zemin sınıflandırmasında önemli değişiklikler getirmiştir. Yönetmeliğe göre zeminler, deprem sırasında gösterdikleri davranışa göre farklı sınıflara ayrılmaktadır ve bu sınıflandırma, yapının tasarımında önemli bir rol oynamaktadır. Zemin tipleri 6 adet olup zeminlerin taşıma kapasitesi, sıvılaşma riski, dinamik özellikleri ve zemin özelliklerinin depreme karşı nasıl tepki vereceği gibi kriterlere dayalı olarak belirlenmektedir. $(N_{60})_{30}$, $(V_s)_{30}$, $(c_u)_{30}$ gibi parametreler zemin sınıfı belirlemesinde esas alınan parametrelerdir. Çizelge 4.2 incelendiğinde bu parametrelere göre ZA, ZB, ZC, ZD, ZE ve ZF zeminlerinin sınıflandırma dereceleri tanımlanmıştır.

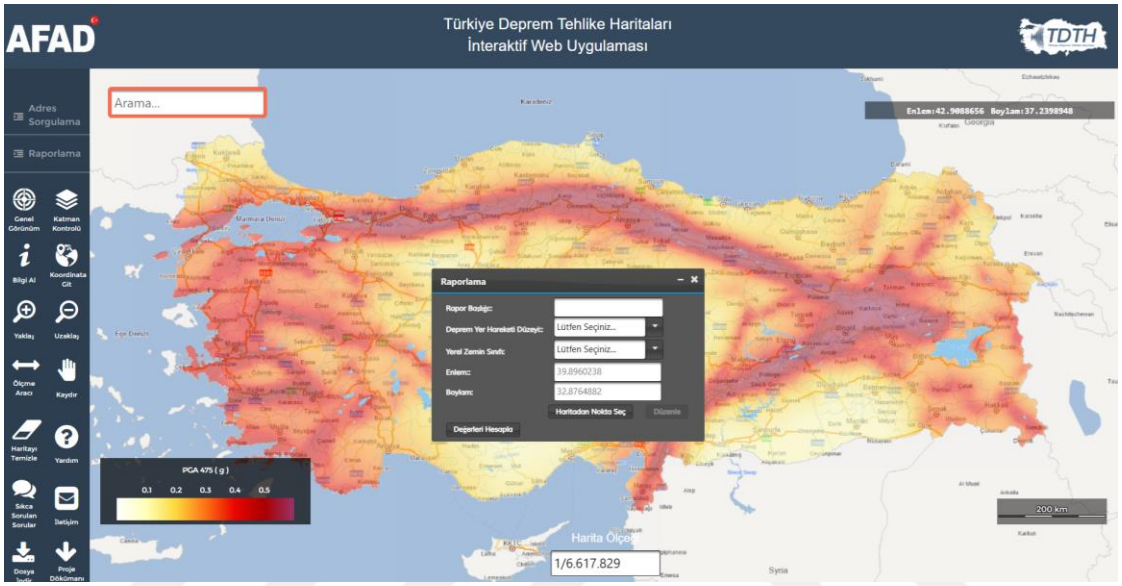
ZF (Zemin Sınıfı F), Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) kapsamında uygunsuz olarak tanımlanmaktadır ve genellikle yapılaşma için uygun olmayan, mühendislik çözümleri gerektiren zeminleri ifade etmektedir. Bu sınıf, derin su doygunluğu, aşırı sıvılaşma riski, gevşek veya homojen olmayan zemin yapıları gibi özel koşullara sahip alanları kapsamaktadır. ZF sınıfındaki zeminlerde yerel zemin etütleri yetersiz olabilir ve standart mühendislik analizleriyle zemin davranışı tahmin edilemeyebilir. Bu tür zeminler için özel mühendislik müdahaleleri, zemin iyileştirme veya özel temel tasarımları gereklidir, bu nedenle inşaat projeleri için titiz bir değerlendirme yapılması gerekmektedir.

Çizelge 4.2. Yerel Zemin Sınıfları (TBDY,2018).

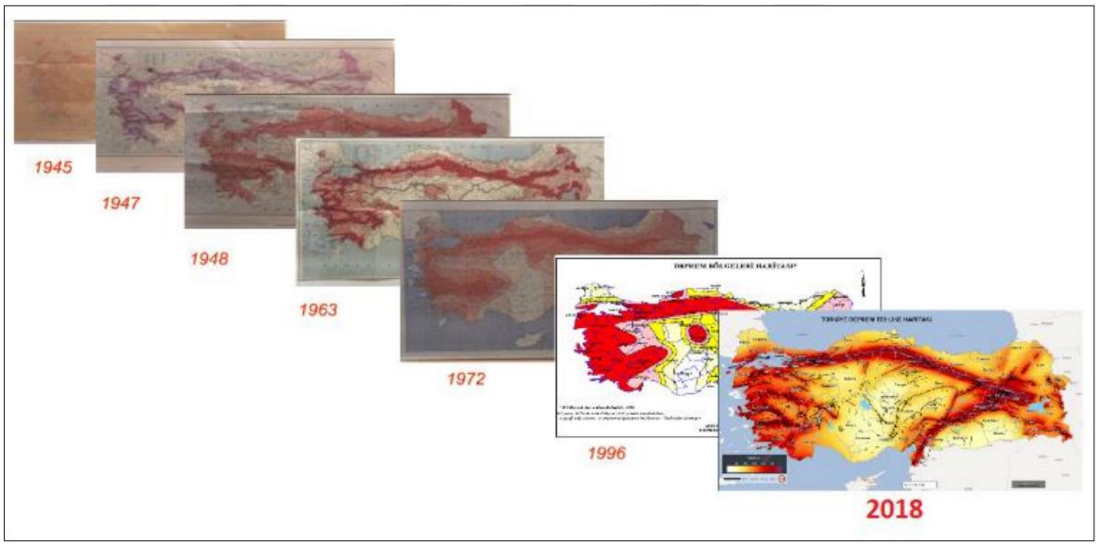
Yerel Zemin Sınıfı	Zemin Cinsi	Üst 30 metrede ortalama		
		$(V_S)_{30}$ [m/s]	$(N_{60})_{30}$ [darbe /30 cm]	$(c_u)_{30}$ [kPa]
ZA	Sağlam, sert kayalar	> 1500	–	–
ZB	Az ayrışmış, orta sağlam kayalar	760 – 1500	–	–
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrışmış, çok çatlaklı zayıf kayalar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

Tasarım spektrumları, bir yapının deprem sırasındaki davranışını analiz etmek ve tasarım için gerekli parametreleri belirlemek amacıyla kullanılan matematiksel bir araçtır. Bu spektrumlar, depremin yapıya etkisini, yapıların dinamik özellikleri (yükseklik, rijitlik, kütle) ve zemin koşullarıyla ilişkilendirerek göstermektedir. Genellikle ivme, frekans ve dönem gibi parametreleri içermektedir ve yapının doğal frekansı ile deprem hareketinin frekansı arasındaki etkileşimi dikkate almaktadır. Tasarım spektrumları, yapının bulunduğu bölgeye, zemin sınıfına ve diğer faktörlere göre şekillenir, böylece yapının deprem sırasında

güvenli bir şekilde tasarlanması sağlanmaktadır. Bu araç, TBDY 2018 gibi yönetmeliklere dayanarak, yapıların deprem yüklerine karşı doğru bir şekilde hesaplanmasını sağlamaktadır. Şekil 4.9'da da görüleceği üzere AFAD'ın internet sitesi üzerinde farklı bölgelere ait koordinat bilgileri, deprem yer hareket düzeyi ve yerel zemin sınıfı verileri ile tasarım spektrum karakteristiklerinin elde edilebileceği bir raporlama yapılabilmektedir.



Şekil 4.9. AFAD tarafından sunulan yerel tasarım spektrum ekranı (AFAD, 2024).



Şekil 4.10. Türkiye deprem tehlike haritasının yıllara göre değişimi (AFAD, 2024)

Türkiye Deprem Tehlikesi Haritası, Türkiye'deki deprem risklerini belirlemek ve bu bilgilere dayanarak yapıların güvenliğini sağlamak amacıyla oluşturulmuştur. Harita, farklı bölgelerdeki sismik aktiviteleri ve zemin koşullarını dikkate alarak deprem tehlikesinin seviyesini gösterir, böylece uygun tasarım ve önlemler alınarak can ve mal güvenliği sağlanabilir. Sonuç olarak TBDY 2018'deki yer alan düzenlemelere göre sahaya özel dinamik analiz gerçekleştirilebilir.

4.4.Deprem Yönetmelikleri

Deprem yönetmelikleri, yapıların depreme dayanıklı inşa edilmesini hedefleyerek can güvenliğini ve mal varlığını korumaktadır. Bu düzenlemeler, binaların güvenli, dayanıklı ve maliyet açısından verimli bir şekilde tasarlanmasını mümkün kılmaktadır. Aynı zamanda, depremler sonrası oluşabilecek kayıpları en aza indirerek toplumsal dayanıklılığı artırmaktadır. Hem yeni yapıların projelendirilmesinde hem de mevcut binaların güçlendirilmesinde temel bir rehber görevi üstlenmektedir.

Yapıların depreme dayanıklı tasarımı, inşası ve değerlendirilmesi için hazırlanmış farklı yönetmelikler mevcuttur. Deprem yönetmelikleri, ülkelerin sismik tehlike düzeyleri, zemin yapıları, ekonomik koşulları ve teknolojik kapasitelerine göre farklılık göstermektedir. Yüksek riskli bölgelerde daha ayrıntılı ve katı kurallar uygulanırken, düşük riskli bölgelerde daha basit düzenlemeler yeterli olabilir. Örneğin, Japonya'da yüksek deprem riski nedeniyle kapsamlı ve sıkı yönetmelikler uygulanırken, Norveç gibi düşük riskli ülkelerde daha basit kurallar yeterli olabilir. Ayrıca, yerel zemin koşulları, inşaat malzemesi tercihleri ve ekonomik durum, yönetmeliklerin içerik ve uygulama biçimini doğrudan etkilemektedir. Her ülkenin kendi ihtiyaçlarına uygun olarak hazırlanan bu yönetmelikler, son yıllarda uluslararası standartlarla uyumlu hale getirilme yönünde de ilerleme kaydetmektedir. Türkiye'de güncel olarak TBDY 2018 kullanılırken, Avrupa'da EUROCODE, Amerika'da ise ASCE kullanılmaktadır.

4.4.1.Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018)

4.4.1.1. Tasarım spektral ivme katsayıları

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde S_{DS} (Spektral İvme Katsayısı), yapının depreme karşı güvenliğini belirleyen bir parametredir. S_{DS}**,** kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı olarak tanımlanmaktadır. Bu değer, yapının bulunduğu bölgedeki sismik risk ve zemin koşullarına göre hesaplanmaktadır. Sismik riskin yüksek olduğu bölgelerde S_{DS} değeri daha yüksek olur, böylece bina tasarımında daha fazla güvenlik önlemi alınmalıdır. S_{D1}, "Spektral Tepki Azaltma Faktörü"nün ilk modunu ifade etmektedir. S_{D1}, yapının tasarım depremi sırasında gösterdiği uzun dönemdeki (daha düşük frekansta) spektral tepkiyi belirlemek için kullanılan bir parametredir. Bu değer, özellikle uzun periyotlu (daha esnek) yapılar için önemlidir ve yapının tasarımında dikkate alınan temel faktörlerden biridir. S_{DS} ve S_{D1} zeminin sismik özelliklerine ve yapı tipine göre hesaplanarak, yapının güvenliğini sağlamak amacıyla kullanılmaktadır.

TBDY 2018 **'**e göre S_s ve S_1, yapıların deprem tasarımında kullanılan spektral ivme katsayılarıdır. Bu katsayılar, yapının deprem sırasında alacağı tepkiyi belirlemek ve tasarım hesaplamalarında kullanmak için önemli parametrelerdir. S_s (Kısa Dönem Spektral Tepki Katsayısı), kısa yapılar için daha yüksek olup, hızlı salınımlar için kullanılırken, S_1 (Uzun Dönem Spektral Tepki Katsayısı), uzun yapılar için daha düşük olup, düşük frekansta salınımlar için kullanılmaktadır. Yerel zemin etki katsayıları ise aşağıda verilen TBDY 2018'de yer alan tablo sayesinde bulunabilir.

$$S_{DS} = S_S \, F_S \qquad (4.9)$$
$$S_{D1} = S_1 \, F_1$$

Denklem 4.9'da gösterildiği üzere harita spektral ivme katsayıları ve yerel zemin etki katsayıları ile birlikte tasarım spektral ivme katsayıları hesaplanmaktadır.

Çizelge 4.3. Yerel Zemin Etki Katsayıları (TBDY,2018)

Tablo 2.1 – Kısa periyot bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayıları

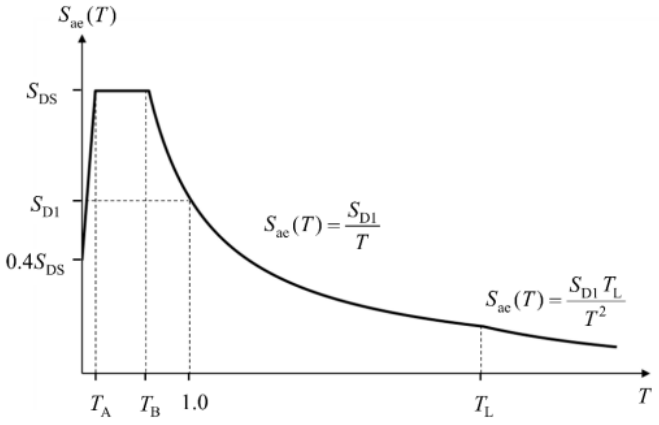
Yerel Zemin Sınıfı	Kısa periyot bölgesi için *Yerel Zemin Etki Katsayısı* F_s					
	$S_s \le 0.25$	$S_s = 0.50$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.00$	$S_s = 1.25$	$S_s \ge 1.50$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
ZC	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
ZD	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
ZE	2.4	1.7	1.3	1.1	0.9	0.8
ZF	*Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır* (**Bkz.16.5**).					

Tablo 2.2 – 1.0 saniye periyot için Yerel Zemin Etki Katsayıları

Yerel Zemin Sınıfı	1.0 saniye periyot için *Yerel Zemin Etki Katsayısı* F_1					
	$S_1 \le 0.10$	$S_1 = 0.20$	$S_1 = 0.30$	$S_1 = 0.40$	$S_1 = 0.50$	$S_1 \ge 0.60$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZC	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4
ZD	2.4	2.2	2.0	1.9	1.8	1.7
ZE	4.2	3.3	2.8	2.4	2.2	2.0
ZF	*Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır* (**Bkz.16.5**).					

4.4.1.2. Yatay elastik tasarım spektrumu

Yatay elastik tasarım spektrumu, yapıların deprem sırasında yatay doğrultuda nasıl tepki vereceğini gösteren bir grafiksel araçtır. Farklı periyotlardaki yapıların salınım ve ivmelerini belirleyerek, deprem etkisini hesaplamak için kullanılmaktadır. Kısa periyotlar daha sert yapılar için, uzun periyotlar ise esnek yapılar için geçerlidir. Bu spektrum, yapıların deprem sırasında alacağı elastik ivmeyi belirleyerek güvenli ve dayanıklı tasarım yapılmasını sağlamaktadır.



Şekil 4.11. Yatay Elastik Tasarım Spektrumu (TBDY,2018)

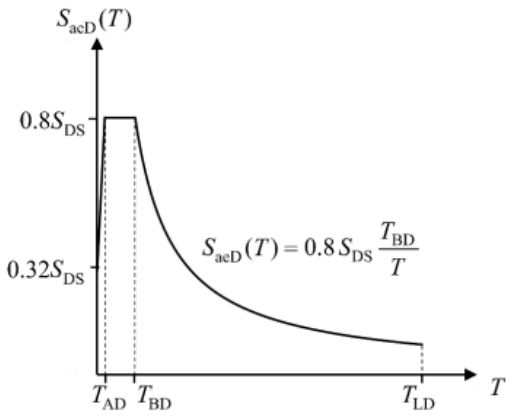
$$S_{ae}(T) = \left(0.4 + 0.6\frac{T}{T_A}\right) S_{DS} \qquad (0 \leq T \leq T_A)$$
$$S_{ae}(T) = S_{DS} \qquad (T_A \leq T \leq T_B) \qquad (4.10)$$
$$S_{ae}(T) = \left(\frac{S_{D1}}{T}\right) \qquad (T_B \leq T \leq T_L)$$
$$S_{ae}(T) = \left(\frac{S_{D1}\, T_L}{T^2}\right) \qquad (T_L \leq T)$$

T_A ve T_B köşe periyotlarını, T doğal titreşim periyodunu ve T_L=6 s olarak sabit yer değiştireme bölgesini geçiş periyodunu temsil etmektedir.

$$T_A = 0.2\frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad ; \quad T_B = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \qquad (4.11)$$

4.4.1.3. Düşey elastik tasarım spektrumu

Düşey elastik tasarım spektrumu, yapıların deprem sırasında düşey doğrultuda (yukarı-aşağı) nasıl tepki vereceğini belirleyen bir araçtır. Yatay hareketlerin yanı sıra düşey hareketler de yapıyı etkileyebilir, özellikle yüksek binalarda ve farklı zemin koşullarında önemli olabilir. Bu spektrum, yapıların düşey ivmelere karşı dayanıklılığını sağlamak için kullanılmaktadır ve tasarımda dikkate alınması gereken bir parametredir.



Şekil 4.12. Düşey Elastik Tasarım Spektrumu (TBDY,2018)

$$S_{aeD}(T) = \left(0.32 + 0.48\frac{T}{T_{AD}}\right) S_{DS} \qquad (0 \leq T \leq T_{AD})$$
$$S_{aeD}(T) = 0.8S_{DS} \qquad (T_{AD} \leq T \leq T_{BD}) \qquad (4.12)$$
$$S_{aeD}(T) = 0.8S_{DS}\left(\frac{T_{BD}}{T}\right) \qquad (T_{BD} \leq T \leq T_{LD})$$

T_{AD} ve T_{BD} köşe periyotlarını temsil etmektedir ve matematiksel olarak aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$T_{AD} = \frac{T_A}{3} \quad ; \quad T_{BD} = \frac{T_B}{3} \quad ; \quad T_{LD} = \frac{T_L}{2} \tag{4.13}$$

4.4.2.ASCE 7 (Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures)

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde tanımlanan S_{DS} ve S_{D1} Amerika yönetmeliğinde ise denklem 4.14'de verildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \tag{4.14}$$
$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1}$$

Kısa periyotlar için maksimum göz önüne alınan deprem spektral tepki ivmesi (S_{MS}) ve 1 saniye periyotta deprem spektral ivmesi (S_{M1}) denklem 4.15'de hesaplanmıştır.

$$S_{MS} = S_S \, F_a \tag{4.15}$$
$$S_{M1} = S_1 \, F_v$$

Çizelge 4.4. Zemin Sınıfına ve Haritalanmış Kısa Periyot Maksimum Göz Önüne Alınan Deprem Spektral İvmesine Bağlı Olarak Fa Değerleri (ASCE,2002)

TABLE 9.4.1.2.4a
VALUES OF F_a AS A FUNCTION OF SITE CLASS AND MAPPED SHORT PERIOD MAXIMUM CONSIDERED EARTHQUAKE SPECTRAL ACCELERATION

Site Class	Mapped Maximum Considered Earthquake Spectral Response Acceleration at Short Periods				
	$S_S \leq 0.25$	$S_S = 0.5$	$S_S = 0.75$	$S_S = 1.0$	$S_S \geq 1.25$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F	*a*	*a*	*a*	*a*	*a*

Note: Use straight-line interpolation for intermediate values of S_S.
[a] Site-specific geotechnical investigation and dynamic site response analyses shall be performed except that for structures with periods of vibration equal to or less than 0.5-seconds, values of F_a for liquefiable soils may be assumed equal to the values for the site class determined without regard to liquefaction in Step 3 of Section 9.4.1.2.2.

Çizelge 4.5. Zemin Sınıfına ve Haritalanmış 1 Saniye Periyot Maksimum Göz Önüne Alınan Deprem Spektral İvmesine Bağlı Olarak F_v Değerleri (ASCE,2002)

TABLE 9.4.1.2.4b
VALUES OF F_v AS A FUNCTION OF SITE CLASS AND MAPPED 1-SECOND PERIOD MAXIMUM CONSIDERED EARTHQUAKE SPECTRAL ACCELERATION

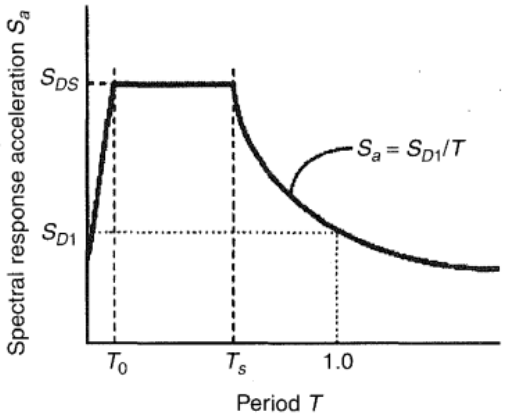
Site Class	Mapped Maximum Considered Earthquake Spectral Response Acceleration at 1-Second Periods				
	$S_1 \leq 0.1$	$S_1 = 0.2$	$S_1 = 0.3$	$S_1 = 0.4$	$S_1 \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
F	*a*	*a*	*a*	*a*	*a*

Note: Use straight-line interpolation for intermediate values of S_1.
[a] Site-specific geotechnical investigation and dynamic site response analyses shall be performed except that for structures with periods of vibration equal to or less than 0.5-seconds, values of F_v for liquefiable soils may be assumed equal to the values for the site class determined without regard to liquefaction in Step 3 of Section 9.4.1.2.2.

$$S_a = S_{DS}\left(0.4 + 0.6\frac{T}{T_0}\right) \qquad (0 \leq T \leq T_0)$$

$$S_a = S_{DS} \qquad (T_0 \leq T \leq T_S) \qquad (4.16)$$

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \qquad (T_S \leq T)$$



Şekil 4.13. Tasarım Tepki Spektrumu (ASCE,2002)

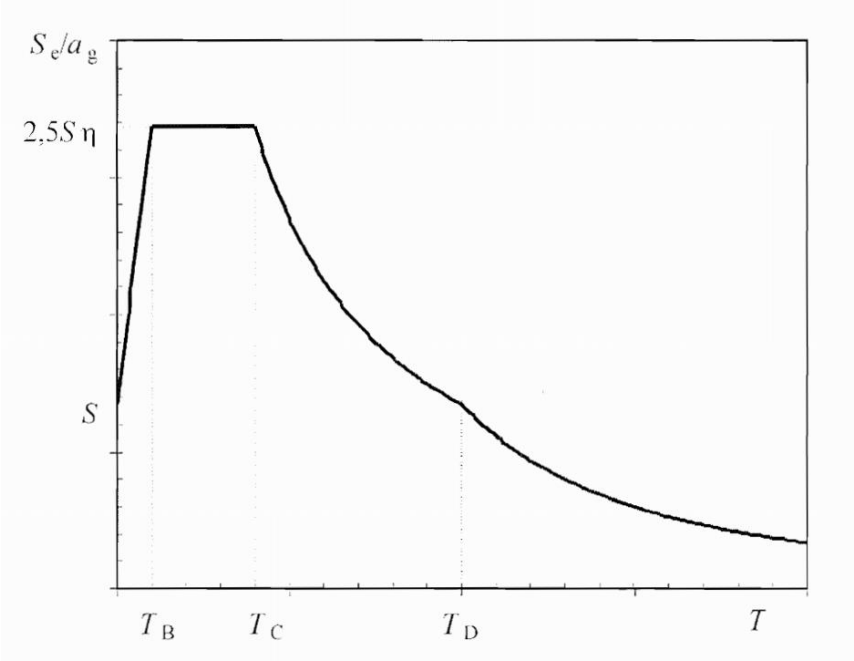
T_0 ve T_S değerleri ise S_{DS} ve S_{D1} değerleri ile denklem 4.17'de gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$T_0 = 0.2\frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad ; \quad T_S = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \tag{4.17}$$

4.4.3. Eurocode 8 (Design of structures for earthquake resistance)

4.4.3.1. Yatay elastik tasarım spektrumu

EN 1998 uygulamalarında tehlike genellikle A tipi zemin üzerindeki referans tepe yer ivmesi değeri , a_{gR} ile belirlenmektedir. Düşük sismik aktivite durumları için önerilen şartlar arasında A tipi zeminde tasarım zemin ivmesi (a_g) 0,08 g 'den büyük değilse veya $a_{g.S}$ 0,1 g 'den büyük değilse a_g'nin mi yoksa $a_{g.S}$'nin mi eşik değer olacağı ülkenin Ulusal Ek'inde bulunabilir. 1998 Erken Uyarı Sistemi gerekmeyen durumlar için yapı kategorileri, zemin türleri ve deprem bölgelerinin seçimi, ülkenin ulusal ekinde belirtilmektedir. Çok düşük sismik aktivite durumlarında, A tipi zeminde tasarım zemin ivmesi (a_g) 0,04g'den küçükse veya $a_{g.S}$ 0,05g 'den küçükse kullanılacak eşik değer ülkenin ulusal ekinde belirlenmektedir.



Şekil 4.14. Elastik Tepki Spektrumunun Şekli (Eurocode 8)

$$S_c(T) = a_g.S.\left[1 + \frac{T}{T_B}.(\eta.2{,}5 - 1)\right] \qquad (0 \le T \le T_B)$$

$$S_c(T) = a_g.S.\eta.2{,}5 \qquad (T_B \le T \le T_C) \qquad (4.18)$$

$$S_c(T) = a_g.S.\eta.2{,}5\left[\frac{T_C}{T}\right] \qquad (T_C \le T \le T_D)$$

$$S_c(T) = a_g.S.\eta.2{,}5\left[\frac{T_C T_D}{T^2}\right] \qquad (T_D \le T \le 4s)$$

$S_c(T)$ elastik tepki spektrumunu, T tek serbestlik dereceli doğrusal bir sistemin titreşim periyodunu, a_g tip A zemin üzerindeki tasarım yer ivmesini ($a_g = \gamma_1 \cdot a_{gR}$), T_B sabit spektral ivme dalının alt sınır periyodunu, T_C sabit spektral ivme dalının üst sınır periyodunu, T_D spektrumun sabit yer değiştirme tepki aralığının başlangıcını tanımlayan değerini, S zemin faktörünü, η sönüm düzeltme faktörü (referans değeri, %5 viskoz sönümleme için η = 1 olarak) temsil etmektedir.

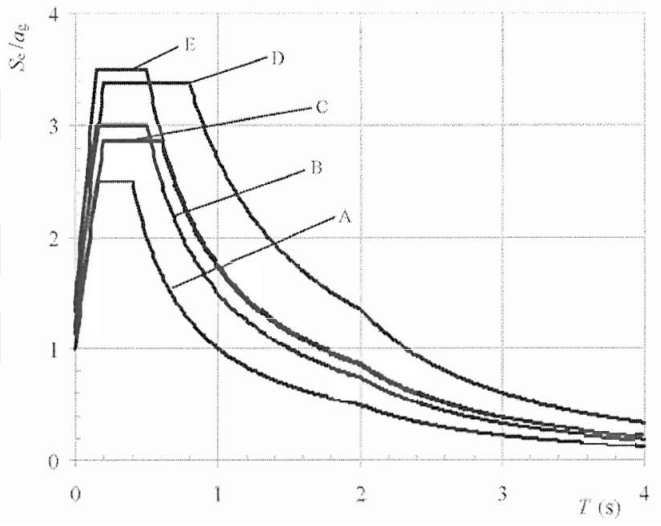
Her zemin türü ve spektrum türü (şekli) için T_B, T_D ve S değerlerinin bir ülkenin ulusal ekinde belirtilmesi gerekmektedir. Eğer derin jeoloji dikkate alınmıyorsa önerilen yöntem, Tip 1 ve Tip 2 olmak üzere iki spektrum türünün kullanılmasıdır. Zemin türüne bağlı olarak T_B, T_D periyotları ve zemin faktörü S ile tanımlanmaktadır. Deprem tehlikesine katkı sağlayan depremlerin yüzey dalgası büyüklüğü (M_s) 5,5'ten küçükse, Tip 2 spektrumu kullanılması önerilmektedir. Beş farklı zemin türü (A, B, C, D, E) için bu parametrelerin değerleri, ilgili ülkenin ulusal ekinde belirtilmektedir (Çizelge 4.6 ve 4.7). %5 sönümleme oranıyla normalize edilmiş spektrum şekilleri sunulmuş olup (Şekil 15 ve 16), derin jeolojinin dikkate alındığı durumlarda ulusal ekte farklı spektrumlar tanımlanabilir.

Çizelge 4.6. Önerilen Tip I Elastik Tepki Spektrumunu Tanımlayan Parametrelerin Değerleri (Eurocode 8)

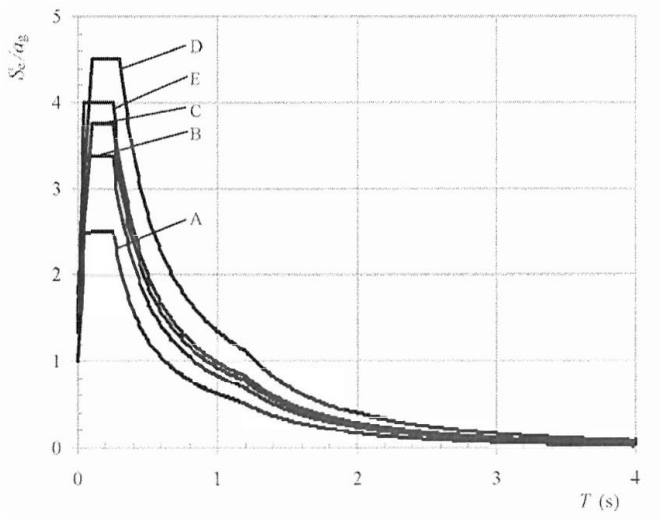
Ground type	S	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
A	1,0	0,15	0,4	2,0
B	1,2	0,15	0,5	2,0
C	1,15	0,20	0,6	2,0
D	1,35	0,20	0,8	2,0
E	1,4	0,15	0,5	2,0

Çizelge 4.7. Önerilen Tip 2 Elastik Tepki Spektrumunu Tanımlayan Parametrelerin Değerleri (Eurocode 8)

Ground type	S	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
A	1,0	0,05	0,25	1,2
B	1,35	0,05	0,25	1,2
C	1,5	0,10	0,25	1,2
D	1,8	0,10	0,30	1,2
E	1,6	0,05	0,25	1,2



Şekil 4.15. Zemin türleri A'dan E'ye kadar önerilen Tip 1 elastik tepki spektrumları (%5 sönümleme için) (Eurocode 8)



Şekil 4.16. Zemin türleri A'dan E'ye kadar önerilen Tip 1 elastik tepki spektrumları (%5 sönümleme için) (Eurocode 8)

4.4.3.2. Düşey elastik tasarım spektrumu

$$S_{vc}(T) = a_{vg}.\left[1 + \frac{T}{T_B}.(\eta.3{,}0 - 1)\right] \quad (0 \leq T \leq T_B)$$
$$S_{vc}(T) = a_{vg}.\eta.3{,}0 \quad (T_B \leq T \leq T_C) \quad (4.19)$$
$$S_{vc}(T) = a_{vg}.\eta.3{,}0\left[\frac{T_C}{T}\right] \quad (T_C \leq T \leq T_D)$$
$$S_{vc}(T) = a_{vg}.\eta.3{,}0\left[\frac{T_C T_D}{T^2}\right] \quad (T_D \leq T \leq 4s)$$

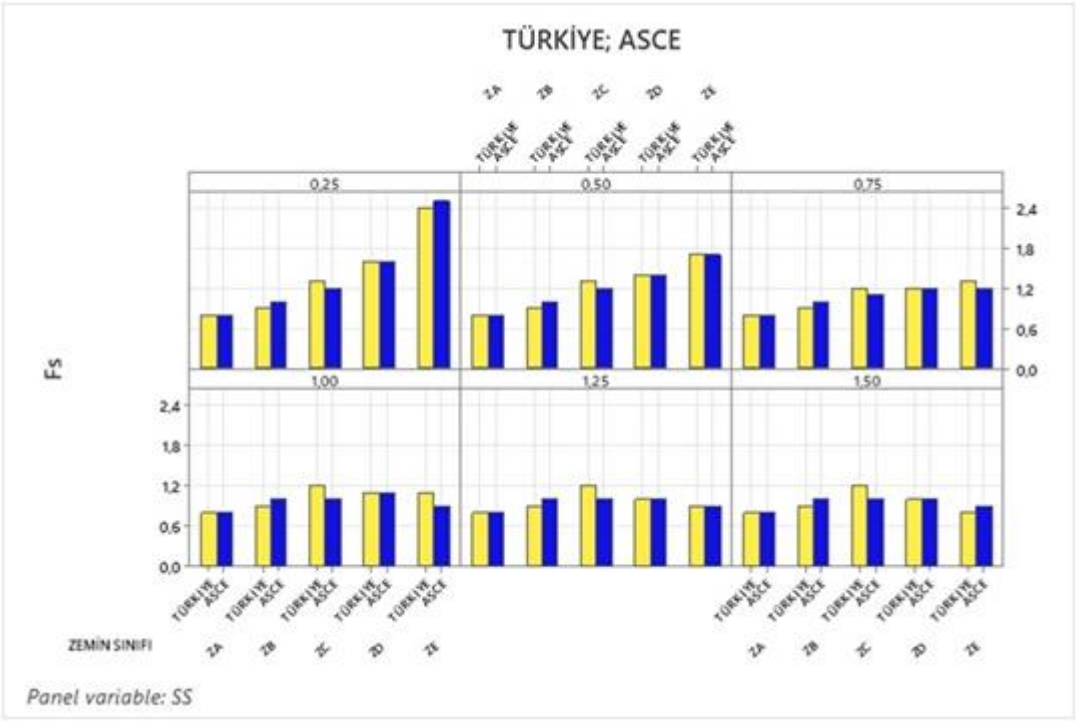
Çizelge 4.8. Düşey elastik tepki spektrumunu tanımlayan parametrelerin önerilen değerleri (Eurocode 8)

Spectrum	a_{vg}/a_g	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
Type 1	0,90	0,05	0,15	1,0
Type 2	0,45	0,05	0,15	1,0

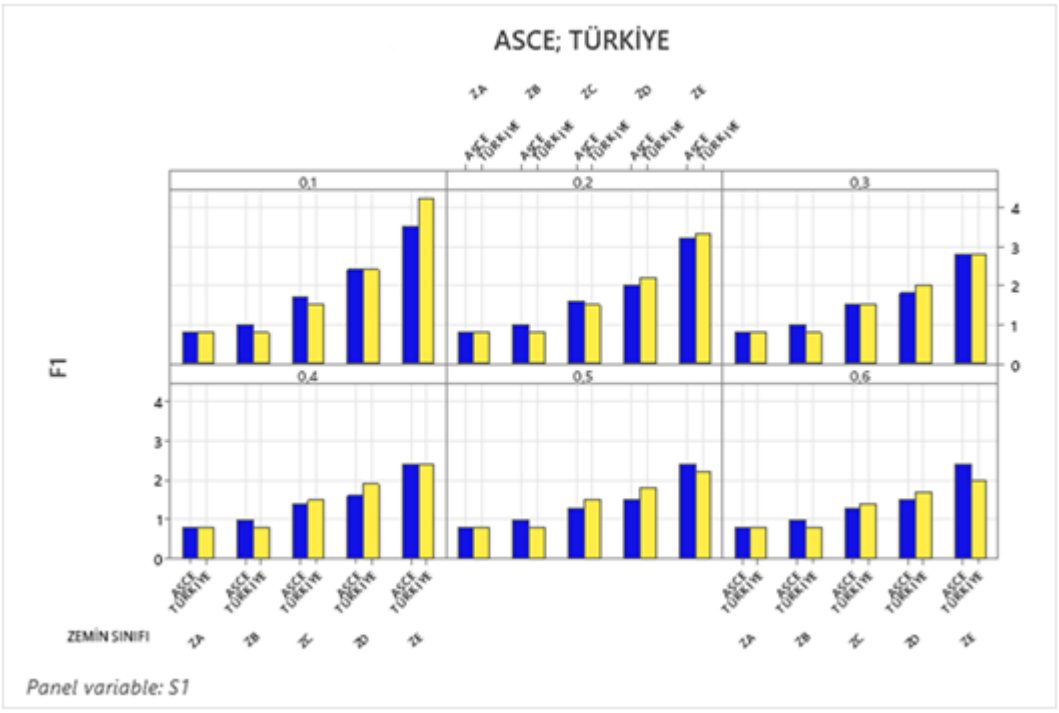
Bir ülkede kullanılacak her bir dikey spektrum için T_B, T_C, T_D ve a_{vg} parametrelerine atfedilecek değerler, ilgili ülkenin ulusal ekinde bulunabilir. Önerilen seçim, iki tür dikey spektrum kullanılmasıdır: Tip 1 ve Tip 2. Yatay bileşenleri tanımlayan spektrumlar için, depremlerin yüzey dalgası büyüklüğü (M_s) 5,5'ten büyük olmayan depremler için Tip 2 spektrumunun kullanılması önerilmektedir. A, B, C, D ve E zemin türleri için dikey spektrumları tanımlayan parametrelerin önerilen değerleri Çizelge 4.8'de verilmiştir. Bu önerilen değerler, özel zemin türleri S_1 ve S_2 için geçerli değildir.

4.4.4.Yönetmeliklerin kıyaslanması

TBDY-2018 ve ASCE-2002 kapsamında incelenen kısa periyot bölgesi ve 1.0 saniye periyot için tanımlanan yerel zemin etki katsayıları tablosu esas alınarak çizilen grafik ile beraber karşılaştırma yapılmıştır. Yerel zemin etki katsayıları TBDY-2018 de yer alan F_S ASCE-2002 yönetmeliğinde F_a tanımına karşılık gelirken F_1 değeri ASCE-2002'de F_v tanımına karşılık gelmektedir.



Şekil 4.17. ASCE-2002 ve TBDY-2018 F_s ve F_a (kısa periyot bölgesi) karşılaştırması



Şekil 4.18. ASCE-2002 ve TBDY-2018 F_1 (1.0 saniye periyot) karşılaştırması

TBDY-2018 ve ASCE-2002 yönetmelikleri zemin tiplerine göre karşılaştırıldığında kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayıları ZA ve ZD zemin tipinde çok değişkenlik göstermezken, ZB zemin tipi için ASCE-2002 yönetmeliğinin TBDY-2018 göre küçük bir farklılıkla etki katsayısının daha büyük olduğunu ve ZC zemin tipi içinse durumun tam tersi olduğu görülebilir. Ancak ZE zemin tipi hariç tüm zemin tiplerinde etki katsayıları iki yönetmelik için de yaklaşık ve orantılı değerler alırken ZE zemin tipinde harita spektral ivme katsayılarına göre çok daha fazla farklılıklar gözlemlenebilir ve yönetmelikler arası bir karşılaştırma yapmanın zorlaştığı görülebilmektedir. Bu gözlemle ise zemin zayıfladıkça etki katsayılarında harita spektral ivme katsayılarını esas alarak değişkenliğin arttığı ve yönetmeliklerin farklılaştığı sonucuna ulaşılabilir. Harita spektral ivme katsayılarının büyüklüğüne göre bir karşılaştırma yapıldığında ise spektral ivme katsayıları küçükken zemin güçsüzleştikçe yerel zemin etki katsayısının non-lineer olarak arttığı ancak spektral ivme katsayısı arttıkça yerel zemin etki katsayısının düzensizleştiği söylenebilir.

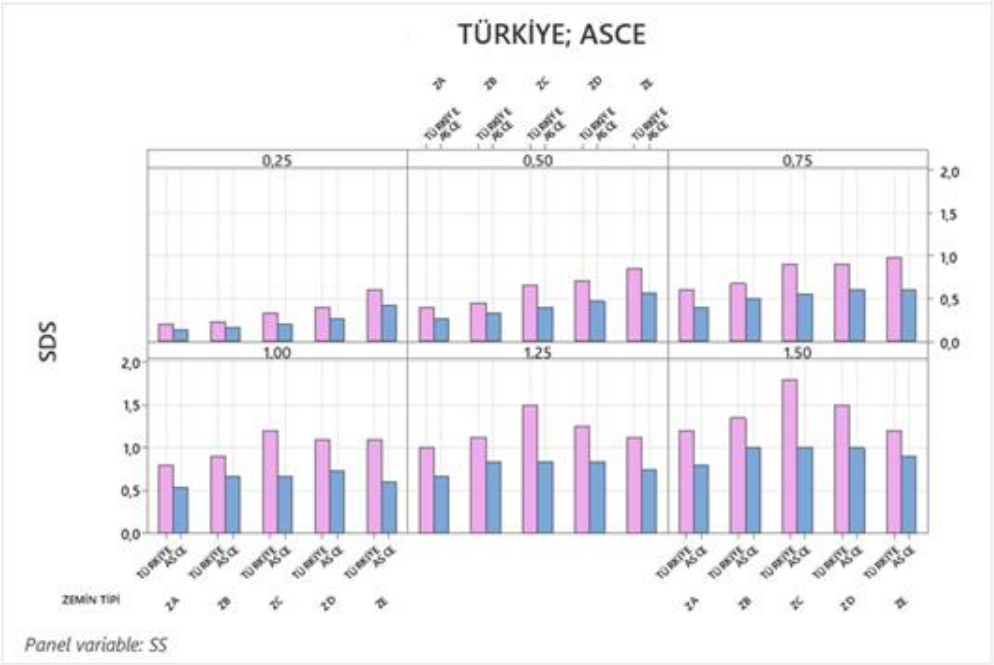
Zemin tiplerine göre karşılaştırıldığında 1.0 saniye periyot için yerel zemin etki katsayılarına bakıldığında ise ZA zemin tipinde yine çok değişkenlik olmadığını, ZB zemin tipi için ASCE-2002 yönetmeliğinin TBDY-2018 göre küçük bir farklılıkla etki katsayısının daha büyük olduğunu ve ZD zemin tipi içinse durumun tam tersi olduğu görülebilir. ZC zemin tipi için ise etki katsayısının yönetmeliklere göre düzensiz olduğunu görebiliriz. ZE zemin tipinde harita spektral ivme katsayılarına göre çok daha fazla farklılıklar gözlemlenebilir ve yönetmelikler arası bir karşılaştırma yapmanın zorlaştığı görülebilmektedir. Ancak harita spektral ivme katsayılarının büyüklüğüne göre bir karşılaştırma yapıldığında kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı düzensizken 1.0 saniye periyot için daha düzenli bir şekilde zemin güçsüzleştikçe yerel zemin etki katsayılarının her iki yönetmelik için de arttığı söylenebilir. 1.0 saniye periyot için yerel zemin etki katsayıları ve kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayıları karşılaştırıldığında ise güçlü zeminlerde benzer ve yakın değerler çıkarken güçsüz zeminlerde her iki yönetmelikte de daha farklı değerler çıkmıştır. TBDY-2018 ve ASCE-2002 kapsamında incelenen kısa periyot bölgesi ve 1.0 saniye periyot için tanımlanan yerel zemin etki katsayıları tablosu ve tasarım spektral ivme katsayıları formülleri ile hesaplanarak hazırlanan kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı (S_{DS}) ve 1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı (S_{D1}) tablosu hazırlanıp esas alınarak çizilen grafik ile beraber karşılaştırma yapılmıştır.

Çizelge 4.9. TBDY-2018 yönetmelik düzenlerine göre hesaplanan S_{DS} değerleri

ZEMİN TİPİ	S_{DS}					
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1,0$	$S_s = 1,25$	$S_s \leq 1,50$
ZA	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2
ZB	0,225	0,45	0,675	0,9	1,125	1,35
ZC	0,325	0,65	0,9	1,2	1,5	1,8
ZD	0,4	0,7	0,9	1,1	1,25	1,5
ZE	0,6	0,85	0,975	1,1	1,125	1,2

Çizelge 4.10. ASCE-2002 yönetmelik düzenlerine göre hesaplanan S_{DS} değerleri

ZEMİN TİPİ	S_{DS}					
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1,0$	$S_s = 1,25$	$S_s \leq 1,50$
ZA	0,13	0,27	0,40	0,53	0,67	0,80
ZB	0,17	0,33	0,50	0,67	0,83	1,00
ZC	0,20	0,40	0,55	0,67	0,83	1,00
ZD	0,27	0,47	0,60	0,73	0,83	1,00
ZE	0,42	0,57	0,60	0,60	0,75	0,90



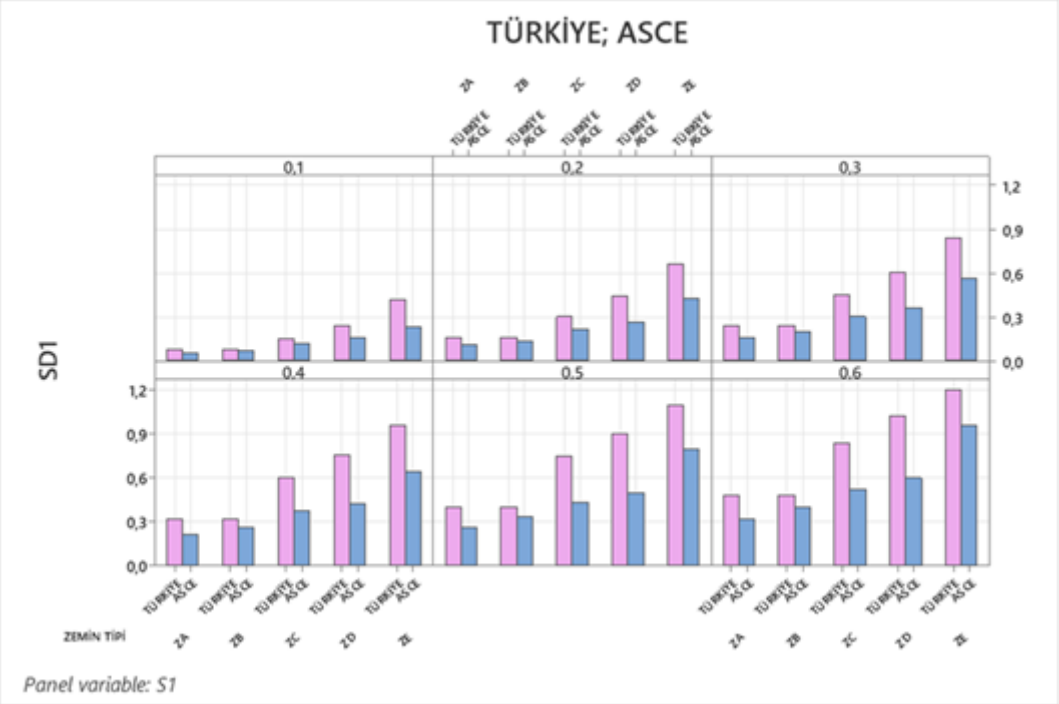
Şekil 4.19. ASCE-2002 ve TBDY-2018 S_{DS} karşılaştırması

Çizelge 4.11. TBDY-2018 yönetmelik düzenlerine göre hesaplanan S_{D1} değerleri

ZEMİN TİPİ	S_{D1}					
	$S_1 \leq 0,1$	$S_1 = 0,2$	$S_1 = 0,3$	$S_1 = 0,4$	$S_1 = 0,5$	$S_1 \leq 0,6$
ZA	0,08	0,16	0,24	0,32	0,4	0,48
ZB	0,08	0,16	0,24	0,32	0,4	0,48
ZC	0,15	0,3	0,45	0,6	0,75	0,84
ZD	0,24	0,44	0,6	0,76	0,9	1,02
ZE	0,42	0,66	0,84	0,96	1,1	1,2

Çizelge 4.12. ASCE-2002 yönetmelik düzenlerine göre hesaplanan S_{D1} değerleri

ZEMİN TİPİ	S_{D1}					
	$S_1 \leq 0,1$	$S_1 = 0,2$	$S_1 = 0,3$	$S_1 = 0,4$	$S_1 = 0,5$	$S_1 \leq 0,6$
ZA	0,05	0,11	0,16	0,21	0,27	0,32
ZB	0,07	0,13	0,20	0,27	0,33	0,40
ZC	0,11	0,21	0,30	0,37	0,43	0,52
ZD	0,16	0,27	0,36	0,43	0,50	0,60
ZE	0,23	0,43	0,56	0,64	0,80	0,96



Şekil 4.20. ASCE-2002 ve TBDY-2018 S_{D1} karşılaştırması

TBDY-2018 ve ASCE-2002 yönetmelikleri Harita spektral ivme katsayılarının büyüklüğüne göre bir karşılaştırma yapıldığında zemin güçsüzleştikçe iki yönetmelik için de bir düzensizlik ortaya çıktığı görülürken yönetmeliklerin 0.5 ve 0.25 harita spektral ivme katsayıları için daha dengeli sonuçlar verdiği görülmektedir. TBDY-2018 yönetmeliğinde harita spektral ivme katsayıları büyük değerler aldıkça ASCE-2002 yönetmeliğine göre kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı (S_{DS}) daha büyük değerlere ulaşmıştır. Zemin tiplerine göre bir karşılaştırma yapıldığında ASCE-2002 yönetmeliği her zemin tipi için TBDY-2018 yönetmeliğine göre daha kararlı davranışlar göstermiştir. Bunun sonucunda kısa periyot bölgesi yerel zemin etki katsayıları her ne kadar kararlı bir davranışta gözükse de TBDY-2018 yönetmeliğinin zemin tiplerinin hepsinde çok fazla S_{DS} varyasyonu olduğu gözükmektedir. S_{DS}, bir yapının tasarım depremi sırasında aldığı maksimum ivmeyi belirlemek için önemli ve deprem sırasında oluşabilecek zararları tahmin etmek ve yapısal güvenliği sağlamak için kullanıldığı için bu kadar değişken bir grafik beklenmemektedir.

1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı (S_{D1}) grafiği incelendiğinde ise TBDY-2018 yönetmeliğinin iyi zeminlerde harita spektral ivme katsayılarının büyüklüğüne göre gayet dengeli bir grafik sağladığı zayıf zeminlerde daha büyük S_{D1} değerlerine ulaştığı ancak ASCE-2002 yönetmeliğinde TBDY-2018 yönetmeliğine göre her zeminde ve harita spektral ivme katsayısında daha küçük S_{D1} değerlerine ulaştığı ancak zemin tiplerinde daha dengeli bir grafik gösterdiği görülmektedir. Bunun sonucunda 1.0 saniye periyot için yerel zemin etki katsayıları ve S_{D1} grafiği benzer sonuçlar ortaya koyduğu halde TBDY-2018 yönetmeliğinde 1.0 saniye periyot yerel zemin etki katsayıları için daha yüksek değerler görülürken S_{D1} için ASCE-2002 yönetmeliğinde daha düşük veriler gözlemlenmiştir.

5.MATERYAL VE YÖNTEM

5.1. Deepsoil

DEEPSOIL, Illinois Üniversitesi Urbana-Champaign'de (UIUC) 1998 yılından bu yana geliştirilen ve zemin tepki analizleri için kullanılan bir yazılımdır. Bu program, hem doğrusal olmayan (nonlinear) hem de eşdeğer doğrusal (equivalent linear) analizleri gerçekleştirebilme yeteneğine sahip olmakla beraber bu analizleri hem frekans hem de zaman tanım alanında gerçekleştirebilmekte, sınırsız sayıda zemin tabakası tanımlanmasına olanak sağlamaktadır (Hashash, 2016) . Bu tabakalar için ivme, gerilme-zaman ilişkisi, fourier spektrumu ve amplifikasyon oranı gibi çeşitli spektral analiz sonuçları elde edilebilmektedir. Ana özellikleri arasında güç kontrollü doğrusal olmayan model, frekans bağımsız sönüm formülasyonu, su basıncı üretimi ve dağılımı modelleri, grafiksel kullanıcı arayüzü ve paralel işlem yapabilme kapasitesi bulunmaktadır. DEEPSOIL, kullanıcıların zemin profillerini tanımlamalarına, analiz türünü seçmelerine ve sonuçları görselleştirmelerine olanak tanır. Ayrıca, kullanıcıların analiz sonuçlarını dışa aktarmalarına ve diğer yazılımlarla entegrasyon sağlamalarına imkan vermektedir.

Bu çalışmada, bir boyutlu zemin davranış analizleri için kullanılan Deepsoil yazılımına odaklanmakla beraber SeismoSignal ve SeismoMatch programları da kullanılmıştır. Deprem yönetmelikleri (Eurocode-8, IBS 2018, TBDY 2018) zaman tanım alanında analizlerin kullanılmasını önerirken, analizlerde gerçek veya sentetik ivme kayıtlarının, tasarım spektrumlarıyla uyumlu olması gerekmektedir. TBDY 2018'e göre, zemin yüzeyine özel deprem spektrumu, taban kayası ve zemin yüzeyi spektral ivme oranlarının ortalamalarından türetilen yerel zemin etki katsayısıyla belirlenmektedir. Bu kapsamda, çalışma kapsamında 18 farklı ivme kaydı kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

5.1.1. Doğrusal olmayan analiz (NL)

DEEPSOIL uygulamasında doğrusal olmayan (NL) analiz, zeminlerin deprem gibi büyük yer hareketleri altında gösterdiği elastik olmayan, doğrusal olmayan davranışları

modellemek için kullanılmaktadır. Bu analizde, zeminlerin kayma modülü ve sönüm oranı, yer hareketinin genliğine bağlı olarak değişir ve zeminler büyük hareketlerde gevşeme, plastikleşme gibi davranışlar sergileyebilir. Doğrusal olmayan analiz, iteratif bir süreçle zemin profillerinin sürekli olarak güncellenmesini sağlar ve zemin sıvılaşması gibi etkileri de dikkate almaktadır. DEEPSOIL, doğrusal olmayan analizlerle zeminlerin gerçek deprem koşullarındaki dinamik tepkilerini doğru bir şekilde simüle etmektedir, ancak bu analiz daha yüksek hesaplama gücü gerektirmektedir. Bu, büyük depremler ve ağır yapıların tasarımı için kritik öneme sahiptir.

5.1.2. Eşdeğer doğrusal analiz (EL)

DEEPSOIL uygulamasında eşdeğer doğrusal (EL) analiz, zeminlerin deprem gibi dinamik yükler altındaki davranışlarını tahmin etmek için kullanılan, doğrusal bir modelle yapılan bir analiz yöntemidir. Bu yöntemde, zemin katmanlarının kayma modülü ve sönüm oranı, yer hareketinin genliğine bağlı olarak dinamik şekilde güncellenmektedir ve zeminlerin doğrusal olmayan (NL) davranışı basitçe doğrusal bir modelle taklit edilmektedir. EL analizleri, daha hızlı ve daha az hesaplama gücü gerektirdiği için büyük deprem hareketlerinin modellemesinde tercih edilmektedir, ancak doğrusal olmayan analizlere göre daha az hassas olabilir. DEEPSOIL, kullanıcıya NL analizleriyle birlikte otomatik olarak EL analiz sonuçlarını da sunmaktadır, böylece iki analiz türü arasında kolay geçiş sağlanmaktadır.

Hangi yöntemin seçileceği, zemin özellikleri ile anakaya deprem hareketinin karakteristiklerine bağlıdır. Zeminin kayma modülü ve sönüm oranı sabit kabul edilmekle birlikte, plastisite indisi ve efektif gerilmeler dikkate alınmaktadır. Düşük tekrarlı gerilmelerde eşdeğer doğrusal analiz yöntemi önerilirken, yüksek tekrarlı gerilmelerde doğrusal olmayan analiz daha gerçekçi sonuçlar vermektedir. Bu fark, zeminin düşük gerilme durumlarında elastik, yüksek gerilme durumlarında ise elasto-plastik veya plastik davranış sergilemesiyle açıklanmaktadır. Kumlu zeminler için Seed ve Idriss (1990), killi zeminler için Darendeli (2001) eğrileri önerilmekle beraber bu çalışmada Darendeli (2001) modeli kullanılmıştır.

5.1.3. Darendeli (2001)

Darendeli çalışmasında, kayma kuvveti - kayma gerinim eğrilerini deneysel verilere dayanarak oluşturmuştur. Küçük gerinimlerde rezonans kolon testi, orta seviyelerde ise torklu kayma testi kullanılmaktadır. Büyük gerinimlerde ise bu veriler ekstrapole edilerek kayma kuvveti hesaplanmaktadır, ancak bu ekstrapolasyon bazen yanlış sonuç verebilir. Bu yüzden büyük gerinimlerde kayma kuvveti düzeltmesi gereklidir. Groholski ve diğ. (2016) tarafından önerilen model, büyük gerinimlerdeki kayma kuvvetine göre referans eğrilerini otomatik olarak düzeltmektedir. Kullanıcı, bu parametreleri DEEPSOIL yazılımı ile elde edebilmektedir. Bu yazılım, kayma kuvveti düzeltmesi yaparak doğru kayma kuvveti - kayma gerinim eğrisini sağlamaktadır.

$$\theta_\tau = \theta_1 + \theta_2 * \frac{\theta_4 * (\frac{\gamma}{\gamma_r})^{\theta_5}}{{\theta_3}^{\theta_5} + \theta_4 * (\frac{\gamma}{\gamma_r})^{\theta_5}} \tag{5.1}$$

$$\gamma_\tau = \tau_{max}/G_0 \tag{5.2}$$

θ_τ belirlendikten sonra, kayma gücü - kayma gerinimi eğrisi şu şekilde oluşturulmaktadır:

$$\tau = \tau_{max} * \left[\frac{1}{\theta_\tau} * \left\{1 + (\frac{\gamma}{\gamma_r}) - \sqrt{\left\{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}\right\}^2 - 4 * \theta_\tau * \frac{\gamma}{\gamma_r}}\right\}\right] \tag{5.3}$$

5.2. SeismoSignal

SeismoSignal, deprem mühendisliği ve sismoloji alanında, güçlü hareket verilerinin işlenmesi, analizi ve görselleştirilmesi için kullanılan bir yazılımdır. İvme kayıtlarını okuyup filtreleyerek temel düzeltme yapabilir, hız ve yer değiştirme zaman serileri türetebilir. Elastik tepki spektrumları, fourier spektrumları, arias yoğunluğu ve sıçrama indeksi gibi sismik parametreleri hesaplayarak verileri grafiksel olarak analiz etmektedir. Deprem mühendisleri, zemin mühendisleri ve sismologlar, yapıların deprem performansını değerlendirmek ve zemin davranışını analiz etmek için bu yazılımı kullanmaktadır. Yazılımdan elde edilen verilerle deprem karakteristikleri hakkında yorum yapılabilir.

Bu çalışmada SeismoSignal programı 18 deprem kaydının birden çok deprem karakteristiğini elde etmek amacıyla kullanılmıştır.

5.3.SeismoMatch

SeismoMatch, Abrahamson (1992) ve Hancock vd. (2006) tarafından önerilen dalga algoritmasını veya Al Atik ve Abrahamson (2010) tarafından önerilen algoritmayı kullanarak deprem ivme kayıtlarını belirli bir hedef tepki spektrumuna uyarlayabilen bir uygulamadır. Kullanıcılar, bazı ivme kayıtlarını yükledikten ve hedef tepki spektrumunu tanımladıktan sonra, yalnızca spektral uyum algoritmasını seçmeli, uyumlu spektrumun dönem aralığını ayarlamalı, gerekli toleransı belirlemeli ve spektral uyum işlemini başlatmalıdır. SeismoMatch ayrıca, kullanıcıların birden fazla uyumlu ivme kaydını birleştirerek maksimum ve ortalama uyumsuzluk gerekliliklerini karşılayan bir birleşik ortalama uyumlu spektrum elde etmelerine olanak tanıyan bir modüle sahiptir.

Bu çalışmada SeismoMatch programı 18 deprem kaydının spektraya göre ölçeklendirilmiş ivme kayıtlarını elde etmek amacıyla kullanılmıştır.

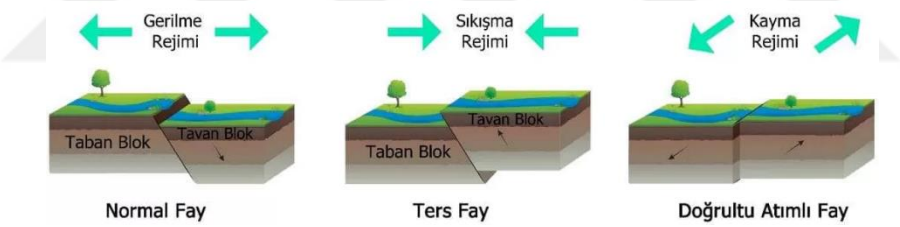
5.4. Çalışmada Kullanılan Zemin Özellikleri

Analizlerde kullanılacak zemin profili için sismik haritadan seçilen PGA değeri 0.451g ve S_{DS} ve S_{D1} değerleri 1.120 ve 0.798 olup Zemin 30 m boyunca yumuşak kil davranışı gösteren düşük plastisiteli bir profilden oluşmaktadır. Plastisite indeksi 15-20 arasında, birim hacim ağırlığı ise 17-17.5 kN/m³ olan ve 30 metre derinlikte ortalama kayma dalgası hızı 180 m/s olarak ölçülen zemin, ZE sınıfı zemin olarak belirlenmiştir. Anakaya derinliği bilinmediğinden, 30 m derinlikte zemin, elastik kaya olarak kabul edilmiştir. Laboratuvar deneyleri sonucunda, zeminin drenajsız kayma dayanımının 35-80 kPa aralığında değiştiği belirlenmiş olup, dinamik analizlerde Darendeli (2001) modeli esas alınmıştır. Yeraltı su seviyesinin yüzeye oldukça yakın olduğu belirlenmiş ve yapılan analizlerde, su seviyesinin yüzeyde olduğu kabul edilerek değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir.

5.5.Analizlerde Kullanılan Deprem Kayıtlarının Seçimi ve Ölçeklendirilmesi

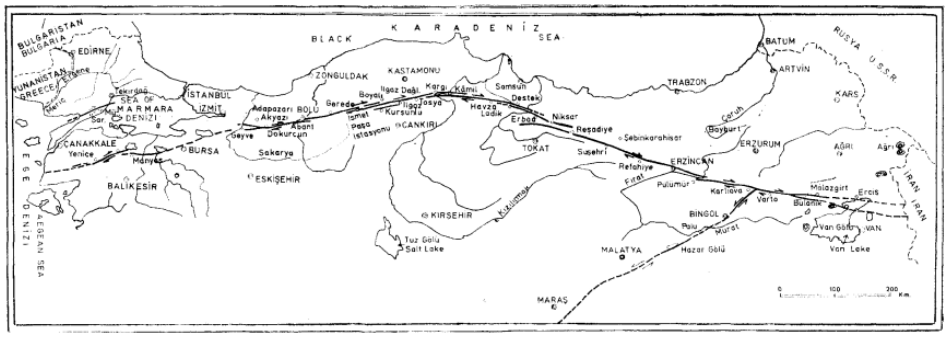
TBDY 2018 tarafından deprem etkilerine dayanıklı yapıların tasarımında kullanılacak deprem kayıtlarının belirlenmesinde, tasarıma esas alınan kuvvetli yer hareketi düzeyine uygun şekilde deprem büyüklüğü, fay mesafesi, kaynak mekanizmaları ve yerel zemin koşullarının göz önünde bulundurulması tavsiye edilmektedir.

Normal Faylar, tektonik levhaların uzaklaştığı bir ortamda oluşmaktadırlar. Yer kabuğundaki gerilme nedeniyle kayaçlar yerçekimi etkisiyle aşağı doğru kayarlar. Ters Faylar (Reverse), iki tektonik levhanın birbirine doğru hareket ettiği bir ortamda oluşmaktadırlar. Yer kabuğundaki gerilme nedeniyle kayaçlar yukarı doğru kayarlar. Yanal, Doğrultu Atımlı (Strike-Slip) Faylar, iki levhanın yan yana hareket ettiği bir ortamda oluşmaktadırlar. Kayaçlar, birbirlerine paralel olarak yanal olarak kayarlar. Transvers (Oblique) Faylar, hem yanal hem de yükselme veya alçalma hareketleri sergileyen karmaşık faylardır. Hem yanal hem de dikey bileşenler içerebilirler.



Şekil 5.1. Fay Çeşitleri

Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ), Türkiye'nin en uzun ve en aktif doğrultu atımlı fay hattıdır. Yaklaşık 1200 km boyunca Bingöl-Karlıova'dan başlayarak Saros Körfezi'ne kadar uzanır. Bu fay, Avrasya ve Araba tektonik levhalarının hareketiyle oluşmaktadır ve genellikle sağ yönlü bir kayma hareketi göstermektedir. Kuzey Anadolu Fayı'nın doğrultu atımlı sağ yönlü bir fay zonu olduğu, ilk kez 27 Aralık 1939 büyük Erzincan depreminden (M_w=8) ve onu izleyen 1942, 1943 ve 1944 depremlerinden sonra anlaşılmıştır (Ketin, 1948). Fay hattı, farklı segmentlerden oluşur ve her segmentin uzunluğu ve hareket hızı değişkenlik göstermektedir. KAFZ'nin yakınındaki bölgelerde büyük depremler, zemin etkileri ve yapıların dayanıklılığı açısından önemli tehlikeler yaratabilir.



Şekil 5.2. Kuzey Anadolu fay zonu

Bu çalışma kapsamında, eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizler için PEER veri tabanından temin edilen farklı yönetmeliklerin kullanıldığı ülkelerden 18 adet gerçek deprem kaydı kullanılmıştır. Bu kayıtlar, deprem büyüklüğü, sismik risk, fay türü ve zemin özellikleri gibi faktörlere bağlı olarak seçilmiş olup, $6.5 \leq M_w \leq 7.5$ büyüklüğünde, faydan 0-20 km uzaklıkta yer alan 18 farklı istasyondan elde edilmiştir. Kayıtların zemine ilişkin V_{s30} değerinin 180-760 m/s aralığında olması, analizlerin zemin ve sismik tehlike koşullarına uygunluğu açısından yeterli görülmüştür.

Çizelge 5.1. PEER veri tabanın temin edilen deprem kayıtları

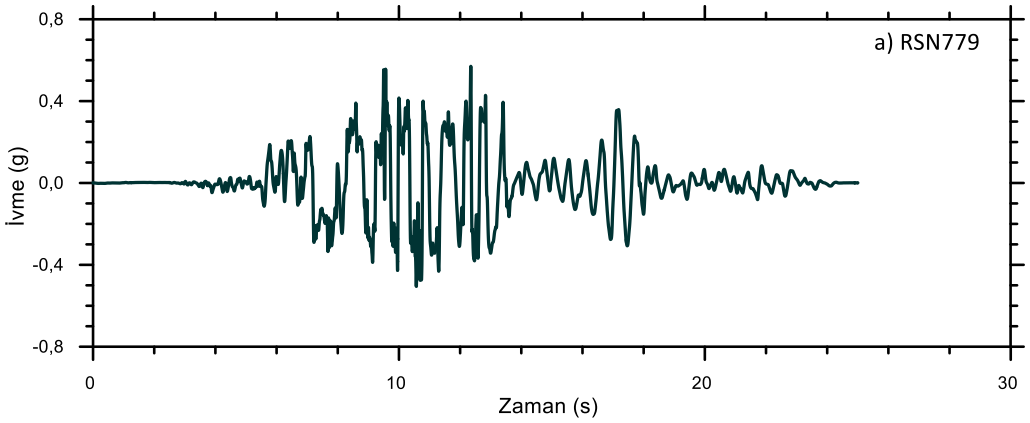
Deprem İsmi	Yıl	Büyüklük	Fay	Vs30 (m/sec)	Rjb (km)	Rrup (km)
Friuli_ Italy-0	1976	7,1	Ters	505,23	14,97	15,82
Tabas_ Iran	1978	7,01	Ters	471,53	0	13,94
Corinth_ Greece	1981	7	Eğik Atımlı Normal	361,4	10,27	10,27
Nniigata_ Japa	2004	6,53	Ters	480,4	0,49	9,46
Irpinia_ Italy-01	1980	6,69	Normal	649,67	8,14	8,18
Montenegro_ Yugoslavia	1979	6,93	Ters	543,26	0	8,01
Cape Mendocino	1992	6,8	Ters	567,78	0	6,96
Northridge-01	1994	6,69	Ters	282,25	0	6,5
Gazli_ USSR	1976	6,9	Ters	259,59	3,92	5,46
Iwate_ Japan	2008	6,5	Ters	506,44	0	4,8
Erzican_ Turkey	1992	7,35	Doğrultu Atımlı	352,05	0	4,38
Duzce_ Turkey	1999	6,6	Doğrultu Atımlı	454,2	3,93	3,93
Loma Prieta	1989	6,63	Eğik Atımlı Ters	594,83	0	3,88
Imperial Valley-06	1979	6,9	Doğrultu Atımlı	223,03	0,44	2,66
Bam_ Iran	2003	6,9	Doğrultu Atımlı	487,4	0,05	1,7
Kobe_ Japan	1995	6,61	Doğrultu Atımlı	256	1,46	1,47
Darfield_ New Zealand	2010	7,14	Doğrultu Atımlı	344,02	1,22	1,22
Tottori_ Japan	2000	6,6	Doğrultu Atımlı	310,21	0,83	0,97

Depremlerin pik ivmeler, hızlar veya arias yoğunluğu gibi birçok karakteristik özellikte birbirlerinden çeşitlilik göstermektedir. Bu ivmelerin SeismoSignal yazılımı sayesinde karakteristik özellikleri tanımlanmıştır.

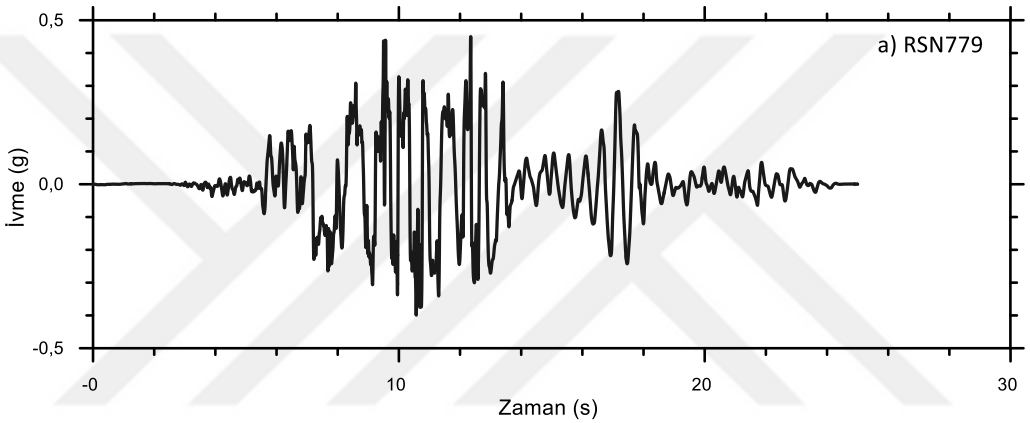
Çizelge 5.2. SeismoSignal programından temin edilen deprem özellikleri

Deprem İsmi	RSN	PGA	PGV	PGD	Arias Şiddeti (m/s)	Karakteristik Yoğunluk	Toplam Mutlak Hız (cm/sec)	Housner Yoğunluğu (cm)	Baskın Periyot (s)	Anlamlı Süre (s)
Friuli_ Italy-0	125	0,357	22.85	4,590	0,786	0,044	557,489	74,082	0,260	0,400
Tabas_ Iran	139	0,324	22,300	15,216	1,439	0,079	940,990	76,801	0,200	0,335
Corinth_ Greece	313	0,237	22,956	5,741	0,692	0,038	726,637	96,818	0,520	0,702
Nniigata_ Japan	4219	0,837	60,569	15,335	8,795	0,179	2732,707	244,930	0,300	-1
Irpinia_ Italy-01	285	0,130	23,604	13,132	0,331	0,023	524,887	81,091	0,120	0,683
Montenegro_ Yugoslavia	4456	0,463	38,647	6,543	4,562	0,152	1920,520	152,006	0,440	0,514
Cape Mendocino	825	1,494	122,330	32,626	5,956	0,209	1417,635	234,489	0,260	0,364
Northridge-01	1063	0,875	147,992	41,882	7,513	0,276	1789,424	460,688	0,700	0,761
Gazli_ USSR	126	0,702	66,219	27,335	5,284	0,234	1420,989	217,106	0,080	0,422
Iwate_ Japan	5657	1,152	72,476	37,087	20,923	0,302	5088,768	282,325	0,120	0,276
Erzican_ Turkey	821	0,387	107,140	31,993	1,522	0,082	804,240	324,340	0,960	1,392
Duzce_ Turkey	1617	0,890	37,189	5,270	9,967	0,284	2678,856	79,535	0,400	0,298
Loma Prieta	779	0,570	96,095	41,949	7,913	0,271	2234,875	414,974	0,700	0,800
Imperial Valley-06	160	0,599	46,750	20,219	3,988	0,146	1486,616	175,938	0,420	0,484
Bam_ Iran	4040	0,808	124,124	33,944	8,019	0,215	2217,112	391,437	0,200	0,502
Kobe_ Japan	1120	0,618	120,676	39,948	8,697	0,257	2447,358	587,357	1,24	1,131
Darfield_ New Zealand	6906	0,764	116,104	100,386	4,503	0,124	1932,856	372,100	0,500	0,966
Tottori_ Japan	3968	0,940	122,144	29,277	11,789	0,197	3438,351	378,649	0,640	-1

Seçilen kayıtlara ait ivme zaman grafiklerden biri Şekil 5.3'de sunulmuştur. Sismik haritadan seçilen PGA değeri 0.451 g'ye göre Deepsoil yazılımı ile bir ölçeklendirme yapılmıştır. Bu ölçeklendirme Şekil 5.4'de görülmektedir. İki ayrı grafikte görüldüğü üzere, kayıtların frekans içeriklerinde herhangi bir değişiklik olmadan pik ivme değerleri 0.57 g den 0.45 g'ye ölçeklendirilmiştir. Büyüklük dışında herhangi bir değişiklik olmamıştır.

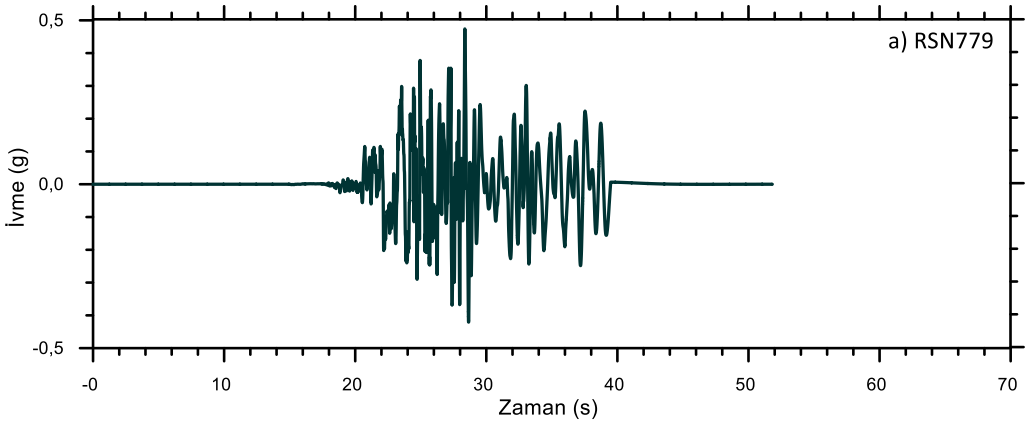


Şekil 5.3. Loma Prieta orijinal ivme



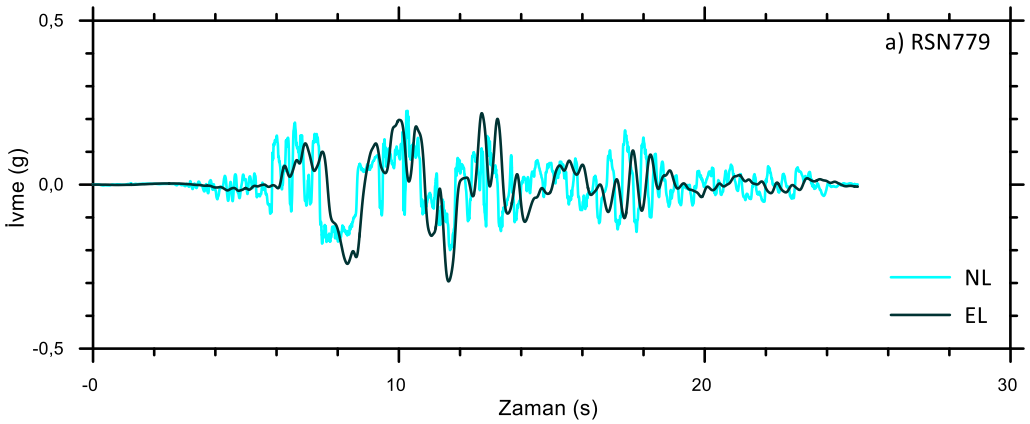
Şekil 5.4. Loma Prieta PGA'ya göre ölçeklendirilmiş ivme

Şekil 5.5'te ise spektraya göre ölçeklendirilmiş ivmeler yer almakta olup, 0.57 g den 0.47 g'ye ölçeklendirilmiştir. Bu ölçeklendirme SeismoMatch programında yapılmış olup Deepsoil ile baseline correction işlemi yapılmıştır. Baseline correction, zemin tabanına uygulanan deprem kayıtlarının veya zaman serilerinin daha doğru analiz edilmesi için kullanılan bir işlemdir. Bu, özellikle ham deprem kayıtlarındaki hataları ve kaymaları düzeltmek için yapılmaktadır. Grafikler ele alındığında orijinal kayıtlara kıyasen frekans içeriğinde farklılıklar belirlenmiştir. SismoMatch yazılımı ile ölçeklendirme sonucu ortaya çıkan spektra uyumu incelenmiştir.

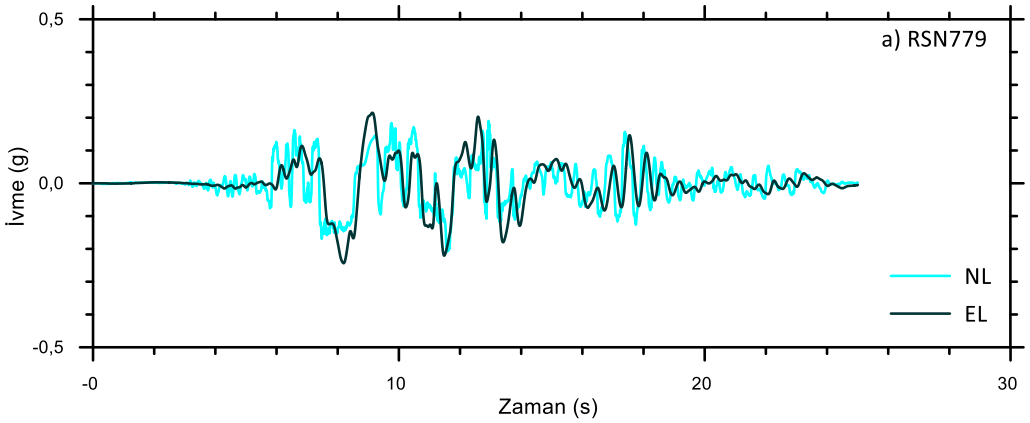


Şekil 5.5. Loma Prieta spektraya göre ölçeklendirilmiş ivme

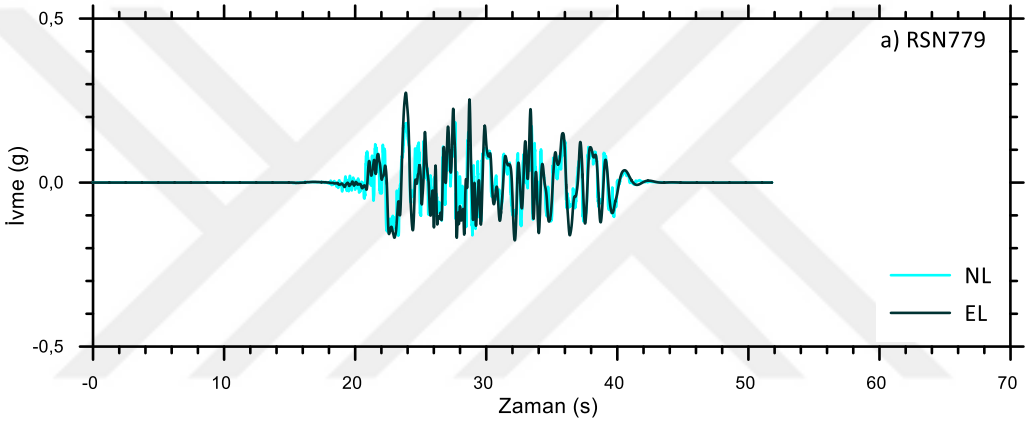
Eşdeğer lineer (EL) ve lineer olmayan (NL) yöntemlerle 18 farklı ivme, 2 farklı ölçeklendirme yöntemi (PGA ve spektra) yardımıyla 36 elastik anakaya kaydına dönüştürülmüştür. Şekil 5.6'da orijinal yüzey ivme kayıtları verilmiştir. Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de ise 2 farklı ölçeklendirme yöntemiyle elde edilen Loma Prieta depremine ait yüzey ivme kayıtları yer almaktadır. Anakaya ivmesinin en büyük değerinin 0.451 g olduğu göz önünde bulundurulsa, bu zemin profilinin anakaya ivmesini azalttığı anlaşılmaktadır. Eşdeğer lineer analiz sonuçları göz önüne alındığında, RSN779 nolu kayıt için, yüzey pik ivmesi 0.30g seviyelerine kadar küçülmüşken, lineer olmayan analiz göz önünde bulundurulduğunda ise yüzey pik ivmesinin 0.22 g seviyelerine kadar küçüldüğü gözlemlenmiştir. Lineer olmayan analizde daha büyük bir küçülme olduğu söylenebilir.



Şekil 5.6. Loma Prieta Yüzey İvme Kayıtları



Şekil 5.7. Loma Prieta PGA'ya göre Ölçekli Yüzey İvme Kayıtları



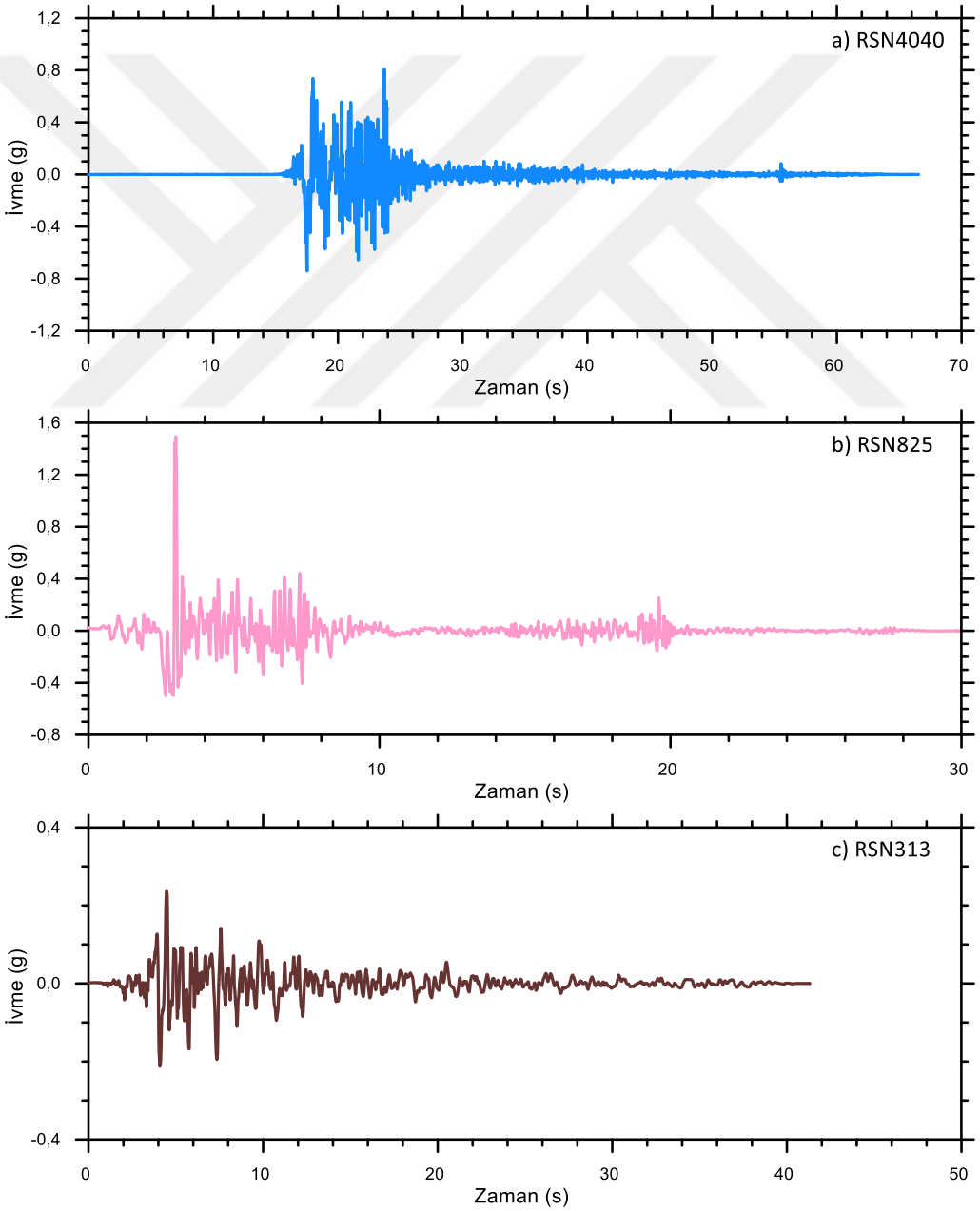
Şekil 5.8. Loma Prieta Spektraya göre Ölçekli Yüzey İvme Kayıtları

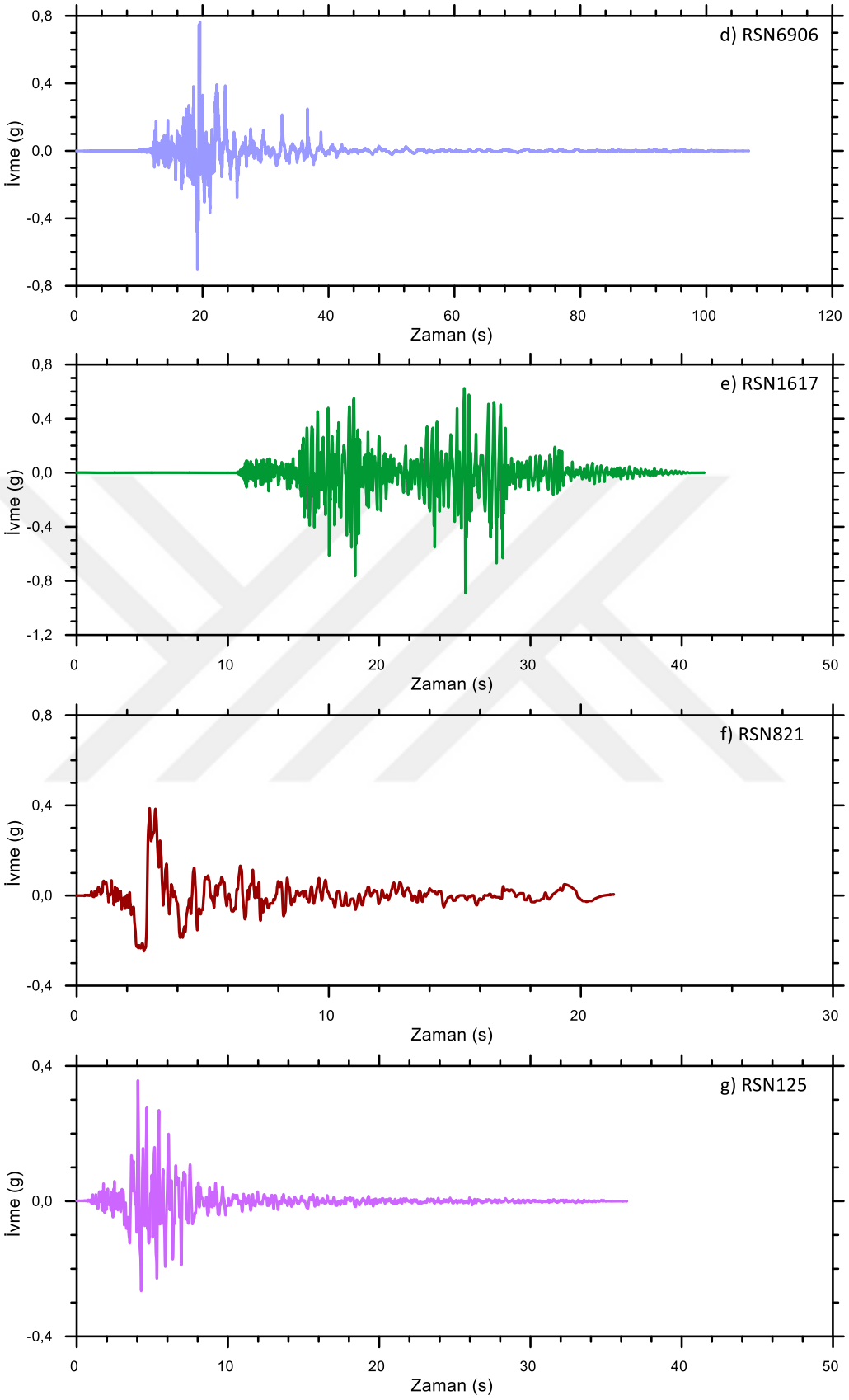
PGA'ya göre ölçeklendirilmiş eşdeğer lineer analiz sonuçları göz önüne alındığında, RSN779 nolu kayıt için, yüzey pik ivmesi 0.24 g seviyelerine kadar küçülmüşken, lineer olmayan analiz göz önünde bulundurulduğunda ise yüzey pik ivmesinin 0.21 g seviyelerine kadar küçüldüğü gözlemlenmiştir. Spektraya göre ölçeklendirilmiş eşdeğer lineer analiz sonuçları göz önüne alındığında ise, RSN779 nolu kayıt için, yüzey pik ivmesi 0.27 g seviyelerine kadar küçülmüşken, lineer olmayan analiz göz önünde bulundurulduğunda ise yüzey pik ivmesinin 0.18 g seviyelerine kadar küçüldüğü gözlemlenmiştir. Sonuç olarak hem orijinal yüzey ivme kayıtlarında hem de iki farklı şekilde ölçeklendirilmiş yüzey ivme kayıtlarında lineer olmayan analizde pik ivmede daha büyük düşüşler tespit edilmiştir.

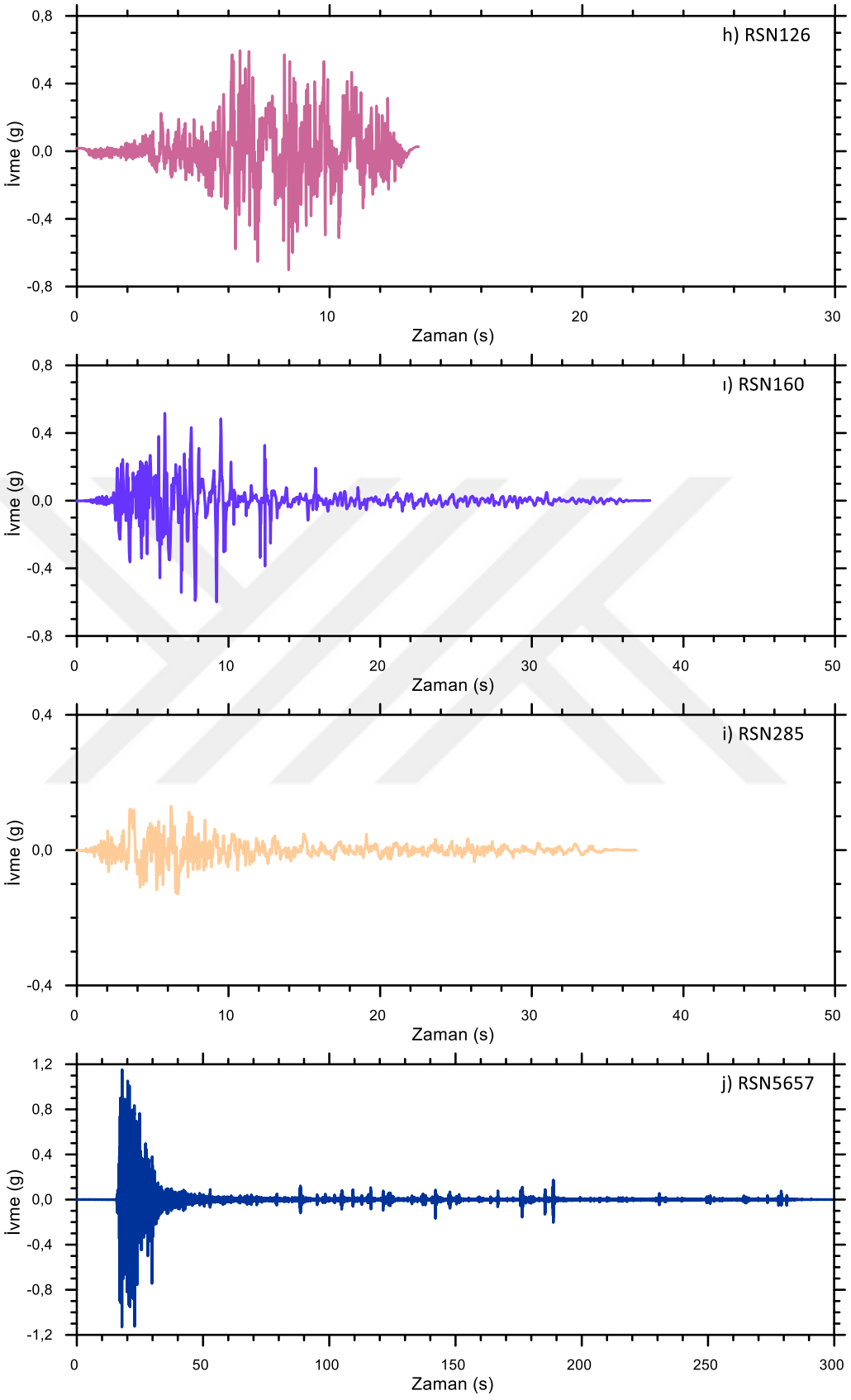
6. BULGULAR VE TARTIŞMA

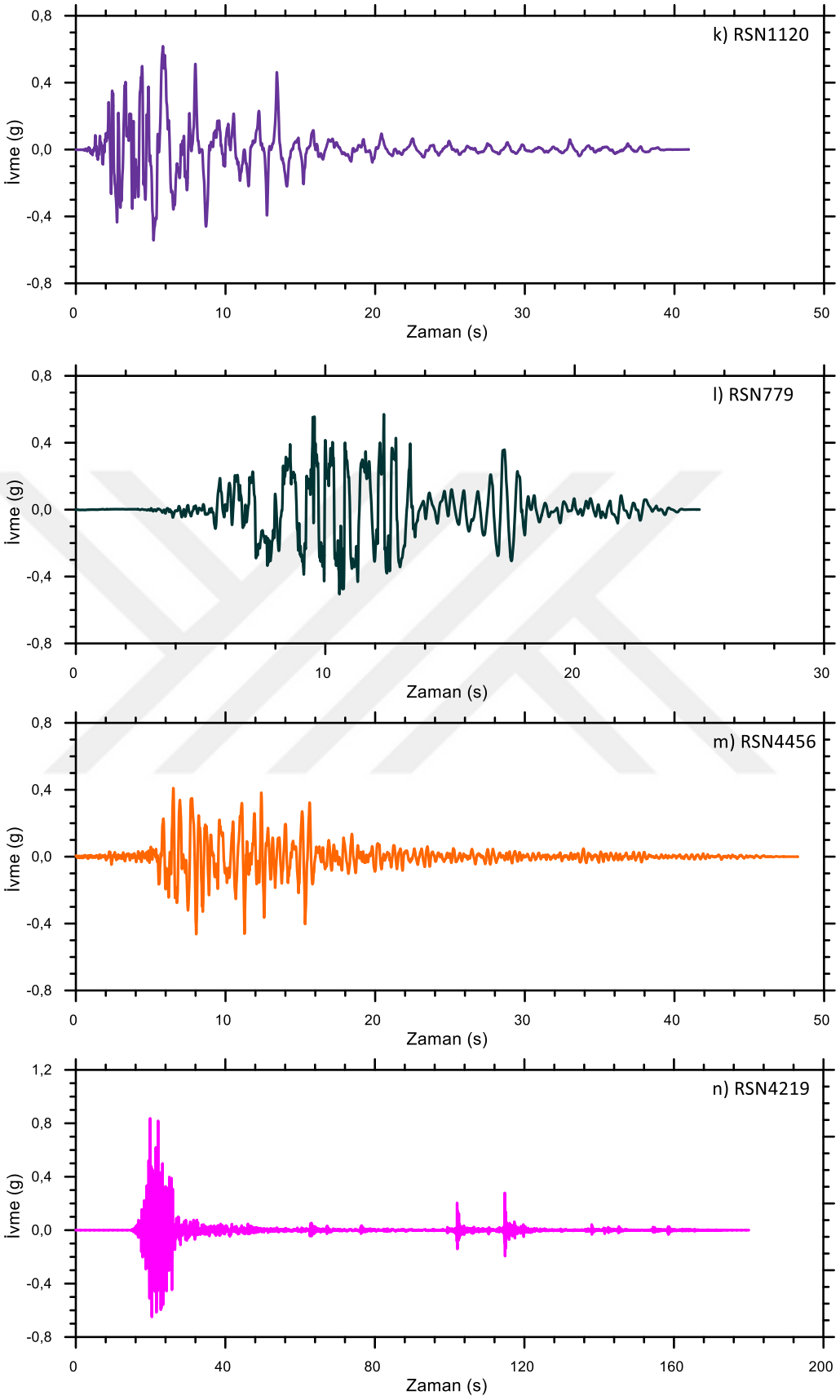
6.1. Anakayada Oluşan İvme Değerleri

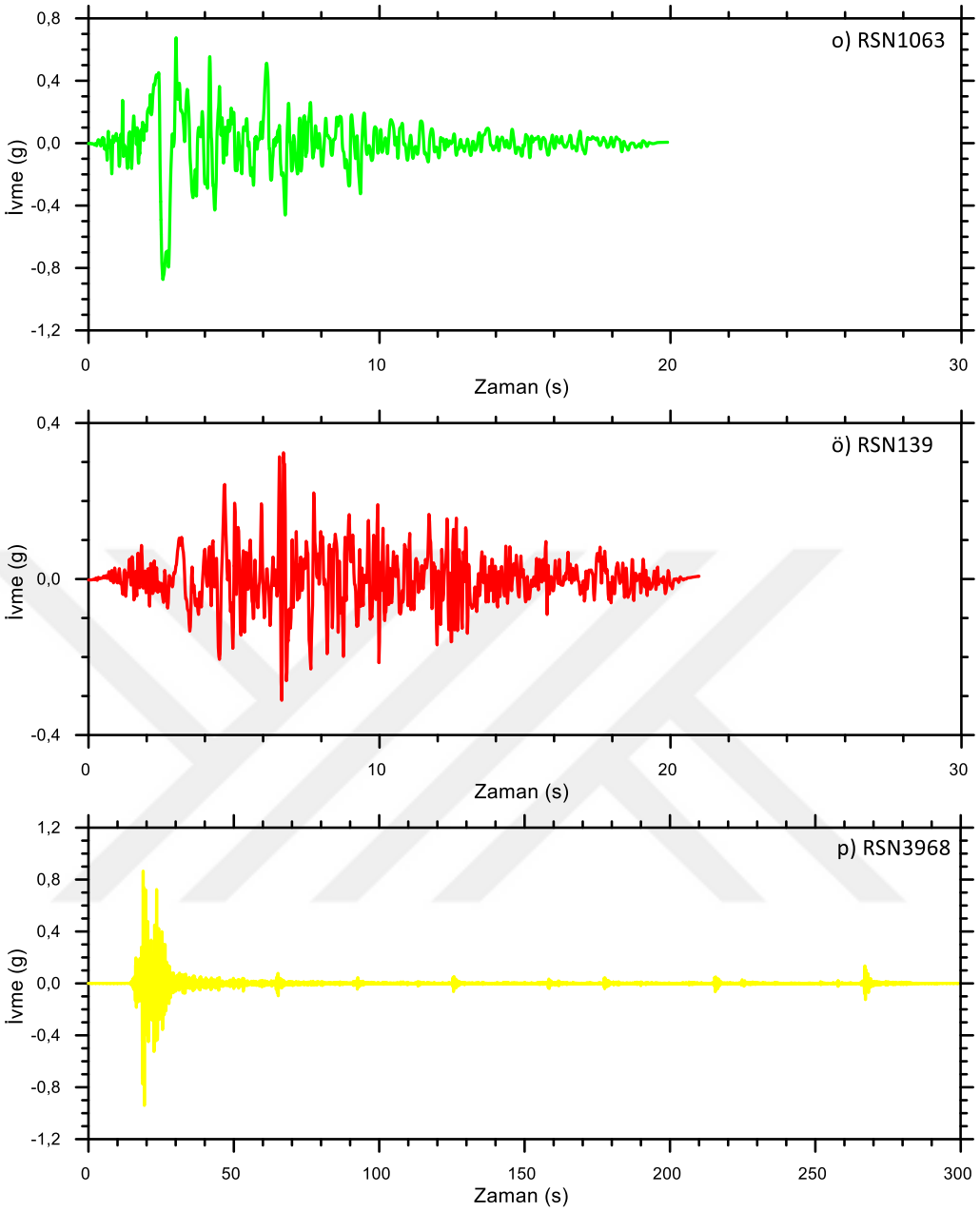
Belirli parametrelerle PEER veri tabanından elde edilen, farklı yönetmelikleri kapsayan farklı ülkelerdeki 18 depremin ivme kaydı DEEPSOIL yazılımı ile hazırlanmıştır. Seçilen kayıtlara ait ivme zaman grafikleri Şekil 6.1'de sunulmuştur.




d) RSN6906
İvme (g)
Zaman (s)
e) RSN1617
İvme (g)
Zaman (s)
f) RSN821
İvme (g)
Zaman (s)
g) RSN125
İvme (g)
Zaman (s)


h) RSN126
İvme (g)
Zaman (s)
ı) RSN160
İvme (g)
Zaman (s)
i) RSN285
İvme (g)
Zaman (s)
j) RSN5657
İvme (g)
Zaman (s)

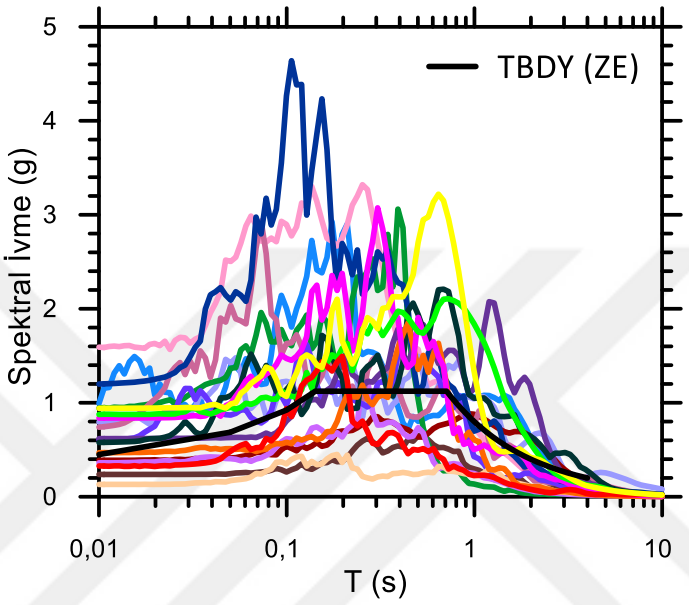

k) RSN1120
İvme (g)
Zaman (s)
l) RSN779
İvme (g)
Zaman (s)
m) RSN4456
İvme (g)
Zaman (s)
n) RSN4219
İvme (g)
Zaman (s)



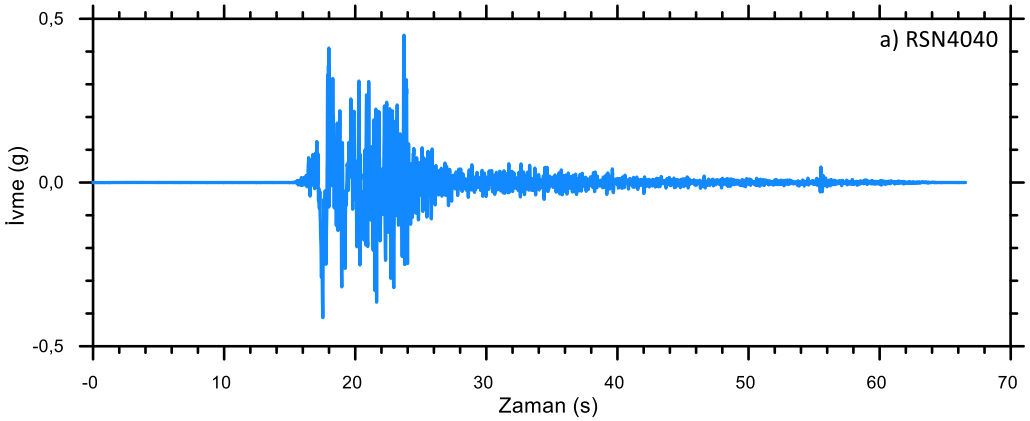
Şekil 6.1 Orijinal ivmeler: a) RSN4040, b) RSN825, c) RSN313, d) RSN6906, e) RSN1617, f) RSN821, g) RSN125, h) RSN126, ı) RSN160, i) RSN285, j) RSN5657, k) RSN1120, l) RSN779, m) RSN4456, n) RSN4219, o) RSN1063, ö) RSN139, p) RSN3968.

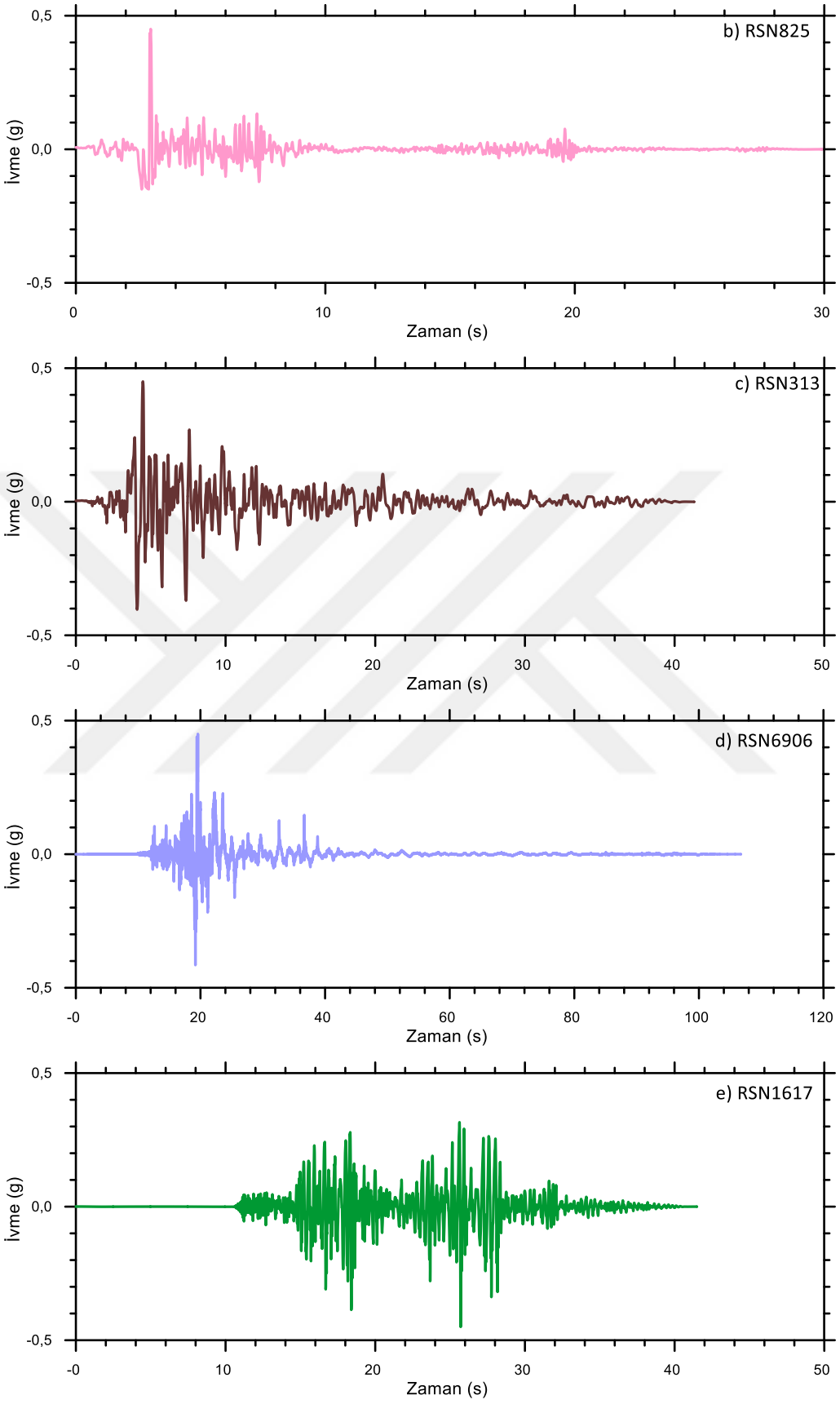
Benzer olmayan davranışlar gösteren farklı pik ivme değerlerine ve farklı sürelere sahip 18 adet kayıt görülmektedir. Pik ivme değerleri sırasıyla 0.81 g, 1.49 g, 0.24 g, 0.76 g, 0.89 g, 0.39 g, 0.36 g, 0.70 g, 0.60 g, 0.13 g, 1.15 g, 0.62 g, 0.57 g, 0.46 g, 0.84 g, 0.87 g, 0.32 g ve 0.94 g civarlarındadır. Farklı saniyelerde gözlemlenen bu değerlerden en büyük pik ivmeye sahip olan 1.49 g ile RSN825 kaydı olmakla beraber bu pik ivmenin 3. saniyede oluştuğu görülmektedir. Deprem kaydı yaklaşık 30 saniye sürerken 300 saniye süren RSN 3968 kaydının pik ivmesi ise 0.94 g olarak elde edilmiştir. Bu sonuçtan süre ile PGA arasında

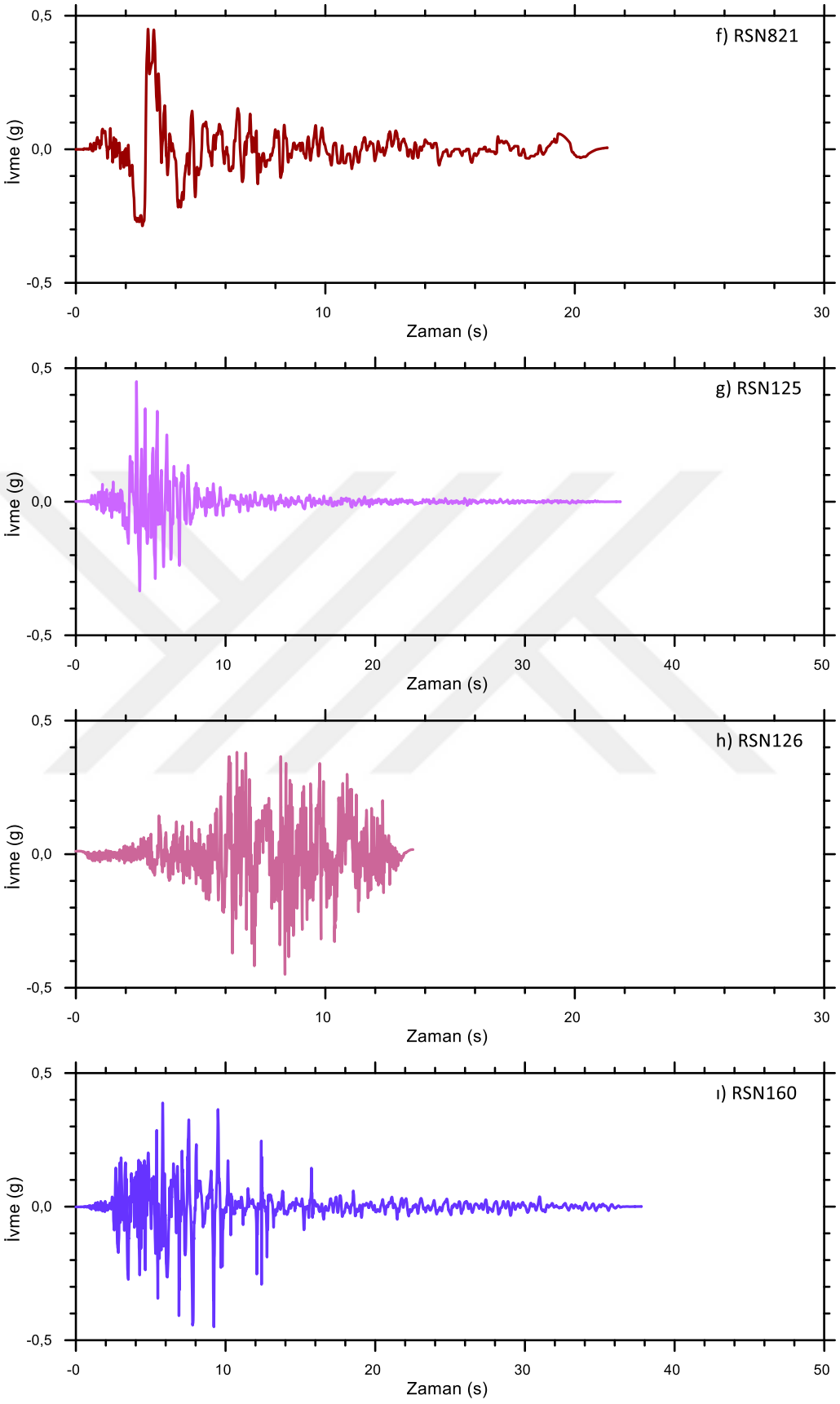
doğrusal bir yaklaşım izlenemeyeceği söylenebilir. RSN4456 ve RSN821 kayıtları ise anakayaya daha yakın ivme değerlerine sahiptir. Ölçeklendirme sonucu ortaya çıkan spektra uyumu ise Şekil 6.2'de yer almaktadır. Bu grafiğe göre başlangıç spektral ivme değerlerinin 0.1 g ile 1.5 g arasında değiştiği, kayıtların arasındaki en büyük pik ivme yaklaşık 0.1 sn civarında 4.8 g civarlarında belirlenmiştir.

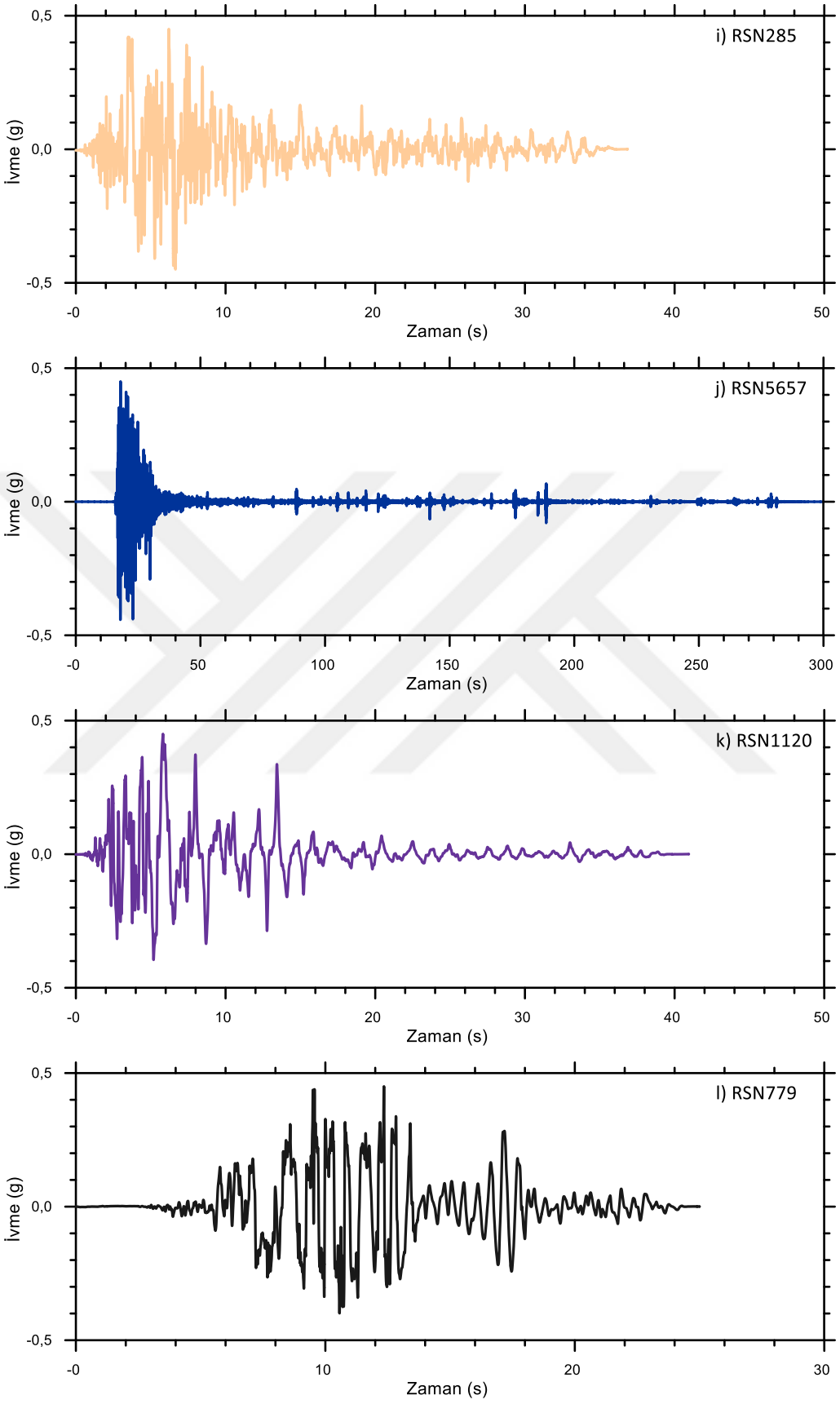


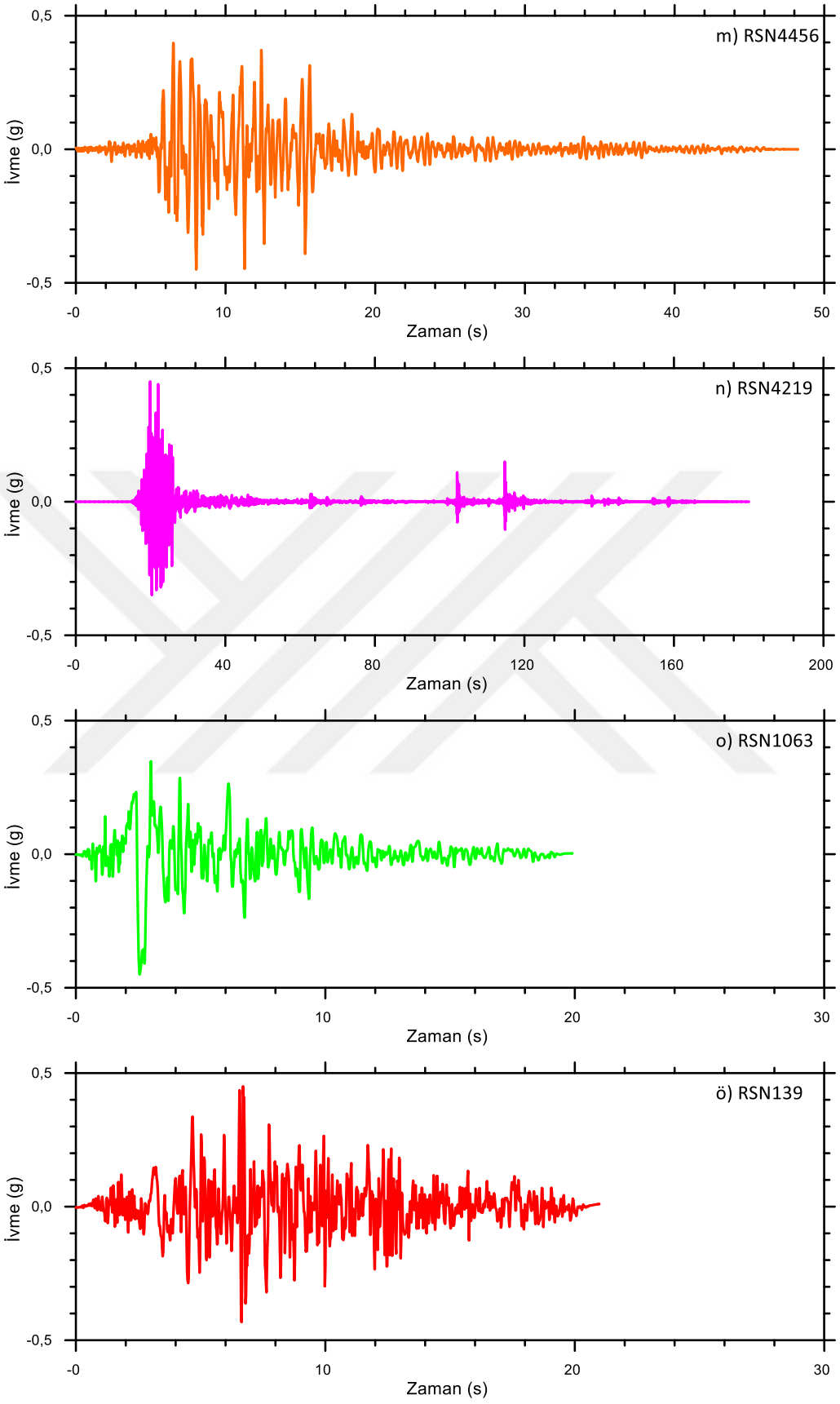
Şekil 6.2: Orijinal İvmeler İçin Spektra Uyuşumu

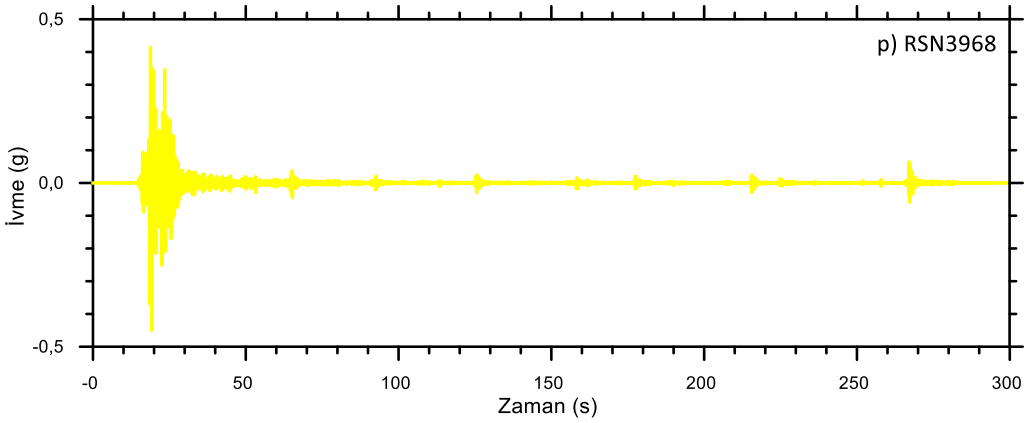



b) RSN825
İvme (g)
0,5
0,0
-0,5
0
10
20
30
Zaman (s)
c) RSN313
İvme (g)
0,5
0,0
-0,5
-0
10
20
30
40
50
Zaman (s)
d) RSN6906
İvme (g)
0,5
0,0
-0,5
-0
20
40
60
80
100
120
Zaman (s)
e) RSN1617
İvme (g)
0,5
0,0
-0,5
-0
10
20
30
40
50
Zaman (s)


f) RSN821
g) RSN125
h) RSN126
ı) RSN160
İvme (g)
Zaman (s)
0,5
0,0
-0,5
-0
10
20
30
40
50

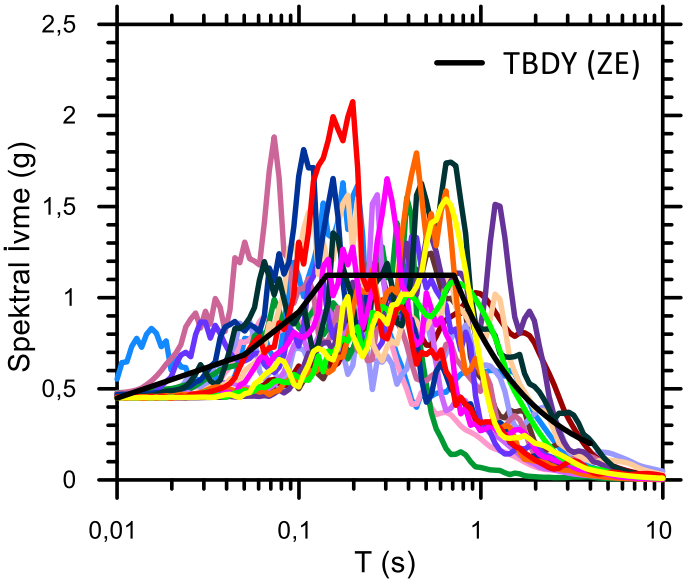

i) RSN285
İvme (g)
0,5
0,0
-0,5
-0
10
20
30
40
50
Zaman (s)
j) RSN5657
İvme (g)
0,5
0,0
-0,5
-0
50
100
150
200
250
300
Zaman (s)
k) RSN1120
İvme (g)
0,5
0,0
-0,5
-0
10
20
30
40
50
Zaman (s)
l) RSN779
İvme (g)
0,5
0,0
-0,5
-0
10
20
30
Zaman (s)


m) RSN4456
İvme (g)
0,5
0,0
-0,5
-0
10
20
30
40
50
Zaman (s)
n) RSN4219
İvme (g)
0,5
0,0
-0,5
-0
40
80
120
160
200
Zaman (s)
o) RSN1063
İvme (g)
0,5
0,0
-0,5
-0
10
20
30
Zaman (s)
ö) RSN139
İvme (g)
0,5
0,0
-0,5
-0
10
20
30
Zaman (s)

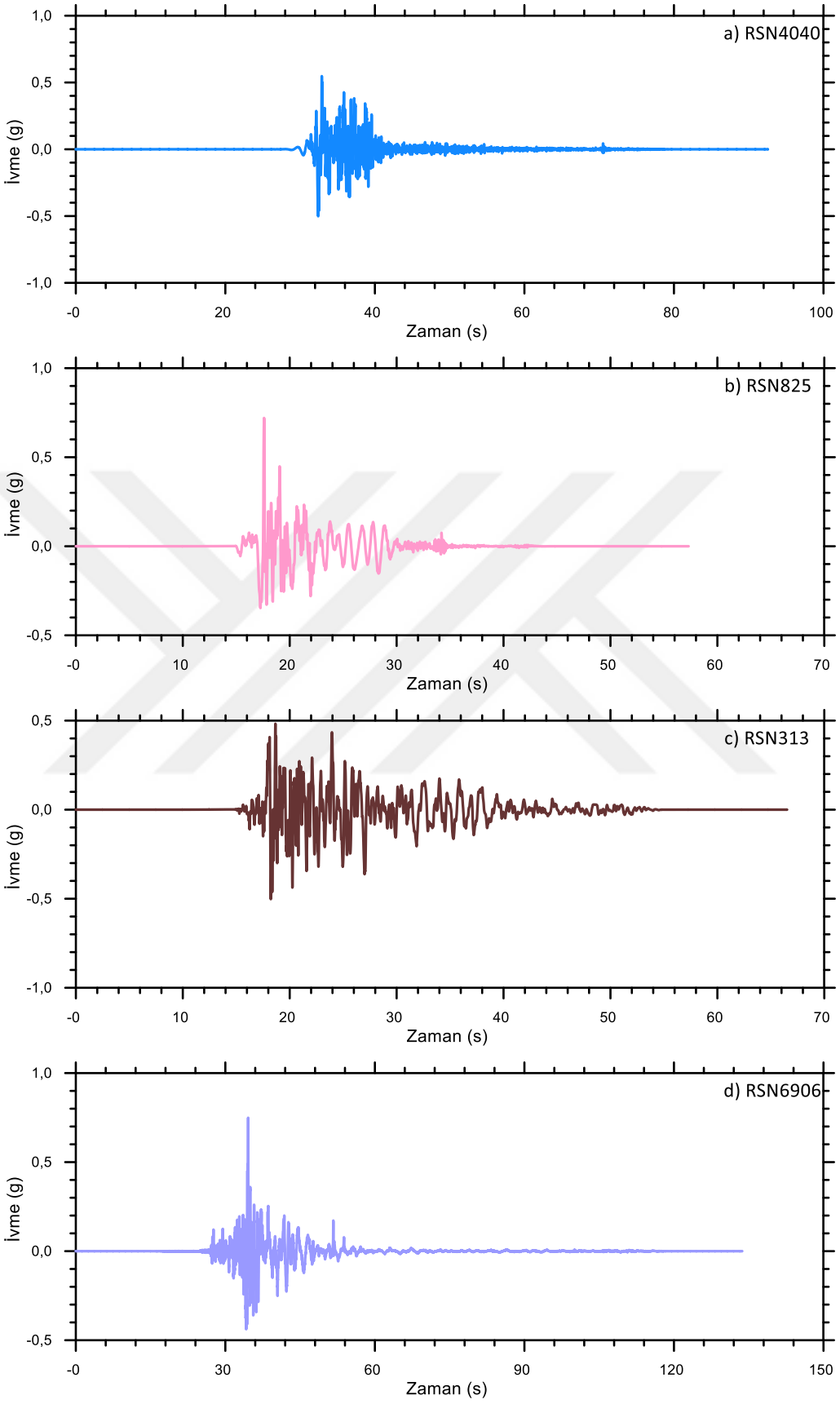


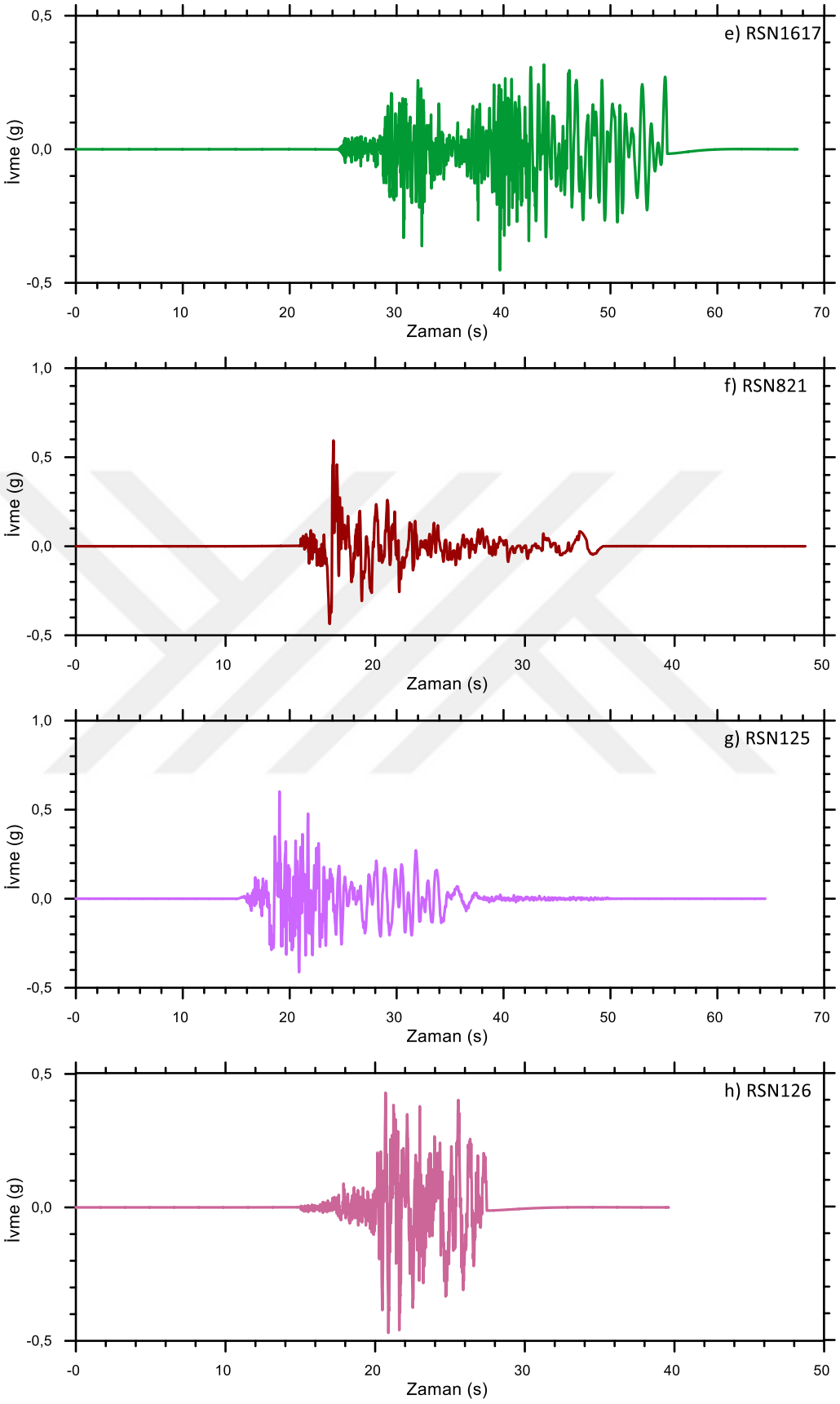
Şekil 6.3. PGA'ya göre Ölçekli İvmeler: a) RSN4040, b) RSN825, c) RSN313, d) RSN6906, e) RSN1617, f) RSN821, g) RSN125, h) RSN126, ı) RSN160, i) RSN285, j) RSN5657, k) RSN1120, l) RSN779, m) RSN4456, n) RSN4219, o) RSN1063, ö) RSN139, p) RSN3968.

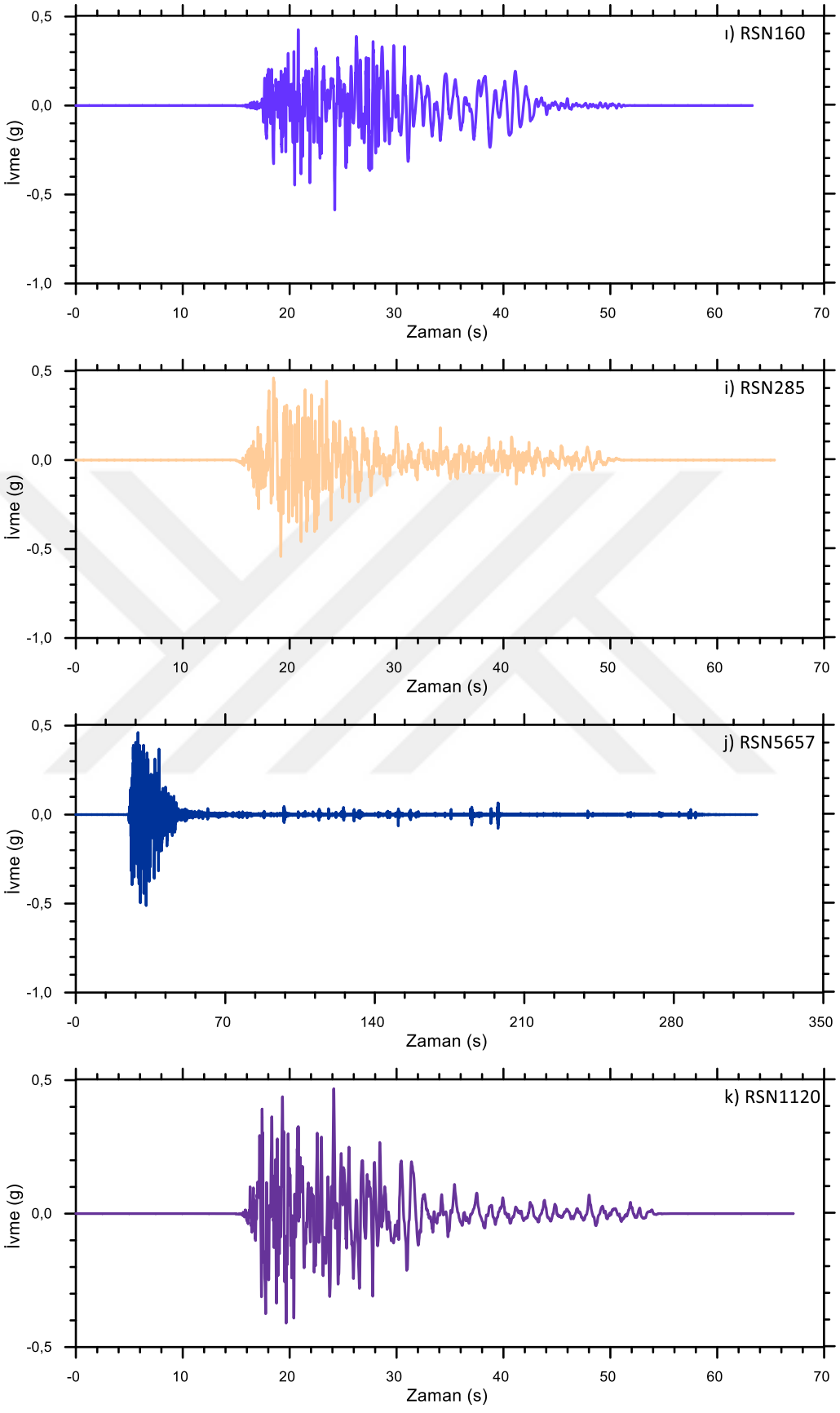
Çalışmada kullanılan deprem kayıtları PGA =0.45 g'ye göre ölçeklendirilmiştir. PGA'ya göre ölçeklendirilmiş 18 adet anakaya ivmeleri Şekil 6.3'de gösterilmiştir. Frekansları hakkında değişiklik olmamakla beraber 0.45 g'dan düşük pik ivmeye sahip kayıtlarda (RSN313, RSN821, RSN125, RSN285, RSN139) artış gözlemlenirken 0.45 g'den büyük pik ivmelere sahip kayıtlarda düşüş gözlemlenmektedir. Ölçeklendirme sonucu ortaya çıkan spektra uyumu ise Şekil 6.4'de yer almaktadır. Bu grafiğe göre başlangıç spektral ivme değerlerinin 0.5 g ile 0.6 g arasında değiştiği, kayıtların arasındaki en büyük pik ivme yaklaşık 0.2 sn civarında 2.1 g civarlarında belirlenmiştir.

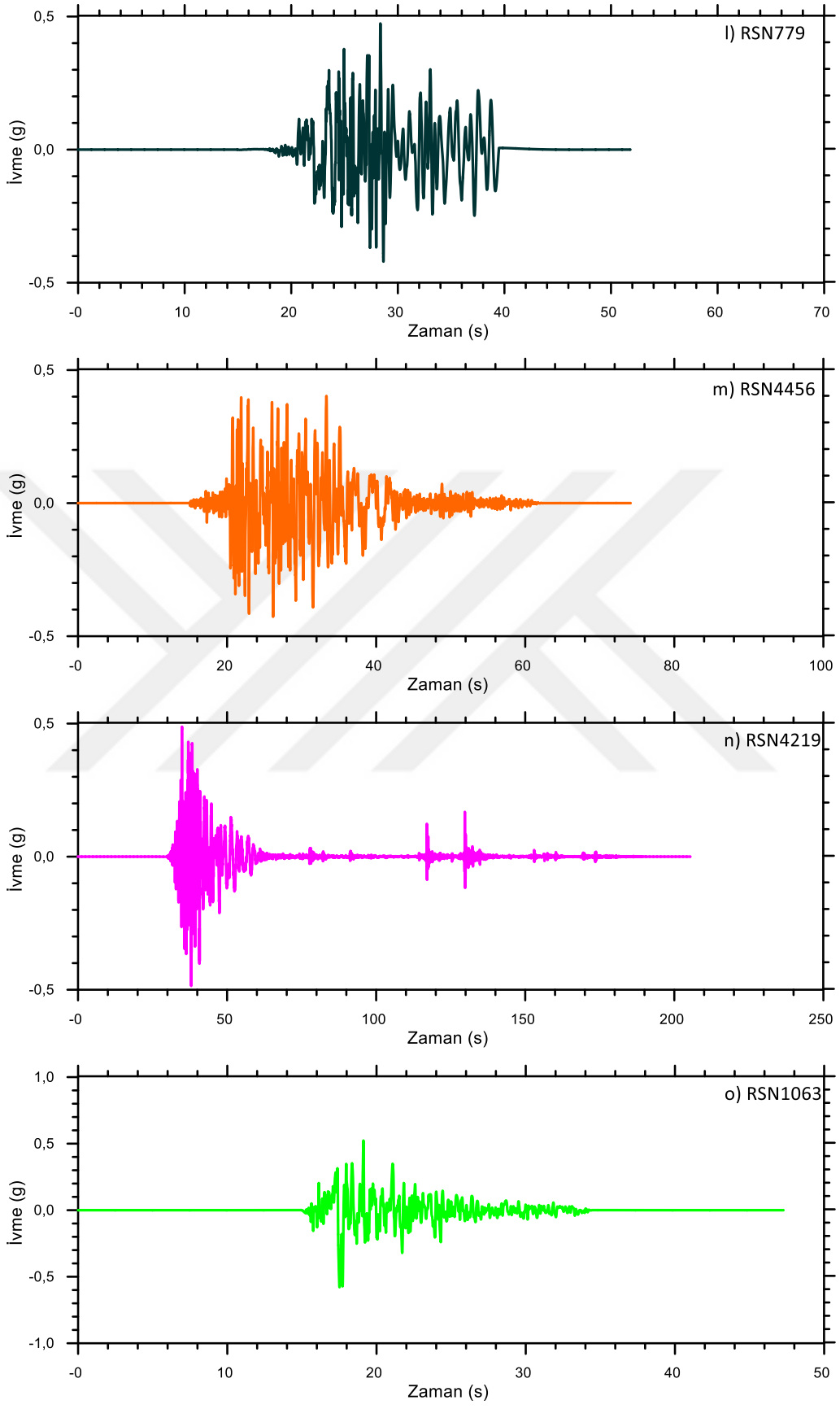


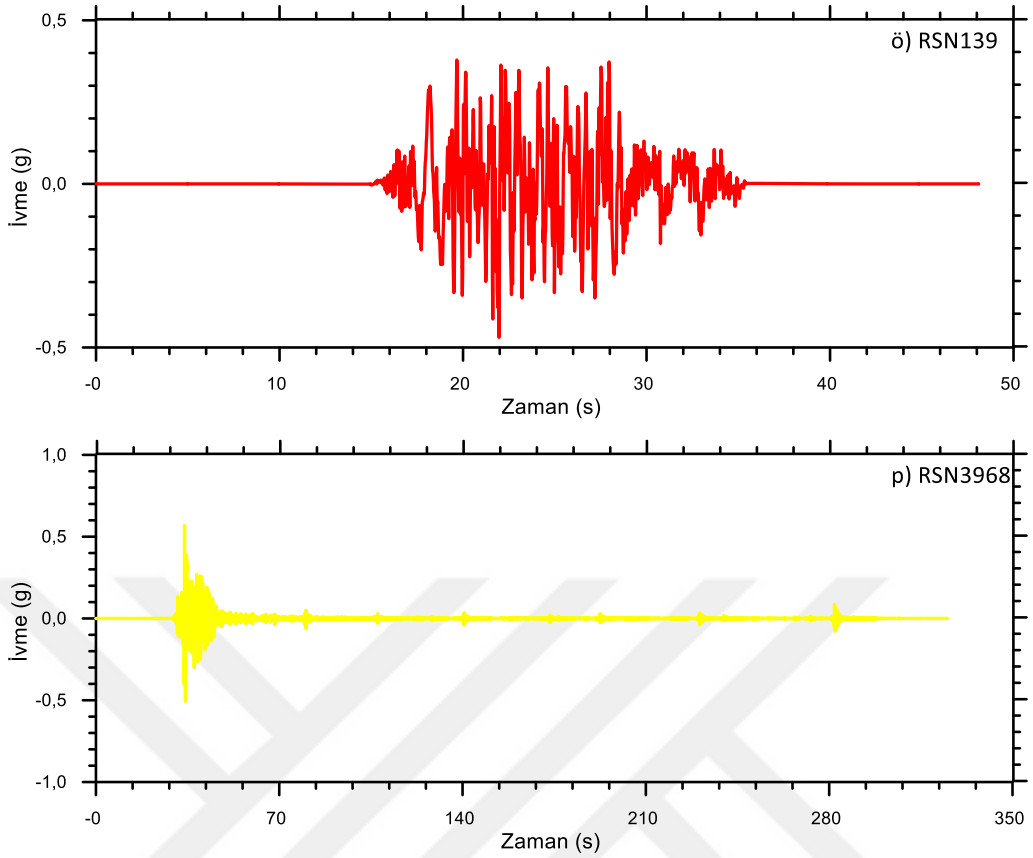
Şekil 6.4: PGA'ya göre Ölçekli İvmeler İçin Spektra Uyuşumu


a) RSN4040
İvme (g)
Zaman (s)
b) RSN825
İvme (g)
Zaman (s)
c) RSN313
İvme (g)
Zaman (s)
d) RSN6906
İvme (g)
Zaman (s)


e) RSN1617
İvme (g)
Zaman (s)
f) RSN821
İvme (g)
Zaman (s)
g) RSN125
İvme (g)
Zaman (s)
h) RSN126
İvme (g)
Zaman (s)

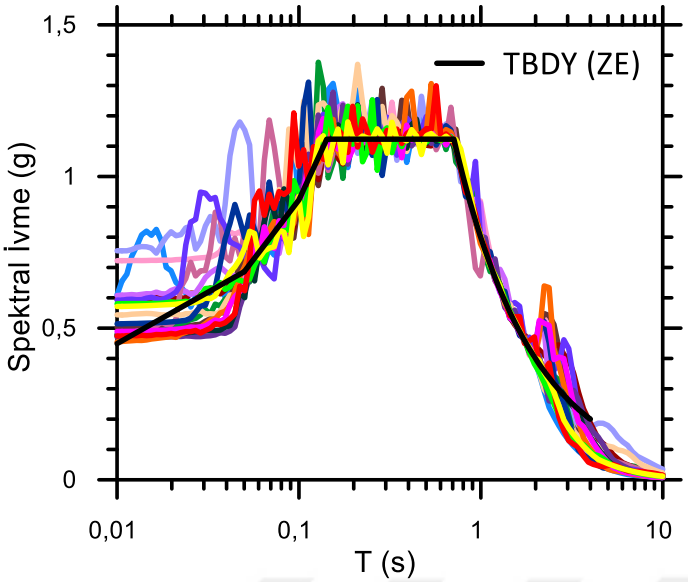

ı) RSN160
İvme (g)
Zaman (s)
i) RSN285
İvme (g)
Zaman (s)
j) RSN5657
İvme (g)
Zaman (s)
k) RSN1120
İvme (g)
Zaman (s)


l) RSN779
İvme (g)
Zaman (s)
m) RSN4456
İvme (g)
Zaman (s)
n) RSN4219
İvme (g)
Zaman (s)
o) RSN1063
İvme (g)
Zaman (s)



Şekil 6.5. Spektraya göre Ölçekli İvmeler: a) RSN4040, b) RSN825, c) RSN313, d) RSN6906, e) RSN1617, f) RSN821, g) RSN125, h) RSN126, ı) RSN160, i) RSN285, j) RSN5657, k) RSN1120, l) RSN779, m) RSN4456, n) RSN4219, o) RSN1063, ö) RSN139, p) RSN3968.

Spektraya göre ölçeklendirilmiş 18 adet anakaya ivmeleri Şekil 6.5'de gösterilmiştir. Pik ivme değerleri sırasıyla 0.55 g, 0.72 g, 0.50 g, 0.75 g, 0.45 g, 0.59 g, 0.60 g, 0.47 g, 0.59 g, 0.54 g, 0.51 g, 0.47 g, 0.47 g, 0.43 g, 0.49 g, 0.58 g, 0.47 g, 0.57 g civarlarındadır. Farklı saniyelerde gözlemlenen bu değerlerden en büyük pik ivmeye sahip olan 0.75 g ile RSN6906 kaydı olmakla beraber bu pik ivmenin 35. saniyede oluştuğu görülmektedir. Deprem kaydı yaklaşık 135 saniye sürmüştür. RSN1617 kaydı ise anakayaya daha yakın ivme değerlerine sahiptir. Birbirinden farklı olan 18 adet farklı kayda ait farklı pik ivmelerin birbirine yaklaştığı bu değerler sayesinde gözlemlenebilir. Hatta RSN126, RSN1120, RSN779 ve RSN139 kayıtlarının pik ivmeleri 0.47 g'dir. Ancak orijinal kayıtlara kıyasen frekans içeriğinde farklılıklar belirlenmiştir. Ölçeklendirme sonucu ortaya çıkan spektra uyumu ise Şekil 6.6'de yer almaktadır. Bu grafiğe göre başlangıç spektral ivme değerlerinin 0.4 g ile 0.75 g arasında değiştiği, kayıtların arasındaki en büyük pik ivme yaklaşık 0.1 sn civarında 1.35 g civarlarında belirlenmiştir.



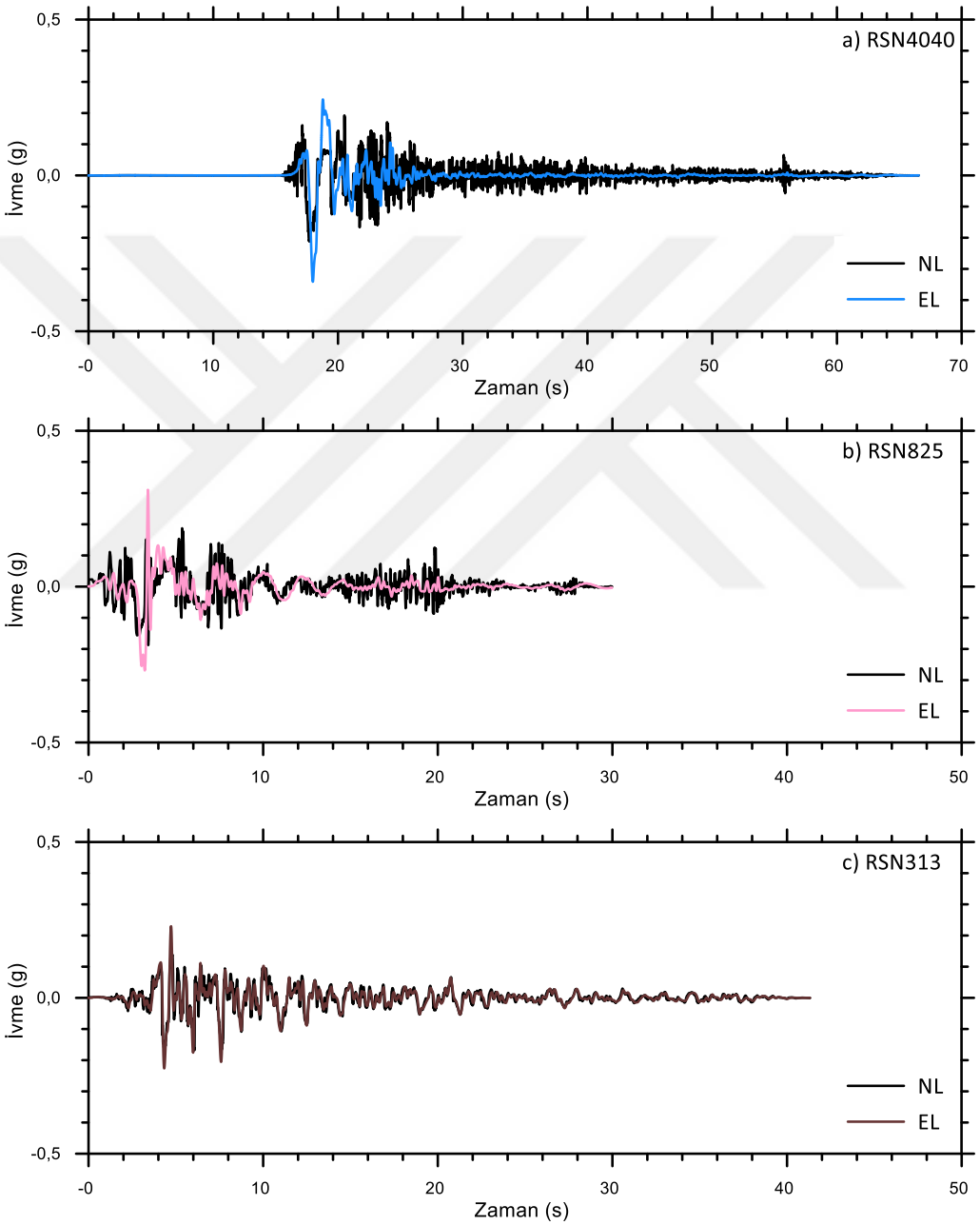
Şekil 6.6: Spektraya göre Ölçekli İvme Spektra Uyuşumu

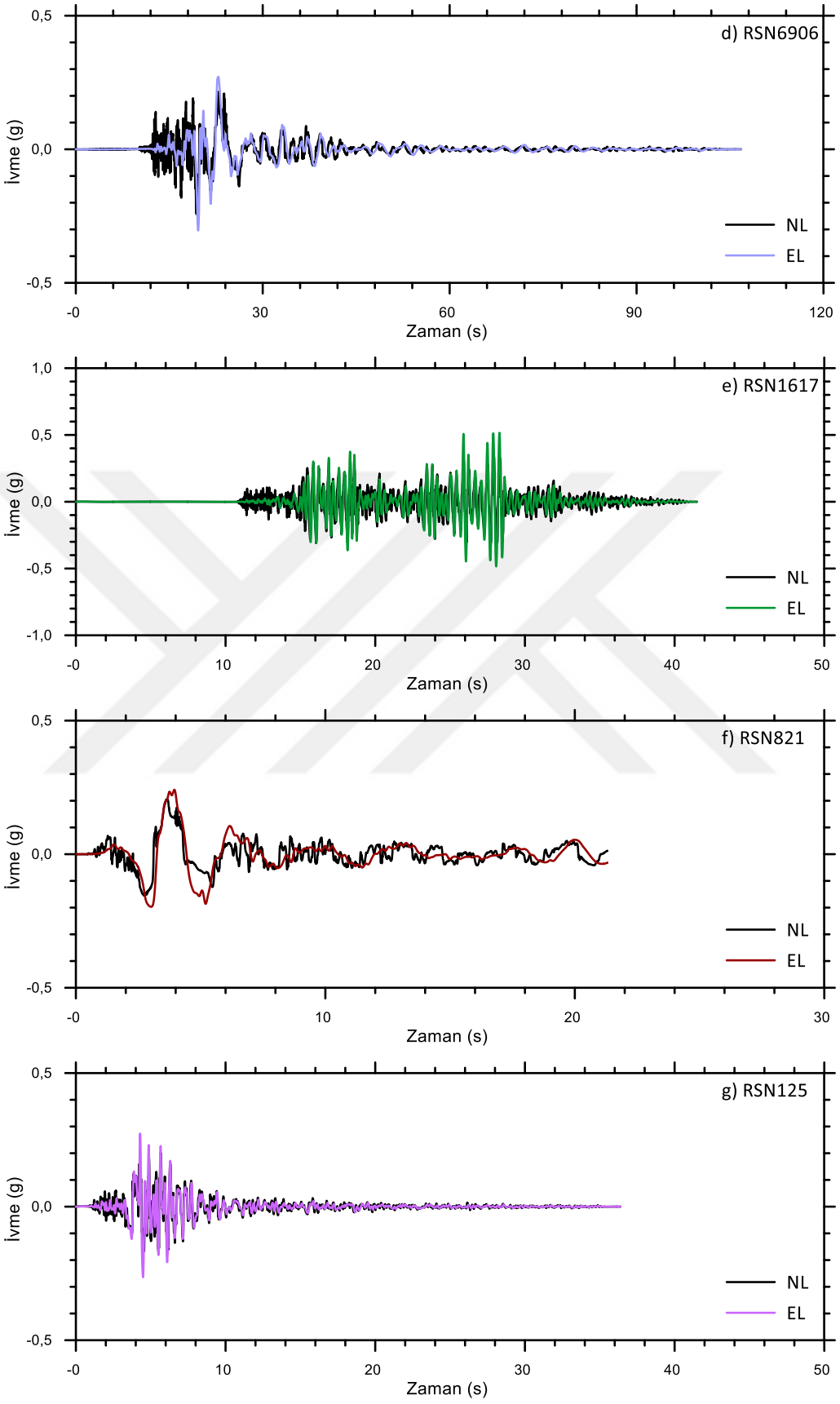
6.2. Yüzey Davranışının Elde Edilmesi

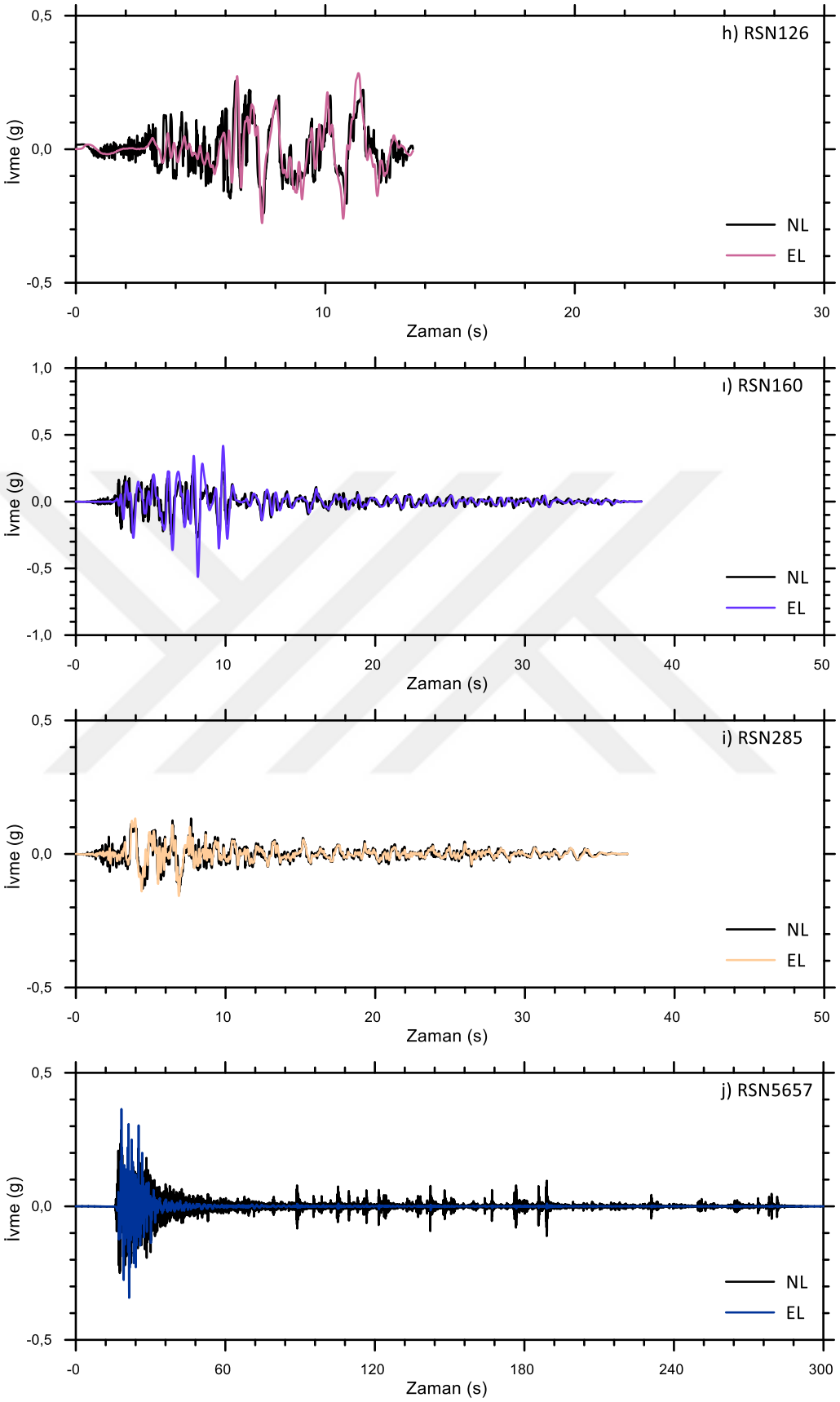
18 farklı ivme, 2 farklı ölçeklendirme yöntemi yardımıyla 36 elastik anakaya kaydına dönüştürülmüş ve eşdeğer linear (EL) ve lineer olmayan (NL) yöntemlerle analizler tamamlanmıştır. Şekil 6.7'de 2 farklı analiz yöntemiyle elde edilen orijinal yüzey ivme kayıtları gösterilmektedir. Pik ivme değerleri lineer olmayan analizde sırasıyla 0.21 g, 0.19 g, 0.17 g, 0.24 g, 0.34 g, 0.2 g, 0.2 g, 0.26 g, 0.27 g, 0.14 g, 0.29 g, 0.23 g, 0.22 g, 0.24 g, 0.32 g, 0.2 g, 0.21 g ve 0.26 g civarlarındadır. Lineer olmayan analiz sonuçları göz önüne alındığında, farklı saniyelerde gözlemlenen bu değerlerin birbirinden çok uzak olmadığı görülmektedir. En büyük pik ivmeye sahip olan 0.34 g ile RSN1617 kaydı olmakla beraber bu pik ivmenin 28. saniyesinde oluşmuştur. Deprem kaydı yaklaşık 40 saniye sürmüştür. Anakaya ivmesinin en büyük değerinin 0.45 g olduğu göz önünde bulundurulsa, RSN1617 kaydı sadece en büyük pik ivmeye sahip olmamakla beraber aynı zamanda anakayaya en yakın pik ivme değerine sahiptir. Pik ivme değerleri eşdeğer lineer analizde ise sırasıyla 0.34 g, 0.31 g, 0.23 g, 0.3 g, 0.52 g, 0.24 g, 0.27 g, 0.28 g, 0.56 g, 0.16 g, 0.36 g, 0.32 g, 0.3 g, 0.34 g, 0.38 g, 0.55 g, 0.29 g ve 0.56 g civarlarındadır. Eşdeğer lineer analiz sonuçları göz önüne alındığında, farklı saniyelerde gözlemlenen bu değerlerin birbirinden lineer olmayan analize göre daha farklı olduğu ve her deprem kaydı için pik değerlerin arttığı görülmektedir. En büyük pik ivmeye sahip olan 0.56 g ile RSN160 ve RSN3968 kayıtlarıdır. Bu pik ivmeler

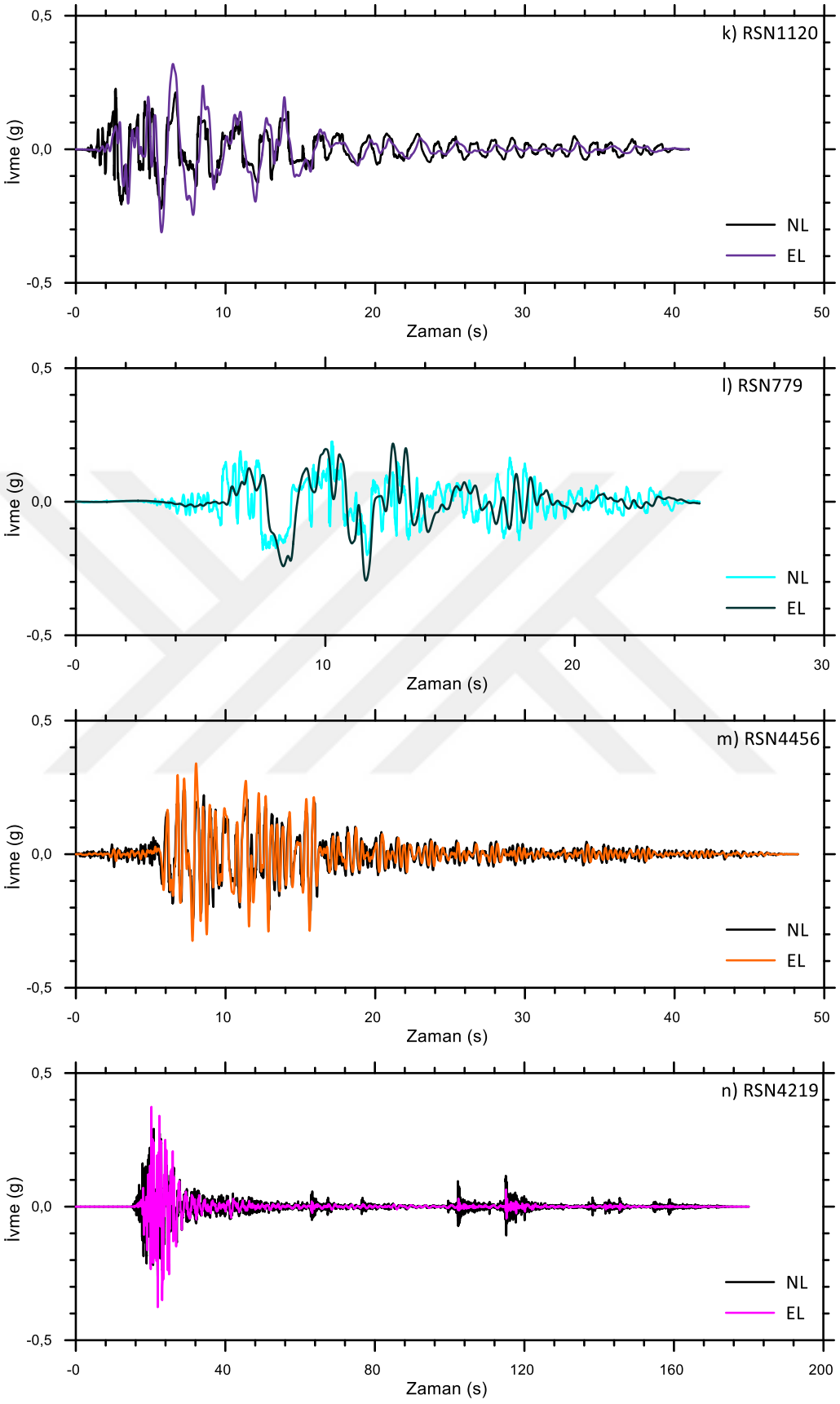
yaklaşık sırasıyla 8. ve 20. saniyelerde oluşmuştur. RSN1617 ve RSN4219 kayıtları anakayaya en yakın pik ivme değerine sahiptir.

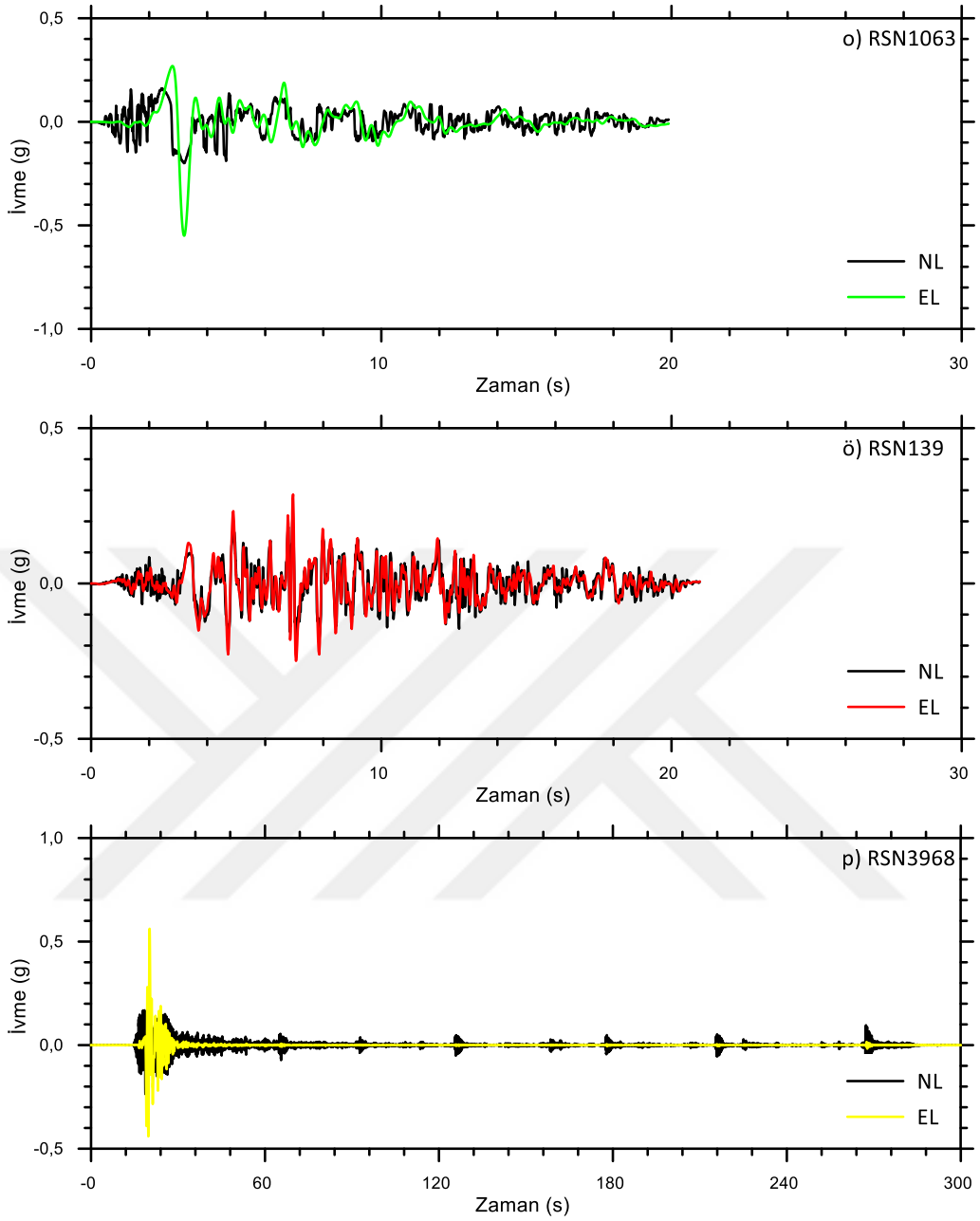
İki analiz yöntemi kıyaslandığında yüzey pik değerlerinin ile olduğu zamanın ve anlamlı büyüklüğe sahip çevrim sayılarının farklı olduğu görülmektedir.




d) RSN6906
İvme (g)
Zaman (s)
NL
EL
e) RSN1617
İvme (g)
Zaman (s)
NL
EL
f) RSN821
İvme (g)
Zaman (s)
NL
EL
g) RSN125
İvme (g)
Zaman (s)
NL
EL


h) RSN126
İvme (g)
Zaman (s)
NL
EL
ı) RSN160
İvme (g)
Zaman (s)
NL
EL
i) RSN285
İvme (g)
Zaman (s)
NL
EL
j) RSN5657
İvme (g)
Zaman (s)
NL
EL


k) RSN1120
NL
EL
İvme (g)
Zaman (s)
l) RSN779
NL
EL
İvme (g)
Zaman (s)
m) RSN4456
NL
EL
İvme (g)
Zaman (s)
n) RSN4219
NL
EL
İvme (g)
Zaman (s)



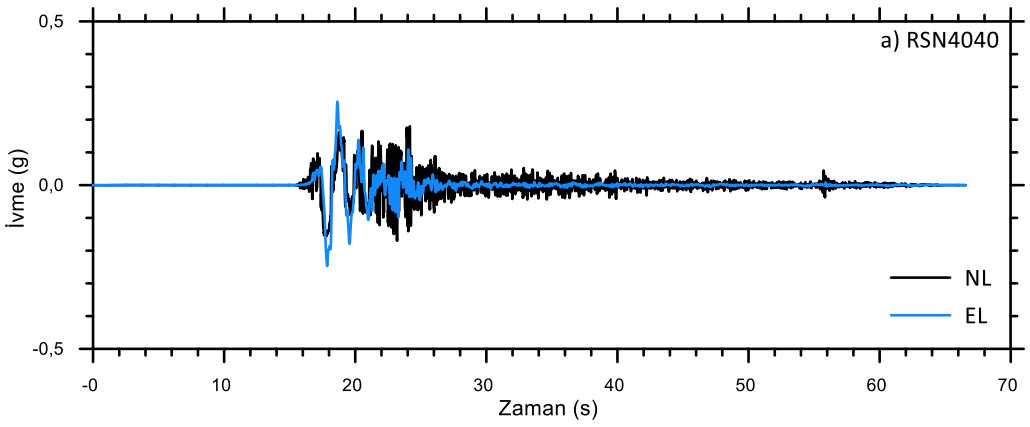
Şekil 6.7. Orijinal İvmeler Kullanılarak Eşdeğer Doğrusal Ve Doğrusal Olmayan (Nonlinear) Analizlerle Elde Edilen Yüzey İvme Kayıtları: a) RSN4040, b) RSN825, c) RSN313, d) RSN6906, e) RSN1617, f) RSN821, g) RSN125, h) RSN126, ı) RSN160, i) RSN285, j) RSN5657, k) RSN1120, l) RSN779, m) RSN4456, n) RSN4219, o) RSN1063, ö) RSN139, p) RSN3968.

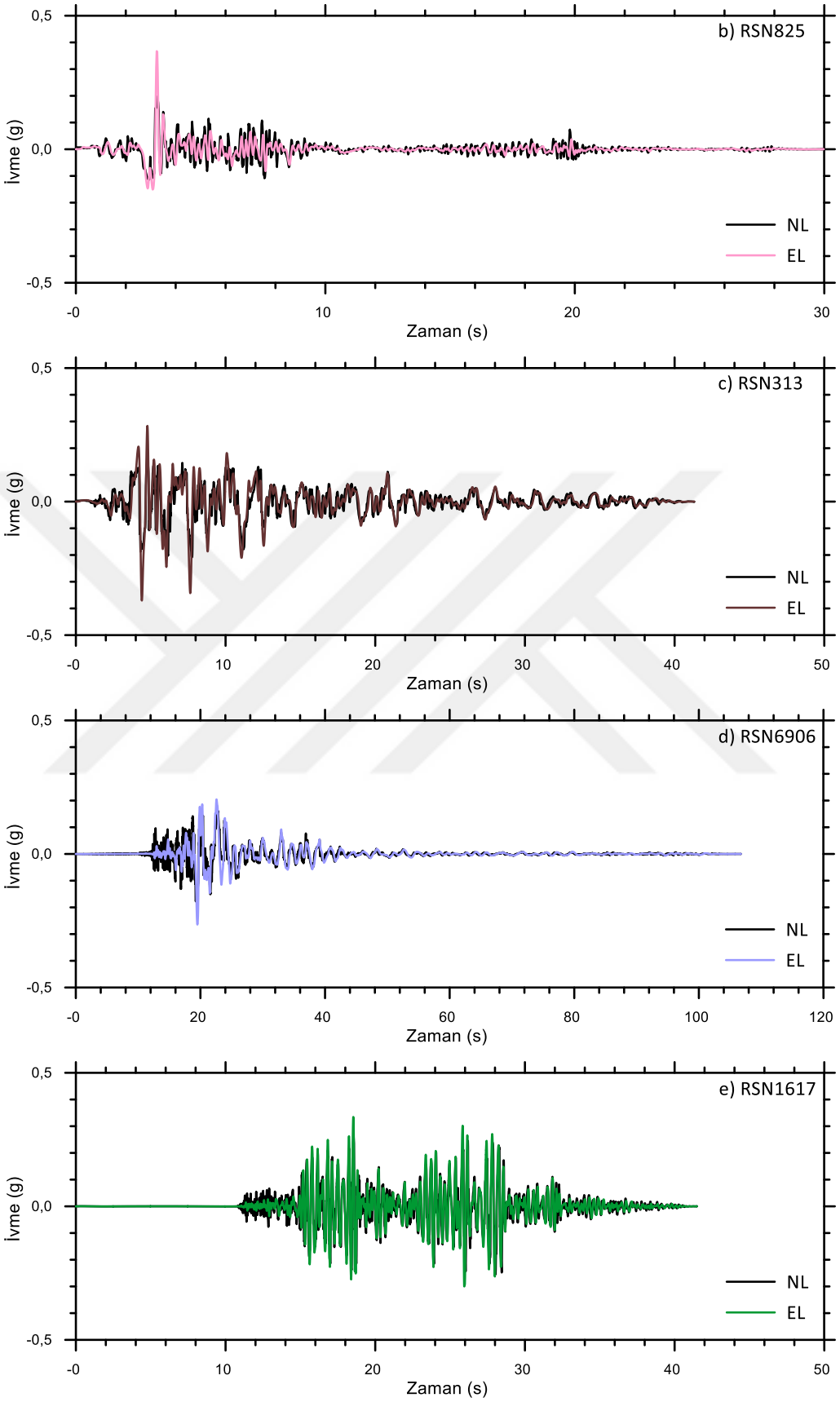
Orijinal anakaya ivme kayıtları ve orijinal yüzey ivme kayıtları pik ivmeleri arası bir karşılaştırma yapıldığında her iki analiz çeşidinde de RSN285 kaydı hariç bir azalma olduğu Çizelge 6.1'den gözlemlenmektedir. Lineer olmayan analizde her zaman eşdeğer lineer analize kıyasla de-amplifikasyon daha fazladır. Pik ivmelerin sürelerinde her kayıt için

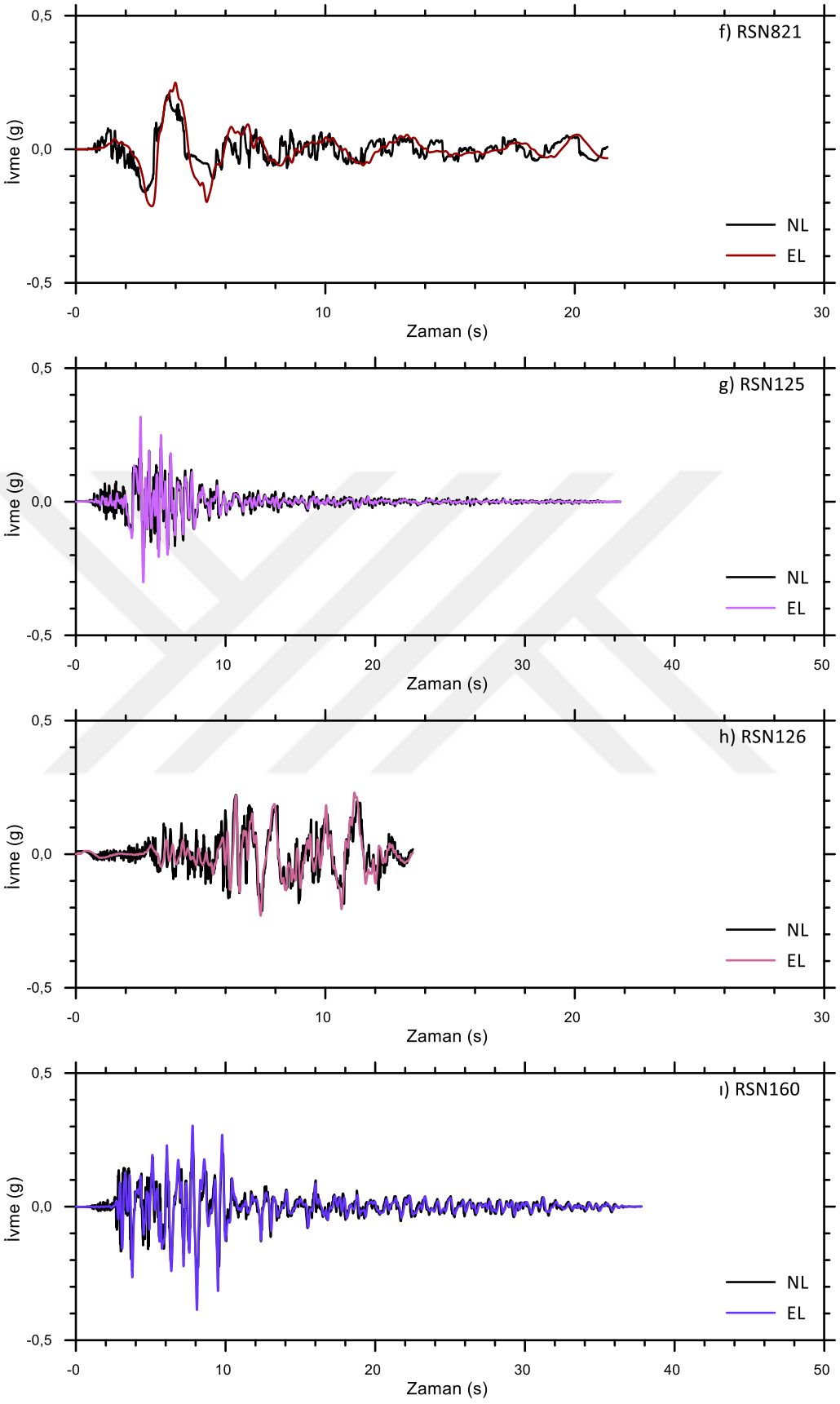
farklılıklar gözlemlenmiştir. Ancak kayıtların pik ivmelerinin görüldüğü süreler anakayada ve yüzeyde yaklaşıktır.

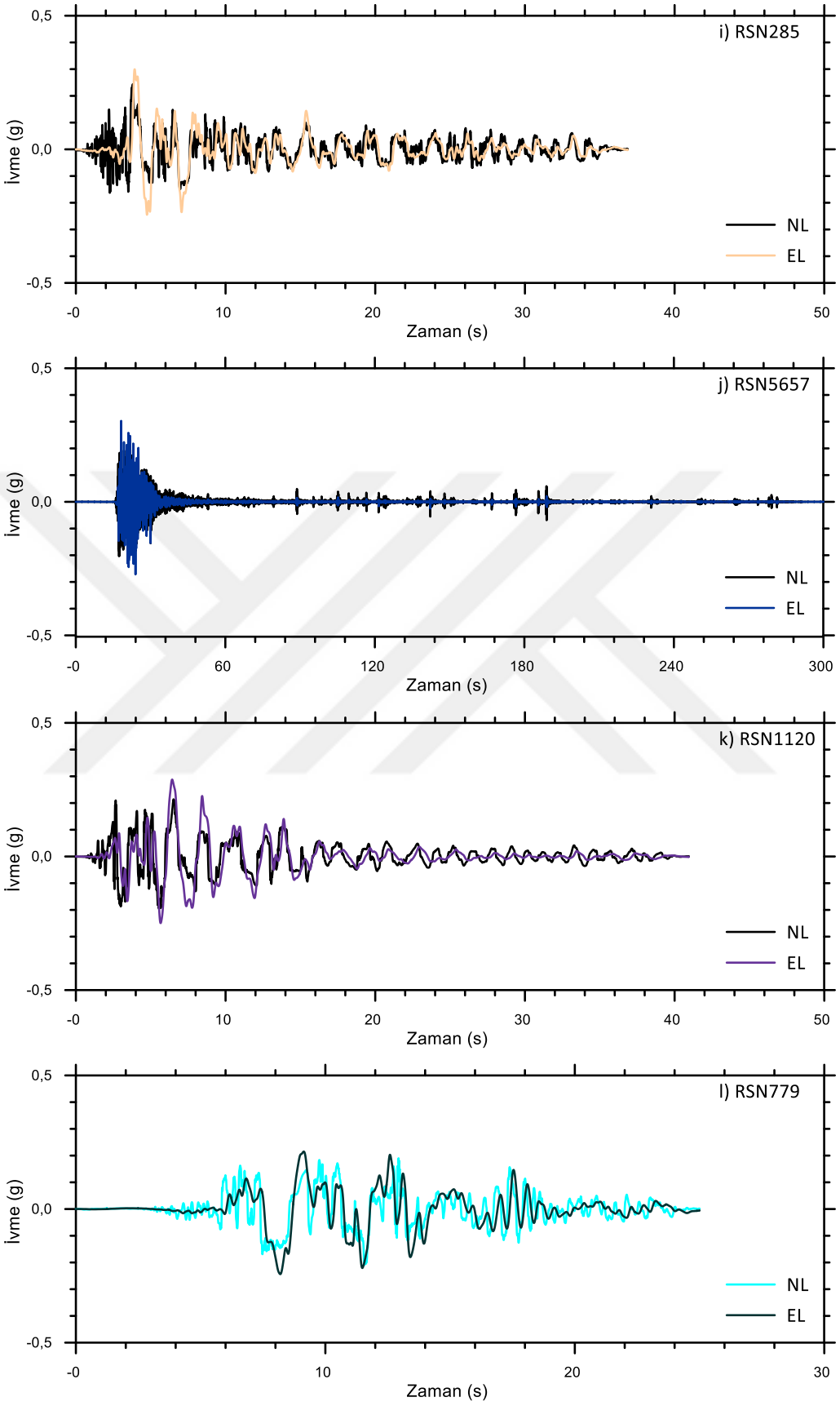
Çizelge 6.1. Orijinal Anakaya İvme Kayıtları ve Orijinal Yüzey İvme Kayıtları Kıyaslanması

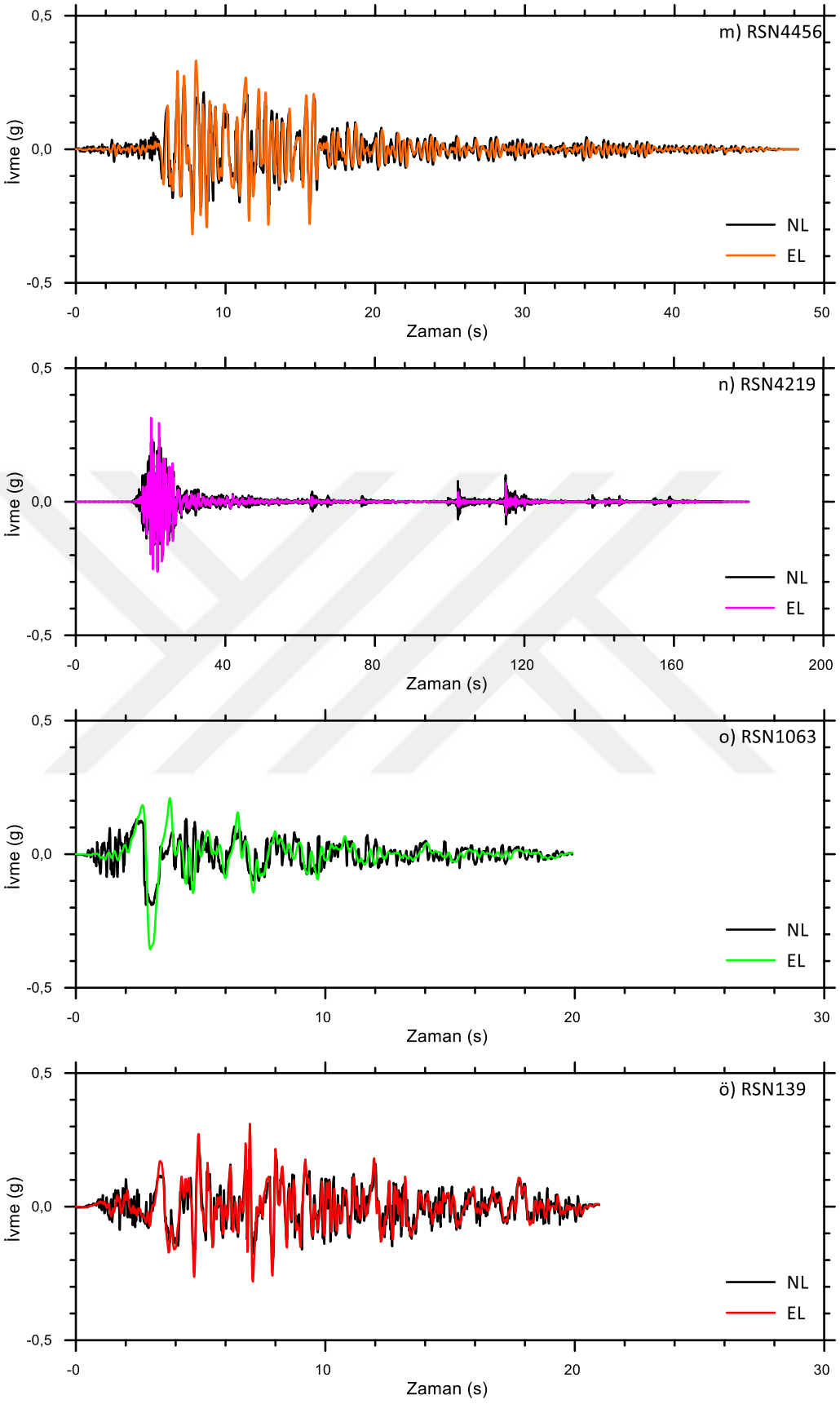
Deprem İsmi	RSN	ORİJİNAL ANAKAYA İVME KAYITLARI		ORİJİNAL YÜZEY İVME KAYITLARI			
		PGA	SÜRE(s)	NL PGA	NL PGA SÜRE(s)	EL PGA	EL PGA SÜRE(s)
Bam_ Iran	4040	0.81	24	0.21	18	0.34	18
Cape Mendocino	825	1.49	3	0.19	3	0.31	3
Corinth_ Greece	313	0.24	4	0.17	6	0.23	5
Darfield_ New Zealand	6906	0.76	20	0.24	19	0.30	20
Duzce_ Turkey	1617	0.89	26	0.34	28	0.52	28
Erzican_ Turkey	821	0.39	3	0.20	4	0.24	4
Friuli_ Italy-0	125	0.36	4	0.20	6	0.27	4
Gazli_ USSR	126	0.70	8	0.26	6	0.28	11
Imperial Valley-06	160	0.60	9	0.27	8	0.56	8
Irpinia_ Italy-01	285	0.13	6	0.14	7	0.16	7
Iwate_ Japan	5657	1.15	18	0.29	18	0.36	18
Kobe_ Japan	1120	0.62	6	0.23	3	0.32	6
Loma Prieta	779	0.57	12	0.22	10	0.30	12
Montenegro_ Yugoslavia	4456	0.46	8	0.24	7	0.34	8
Nniigata_ Japan	4219	0.84	20	0.32	22	0.38	22
Northridge-01	1063	0.87	3	0.20	3	0.55	3
Tabas_ Iran	139	0.32	7	0.21	7	0.29	7
Tottori_ Japan	3968	0.94	19	0.26	19	0.56	20

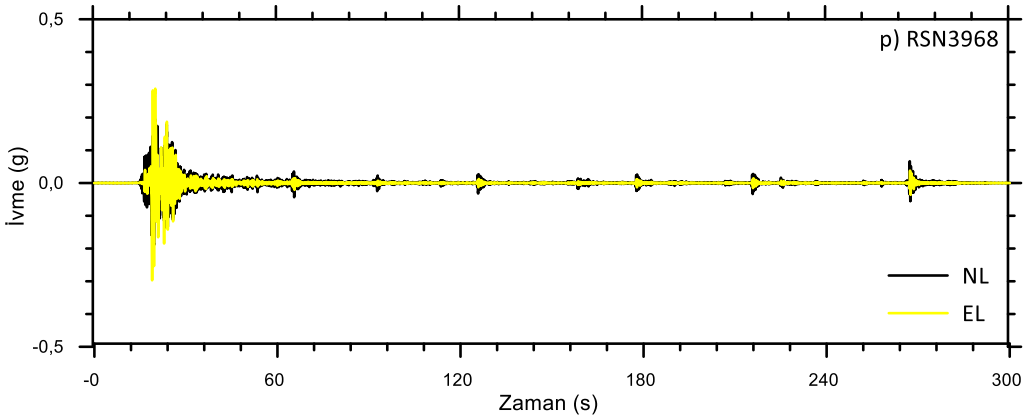



b) RSN825
İvme (g)
0,5
0,0
-0,5
-0
10
20
30
Zaman (s)
NL
EL
c) RSN313
İvme (g)
0,5
0,0
-0,5
-0
10
20
30
40
50
Zaman (s)
NL
EL
d) RSN6906
İvme (g)
0,5
0,0
-0,5
-0
20
40
60
80
100
120
Zaman (s)
NL
EL
e) RSN1617
İvme (g)
0,5
0,0
-0,5
-0
10
20
30
40
50
Zaman (s)
NL
EL


f) RSN821
İvme (g)
Zaman (s)
NL
EL
g) RSN125
İvme (g)
Zaman (s)
NL
EL
h) RSN126
İvme (g)
Zaman (s)
NL
EL
ı) RSN160
İvme (g)
Zaman (s)
NL
EL


i) RSN285
İvme (g)
0,5
0,0
-0,5
-0
10
20
30
40
50
Zaman (s)
NL
EL
j) RSN5657
İvme (g)
0,5
0,0
-0,5
-0
60
120
180
240
300
Zaman (s)
NL
EL
k) RSN1120
İvme (g)
0,5
0,0
-0,5
-0
10
20
30
40
50
Zaman (s)
NL
EL
l) RSN779
İvme (g)
0,5
0,0
-0,5
-0
10
20
30
Zaman (s)
NL
EL


m) RSN4456
n) RSN4219
o) RSN1063
ö) RSN139
İvme (g)
Zaman (s)
NL
EL
0,5
0,0
-0,5
-0
10
20
30
40
50
80
120
160
200



Şekil 6.8. PGA'ya göre Ölçekli İvmeler Kullanılarak Eşdeğer Doğrusal Ve Doğrusal Olmayan (Nonlinear) Analizlerle Elde Edilen Yüzey İvme Kayıtları: a) RSN4040, b) RSN825, c) RSN313, d) RSN6906, e) RSN1617, f) RSN821, g) RSN125, h) RSN126, ı) RSN160, i) RSN285, j) RSN5657, k) RSN1120, l) RSN779, m) RSN4456, n) RSN4219, o) RSN1063, ö) RSN139, p) RSN3968.

Şekil 6.8'de 2 farklı analiz yöntemiyle elde edilen PGA'ya göre ölçeklendirilmiş yüzey ivme kayıtları gösterilmektedir. Pik ivme değerleri lineer olmayan analizde sırasıyla 0.18 g, 0.20 g, 0.21 g, 0.18 g, 0.26 g, 0.2 g, 0.21 g, 0.22 g, 0.23 g, 0.24 g, 0.22 g, 0.21 g, 0.21 g, 0.24 g, 0.26 g, 0.19 g, 0.22 g ve 0.19 g civarlarındadır. Lineer olmayan analiz sonuçları göz önüne alındığında, farklı saniyelerde gözlemlenen bu değerlerin birbirinden çok uzak olmadığı görülmektedir. En büyük pik ivmeye sahip olan 0.26 g ile RSN1617 ve RSN4219 kayıtlarıdır. Bu pik ivmeler yaklaşık sırasıyla 19. ve 22. saniyelerde oluşmuştur. RSN1617 ve RSN4219 kayıtları sadece en büyük pik ivmeye sahip olmamakla beraber aynı zamanda anakayaya en yakın pik ivme değerine sahiptir. Pik ivme değerleri eşdeğer lineer analizde ise sırasıyla 0.25 g, 0.37 g, 0.37 g, 0.26 g, 0.33 g, 0.25 g, 0.32 g, 0.23 g, 0.39 g, 0.30 g, 0.30 g, 0.29 g, 0.24 g, 0.33 g, 0.31 g, 0.36 g, 0.31 g ve 0.30 g civarlarındadır. Eşdeğer lineer analiz sonuçları göz önüne alındığında, farklı saniyelerde gözlemlenen bu değerlerin birbirinden lineer olmayan analize göre daha farklı olduğu ve her deprem kaydı için pik değerlerin arttığı görülmektedir. En büyük pik ivmeye sahip olan 0.39 g ile RSN160 kaydıdır. Bu pik ivme yaklaşık 8. Saniyede oluşmuştur. RSN160 kaydı aynı zamanda anakayaya en yakın pik ivme değerine sahiptir.

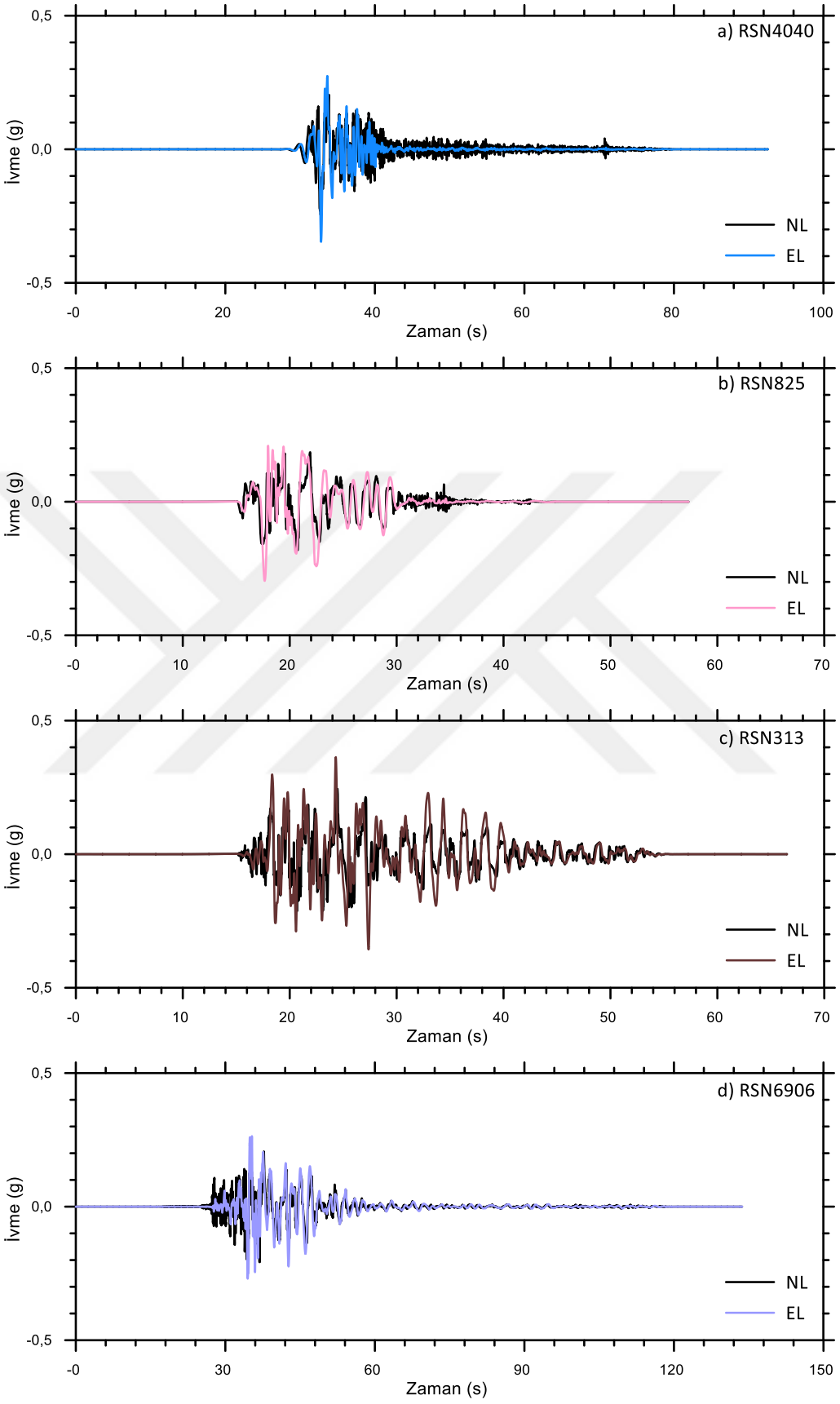
RSN1617 kaydı PGA'ya göre ölçeklendirilmiş yüzey ivme kayıtlarında da orijinal yüzey ivme kayıtlarında da lineer olmayan analizde en büyük pik ivmeye sahip olan kayıt

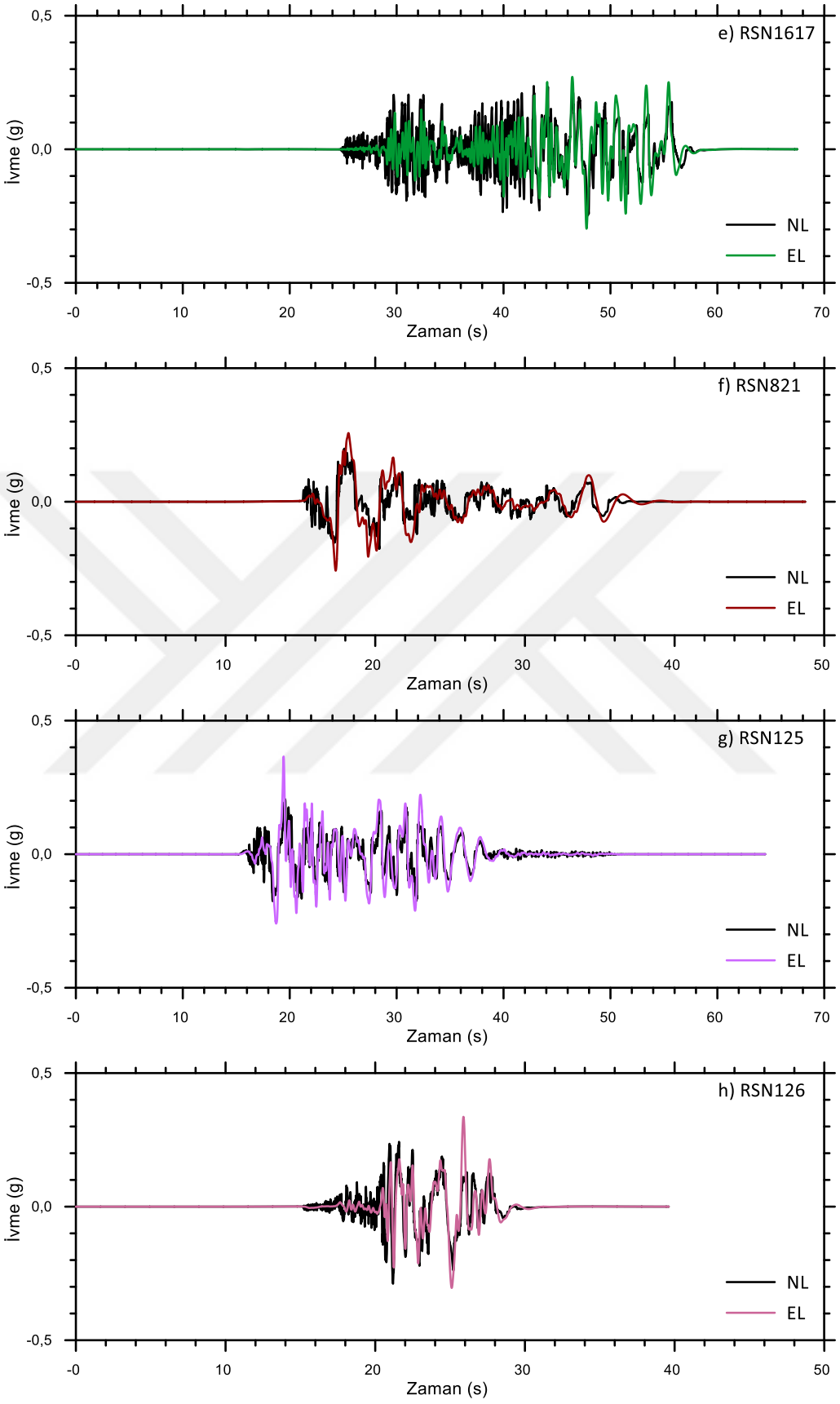
olduğu görülmektedir. Eşdeğer lineer analizde ise RSN160 kaydı hem PGA'ya göre ölçekli yüzey ivme kaydında hem de orijinal yüzey ivme kaydında en yüksek pik ivmeye sahiptir.

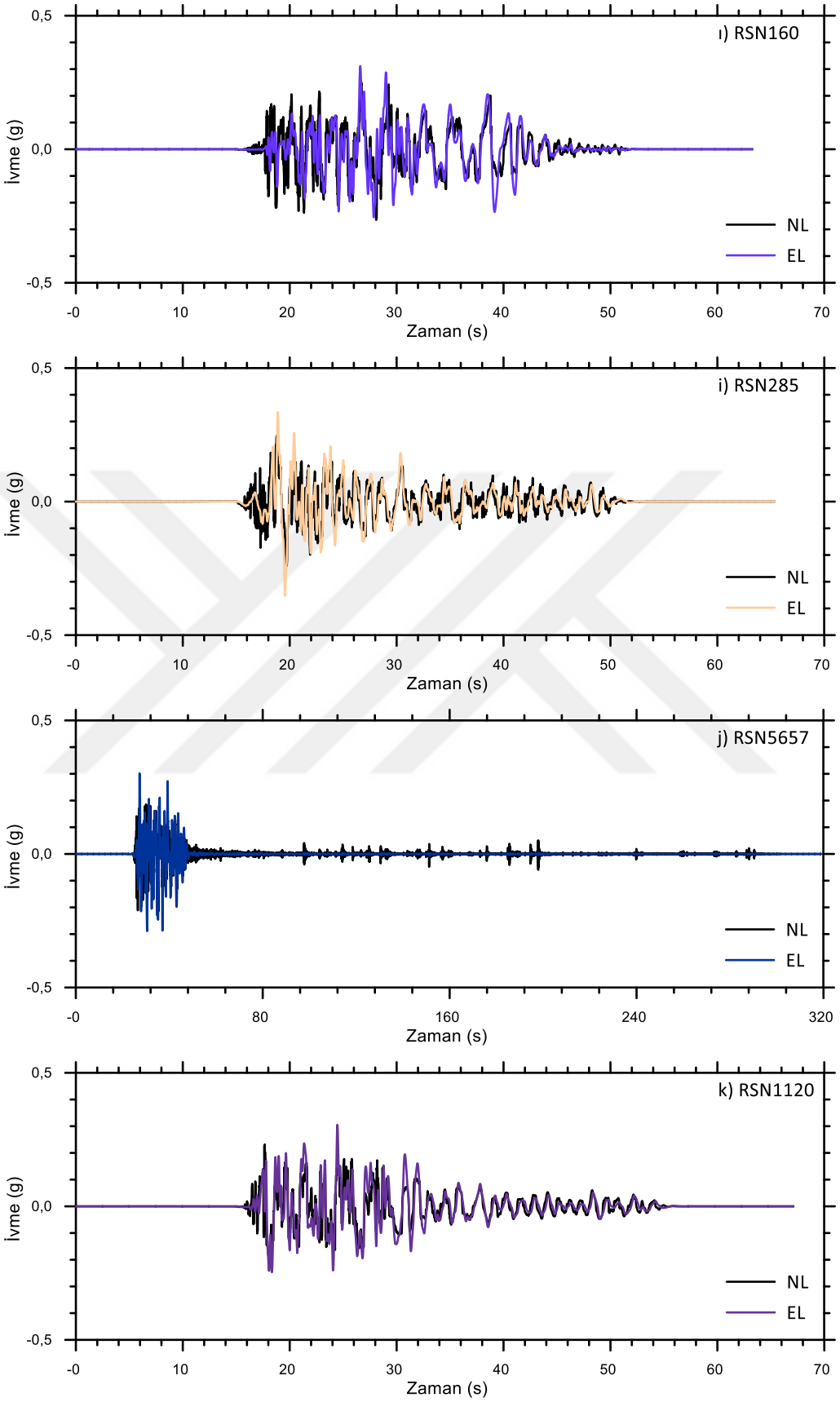
Çizelge 6.2. PGA'ya göre Ölçekli Anakaya ve Orijinal Yüzey İvme Kayıtları Kıyaslanması

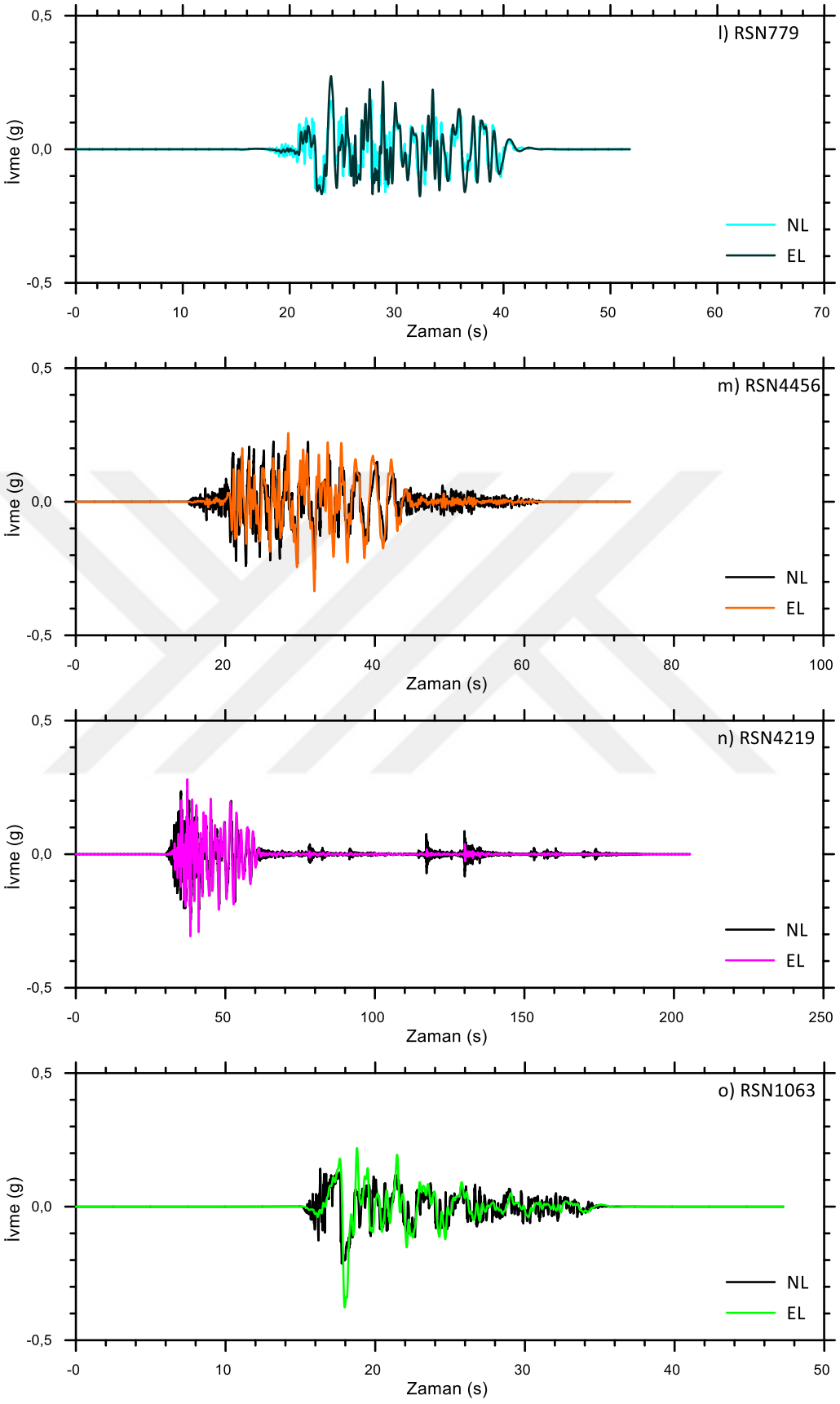
Deprem İsmi	RSN	PGA'YA GÖRE ÖLÇEKLİ ANAKAYA İVME KAYITLARI		PGA'YA GÖRE ÖLÇEKLİ YÜZEY İVME KAYITLARI			
		PGA	SÜRE(s)	NL PGA	NL PGA SÜRE(s)	EL PGA	EL PGA SÜRE(s)
Bam_ Iran	4040	0.45	24	0.18	24	0.25	19
Cape Mendocino	825	0.45	3	0.20	3	0.37	3
Corinth_ Greece	313	0.45	4	0.21	8	0.37	4
Darfield_ New Zealand	6906	0.45	20	0.18	19	0.26	20
Duzce_ Turkey	1617	0.45	26	0.26	19	0.33	19
Erzican_ Turkey	821	0.45	3	0.20	4	0.25	4
Friuli_ Italy-0	125	0.45	4	0.21	6	0.32	4
Gazli_ USSR	126	0.45	8	0.22	6	0.23	11
Imperial Valley-06	160	0.45	9	0.23	8	0.39	8
Irpinia_ Italy-01	285	0.45	6	0.24	4	0.30	4
Iwate_ Japan	5657	0.45	18	0.22	18	0.30	18
Kobe_ Japan	1120	0.45	6	0.21	7	0.29	6
Loma Prieta	779	0.45	12	0.21	12	0.24	8
Montenegro_ Yugoslavia	4456	0.45	8	0.24	7	0.33	8
Nniigata_ Japan	4219	0.45	20	0.26	22	0.31	20
Northridge-01	1063	0.45	3	0.19	3	0.36	3
Tabas_ Iran	139	0.45	7	0.22	7	0.31	7
Tottori_ Japan	3968	0.45	19	0.19	20	0.30	19

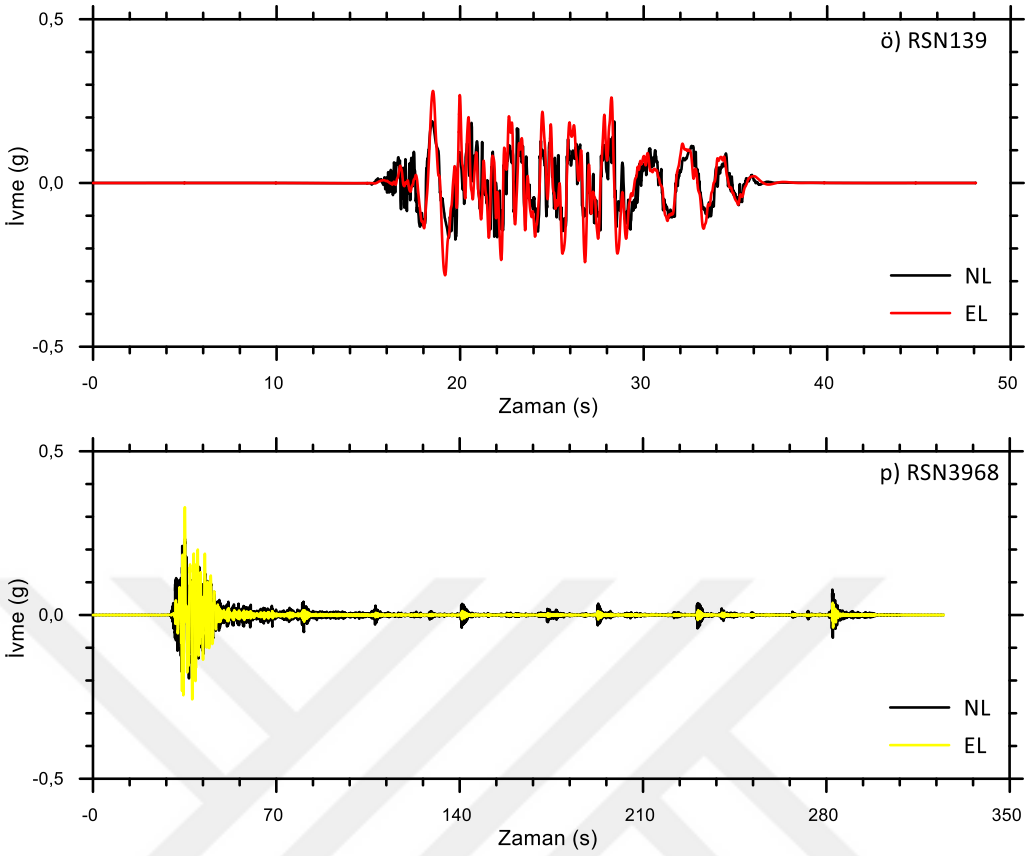
PGA'ya göre ölçekli anakaya ivme kayıtları ve PGA'ya göre ölçekli yüzey ivme kayıtları pik ivmeleri arası bir karşılaştırma yapıldığında her iki analiz çeşidinde de azalma olduğu Çizelge 6.2'den gözlemlenmektedir. Lineer olmayan analizde eşdeğer lineer analize kıyasla de-amplifikasyon yine daha fazladır. Pik ivmelerin sürelerinde her kayıt için farklılıklar gözlemlenmiştir. Ancak kayıtların pik ivmelerinin görüldüğü süreler anakayada ve yüzeyde benzer elde edilmiştir. Bununla birlikte frekans açısından bir değişiklik olmadığı sonucuna varılabilir.


a) RSN4040
İvme (g)
0,5
0,0
-0,5
-0
20
40
60
80
100
Zaman (s)
NL
EL
b) RSN825
İvme (g)
0,5
0,0
-0,5
-0
10
20
30
40
50
60
70
Zaman (s)
NL
EL
c) RSN313
İvme (g)
0,5
0,0
-0,5
-0
10
20
30
40
50
60
70
Zaman (s)
NL
EL
d) RSN6906
İvme (g)
0,5
0,0
-0,5
-0
30
60
90
120
150
Zaman (s)
NL
EL


e) RSN1617
İvme (g)
Zaman (s)
NL
EL
f) RSN821
İvme (g)
Zaman (s)
NL
EL
g) RSN125
İvme (g)
Zaman (s)
NL
EL
h) RSN126
İvme (g)
Zaman (s)
NL
EL


ı) RSN160
İvme (g)
0,5
0,0
-0,5
-0
10
20
30
40
50
60
70
Zaman (s)
NL
EL
i) RSN285
İvme (g)
0,5
0,0
-0,5
-0
10
20
30
40
50
60
70
Zaman (s)
NL
EL
j) RSN5657
İvme (g)
0,5
0,0
-0,5
-0
80
160
240
320
Zaman (s)
NL
EL
k) RSN1120
İvme (g)
0,5
0,0
-0,5
-0
10
20
30
40
50
60
70
Zaman (s)
NL
EL


l) RSN779
İvme (g)
Zaman (s)
NL
EL
m) RSN4456
İvme (g)
Zaman (s)
NL
EL
n) RSN4219
İvme (g)
Zaman (s)
NL
EL
o) RSN1063
İvme (g)
Zaman (s)
NL
EL



Şekil 6.9. Spektraya göre Ölçekli İvmeler Kullanılarak Eşdeğer Doğrusal Ve Doğrusal Olmayan (Nonlinear) Analizlerle Elde Edilen Yüzey İvme Kayıtları: a) RSN4040, b) RSN825, c) RSN313, d) RSN6906, e) RSN1617, f) RSN821, g) RSN125, h) RSN126, ı) RSN160, i) RSN285, j) RSN5657, k) RSN1120, l) RSN779, m) RSN4456, n) RSN4219, o) RSN1063, ö) RSN139, p) RSN3968.

Şekil 6.9'da 2 farklı analiz yöntemiyle elde edilen spektraya göre ölçeklendirilmiş yüzey ivme kayıtları gösterilmektedir. Pik ivme değerleri lineer olmayan analizde sırasıyla 0.25 g, 0.18 g, 0.24 g, 0.21 g, 0.25 g, 0.20 g, 0.21 g, 0.29 g, 0.26 g, 0.25 g, 0.21 g, 0.23 g, 0.18 g, 0.25 g, 0.25 g, 0.21 g, 0.19 g ve 0.23 g civarlarındadır. Lineer olmayan analiz sonuçları göz önüne alındığında, farklı saniyelerde gözlemlenen bu değerlerin birbirinden çok uzak olmadığı görülmektedir. En büyük pik ivmeye sahip olan 0.29 g ile RSN126 kaydı olmakla beraber bu pik ivme yaklaşık 21. saniyede oluşmuştur. RSN126 kaydı sadece en büyük pik ivmeye sahip olmamakla beraber aynı zamanda anakayaya en yakın pik ivme değerine sahip olduğu görülmektedir. Pik ivme değerleri eşdeğer lineer analizde ise sırasıyla 0.35 g, 0.30 g, 0.36 g, 0.27 g, 0.30 g, 0.26 g, 0.36 g, 0.34 g, 0.31 g, 0.35 g, 0.30 g, 0.30 g, 0.27 g, 0.34 g, 0.31 g, 0.38 g, 0.28 g ve 0.33 g civarlarındadır. Eşdeğer lineer analiz sonuçları göz önüne alındığında, farklı saniyelerde gözlemlenen bu değerlerin birbirinden lineer olmayan analize göre daha farklı olduğu ve her deprem kaydı için pik değerlerin arttığı

görülmektedir. En büyük pik ivmeye sahip olan 0.38 g ile RSN1063 kaydıdır. Bu pik ivme yaklaşık 18. saniyede oluşmuştur. RSN1063 kaydı aynı zamanda anakayaya en yakın pik ivme değerine sahip olduğu gözlemlenebilir.

PGA'ya göre ölçekli yüzey ivme kayıtlarında ve orijinal kayıtlarda analizlerde en büyük pik ivmelerde aynı deprem kayıtları ortaya çıkmışken spektraya göre ölçekli yüzey ivme kayıtlarında lineer olmayan analizde de eşdeğer lineer analizde de farklı ivmeler en büyük pik ivme değerine ulaşmıştır.

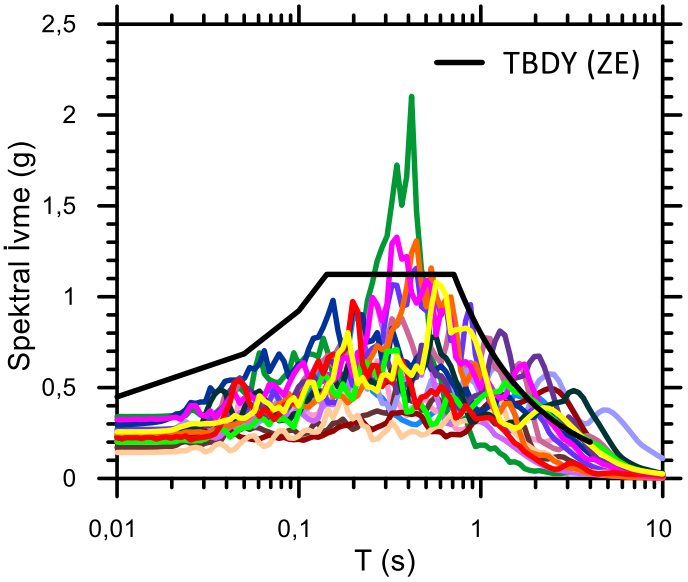
Çizelge 6.3. Spektraya göre Ölçekli Anakaya ve Orijinal Yüzey İvme Kayıtları Kıyaslanması

Deprem İsmi	**RSN**	**SPEKTRAYA GÖRE ÖLÇEKLİ ANAKAYA İVME KAYITLARI**		**SPEKTRAYA GÖRE ÖLÇEKLİ YÜZEY İVME KAYITLARI**			
		PGA	**SÜRE(s)**	**NL PGA**	**NL PGA SÜRE(s)**	**EL PGA**	**EL PGA SÜRE(s)**
Bam_ Iran	4040	0.55	33	0.25	33	0.35	33
Cape Mendocino	825	0.72	18	0.18	22	0.30	18
Corinth_ Greece	313	0.50	18	0.24	24	0.36	24
Darfield_ New Zealand	6906	0.75	35	0.21	37	0.27	34
Duzce_ Turkey	1617	0.45	40	0.25	48	0.30	48
Erzican_ Turkey	821	0.59	17	0.20	18	0.26	17
Friuli_ Italy-0	125	0.60	19	0.21	20	0.36	19
Gazli_ USSR	126	0.47	21	0.29	21	0.34	26
Imperial Valley-06	160	0.59	24	0.26	28	0.31	27
Irpinia_ Italy-01	285	0.54	19	0.25	19	0.35	20
Iwate_ Japan	5657	0.51	33	0.21	35	0.30	27
Kobe_ Japan	1120	0.47	24	0.23	18	0.30	24
Loma Prieta	779	0.47	28	0.18	28	0.27	24
Montenegro_ Yugoslavia	4456	0.43	26	0.25	32	0.34	32
Nniigata_ Japan	4219	0.49	35	0.25	38	0.31	38
Northridge-01	1063	0.58	18	0.21	18	0.38	18
Tabas_ Iran	139	0.47	22	0.19	18	0.28	19
Tottori_ Japan	3968	0.57	34	0.23	35	0.33	35

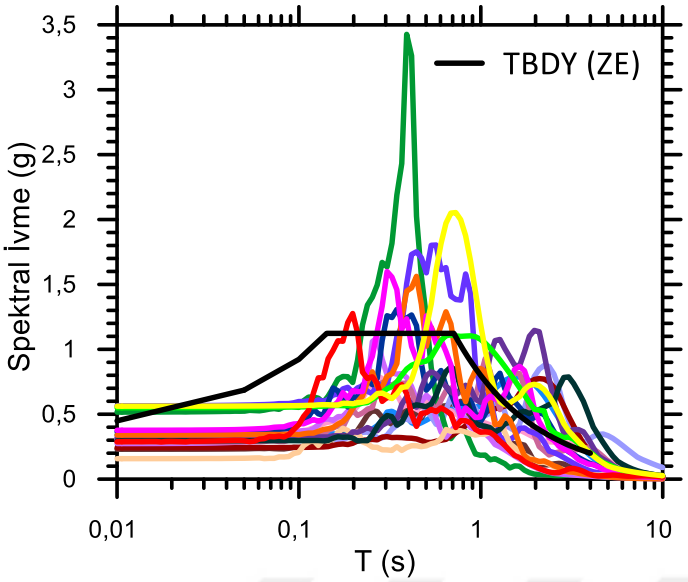
Spektraya göre ölçekli anakaya ivme kayıtları ve spektraya göre ölçekli yüzey ivme kayıtları pik ivmeleri arası bir karşılaştırma yapıldığında her iki analiz çeşidinde de azalma olduğu Çizelge 6.3'den gözlemlenmektedir. Lineer olmayan analizlerde eşdeğer lineer analize kıyasla de-amplifikasyon yine daha fazladır. Pik ivmelerin sürelerinde her kayıt için farklılıklar gözlemlenmiştir. Ancak kayıtların pik ivmelerinin görüldüğü süreler anakayada ve yüzeyde benzer ele edilmiştir. Ek olarak orijinal kayıtlara kıyasen frekans içeriğinde farklılıklar belirlenmiştir.

6.3. Spektral İvme Değerlendirmesi

Bu bölümde eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizler sonucunda seçilen 18 adet deprem ve tasarım spektrumu için spektral ivme (S_a) - Periyot (T) grafikleri oluşturulmuştur. Şekil 6.10'da orijinal ivmeler ile doğrusal olmayan analiz sonucunda spektral ivme-periyot grafiği gösterilmiştir. RSN1617 kaydı hariç daha benzer spektral ivme değerleri elde edilmiş olup RSN1617 kaydının en büyük spektral ivmesi diğer 17 depreme göre daha büyük çıkmıştır. Bu en büyük spektral ivmenin yaklaşık 2.1 g'ye 0.4 saniyede ulaştığı görülmektedir. RSN160 depreminde anakaya hareketine en benzer sonuçlar elde edilmiştir. RSN821 ve RSN285 kayıtlarında daha düşük spektral ivme değerleri görülmüştür.

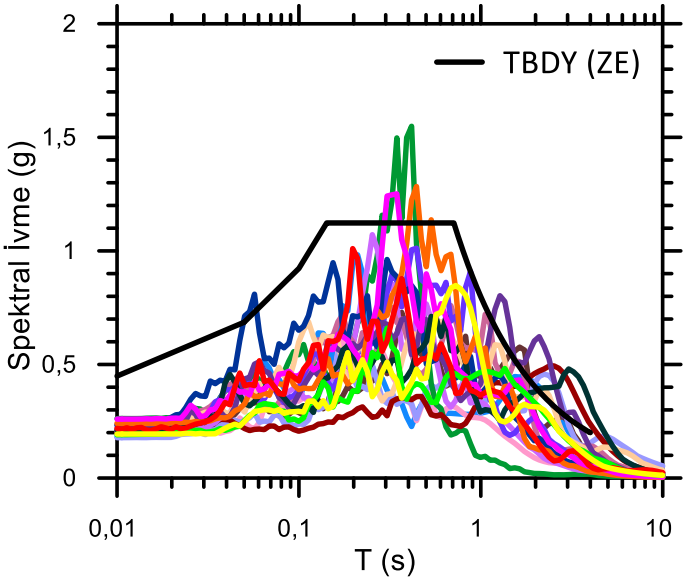


Şekil 6.10. Orijinal İvmeler Kullanılarak Doğrusal Olmayan (Nonlinear) Analizlerle Elde Edilen Spektral İvme-Periyot Değerleri



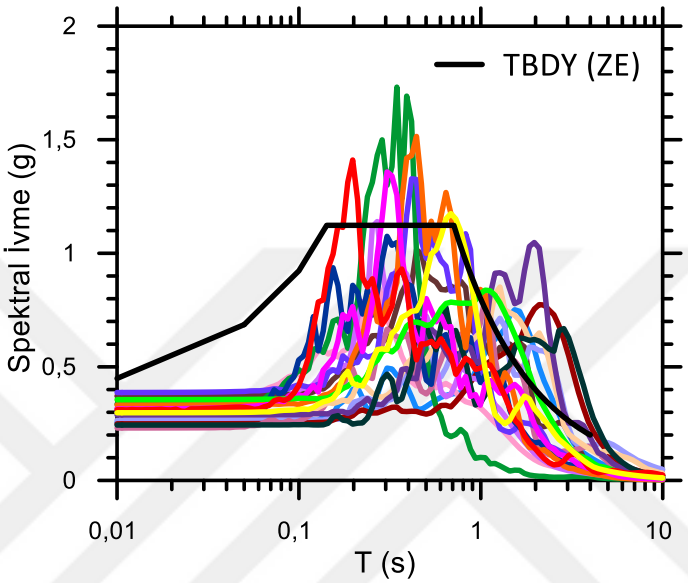
Şekil 6.11. Orijinal İvmeler Kullanılarak Eşdeğer Doğrusal Analizlerle Elde Edilen Spektral İvme-Periyot Değerleri

Orijinal ivmeler ile eşdeğer doğrusal analiz sonucunda spektral ivme-periyot grafiği incelendiğinde sonuçlar doğrusal olmayan analizdeki sonuçlarla benzerdir. RSN1617 kaydının en büyük spektral ivmesi en büyük spektral ivme olup 3.5 g'ye 0.4 saniyede ulaştığı görülmektedir. RSN125 ve RSN1063 depremleri anakaya hareketine en benzer kayıtlardır. Orta periyotlarda spektral davranışlar farklılık göstermektedir. RSN285 kaydında daha düşük spektral ivme değerleri görülmüştür (Şekil 6.11).



Şekil 6.12. PGA'ya göre Ölçekli İvmeler Kullanılarak Doğrusal Olmayan (Nonlinear) Analizlerle Elde Edilen Spektral İvme-Periyot Değerleri

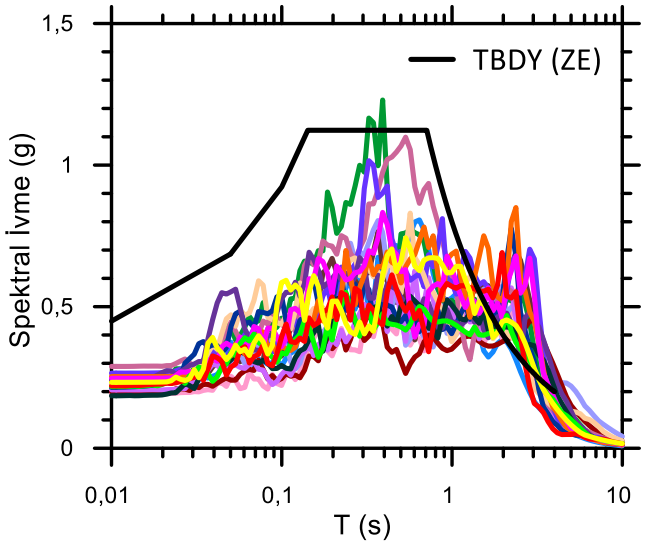
PGA'ya göre ölçekli ivmeler ile doğrusal olmayan analiz sonucunda spektral ivme-periyot grafiği incelendiğinde RSN1617 kaydının orijinal ivmelerdeki gibi en büyük spektral ivme olan 1.6 g'ye 0.4 saniyede ulaştığı görülmektedir. Zamanda bir değişiklik olmasa da en büyük spektral ivmenin azaldığı söylenebilir. RSN125 depremi anakaya hareketine en benzer kayıttır. (Şekil 6.12).



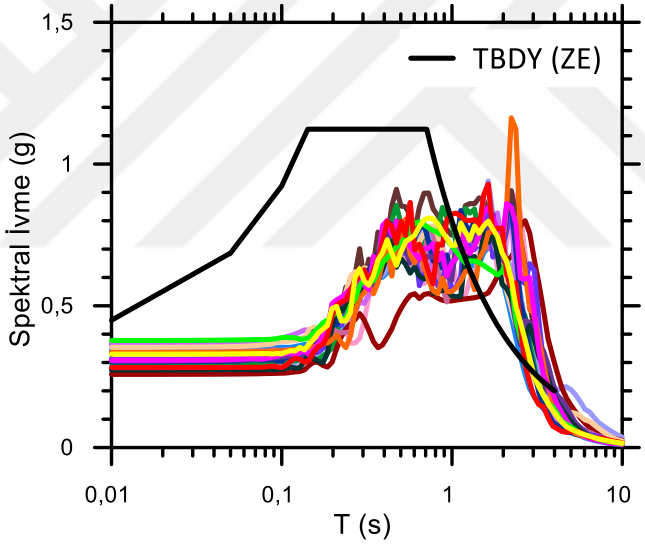
Şekil 6.13. PGA'ya göre Ölçekli İvmeler Kullanılarak Eşdeğer Doğrusal Analizlerle Elde Edilen Spektral İvme-Periyot Değerleri

PGA'ya göre ölçekli ivmeler ile eşdeğer doğrusal analiz sonucunda spektral ivme-periyot grafiği incelendiğinde RSN1617 kaydının orijinal ivmelerdeki gibi en büyük spektral ivme olan 1.8 g'ye 0.4 saniyede ulaştığı görülmektedir. Doğrusal olmayan analizden daha büyük bir değer ortaya çıkmıştır. RSN1120 ve RSN5657 depremleri anakaya hareketine en benzer kayıtlardır (Şekil 6.13).

Spektraya göre ölçekli ivmeler ile doğrusal olmayan analiz sonucunda spektral ivme-periyot grafiği incelendiğinde RSN1617 kaydının en büyük spektral ivme olan 1.3 g'ye 0.4 saniyede ulaştığı ancak bu en büyük spektral ivmenin anakayaya çok daha yakın olduğu görülmektedir. Bütün kayıtların spektral ivmelerinde küçülmeler olduğu anlaşılmaktadır. Doğrusal olmayan analiz yönteminde PGA'ya göre ölçekli ve spektraya göre ölçekli ivmelerde kısa periyotlarda davranışlar benzer iken, orta ve uzun periyotlarda davranışlar farklılık göstermiştir (Şekil 6.14).



Şekil 6.14. Spektraya göre Ölçekli İvmeler Kullanılarak Doğrusal Olmayan (Nonlinear) Analizlerle Elde Edilen Spektral İvme-Periyot Değerleri



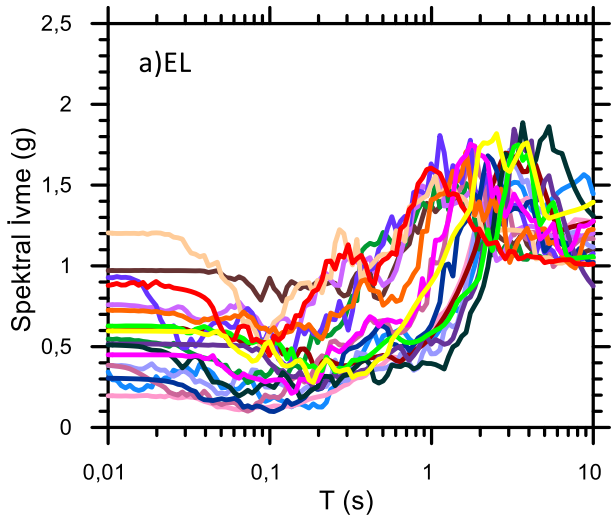
Şekil 6.15. Spektraya göre Ölçekli İvmeler Kullanılarak Eşdeğer Doğrusal Analizlerle Elde Edilen Spektral İvme-Periyot Değerleri

Spektraya göre ölçekli ivmeler ile eşdeğer doğrusal analiz sonucunda spektral ivme-periyot grafiği incelendiğinde RSN4456 kaydının en büyük spektral ivme olan 1.2 g'ye 1.2 saniyede ulaştığı ancak bu en büyük spektral ivmenin anakaya çok daha yakın olduğu görülmektedir. Bütün kayıtların spektral ivmelerinde farklılıklar olduğu anlaşılmaktadır. Özellikle eşdeğer lineer analizler PGA'ya göre ölçekli ve spektraya göre ölçekli ivmelerde göz önünde bulundurulduğunda pik değerler ve olduğu periyotlar birbirlerinden çok farklı olup maksimum spektral ivmenin yayıldığı periyot aralıkları da birbirlerinden farklılıklar göstermektedir (Şekil 6.15).

6.4. Zemin Büyütme Değerlendirmesi (Amplifikasyon Faktörü)

Yumuşak zeminler, deprem sırasında anakaya ve sert zeminlere göre farklı tepkiler verir. Bazı frekanslarda deprem dalgalarını büyütebilirken, diğer frekanslarda sönümleyebilirler. Bu, zemin ile deprem dalgalarının frekanslarının etkileşimi sonucu rezonans yaratabilir ve yapıların hasar görme riskini artırabilir. Bu nedenle, zemin özelliklerinin iyi analiz edilmesi önemlidir. Maksimum büyütmenin oluştuğu periyot, zeminin hâkim periyotu olarak adlandırılır ve bu, zemin tabakası kalınlığı ve deprem dalgası hızı gibi faktörlere bağlıdır (Kramer, 1996).

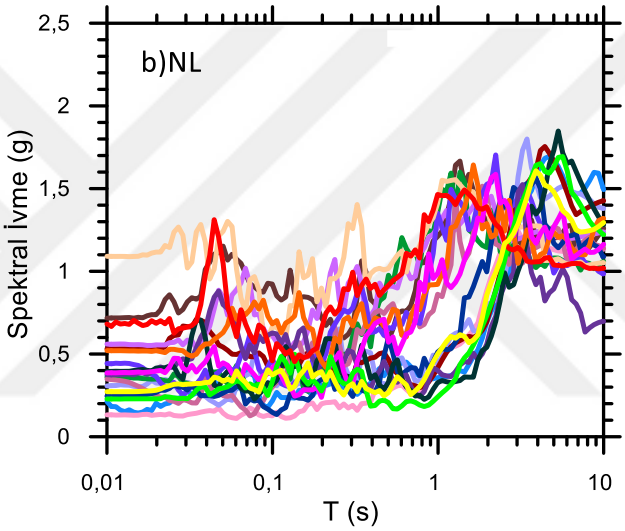
Şekil 6.16'da 18 farklı depremin eşdeğer doğrusal analiz çalışmaları sonucunda büyütme oranlarının 1.54 ile 1.89 arasında değiştiği, en büyük amplifikasyon faktörü RSN779 kaydında 1.89 değeri 3.7 saniyede; en düşük maksimum amplifikasyon faktörü ise RSN1617 kaydında 1.54 değeri 1.4 saniyede gerçekleşmiştir. T=0.01 s için büyütme oranları incelendiğinde, farklı depremler için farklı sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Maksimum büyütme oranları birbirine yakın olmakla birlikte genel olarak davranışlar çok farklılılık göstermektedir.



Şekil 6.16. Orijinal İvmeler Kullanılarak Eşdeğer Doğrusal Analizlerle Elde Edilen Amplifikasyon Faktörü (Büyütme) Değerleri

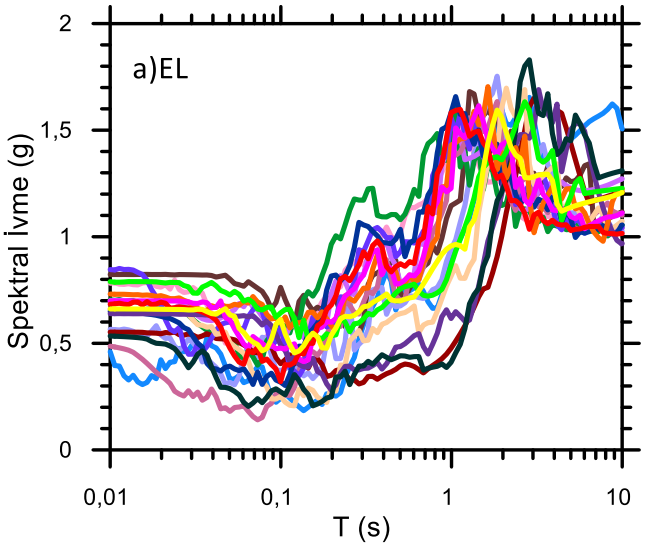
Amplifikasyon oranları için, doğrusal olmayan analiz çalışmaları kapsamında orijinal ivmeler için elde edilen veriler Şekil 6.17'de gösterilmektedir. Bu çalışmada maksimum büyütme oranlarının 1.24 ile 1.85 arasında değiştiği belirlenmiştir. En yüksek

büyütme, RSN779 kaydında 1.85 olarak hesaplanmış olup, bu değer 5.3 saniyede gerçekleşmiştir. Öte yandan, en düşük maksimum büyütme oranı RSN825 kaydında gözlemlenmiş ve 1.24 olarak 3.0 saniyede meydana gelmiştir.Ayrıca, eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analiz sonuçları karşılaştırıldığında, doğrusal olmayan analizlerde orijinal ivmeler kullanıldığında daha düşük amplifikasyon değerleri elde edildiği görülmüştür. Bu durum, doğrusal olmayan analizlerin zemin davranışını daha gerçekçi bir şekilde yansıtmasından kaynaklanabilir.Maksimum büyütme oranın görüldüğü kayıt iki analiz çeşidinde de aynıyken en küçük büyütme oranı eşdeğer doğrusal analiz ve doğrusal olmayan analizde farklı çıkmıştır.

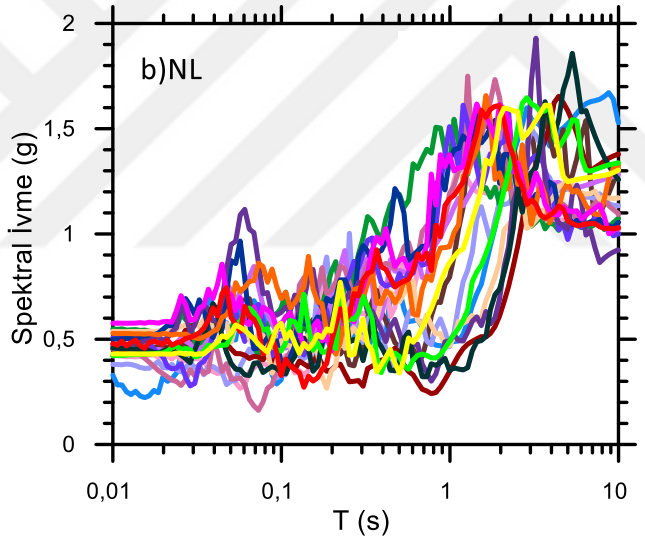


Şekil 6.17. Orijinal İvmeler Kullanılarak Doğrusal Olmayan (Nonlinear) Analizlerle Elde Edilen Amplifikasyon Faktörü (Büyütme) Değerleri

Şekil 6.18'de PGA'ya göre ölçekli 18 depremin eşdeğer doğrusal analiz çalışmaları sonucunda büyütme oranlarının 1.47 ile 1.83 arasında değiştiği, en büyük amplifikasyon faktörü RSN779 kaydında 1.83 değeri 2.9 saniyede; en düşük maksimum amplifikasyon faktörü ise RSN125 kaydında 1.47 değeri 1.1 saniyede gerçekleşmiştir. Bu analiz sonuçlarına göre, periyot süresi T=1'den sonra, yani uzun periyot aralığında, sistemin davranışının kısa ve orta periyotlara kıyasla daha benzer olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, T=0.1 ile T=1 arasındaki davranışın farklılaştığı gözlemlenmiştir. Maksimum büyütme oranları birbirine yakın olmakla birlikte genel olarak davranışlar çok farklılık göstermektedir.

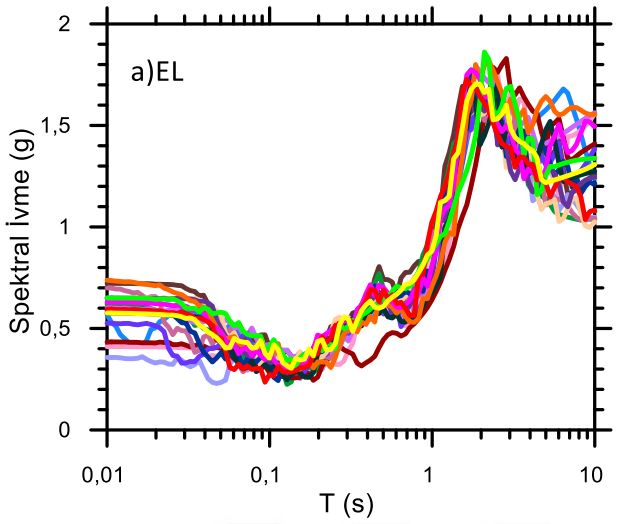


Şekil 6.18. PGA'ya göre Ölçekli İvmeler Kullanılarak Eşdeğer Doğrusal Analizlerle Elde Edilen Amplifikasyon Faktörü (Büyütme) Değerleri



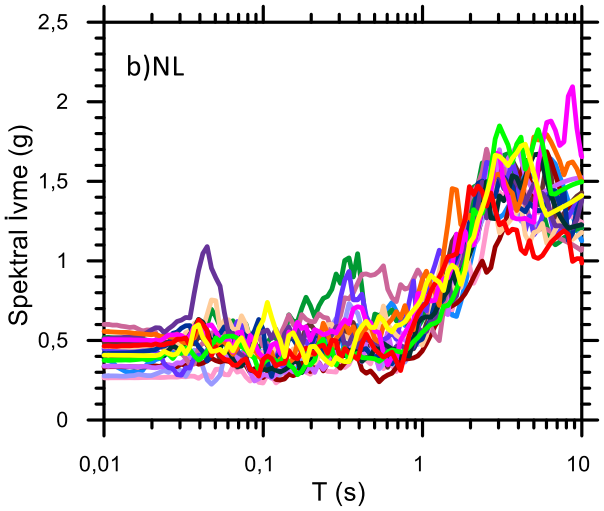
Şekil 6.19. PGA'ya göre Ölçekli İvmeler Kullanılarak Doğrusal Olmayan (Nonlinear) Analizlerle Elde Edilen Amplifikasyon Faktörü (Büyütme) Değerleri

Amplifikasyon oranları için, doğrusal olmayan analiz çalışmaları kapsamında PGA'ya göre ölçekli ivmeler için elde edilen veriler Şekil 6.19'da gösterilmektedir. Burada maksimum büyütme oranlarının 1.25 ile 1.93 arasında değiştiği, en büyük amplifikasyonun RSN1120 kaydında 1.93 olarak 3.2 saniyede, en düşük maksimum amplifikasyonun ise RSN285 kaydında 1.25 olarak 5 saniyede oluştuğu belirlenmiştir. Tüm depremlerin 1 saniyeden uzun sürede pik değerlere ulaştığı görülmektedir. İki analiz çeşidinde de en büyük amplifikasyona ve en küçük maksimum amplifikasyona ait olan kayıtlar farklılık göstermektedir.



Şekil 6.20. Spektraya göre Ölçekli İvmeler Kullanılarak Eşdeğer Doğrusal Analizlerle Elde Edilen Amplifikasyon Faktörü (Büyütme) Değerleri

Şekil 6.20'de spektraya göre ölçekli 18 depremin eşdeğer doğrusal analiz çalışmaları sonucunda büyütme oranlarının 1.66 ile 1.86 arasında değiştiği, en büyük amplifikasyon faktörü RSN1063 kaydında 1.86 değeri 2.1 saniyede; en düşük maksimum amplifikasyon faktörü ise RSN285 kaydında 1.66 değeri 2.2 saniyede gerçekleşmiştir. Kısa periyotlarda davranış farklılık gösterirken T=0.1 ile T=3 arasında benzer davranışlar gösterilmiştir. Ancak yüksek periyotlarda davranış tekrar farklılık göstermektedir.



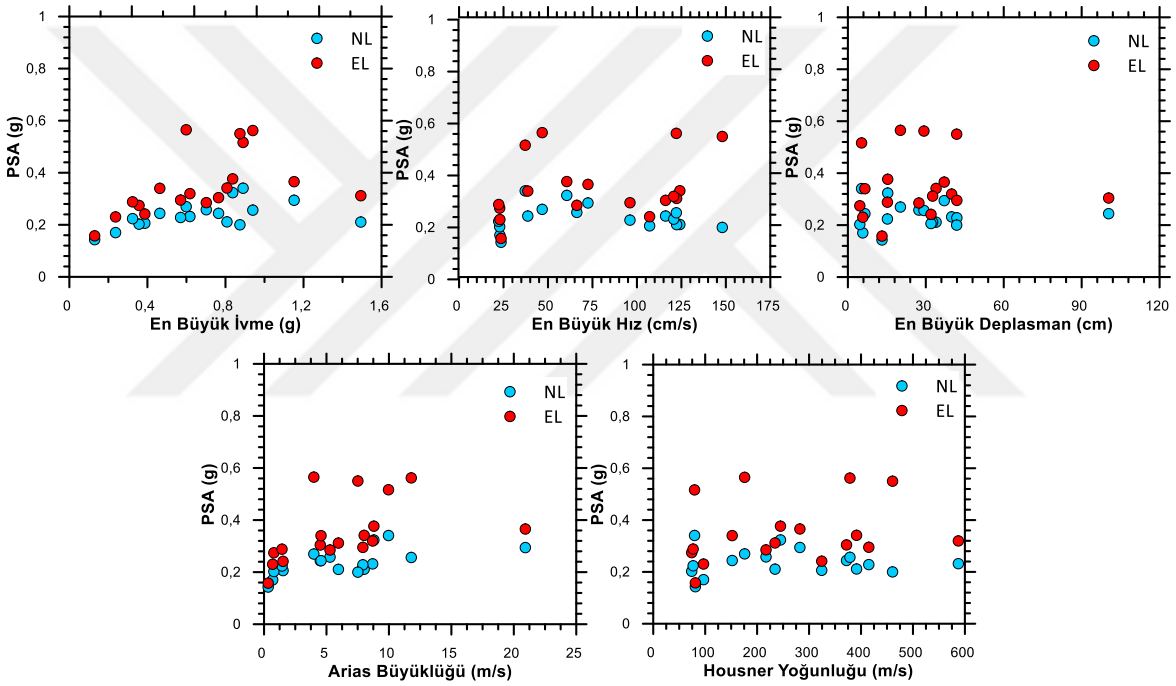
Şekil 6.21. Spektraya göre Ölçekli İvmeler Kullanılarak Doğrusal Olmayan (Nonlinear) Analizlerle Elde Edilen Amplifikasyon Faktörü (Büyütme) Değerleri

Amplifikasyon oranları için, doğrusal olmayan analiz çalışmaları kapsamında spektraya göre ölçekli ivmeler için elde edilen veriler Şekil 6.21'de gösterilmektedir. Burada maksimum büyütme oranlarının 1.47 ile 2.09 arasında değiştiği, en büyük amplifikasyonun RSN4219 kaydında 2.09 olarak 8.7 saniyede, en düşük makismum amplifikasyonun ise RSN139 kaydında 1.47 olarak 2.2 saniyede oluştuğu belirlenmiştir. İki analiz çeşidinde de en büyük amplifikasyona ve en küçük amplifikasyona ait olan kayıtlar farklılık göstermektedir. Amplifikasyon değerleri orijinal verilerde ve PGA'ya göre ölçekli verilerde her iki analizde de 1 ve 2 arasında seyrederken spektraya göre ölçekli ivmelerin doğrusal olmayan analizinde 2'den büyük değerler tespit edilmiştir.

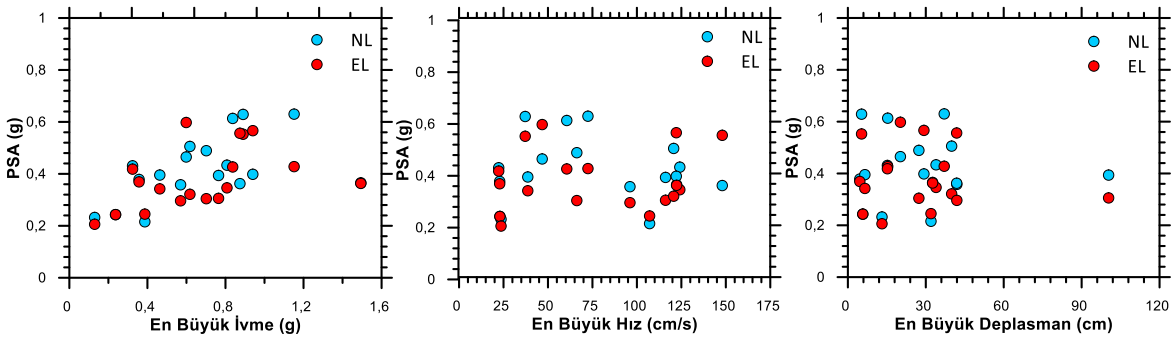
6.5. Eşdeğer Doğrusal Analiz Sonuçlarının Doğrusal Olmayan Analizler ile Karşılaştırılması

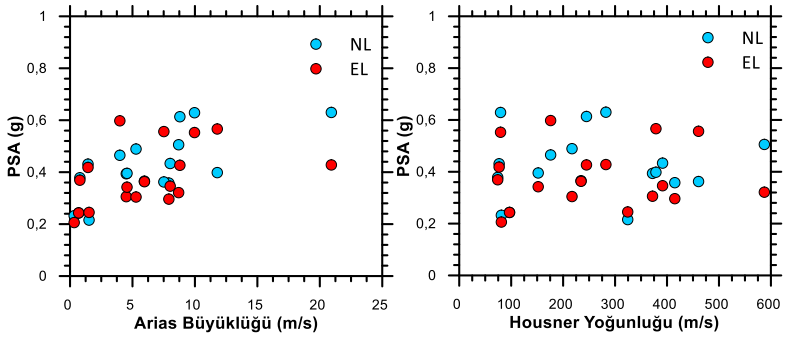
Bu çalışmada, farklı bölgelerden elde edilen 18 deprem kaydının eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan zemin davranış analizleri gerçekleştirilmiştir. Farklı iki yöntemle ölçeklendirilen bu depremler 54 adet eşdeğer doğrusal analiz ve 54 adet doğrusal olmayan analiz olmak üzere 108 adet analiz üzerinden incelenmiştir. Yüzey zemin analizlerinden elde edilen spektral parametreler ve Tasarım Tepki Spektrumu (PSA) değerleri, anakaya ile zemin yüzeyi arasındaki hareketin %5 sönüm durumunda maksimum deprem tepkisini belirlemek amacıyla hesaplanmıştır. Bu tasarım spektrumları, farklı periyotlara sahip sahalarda deprem yüklerini belirlemek için kullanılmakta ve yeni inşa edilecek yapıların deprem güvenliği açısından temel bir rol oynamaktadır. Depremleri etkileyen birçok parametre olup bu parametrelere bu çalışmada değinilmiştir. PGA (Zemin yüzeyindeki maksimum ivme), saha tepkisini etkileyen birincil parametre olmasına rağmen, deprem hareketinin diğer karakteristikleri de zemin davranışı üzerinde önemli rol oynayabilir. Bu nedenle, yalnızca PGA ile sınırlı kalmayarak, farklı deprem karakteristiklerinin saha tepkisi üzerindeki etkisini daha iyi anlamak amacıyla deprem parametreleri ile PSA (Spektral İvme) arasında bir ilişki kurulmuştur. Çalışmada, 18 farklı kayıt için eşdeğer doğrusal (EL) ve doğrusal olmayan (NL) analiz yöntemlerinden elde edilen PSA değerleri, T=0.01 sn, T=0.1 sn ve T=1 sn periyotlarında en büyük ivme (PGA), en büyük hız (PGV), en büyük deplasman (PGD), arias büyüklüğü ve housner yoğunluğu açısından karşılaştırılmıştır. Bu periyotlar, yapı tasarımında kritik öneme sahip oldukları ve yüzey hareketine ilişkin bir yaklaşım sağladıkları için tercih edilmiştir.

Orijinal yüzey ivme kayıtları en düşük periyottaki (T=0.01) parametreler eşdeğer doğrusal analizde doğrusal olmayan analize kıyasla daha büyükken, T=0.1 sn ve T=1 sn periyotlarında böyle bir kıyaslama yapılamamaktadır. PSA ve periyotlar arasında eşdeğer doğrusal analiz aşamasında doğrusal bir ilişki varken RSN1617 ve RSN139 kayıtlarında ise bir orantı görülmemektedir. Ancak doğrusal olmayan analizde periyotlar arasında bir şey söylemek doğru olmamaktadır. Eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan sonuçlardan elde edilen PSA değerlerinin T=0.01 sn periyodunda en yakın olduğu ve sonuçların hemen hemen her üç periyot için eşdeğer doğrusal analizde 0.15 g ile 1.25 g arasında değiştiği, doğrusal olmayan analizde ise 0.1 g ile 0,7 g arasında değiştiği görülmektedir.

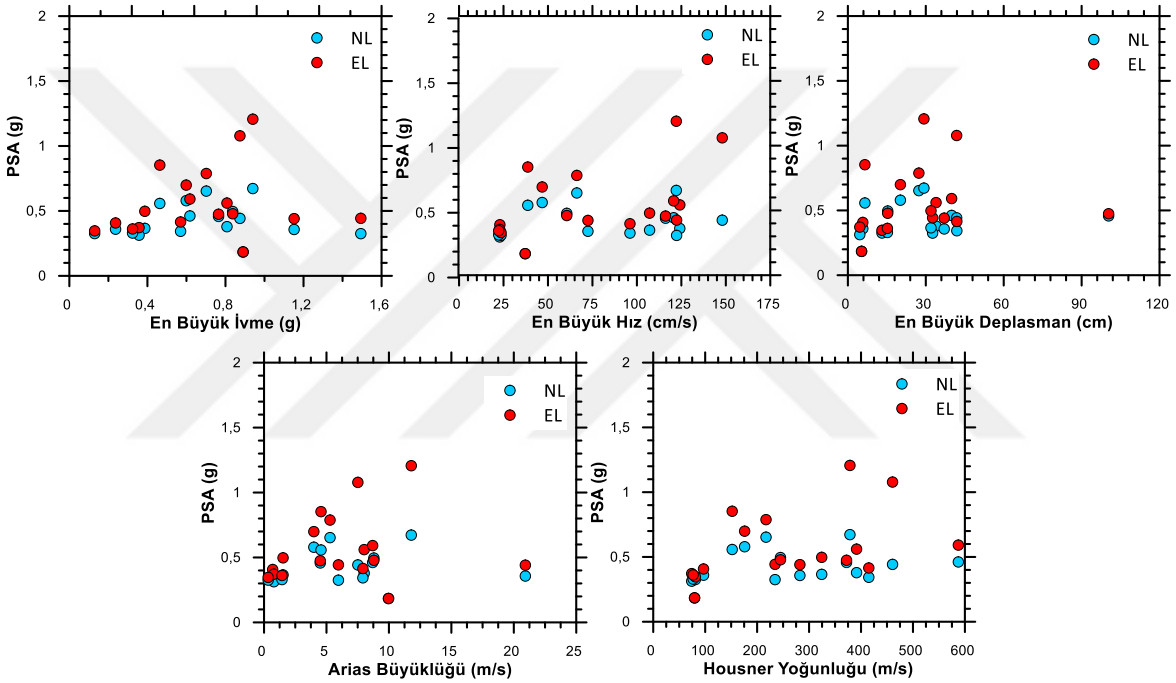


Şekil 6.22. Orijinal Yüzey İvme Kayıtlarının T=0.01 saniyede PSA değerlerinin ve Deprem Karakteristiklerinin Kıyaslanması





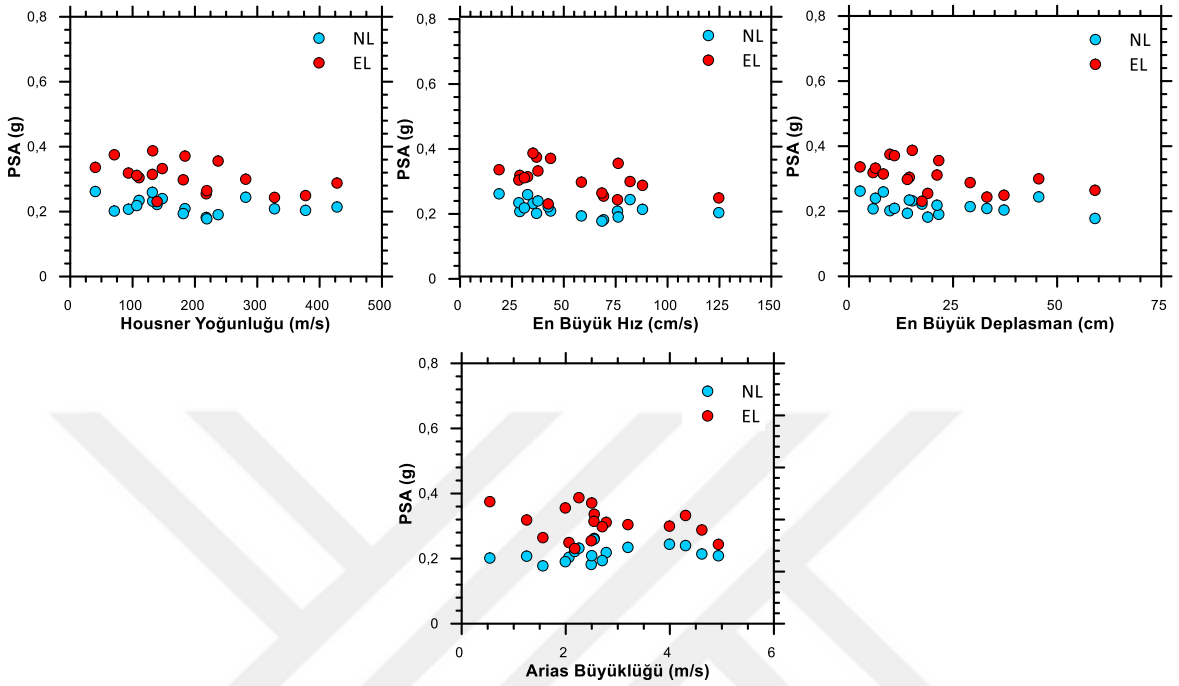
Şekil 6.23. Orijinal Yüzey İvme Kayıtlarının T=0.1 saniyede PSA değerlerinin ve Deprem Karakteristiklerinin Kıyaslanması



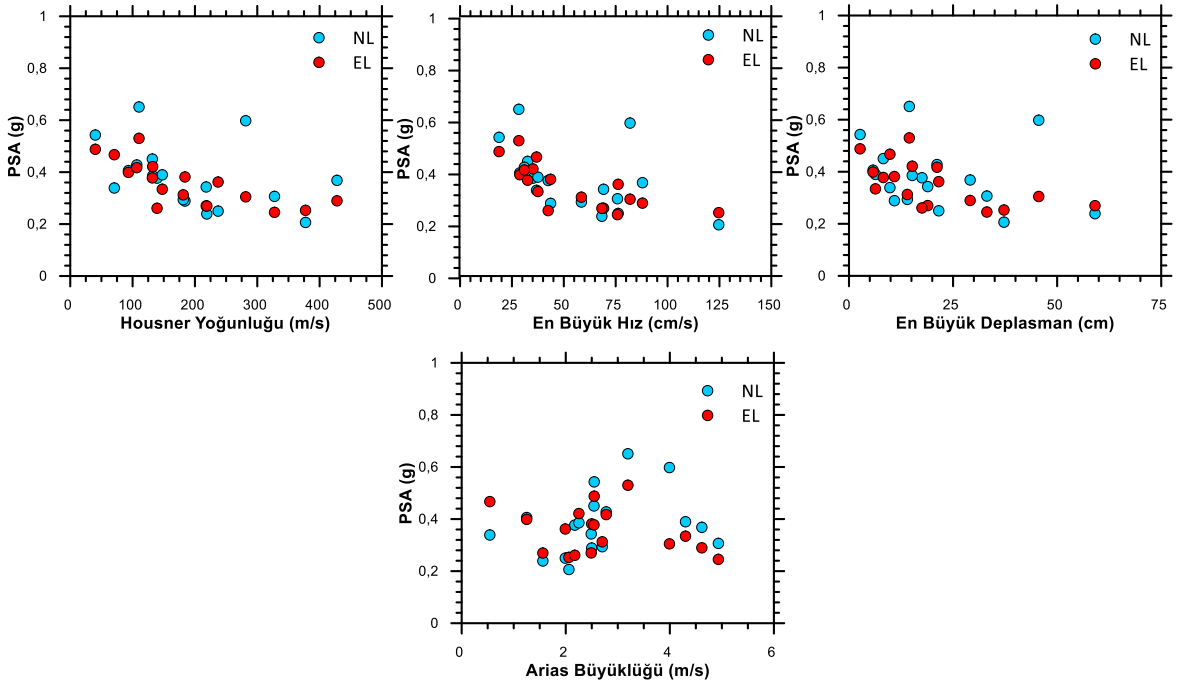
Şekil 6.24. Orijinal Yüzey İvme Kayıtlarının T=1 saniyede PSA değerlerinin ve Deprem Karakteristiklerinin Kıyaslanması

PGA'ya göre ölçekli yüzey ivme kayıtları en düşük periyottaki (T=0.01) parametreler eşdeğer doğrusal analizde doğrusal olmayan analize kıyasla daha büyükken, T=0.1 sn ve T=1 sn periyotlarında böyle bir kıyaslama yapılamamaktadır. Parametrelere bakıldığında ise PGA'ya göre ölçekli ivmelerde tüm PGA'lar 0.45 g olduğundan dolayı PGA kıyası yapılmamıştır. PSA ve periyotlar arasındaki ilişkinin hem eşdeğer doğrusal analizde hem de doğrusal olmayan analizde daha düzensiz olduğu sonucuna varılabilir. Eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan sonuçlardan elde edilen PSA değerlerinin T=0.01 sn periyodunda en yakın olduğu ve sonuçların hemen hemen her üç periyot için eşdeğer

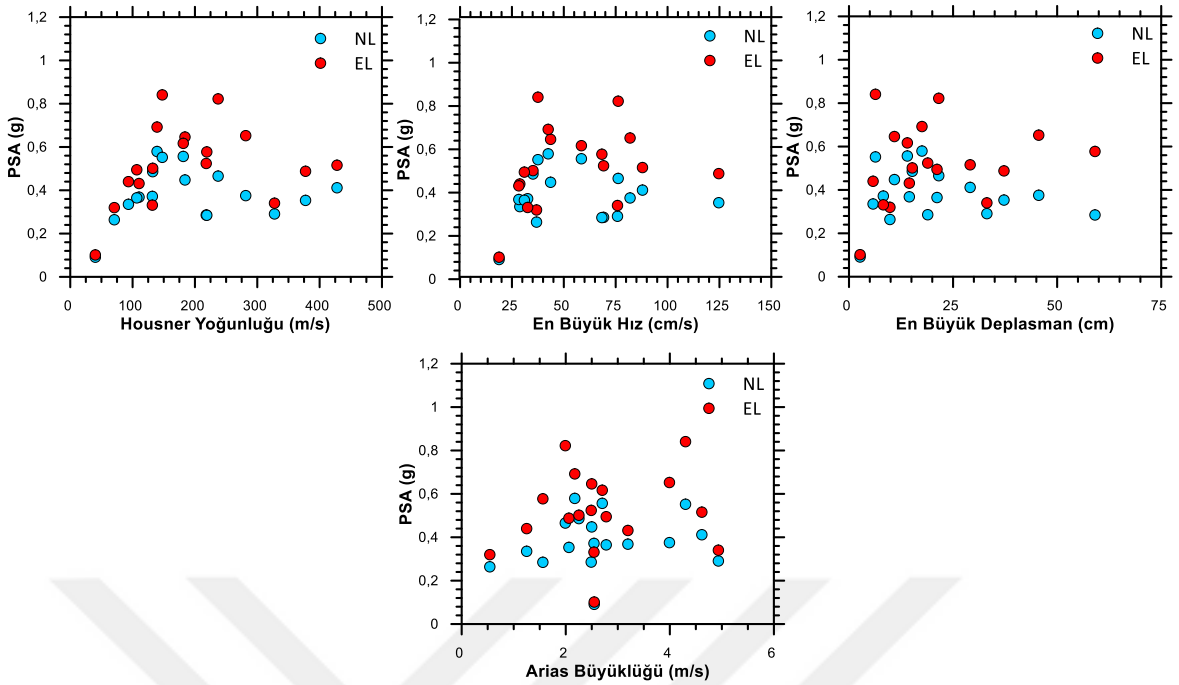
doğrusal analizde 0.1 g ile 0.85 g arasında değiştiği, doğrusal olmayan analizde ise 0.05 g ile 0,7 g arasında değiştiği görülmektedir.



Şekil 6.25. PGA'ya göre Ölçekli Yüzey İvme Kayıtlarının T=0.01 saniyede PSA değerlerinin ve Deprem Karakteristiklerinin Kıyaslanması



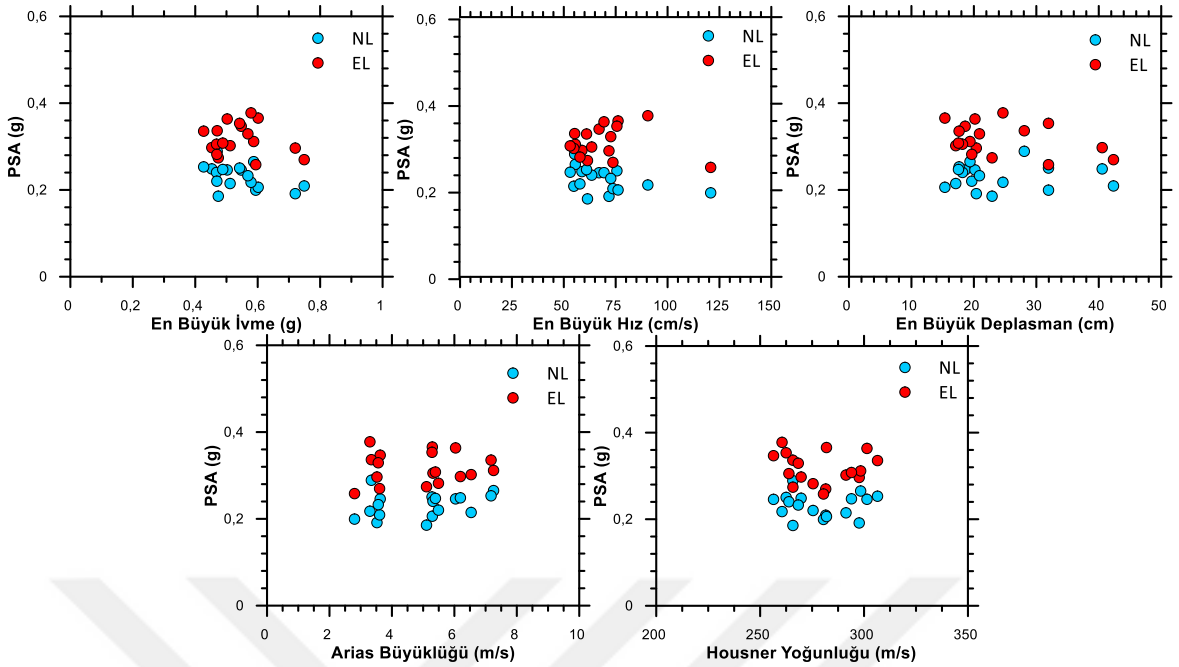
Şekil 6.26. PGA'ya göre Ölçekli Yüzey İvme Kayıtlarının T=0.1 saniyede PSA değerlerinin ve Deprem Karakteristiklerinin Kıyaslanması



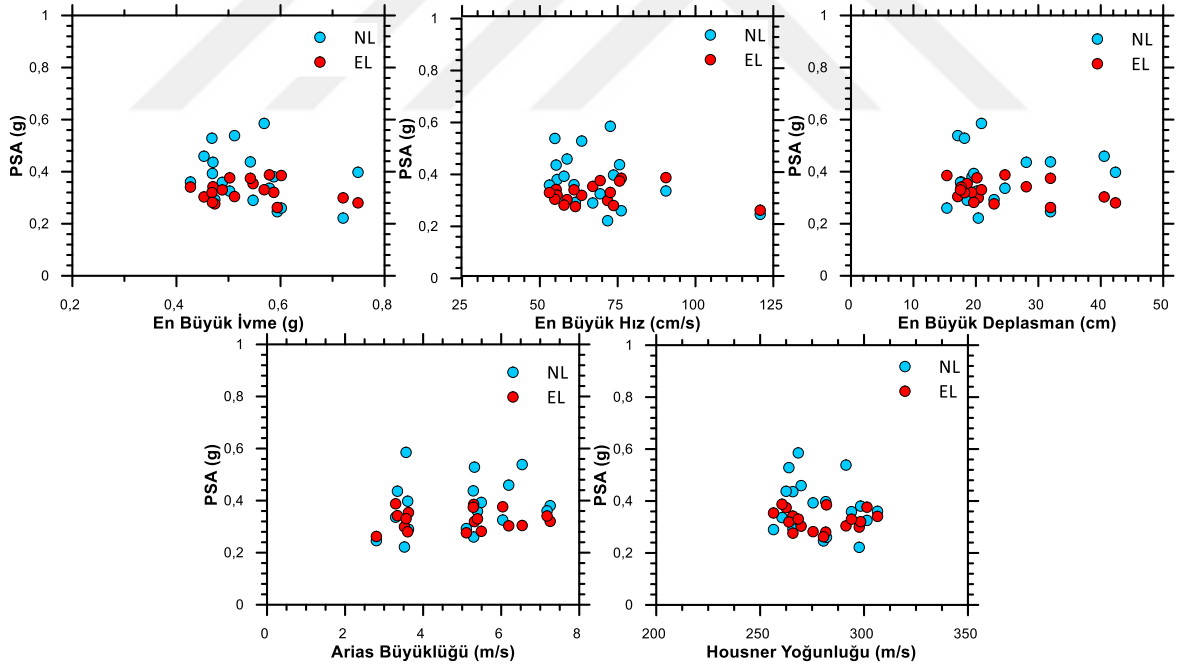
Şekil 6.27. PGA'ya göre Ölçekli Yüzey İvme Kayıtlarının T=1 saniyede PSA değerlerinin ve Deprem Karakteristiklerinin Kıyaslanması

Spektraya göre ölçekli yüzey ivme kayıtları en düşük periyottaki (T=0.01) parametreler eşdeğer doğrusal analizde doğrusal olmayan analize kıyasla daha büyük çıkmaktadır. Bu nedenle eşdeğer doğrusal analiz yönteminden elde edilen sonuçlar doğrusal olmayan analiz yöntemine göre daha güvenli tarafta kalmaktadır.

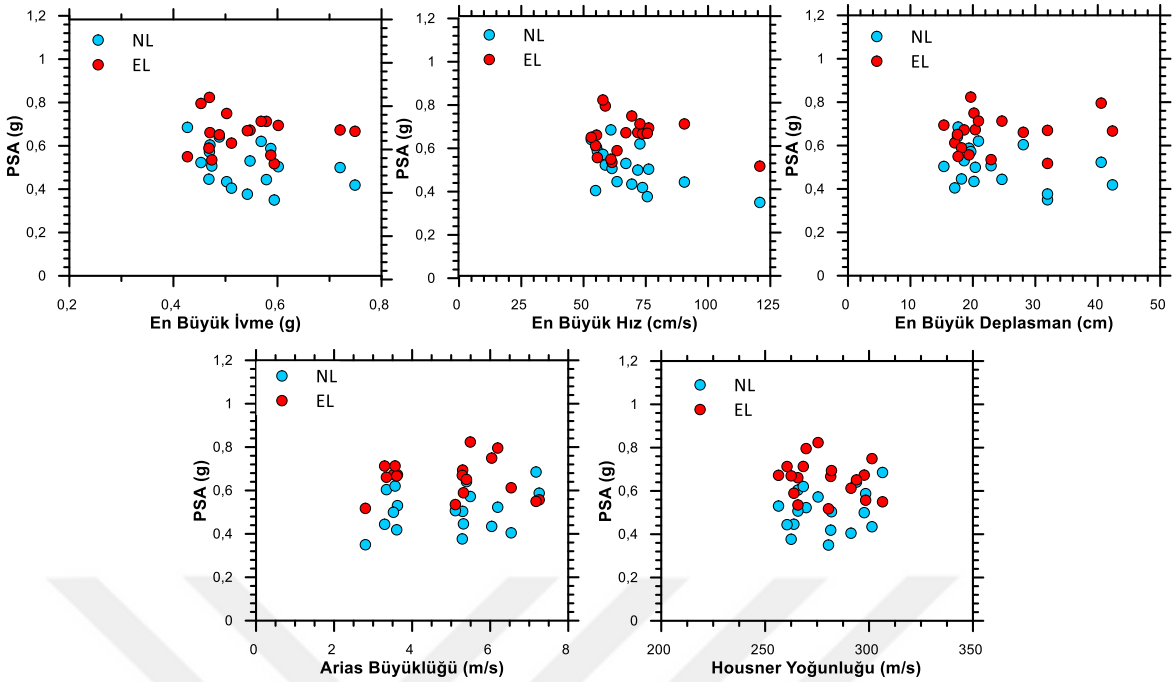
PSA ve periyotlar arasında eşdeğer doğrusal analiz aşamasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır. Ancak doğrusal olmayan analizde RSN285, RSN5657 ve RSN1120 kayıtlarında periyotlar ve PSA arasında düzensizlikler farkedilmiştir. Eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan sonuçlardan elde edilen PSA değerlerinin T=0.01 sn periyodunda en yakın olduğu ve sonuçların hemen hemen her üç periyot için eşdeğer doğrusal analizde 0.25 g ile 0.85 g arasında değiştiği, doğrusal olmayan analizde ise 0.15 g ile 0,65 g arasında değiştiği görülmektedir.



Şekil 6.28. Spektraya göre Ölçekli Yüzey İvme Kayıtlarının T=0.01 saniyede PSA değerlerinin ve Deprem Karakteristiklerinin Kıyaslanması



Şekil 6.29. Spektraya göre Ölçekli Yüzey İvme Kayıtlarının T=0.1 saniyede PSA değerlerinin ve Deprem Karakteristiklerinin Kıyaslanması



Şekil 6.30. Spektraya göre Ölçekli Yüzey İvme Kayıtlarının T=1 saniyede PSA değerlerinin ve Deprem Karakteristiklerinin Kıyaslanması

7.SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında seçilen 18 farklı deprem için anakaya ivme kayıtları ile eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan zemin davranış analizler sonucunda yüzey ivme kayıtları farklı iki ölçeklendirme sistemi ile incelenmiştir.

- Çalışma kapsamında orijinal ivme kayıtları zamandan bağımsız olarak farklılık göstermiştir. Depremlere ait ivme kayıtları 0.45 g'ye göre ölçeklendirilerek analizlerde kullanılmıştır. Spektraya göre ölçeklendirilen kayıtların pik ivmelerin birbirine yaklaştığı gözlemlenebildiği gibi orijinal kayıtlara kıyasen frekans içeriğinde farklılıklar olduğu görülmektedir. Orijinal ivme kayıtlarında en büyük pik ivmesi 0.49 g ile RSN825 iken spektraya göre ölçekli ivmelerde en büyük pik ivme 0.75 g ile RSN6906 kaydı olarak elde edilmiştir.

- Yüzey ivme kayıtları incelendiğinde ise eşdeğer lineer analiz sonuçları göz önüne alındığında, farklı saniyelerde gözlemlenen bu değerlerin birbirinden lineer olmayan analize göre daha farklı olduğu ve her deprem kaydı için pik değerlerin arttığı görülmektedir. İki analiz yöntemi kıyaslandığında yüzey pik değerlerinin ile olduğu zamanın ve anlamlı büyüklüğe sahip çevrim sayılarının farklı olduğu görülmektedir. Lineer olmayan analizde her zaman eşdeğer lineer analize kıyasla de-amplifikasyon daha fazla elde edilmiştir. Pik ivmelerin süreleri her kayıt için farklı olarak gözlemlenmiştir. Ancak kayıtların pik ivmelerinin görüldüğü süreler anakayada ve yüzeyde yaklaşıktır. Orijinal yüzey ivmelerinde ve PGA'ya göre ölçekli yüzey ivmelerinde doğrusal olmayan analizde en büyük ivme sırasıyla 0,34 g ve 0,26 g ile RSN1617 iken eşdeğer doğrusal analizde yine sırasıyla 0,56 g ve 0,39 g ile RSN160 kaydıdır. Ancak spektraya göre ölçekli doğrusal olmayan analizde en büyük ivme 0,29 g ile RSN126 ve eşdeğer doğrusal analizde en büyük ivme 0,38 g ile RSN1063 kaydıdır. PGA'ya göre ölçekli yüzey ivme kayıtlarında ve orijinal kayıtlarda analizlerde en büyük pik ivmelerde aynı deprem kayıtları ortaya çıkmışken spektraya göre ölçekli yüzey ivme kayıtlarında lineer olmayan analizde de eşdeğer lineer analizde de farklı ivmeler en büyük ivme değerine ulaşmıştır.

- Bu bölümde eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizler sonucunda seçilen 18 adet deprem ve tasarım spektrumu için spektral ivme (S_a) - Periyot (T) grafikleri oluşturulmuştur. En büyük spektral ivmenin spektraya göre ölçekli ivmeler ile eşdeğer doğrusal analiz dışında RSN1617 kaydı olduğu ancak spektraya göre ölçekli eşdeğer doğrusal analiz sonucunda RSN4456 kaydı olduğu anlaşılmaktadır. Özellikle eşdeğer lineer analizler PGA'ya göre ölçekli ve spektraya göre ölçekli ivmelerde göz önünde bulundurulduğunda pik değerler ve olduğu periyotlar birbirlerinden çok farklı olup maksimum spektral ivmenin yayıldığı periyot aralıkları da birbirlerinden farklılıklar göstermektedir. Maksimum spektral ivmelerin geniş bir aralıkta oluştuğu belirlenmiştir. Bu durum, tek bir baskın periyottan ziyade, farklı periyot aralıklarında birden fazla hâkim periyot bulunduğunu göstermektedir. Yapı tasarımında, yapı ile zemin arasındaki doğal periyotların çakışması durumunda rezonans etkisi oluşabilir ve bu da yapılar üzerinde büyük hasarlara yol açabilir. Ancak, geniş aralığı temsil eden hakim periyotların varlığı, tek bir hakim periyota göre çakışma olasılığını azaltarak yapıların deprem karşısında daha güvenli olmasını sağlamaktadır. Bu parametrelerin doğru bir şekilde dikkate alınması, deprem mühendisliğinde güvenli yapı tasarımının önemini vurgulamaktadır.

- Çalışmada amplifikasyon oranı da incelenmiştir. Analizlerde en büyük amplifikasyona ve en küçük maksimum amplifikasyona ait olan kayıtlar farklı olarak elde edilmiştir. Amplifikasyon değerleri orijinal verilerde ve PGA'ya göre ölçekli verilerde her iki analizde de 1 ve 2 arasında seyrederken spektraya göre ölçekli ivmelerin doğrusal olmayan analizinde 2'den büyük değerler gözlemlenmiştir.

- Çalışmada elastik tasarım deprem yükünün hesabında kullanılan PSA (tasarım tepki spektrumu) değerleri analizler sonucunda elde edilmiştir. En düşük periyottaki (T=0.01) parametreler eşdeğer doğrusal analizde doğrusal olmayan analize kıyasla daha büyük sonuçlanmıştır. Bu nedenle eşdeğer doğrusal analiz yönteminden elde edilen sonuçlar doğrusal olmayan analiz yöntemine göre daha güvenli tarafta kalmaktadır. Sonuç olarak, tasarımda kullanılan ivmelerin belirlenmesinde yalnızca PGA kıyasının yeterli olmadığı, aynı zamanda deprem hareketinin karakteristik özelliklerinin de dikkate alınması gerektiği ortaya çıkmaktadır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Liu, P., Qu, H., Ma, G., & Li, J. (2024). An improved time domain spectral matching method using particle swarm optimization. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. doi:https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.108729

Zhang, R., Zhang, L., Pan, C., Chen, Q., & Wang , Y. (2021). Generating high spectral consistent endurance time excitations by a modified time-domain spectral matching method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*.

Adekristi, A., & Eatherton, M. (2015). Time-Domain Spectral Matching of Earthquake Ground Motions using Broyden Updating. *Journal of Earthquake Engineering, 20(5)*, 1-20. doi:10.1080/13632469.2015.1104753

American Society Of Civil Engineers Minimum Design Loads For Buildings And Other Structures. (2002).

Apriadi, D., Mandhany, A., Sahadewa, A., Basarah, Y. I., Sengara, W., & Hakim, A. (2023). Scaling factors for 1-D ground response amplification in a soft soil basin. *Frontiers in Built Environment*.

Atik, L. A., & Abrahamson, N. (2010). An Improved Method for Nonstationary Spectral Matching. *Earthquake Spectra, 26(3)*. doi:https://doi.org/10.1193/1.3459159

Bolisetti, C., Whittaker,, A. S., Mason, H. B., . . . M. (2014). Equivalent linear and nonlinear site response analysis for design and risk assessment of safety-related nuclear structures. *Nuclear Engineering and Design, 275*, 107-121.

Celep, Z. (2018). *Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanık Yapı Tasarımı.*

Civelekler, E. (2020). *Eşdeğer ve Doğrusal Olmayan Analiz Yöntemleri ile Zeminlerin Dinamik Davranışının Belirlenmesi.* Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Ensititüsü, Eskişehir.

Civelekler, E. (2024). Killi Zeminlerde İki Farklı Dinamik Kayma Modülü Yaklaşımın Sahaya Özgü Tepki Analizlerinde Karşılaştırılması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 884-893. doi: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1425268

Civelekler, E., & Afacan, K. B. (2022). Effect of Site Specific Soil Characteristics on the Nonlinear Ground Response Analysis.

Civelekler, E., Okur, D. V., & Afacan, K. B. (2021). Eşdeğer Doğrusal Ve Doğrusal Olmayan Yaklaşımlara Göre Sismik Yük Etkisindeki Zeminlerde Davranış Analizi. *ESOGÜ Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(2) 158 - 171.

De-Alba, P., Baldwin, & K.C. (1991). Use of bender elements in soil dynamics experiments. *ASCE Geotechnical Special Publication No. 29* (s. 86-101).

KAYNAKLAR DİZİNİ

Demir, A., Kayhan, A. H., & Palanci, M. (2023). Response- and probability-based evaluation of spectrally matched ground motion selection strategies for bi-directional dynamic analysis of low- to mid-rise RC buildings. *Structures*. doi:https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105533

Elnashai, A., Di Sarno, & L. (2008). Fundamentals of earthquake engineering. *John Wiley and Sons.* Chichester. doi:10.1002/9780470024867

Eurocode 8: Design Of Structures For Earthquake Resistance - Part 1 : General Rules, Seismic. (2004).

Eurocode 8: Design Of Structures For Earthquake Resistance Part 5: Foundations, Retaining. (2004).

FAHJAN, Y. (2008). Selection and Scaling of Real Earthquake Accelerograms to Fit the Turkish Design Spectra. *Teknik Dergi, 19(3)*, 4423-4444.

Graizer, V., EERI, M., & Kalkan, E. (2009). Prediction of Spectral Acceleration. *Earthquake Spectra, 25(1)*, 39-69.

Güler, E. (2021). *Zeminlerin Dinamik Özelliklerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi ve Zemin Büyütme Analizlerinin Yapılması.* Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Hammam, A., & Eliwa, M. . (2013). Comparison between results of dynamic & static moduli of soil determined by different methods. *HBRC Journal, 9(2)*, 144-149. doi:https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2013.05.002

Han, S. W., & Ha, S. J. (2016). A Method for Selecting Ground Motions that Considers Target Response Spectrum Mean and Variance as Well as Correlation Structure. *Journal of Earthquake Engineering, 20(8)*, 1263-1277. doi:https://doi.org/10.1080/13632469.2016.1138162

Hanumantharao, C., Ramana, & G.V. (2008). Dynamic soil properties for microzonation of Delhi. *India. J. Earth Syst. Sci., 117*(2), 719-730.

Hashash, Y. M., Dashti, S., Romero, M. I., Ghayoomi, M., & Musgrove , M. (2015). Evaluation of 1-D seismic site response modeling of sand using centrifuge experiments. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19-31. doi:https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.07.003

Hashash, Y., Musgrove, M., Harmon, J., Ilhan, O., Xing, G., Numanoglu, O., . . . Park, D. (2020). *DEEPSOIL 7.0, User Manual.* Urbana, IL, Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign.

Ketin, & İ. (1948). Über die tektonisch-mechanischen Folgerungen aus den grossen anatolischen Erdbeben des letzten Dezenniums. *Geol. Rund., 36*, 77-83.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Ketin, İ. (1976). San Andreas ve Kuzey Anadolu Fayları. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, 149-154.

Korkusuz, A. E. (2024). *Deprem Kaydı Seçiminin Düşey Yüklü Kazıkların Davranışına Etkisinin Araştırılması.* Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Kramer, & S. L. (1996). *Geotechnical Earhquake Engineering.* NJ, USA: Prentice Hall.

Kurniawandy, A., Aminsyah, M., Cahyadi, B. U., & Djauhari, Z. (2023). Comparative study of the simulation ground motion by amplitude scale and spectral matching. *E3S Web of Conferences, 464(9)*, s. 8.

Li, B., Pandey, M., Xie, W.-C., & Cai, Z. (2018). Probabilistic seismic hazard analysis considering site-specific soil effects. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 103-113. doi:https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.11.029

Li, P., Gu, J., Liu, Y., & Li, Y. (2022). The study of soft soil seismic subsidence based on the 3D OpenSees model. *Geoenvironmental Disasters, 9:10*.

Manfredi, V., Masi, A., Özcebe, A. G., Paolucci, R., & Smerzini, C. (2022). Selection and spectral matching of recorded ground motions for seismic fragility analyses. *Bulletin of Earthquake Engineering, 20(3)*, 4961–4987.

O'Donnell, A., Beltsar, O., Kurama, Y., Kalkan, E., & Taflanidis, A. (2012). Evaluation of Ground Motion Scaling Methods for Analysis of Structural Systems. *Structures Congress.*

Onur, M. İ. (Dü.). (2023). *Geoteknik Mühendisliğinde Yenilikçi Araştırmalar.* Özgür Publications.

Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER). (2006). https://peer.berkeley.edu/ adresinden alındı

Prasad, S. K., & Vijayendra, K. V. (2017). Relevance of Site Characterization in Seismic Studies. *Indian Journal of Advances in Chemical Science, 5(1)*, 59-64.

Rahnama, M., & Krawinkler, H. (1993). Effects of Soft Soil and Hysteresis Model on Seismic Demands. *Stanford Digital Repository*.

Richard, F.E., J.R. Hall, & R.D. Woods. (1970). *Vibration of Soil and Foundations.* New Jersey: Prentice Hall.

S. U. Umu, D. V. Okur, G. Yılmaz, & S. Fırat. (2013). "Dinamik yükleme şartlarında kum/lastik karışımlarının rijitlik ve sönüm özelliklerinin incelenmesi. *Politeknik Dergisi, 17*(1), 11-19.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Sun, J.I., H.B., Golesorkhi, R., & Seed. (1988). *Dynamic Moduli and Damping Ratios for Cohesive Soils.* Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC-88/15. University of Berkeley, California, USA.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY). (2018).

Viggiani, & G. (1991). Dynamic measurements of small strain stiffness of fine grained soils in the triaxial apparatus. *Experimental Characterization and Modeling of Soils and Soft Rocks, Proceedings of the Workshop in Napoli*, 75-97.

Vucetic, M., Dobry, & R. (1988). Degradation of Marine Clays Under Cyclic Loading. *Journal of Geotechnical Engineering, 114*, 133-149. doi:https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1988)114:2(133)

Vucetic, M., Dobry, & R. (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response. *Geotechnical Engineering, ASCE, 117*(1), 89-107.

Youn, J., Choo, Y., & D. (2008). Measurement of small-strain shear modülus Gmax of dry and saturated sands by bender element, resonant column, and torsional shear tests. *Canadian Geotechnical Testing Journal, 45*(10), 1426-1438.

Zhao, G., Xu, L., Zhu, X., Lin, S., & Xie, L. (2022). Spectrum-matched ground motion selection method based on Siamese Convolutional Neural Networks. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. doi:https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107515