Yakın kaynaklı deprem etkisine maruz alüvyon zeminlerde zemin büyütme analizi

Gizem Nur Coşkun

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2026

Site amplification analysis of alluvial soils subjected to near-source earthquake effect

Gizem Nur Coşkun

MASTER OF SCIENCE THESIS DISSERTATION

Department of Civil Engineering

January 2026

Yakın kaynaklı deprem etkisine maruz alüvyon zeminlerde zemin büyütme analizi

Gizem Nur COŞKUN

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: Prof. Dr. Murat TÜRKÖZ
İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ebru CİVELEKLER

Ocak 2026

ONAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Gizem Nur COŞKUN' un YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı **"Yakın kaynaklı deprem etkisine maruz alüvyon zeminlerde zemin büyütme analizi"** başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Murat TÜRKÖZ

İkinci Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Ebru CİVELEKLER

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye: Prof. Dr. Murat TÜRKÖZ

Üye: Doç. Dr. Kamil Bekir AFACAN

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet İnanç ONUR

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

Prof. Dr. Fatma TÜMSEK

Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Murat TÜRKÖZ ve Dr. Öğr. Üyesi Ebru CİVELEKLER danışmanlıklarında hazırlamış olduğum "**Yakın kaynaklı deprem etkisine maruz alüvyon zeminlerde zemin büyütme analizi**" 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. 06/01/2026

Gizem Nur Coşkun

İmza

T.C.
ESKİŞEHİR OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÜRETKEN YAPAY ZEKÂ KULLANIMI BEYAN FORMU

Bu tezi/projeyi hazırlarken aşağıdaki Üretken Yapay Zekâ (ÜYZ) araçlarından destek aldığımı beyan ederim:

Aşağıdaki ÜYZ araçlarını kullandım. (Birden fazla seçenek işaretlenebilir)

☐ Claude
☐ ChatGPT
☐ DeepSeek
☒ Gemini
☐ Copilot
☐ Diğer (Belirtiniz): .....

ÜYZ araçlarını tezimin/projemin aşağıdaki aşamalarında ilgili amaçlar için kullandım. (Birden fazla seçenek işaretlenebilir**.**

☐ Metin oluşturma
☐ Literatür tarama
☐ Çeviri
☒ Düzenleme/dil kontrolü
☐ Veri işleme ve analizi
☐ Veri görselleştirme
☐ Görüntü üretme
☒ Kaynakça düzenleme
☐Diğer (Belirtiniz): ……

Bu çalışmada ÜYZ kullanımı ***Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde Üretken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehber***'e ve akademik dürüstlük ilkelerine uygun şekilde gerçekleştirilmiş olup ÜYZ araçlarından alınan destek etik kurallar ve kaynak gösterme esaslarına uygun biçimde belirtilmiştir.

ÜYZ araçlarının sağladığı bilgilerin doğruluğunu kontrol ettiğimi, yanlış veya eksik bilgi bulunması halinde tüm sorumluluğun tarafıma ait olduğunu; ayrıca çalışmamla ilgili bu beyana aykırı bir durumun herhangi bir zamanda tespit edilmesi durumunda ortaya çıkabilecek akademik ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi beyan ederim.

Gizem Nur COŞKUN
06/01/2026

(İmza)

ÖZET

1964 Niigata ve Büyük Alaska depremlerinde gözlenen hasarlar, deprem sırasında zemin davranışının yapı hasarları üzerindeki belirleyici rolünü açık bir şekilde ortaya koymuştur. Türkiye, küresel ölçekte en aktif sismik kuşaklardan birinin üzerinde konumlanmış olup 17 Ağustos 1999, 12 Kasım 1999, 24 Ocak Elâzığ ve 6 Şubat 2023 tarihlerinde sırasıyla Kocaeli, Düzce, Elâzığ ve Kahramanmaraş depremleri gibi çok sayıda maddi ve manevi zarara sebebiyet veren depremler yaşamıştır. Bu depremler sırasında meydana gelen hasarların önemli bir bölümünün zemin kaynaklı problemlere bağlı olduğu bilinmektedir. Deprem etkilerinin azaltılabilmesi ve yapı güvenliğinin sağlanabilmesi için, zemin tabakalarının deprem yükleri altındaki davranışının doğru şekilde belirlenmesi ve uygun mühendislik tasarımlarının yapılması büyük önem taşımaktadır.

Bu bağlamda, TBDY (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği) 2018'in önerdiği yöntemler doğrultusunda zemin etütlerinin kapsamı genişletilmiş ve sahaya özgü zemin davranışı analizlerinin yapılması gerekliliği vurgulanmıştır. Bu çalışma kapsamında, Eskişehir ili İnönü ilçesinde meydana gelebilecek olası bir depremin zemin tabakaları üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Zemin davranışı, analiz yöntemleri olarak tek boyutlu eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analiz yöntemleri ile incelenerek DeepSoil programının 7.1 yazılım versiyonu yardımıyla analizler gerçekleştirilmiştir. Yönetmelikte önerilen şekilde çalışma kapsamında bulunan sondaj loglarının her biri için 11 farklı ivme kaydı kullanılarak zemin büyütmesi analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, çalışma alanına ait zeminlerin sahaya özgü dinamik davranış özellikleri ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Zemin Davranışı, Bölgesel Zemin Koşulları, Eşdeğer Doğrusal (lineer) Analiz, Doğrusal Olmayan (non-lineer) Analiz, DeepSoil, Eskişehir.

SUMMARY

The damages observed during the 1964 Niigata earthquake and the Great Alaska earthquake that occurred in the same year clearly demonstrated the decisive role of soil behavior on structural damage during seismic events. Turkey is located on one of the most active seismic belts in the world and has experienced numerous earthquakes causing significant material and moral damage, such as the Kocaeli earthquake on August 17, 1999, the Düzce earthquake on November 12, 1999, the Elâzığ earthquake on January 24, 1999, and the Kahramanmaraş earthquake on February 6, 2023. It is well known that a significant portion of the damage observed during these earthquakes was associated with soil-related problems. In order to mitigate earthquake-induced damages and ensure structural safety, it is essential to accurately determine the behavior of soil layers under seismic loading and to perform appropriate engineering designs.

In this context, the scope of ground investigations has been expanded in line with the methods proposed by TBDY (Turkish Building Earthquake Regulation) 2018, and the necessity of conducting site-specific ground behavior analyses has been emphasized. Within the scope of this study, the effects of a potential earthquake on soil layers in the İnönü district of Eskişehir province were investigated. Soil behavior was examined using one-dimensional equivalent lineer and nonlineer analysis methods, and analyses were performed using the DeepSoil program version 7.1. Ground amplification analyses were performed for each drilling log included in the scope of work as recommended in the regulation, using 11 different acceleration records. Based on the obtained results, the site-specific dynamic behavior characteristics of the soils in the study area were determined.

Keywords: Soil Behavior, Site-Specific Soil Conditions, Equivalent Lineer Analysis, Nonlineer Analysis, Eskişehir.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresi boyunca bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşarak bana karşı hoşgörüsünü eksik etmeyen ve her zaman yardımcı olan saygıdeğer hocam Prof. Dr. Murat TÜRKÖZ'e,

Tez çalışmamın bütün aşamalarında karşılaştığım her sorunu rahatlıkla sorabildiğim, yardımsever ve yapıcı yaklaşımı ile bu süreçte her zaman benim yanımda olarak tez çalışmamın tamamlanması için büyük emeğe sahip olan ikinci danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Ebru CİVELEKLER'e,

Hayatım boyunca bana sevgiyle rehberlik eden, koşulsuz destekleriyle her zaman yanımda olan en büyük güç kaynaklarım sevgili anne ve babama; sabırları, fedakarlıkları ve bana verdikleri emek için minnettarlığımı belirterek çalışmamın yararlı olmasını temenni ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET ..... **vii**
SUMMARY ..... **viii**
TEŞEKKÜR ..... **ix**
İÇİNDEKİLER ..... **x**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **xiii**
ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **xvi**
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... **xvii**
1. GİRİŞ VE AMAÇ **1**
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI **4**
3. ÇALIŞMA BÖLGESİ GENEL ÖZELLİKLERİ **12**
3.1. Çalışma Bölgesinin Konumsal ve Yüzeysel Özellikleri 12
3.2. Çalışma Bölgesinin Jeolojisi ve Stratigrafisi 13
3.3. İnceleme Bölgesinin Tektonik, Hidrojeolojik ve Jeolojik Nitelikleri 14
3.3.1 İnceleme bölgesinin tektonik özellikleri 14
3.3.2 İnceleme bölgesinin hidrojeolojik yapısı 15
3.3.3. İnceleme bölgesi ve çevresinin jeolojik özellikleri 15
3.4. Çalışma Bölgesi Tektonik Durumu ve Depremselliği 16
4. TEORİK YAKLAŞIMLAR **19**
4.1. Sismik Yer Hareketi Parametreleri 19
4.1.1. Yer hareketinin genlik özellikleri 20
4.1.1.1. Yer hareketinin tepe ivmesi 20
4.1.2. Yer hareketinin frekans karakteristikleri 22
4.1.2.1. Fourier spektrumları 23
4.1.2.2. Tepki spektrumları 23
4.1.3. Deprem yer hareketi süresi 25

İÇİNDEKİLER

Sayfa

4.2. Zemin Dinamiğine İlişkin Tanımlayıcı Parametreler 26
4.2.1. Sismik davranışta kayma modülü (G) ve sönüm oranı (D) 26
4.3. Dinamik Zemin Davranışının İncelenmesi 31
4.3.1. Tek boyutlu (1-B) dinamik tepki değerlendirmesi 32
4.3.1.1. Tek boyutlu eşdeğer doğrusal (equivalent lineer) yaklaşım 34
4.3.1.2. Doğrusal olmayan dinamik tepki çözümlemesi 35
4.3.1.3. Zemin büyütmesi 35
5. ÇALIŞMADA KULLANILAN MATERYAL VE YÖNTEM 38
5.1. DeepSoil Tabanlı Modelleme Süreci 38
5.1.1. DeepSoil kullanılarak eşdeğer doğrusal yaklaşımın uygulanması 39
5.1.2. Deepsoil programı ile doğrusal olmayan (non-lineer) analiz 41
5.2. Deprem Verilerinin Seçimi ve Ölçek Uyarlaması 45
5.3. Sondaj Lokasyonlarının Alanlara Göre Ayrımı 47
5.4. Çalışmada Kullanılan Sondajların Zemin Özellikleri 48
6. BULGULAR VE TARTIŞMA 50
6.1. Eşdeğer Doğrusal Tepki Analizinin Bulguları 50
6.1.1. Yüzeyde oluşan maksimum ivme büyüklükleri 50
6.1.2. Saha koşullarına bağlı tepki spektrumları 62
6.1.3. Zemin büyütmesinin (amplifikasyon faktörü) hesaplanan değerleri 63
6.2. Doğrusal Olmayan Tepki Analizlerinden Elde Edilen Bulgular 65
6.2.1. Sahaya özel zemin yüzeyinde oluşan ivme değerleri 66
6.2.2. Sahaya özel zeminin tepki spektrumu 76
6.2.3. Sahaya özel zeminin büyütme değerleri (amplifikasyon faktörü) 78
7. SONUÇ VE ÖNERİLER 79

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KAYNAKLAR DİZİNİ 84

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil Sayfa

3.1. Çalışma bölgesinin konum gösterimi ... 13
3.2. Eskişehir ve çevresinin tektonik haritası [Altunel ve Barka, 1998] ... 15
3.3. İnönü ve yakın çevresinin jeolojisi (DSİ, 1975, Gözler vd., 1996 ve Tokay ve Altunel, 2005'ten değiştirilerek alınmıştır) ... 16
3.4. Ülkemizin tektonik yapısına göre kaynak zonları (Türköz, M., Tosun, H., Savaş, H., Orhan, A. Ve Seyrek E., 2013) ... 18
3.5. Türkiye deprem bölgeleri haritası (AFAD, 2018) ... 18
4.1. Çalışmada kullanılan Coyote yer hareketi verilerinin örnek parametreleri ... 20
4.2. Parkfield 2004 (M=6) deprem kaydına ait ivme değerleri ... 22
4.3. Darfield New Zelland (2010) depremi (M=7) yer ivmesi kayıtları ... 22
4.4. Tek serbestlik dereceli sistemlerde tepki spektrumu tanımı (Kramer, 1996) ... 24
4.5. Zeminlerde tanjant ve sekant kayma modül davranışı (Kramer, 2003) ... 27
4.6. Maksimum kayma modülü (G_{max}) ve sönümleme oranı (D) ... 28
4.7. Vucetic–Dobry (1991) kil zemin kayma modülü azalma eğrisi ... 30
4.8. Killi zeminlerde Vucetic–Dobry (1991) eğrilerinin Deepsoil 7.1 yazılımında kullanımına ilişkin bir örnek ... 31
4.9. Faydaki hareketlerin sonucunda sismik dalgaların zemin içerisindeki yayılımı (Kramer, 1996). ... 33
5.1. Analiz türü seçme, Deepsoil ... 40
5.2. Eşdeğer doğrusal analiz için bir örnek sondaj verisi (DeepSoil) ... 40
5.3. Zemin parametrelerinin girdisi ve referans eğrisi seçimi ... 41
5.4. Deepsoil'e viskoz sönümleme matrisinin girilmesi ... 44
5.5. Deepsoil programına analiz kontrol parametrelerinin girilmesi ... 44
5.6. EL ve NL analizlerinde kullanılan PGA=0.3g olarak ölçekli deprem kayıtları ... 47
5.7. Zemin davranış analiz çalışmaları kapsamında çalışma alanının hücrelere ayrılması ... 48
6.1. Kocaeli 1999 Yarımca deprem verisine göre eşdeğer doğrusal analiz sonucu elde edilen ivme-zaman grafikleri ... 51

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil Sayfa

6.2. Denali (2002) depremi için eşdeğer doğrusal analizi sonrası ivme-zaman grafikleri 52
6.3. Coyote Lake (1979) depremi için EL tepki analizinden elde edilen ivme-zaman grafikleri 53
6.4. Darfield Yeni Zelanda (2010) depremi için eşdeğer doğrusal tepki analizi sonucu elde edilen ivme-zaman grafikleri 54
6.5. Imperial Valley I (1979) depremi için EL tepki çözümlemesi sonucu ivme zaman grafikleri 55
6.6. Imperial Valley II (1940) deprem kaydı için eşdeğer doğrusal analiz ivme zaman grafikleri 56
6.7. Düzce deprem kaydı için eşdeğer doğrusal yöntem sonucu ivme–zaman grafikleri 57
6.8. Erzincan depremine ait verilerin EL analizi sonucu ivme–zaman grafik çıktıları 58
6.9. Loma Prieta I (Gilroy İstasyonu) deprem verisinin EL analizi ile elde edilen ivme–zaman grafikleri 59
6.10. Loma Prieta II (Gilroy) depremi için eşdeğer doğrusal tepki çözümlemesi sonrası ivme–zaman grafikleri 60
6.11. Parkfield deprem kaydının EL yöntemiyle işlenmesi sonucu ivme–zaman grafikleri 61
6.12. Eşdeğer doğrusal analiz çalışmalarında 11 farklı deprem verisi kullanılarak elde edilmiş spektral ivme-periyot grafikleri 63
6.13. NL analizlerinde 11 farklı deprem kaydından türetilen büyütme (amplifikasyon) grafikleri 65
6.14. Kocaeli (1999–Yarımca) depremi için non-lineer analiz sonrası ivme-zaman grafikleri 66
6.15. Erzincan 1992 deprem verisine göre doğrusal olmayan analiz yöntemi sonucu elde edilen ivme-zaman grafikleri 67
6.16. Düzce 1999 deprem kaydına göre doğrusal olmayan analiz yöntemi sonucunda elde edilen ivme-zaman grafikleri 68
6.17. Coyote Lake (1979) depremi için non-lineer tepki analizinden elde edilen ivme zaman grafikleri 69

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil Sayfa

6.18. Imperial Valley I (1979) deprem verisinin doğrusal olmayan tepki analiz sonrası ivme–zaman grafikleri 70
6.19. Imperial Valley II (1940) depremi için NL analiz sonucu elde edilen ivme zaman grafikleri 71
6.20. Loma Prieta I (1989) deprem kayıtlarının non-lineer tepki analizi sonrası ivme–zaman grafikleri 72
6.21. Loma Prieta II (1989) deprem kaydı için NL tepki modeli sonucu ivme zaman grafikleri 73
6.22. Parkfield (1966) depremi için doğrusal olmayan tepki incelemesi sonrası ivme zaman grafikleri 74
6.23. Denali Alaska (2002) depremi için NL zemin tepki analizi sonucu ivme–zaman grafikleri 75
6.24. Darfield New Zelland (2010) deprem kayıtlarının non-lineer analiz sonrası ivme–zaman grafikleri 76
6.25. İnönü bölgesine ait NL analizlerde kullanılan 11 deprem kaydından üretilen spektral ivme–periyot grafikleri 77
6.26. İnönü bölgesi non-lineer çözümlemelerinde hesaplanan amplifikasyon (büyütme) grafikleri 78

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge Sayfa

4.1. Büyütme katsayısına dayalı sismik tehlike sınıflandırılması (ISSMFE 1993, ISSMGE/TC4 1999, Özçep 2007). 37

5.1. Tez çalışmasında kullanılan yer hareketi verileri (PEER, 2006). 46

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklamalar
D	Sönümleme oranı
G	Kayma modülü
G/G_{max}	Dinamik makaslama modülü oranı
G_{max}	Maksimum kayma modülü
G_{sec}	Sekant kayma modülü
G_{tan}	Tanjant kayma modülü
g	Yerçekimi ivmesi
H	Tabaka kalınlığı
M_S	Yüzey dalgası büyüklüğü
M_w	Moment büyüklüğü
S_a	Spektral yer ivmesi
S_d	Spektral deplasman
S_v	Spektral hız
T	Periyot

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklamalar
T_0	Zemin hakim periyodu
V_P	Boyuna dalga hızı
V_S	Makaslama (kayma) dalgası hızı
$V_{S(30)}$	Üst 30 metre için ortalama makaslama dalgası hızı
W_D	Histeresis ilmeğinin alanı (tüketilen enerji)
W_S	Depolanan maksimum esneklik potansiyel enerjisi
γ	Birim kayma şekil değiştirmesi
λ	Sönüm oranı
ν	Poisson oranı
ξ	Sönümleme oranı (Deepsoil parametresi)
ρ	Zemin yoğunluğu

Kısaltmalar	Açıklamalar
1-B	Tek boyutlu analiz

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar	Açıklama
ACC	İvme-zaman serisi (acceleration time history)
AFAD	Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
CBS	Coğrafi bilgi sistemleri
DBYBHY	Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
DD2	Tasarım depremine karşılık gelen orta şiddetteki yer hareketi düzeyi
DSİ	Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü
EFZ	Eskişehir Fay Zonu
ELA / EL	Eşdeğer doğrusal analiz
FGS	Fourier genlik spektrumu
HVSR	Yatay/düşey spektral oran yöntemi
KAF	Kuzey Anadolu Fay Zonu
MASW	Çok kanallı yüzey dalgası analizi
N	Standart penetrasyon testi darbe sayısı
NLA / NL	Doğrusal olmayan analiz

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar	Açıklama
PEER	Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi
PGA	Tepe (pik) yer ivmesi
PI	Plastisite indisi
PSA	Pik spektral ivme
SH Dalgaları	Yatay polarize kayma dalgaları
SK	Sondaj kuyusu
SPT	Standart penetrasyon testi
SSR	Standart spektral oran yöntemi
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
TSD	Tek serbestlik dereceli sistem
WGS 84	Dünya jeodezik sistemi 1984
ZB / ZC / ZD / ZF	TBDY 2018 yerel zemin sınıfları

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Türkiye, jeolojik konumu nedeniyle dünyanın en etkin deprem kuşaklarının tam üzerinde yer almakta olup bu durum, ülkenin özellikle son yirmi yıl içinde meydana gelen büyük depremler karşısında oldukça kırılgan olmasına neden olmuştur. Bu süreçte 17 Ağustos 1999 Kocaeli, 12 Kasım 1999 Düzce, 23 Ekim 2011 Van, 24 Ocak 2020 Elâzığ ve en son 6 Şubat 2023 tarihinde yaşanan Kahramanmaraş merkezli depremler, geniş alanlarda ağır hasarlarla birlikte ciddi can kayıplarına yol açmıştır. Bu afetler arasında öne çıkan 1999 Kocaeli depremi (Mw 7.4), Marmara Bölgesi'nin büyük bir kesiminde etkisini göstermiş hem ekonomik yapıyı hem de toplumsal yaşamı derinden sarsmıştır. Bu büyük depremin etkilerinin hissedildiği yerleşimlerden biri de bu çalışmada incelenen bölgenin bağlı bulunduğu Eskişehir ili olmuştur.

Deprem mühendisliği, deprem anında ve sonrasında ortaya çıkabilecek etkileri öngörmeyi amaçlar. Bu alandaki çalışmalarda, dinamik yükler altında zemin davranışının doğru bir şekilde belirlenmesi ve özellikle zemin-yapı etkileşiminin üst yapı tasarımına etkileri büyük bir önem taşımaktadır. Zemin özelliklerinin bulunduğu konuma göre farklılık göstermesi, deprem sırasında ortaya çıkan tekrarlı yükleme karakteristiklerini değiştirebilme potansiyeline sahiptir. Yerel zemin özelliklerine ek olarak yapılara deprem sırasında ulaşan yer ivmesi genlikleri, frekans içerikleri ve bunlara bağlı olarak gelişen tepki kuvvetleri de yapısal davranışı ciddi ölçüde etkileyen temel faktörlerdir. Bu bağlamda, herhangi bir deprem senaryosunda temel zemini oluşturan tabakaların deprem sırasındaki ve sonrasındaki davranışını tespit etmek, ilgili mühendislik analizleri için kritik bir gerekliliktir. Deprem etkileri altında zemin davranışını temsil etmek amacıyla, yarı sonsuz tabakalı ve viskoelastik özellik gösteren bir ortamda dalga yayılımı prensibine dayalı olarak geliştirilen paket yazılımlardan yararlanılmaktadır (Idriss, I.M. and Sun,J.I., 1992). Bu programlarla yapılan dinamik analiz sonucunda istenilen noktalarda spektral ivme, spektral hız ve büyütmeler hesaplanabilmektedir. Zemine ait büyütme değerleri ayrıca ampirik yöntemler kullanılarak da hesaplanabilmektedir (Borcherdt, R.D., 1994, Midorikawa, S., 1987). Zemin tabakalarının deprem sırasında sergilediği davranışın sayısal analizler aracılığıyla

değerlendirilmesinde, zeminlerin geoteknik, jeolojik ve jeofizik özelliklerinin doğru bir biçimde tanımlanması kritik bir aşamadır. Bu süreçte hem arazi çalışmaları hem de laboratuvar deneyleri sonucunda elde edilen verilerin güvenilirliği büyük önem taşımaktadır.

Türkiye'de yürürlükte olan Bina Deprem Yönetmelikleri incelendiğinde, depreme dayanıklı yapı tasarlayabilmek için sahaya özel zemin özelliklerinin tasarım sürecinde mutlaka değerlendirilmesi zorunluluğu ilk defa 1975 Yönetmeliği ile getirilmiştir. Ancak, bu konuya dair kapsamlı düzenlemeler veya önemli değişiklikler, 1998 ve 2007 yönetmeliklerinde sınırlı kalmıştır. Geoteknik deprem mühendisliği alanındaki bilgi birikiminin ve yapılan araştırmaların artması neticesinde, zemin etkileşimini konu alan hükümler, günümüzde yürürlükte olan Bina Deprem Yönetmeliği'ne daha ayrıntılı ve güncel bir biçimde dâhil edilmiştir.

Türkiye'de güncel olarak 2019 yılından bu yana yürürlükte olan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018), daha önceki yönetmeliklere kıyasla önemli bir yenilik getirmiştir. Özellikle çalışma alanına ait zemin sınıflarının doğru biçimde tanımlanması gerekliliği konusu vurgulanmış; deprem yer hareketi spektrumlarının, yapının konumu, fay hattına olan mesafesi ve zemin karakteristikleri gibi faktörlere bağlı olarak hesaplanması zorunlu hale getirilmiştir. Yönetmeliğin 16.5.1.3. bölümünde tanımlanan ZF zemin sınıfı için, yüzeydeki deprem yer hareketinin doğru bir şekilde belirlenebilmesi amacıyla sahaya özel zemin davranış analizlerinin yapılması koşulu getirilmiştir. TBDY (2018) bu tür özel analizlerin, gerekli görülmesi durumunda diğer zemin sınıfları için de gerçekleştirilmesini önermektedir. Bu yaklaşım, deprem mühendisliği alanında zemin özelliklerinin önemine verilen değeri artırmıştır.

Deprem hasarlarının yumuşak zeminlerin üzerinde ana kaya üzerindekine oranla genellikle daha büyük olduğu uzun zamandır araştırma ve çalışmalar doğrultusunda bilinmektedir. Eskişehir İnönü ilçesini de kapsayan birçok yerleşim alanında binaların veya diğer yapıların sismik tasarımında yerel zemin özelliklerinin etkisi öncelikle dikkate

alınmaktadır. Eskişehir İnönü ilçesi Eskişehir Fay Zonu etkisinde deprem riski altındadır. Tez çalışması kapsamındaki çalışma alanı jeolojik tarih içinde çok yoğun tektonik aktivitelere maruz kalmış olup, büyük atım kapasitesine sahip fay sistemleri mevcuttur. Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAF), Kütahya ve Eskişehir Fay Zonları ve İnönü-Dodurga Fayı bölgedeki en önemli deprem kaynaklarıdır.

Bu tez çalışması, uygulamaya yönelik olması açısından Eskişehir ili batısında yer alan İnönü ilçesi yerleşim alanını kapsayan bölgenin dinamik zemin özelliklerinin farklı deprem koşulları altında davranışının incelenmesini amaçlanmaktadır. Çalışmanın temel çıktısı, bölgedeki deprem etkisi altında yeni yapı tasarımı yapılacak veya mevcut yapıların deprem performansını değerlendirerek güçlendirme projelerini yürütecek araştırmacılar ve mühendisler için kullanıma hazır, güvenilir bir veri seti oluşturmaktır. Bununla beraber çalışmanın özel amacı, İnönü ilçesinin alüvyon zemin tabakasının davranışını eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan değerlendirme yöntemleriyle tespit ederek çıkan bu iki farklı sonucun karşılaştırmalı bir değerlendirmesini sunmaktır. Çalışma sahası, yaklaşık 2400 m^2'lik bir alanı kapsamaktadır. Analizler için, sahada 30.5 metre derinlikte gerçekleştirilen 11 adet sondajdan belirlenen temel zemine ait fiziksel ve mekanik özellikler ile aynı lokasyonlarda gerçekleştirilen sismik arazi deneylerinden (MASW) elde edilen veriler birlikte değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonucunda elde edilen veriler, DeepSoil programına işlenerek analizler yapılmış ve sondaj noktalarındaki büyütme değerleri hesaplanmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Eskişehir zemininin jeolojik, hidrojeolojik, tektonik ve geoteknik açıdan incelenmesine yönelik araştırmalar, geçmişi 1970'li yıllara kadar uzanmaktadır. Bu alanda yapılan erken dönem çalışmalarından biri, Esen vd. (1976) tarafından yapılmış olup, Eskişehir ve İnönü ovalarındaki içme/kullanma suyu teminini hedefleyen hidrojeolojik etüt haritalarını içermektedir. Bununla beraber ilgili bahsi geçen şehir için genel jeoloji araştırmaları ise Gözler vd. (1984, 1985) tarafından gerçekleştirilmiştir.

Nakamura (1989), zemin büyütme konusunda büyütmenin kapasitesine etkiyen başlıca temel faktörleri anakayanın (mühendislik ana kayası) konumu ile zemin-anakaya arasındaki sismik empedans (sismik dalgaların yayılmasına karşı gösterilen direncin bir ölçüsü) farkının rolünü öne sürmüştür. Zemin tabakalarının sismik dalgaları belirli frekans aralıklarında büyütme eğilimi göstermesinden dolayı bu frekanslar mühendislik açısından yapılar için potansiyel tehlike oluşturabilir. Bu nedenle çalışmasında olası hasarları en aza indirgemek için zemin tabakasının ve üzerine inşa edilecek yapının hakim titreşim periyotlarının olabildiğince birbirlerinden uzak tutulması sağlanması gerektiğini öne sürmüştür.

Bölgenin sismotektonik yapısına ilişkin dikkate değer araştırmalardan biri Altunel ve Barka (1998) tarafından gerçekleştirilmiş olup, bu çalışmada Eskişehir Fay Zonu'nun (EFZ) farklı segmentleri detaylı biçimde ele alınmıştır. Araştırma bulguları, EFZ'yi oluşturan fay parçalarının günümüzde de aktif tektonik davranış sergilediğini ve son 10.000 yıllık süreçte moment büyüklüğü 6'nın üzerinde birden fazla deprem üretebilecek kapasitede olduklarını göstermiştir.

Trifunac ve Todorovska (2000), yürüttükleri araştırmada, kısa periyotlardaki sismik büyütme oranlarına dikkat çekmişlerdir. Çalışmanın çıktılarına göre, kuvvetli yer hareketi altındaki doğrusal olmayan zemin davranışında 0.2 saniyeden daha küçük periyotlar söz konusu olduğunda, kaya zeminlerdeki büyütme miktarının alüvyon zeminlerden oluşan bölgelere kıyasla yaklaşık olarak 1.5 kat daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Okan (2005), Yenişehir (Bursa) ilçesi sınırları içerisinde bulunan alüvyal zeminlerin sismik büyütme karakteristiğini araştırmıştır. Bu kapsamda araştırmaya öncelikle sahada sondaj ve jeofizik çalışmalar yürüterek başlamış ve elde edilen geoteknik verilerle ilçenin yerel zemin koşullarını yansıtan bir veri tabanı oluşturulmuştur. Çalışmada, zemin büyütme potansiyelini ampirik (görgül) ilişkiler, tek boyutlu sayısal analiz ve mikrotremör ölçüm yöntemi olmak üzere üç farklı analiz metodu kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu üç yöntemin yanında yaygın kullanılan bir yaklaşım olarak, Standart Penetrasyon Testi (SPT) darbe sayısı (N) değerlerinden makaslama dalgası hızı (V_S) tahminleri yapılmıştır. Tahmin edilen bu V_S değerleri ile çalışmada doğrudan ölçülen V_S değerleri kullanılarak zemin büyütme katsayıları hesaplanmış ve elde edilen tüm sonuçları detaylı bir karşılaştırmaya tabi tutmuştur.

Li vd. (2022) tarafından gerçekleştirilen bir araştırmada, yumuşak zeminlerin deprem etkisi altındaki çökme davranışı, OpenSees (The Open System for Earthquake Engineering Simulation - Deprem Mühendisliği Simülasyonu için Açık Sistem) yazılımı kullanılarak doğrusal olmayan analiz ile detaylı olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında, özellikleri birbirinden farklı deprem kayıtlarının yumuşak zemin ortamındaki davranışa nasıl yansıdığı detaylı olarak analiz edilmiştir. Sonuçlar yüksek tepe ivme (PGA) değerlerinin yüzeyde meydana gelen hasar oranını yükselttiğini göstermiştir. Bununla birlikte deprem yer hareketlerinin frekans özelliklerinin de depremden dolayı zemin hareketleri ile zeminin kalıcı olarak aşağı doğru hareket etmesi ve hacim kaybetmesi davranışları üzerinde kritik bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Özellikle, düşük frekanslı veya yüksek genlikli hareketlerin, zemin tabakasının doğal frekansına yaklaştığı durumlarda rezonans etkisi ortaya çıkararak çok daha büyük sismik çökme hasarlarına neden olduğu belirlenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen bulgular ışığında yumuşak zeminlerin dinamik yükler

altındaki davranışı daha iyi anlaşılmakta ve deprem riski olan yerlerde zemin özelliklerinin doğru bir şekilde değerlendirilmesinin aslında ne kadar önemli olduğu vurgulanmaktadır.

Fahjan (2008) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, farklı yerel zemin sınıflarını temsil eden on adet zaman alanı kaydı, Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) veri tabanından seçilerek değerlendirilmiştir. Araştırmanın temel amacı, belirli bir periyot aralığını kapsayan kayıtların, o dönem yürürlükte olan DBYBHY (2007) koşullarına uygun şekilde ölçeklendirilmesidir. Böylece farklı zemin sınıflarında ortaya çıkan sismik davranışların daha doğru şekilde incelenmesi ve yerel zemin özelliklerine uyarlanmış güvenilir dinamik analizlerin yapılabilmesi hedeflenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen verilerin, sismik tasarım ve analiz süreçlerinde yerel zemin koşullarının etkilerinin değerlendirilmesine yönelik önemli bir veri seti oluşturduğu belirtilmektedir.

Karasu (2009), İstanbul Büyükşehir Belediyesi Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü'nce belirlenen 131 farklı noktada yürütülen saha çalışmaları verilerinden faydalanmıştır. Bu veriler, derinlikleri 30 ila 40 metre arasında değişmekte olan sondaj çalışmaları ile yapılan sismik kırılma deneylerinden elde edilmiştir. Araştırmacı, bölgede farklılaşan zemin koşullarını temsil eden üç ayrı bölge için, Deepsoil yazılımını kullanarak eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan dinamik davranış analizleri gerçekleştirmiştir. Bu analizlerden elde ettiği sonuçları, farklı bir yazılım olan EERA'dan elde edilen sonuçlarla karşılaştırmalı olarak değerlendirmiştir.

Hashash vd. (2010), doğrusal olmayan analiz yöntemleri üzerine odaklandıkları çalışmalarında, zemin tepki analizlerinde belirli koşullar altında hangi parametrelerin kullanımının daha uygun olacağını araştırmışlardır. Bu çalışma, günümüzde yaygınlaşan bu analitik yöntemin, mühendislik uygulamalarında dinamik zemin özelliklerinin pratik ve etkin bir şekilde belirlenmesine yönelik önemli bir yaklaşım sunduğunu göstermiştir.

Yeşil (2012) tarafından Isparta ovasında gerçekleştirilen jeolojik araştırmalarda, zeminin spektral büyütme değerleri Nakamura tekniği (HVSR yöntemi) kullanılarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda elde edilen zemin büyütme katsayıları incelendiğinde, kaya zeminlerde büyütme değerlerinin 1'den küçük olduğu; buna karşın yumuşak zeminler ve gevşek kayaçlarda ise bu değerlerin 1 ile 3 arasında bir değişim gösterdiği gözlemlenmiştir.

Eskisar (2014), İzmir Körfezi civarında gerçekleştirilen çalışmasında, deterministik ve olasılıksal yaklaşımları birlikte kullanarak kapsamlı bir sismik tehlike analizi ortaya koymuştur. Analizlerin sonuçları, bölge için senaryo deprem büyüklüğünün Mw≈6.5 mertebesinde olabileceğini göstermektedir. Ayrıca araştırmada, bölgeye özgü zemin büyütme değerleri, sıvılaşma değerlendirmeleri, spektral ivme dağılımları ve maksimum yer ivmesi haritaları üretilmiştir.

Mirshekari ve Ghayoomi (2015), yaklaşık 10 metre derinliğe sahip ve farklı sabit emme profillerine sahip kum ve silt tabakalarının sismik tepkisini değerlendiren bir çalışma yapmışlardır. Araştırmanın temel amacı, kısmen doymuş zeminlerin doğrusal olmayan davranış analizlerinde karşılaşılan zorlukları belirlemektir. Çalışmada, Northridge depremi yer hareketi ölçeklendirilerek hem doğrusal hem de doğrusal olmayan yöntemlerle analizler gerçekleştirmişlerdir.

Akın vd. (2016), Tokat'ın Erbaa ilçesindeki zeminin dinamik özelliklerini belirlemek amacıyla tek boyutlu eşdeğer doğrusal analiz yöntemini kullanmışlardır. Bu kapsamda, çalışma alanını 500×500 metrelik ızgaralara (gridlere) ayırarak, her bir ızgara alanı için ayrı ayrı saha tepki analizleri gerçekleştirmişlerdir. Analizler için ProSHAKE yazılımından faydalanılmıştır.

Nar (2016), 1999 Kocaeli depremi sonrasında Gölcük bölgesinde depremden sonra meydana gelen zemin ve üst yapı hasarlarını incelemiştir. Bu hasarların nedenlerini anlamak

amacıyla, Deepsoil programından da yararlanarak bölgede yapılmış olan sondaj verileri yardımı ile oluşturulan zemin profilleri üzerinde tek boyutlu dinamik saha davranış analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerin temel hedefi, zemin büyütmelerini hesaplamak ve bölgeye özgü tepki spektrumlarını geliştirmektir. Çalışma sonucunda, zemin tabakalarının hakim periyotlarının özellikle birinci artçı şokun hakim periyoduna çok yakın olduğunu belirlemiştir.

Alcik (2018), Muğla'nın Bodrum ilçesi için kapsamlı bir sismik çalışma yürütmüştür. Çalışmada, M_w=6.6 büyüklüğündeki deprem kaydı da dahil olmak üzere toplam 51 farklı deprem kaydını kullanmıştır. Bu kayıtlar temel alınarak, bölgenin zemin hakim periyodu ve zemin büyütme değerleri Yatay/Düşey Spektral Oran (HVSR) ve Standart Spektral Oran (SSR) yöntemleri ile hesaplamıştır. Analiz sonuçlarına göre, yumuşak zeminlerin bulunduğu alanlarda zemin hakim periyotlarının 2.1 ile 2.7 Hz frekans aralığında olduğu, zemin büyütme katsayılarının ise 1.0 ile 6.6 arasında değişkenlik gösterdiğini tespit etmiştir.

Civelekler vd. (2018), Eskişehir il merkezindeki yerel zemin koşullarının dinamik davranış üzerindeki etkilerini inceleyen bir çalışma yapmıştır. Bu amaçla, 40 farklı sondaj verisi kullanılarak bölgenin zemin özelliklerini belirlemiştir. Yapılan bu çalışmada belirlenen bölgelerde 1999 Kocaeli depremi verileri girdi olarak kullanılmış ve Deepsoil programı aracılığıyla tek boyutlu eşdeğer doğrusal analizler gerçekleştirmiştir. Çalışmasında her bir nokta için hesaplanan zemin büyütme katsayıları, daha sonrasında yapı yapılacak yerler bazında güvenli yerleşim alanlarının belirlenmesine katkı sağlamak amacıyla Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) kullanılarak haritalanmıştır.

Mert (2018), Eskişehir ili Çifteler ilçesi çalışma alanında yer alan 18 adet sondaj verisini temel almıştır. Çalışmasında dinamik davranış analizlerini gerçekleştirmek üzere hem eşdeğer doğrusal hem de doğrusal olmayan tek boyutlu yöntemleri uygulamıştır. Analizlerin bir sonucu olarak, yüzeyde oluşması beklenen ivme değerlerinden hareketle, sıvılaşma potansiyeli indeks değerlerini her iki yöntemi kullanarak hesaplamış ve değerlendirmiştir.

Arslan (2019), Bursa'nın Osmangazi ilçesindeki belirli mahalleler için bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışma kapsamında, mevcut sondaj verileri ve sismik ölçümler kullanılarak hazırlanan zemin modelleri üzerinde Deepsoil programı aracılığıyla eşdeğer doğrusal analizler yapmıştır. Çalışmasında gerçekleştirdiği analizlerin sonuçlarına göre, potansiyel bir depremde ana kaya üzerinde oluşan ivme değerlerinin yüzeye ulaşana kadar bazı noktalarda azaldığı (sönümlendiği) gözlemlenirken, bazı alanlarda ise 2 ila 3 katına kadar büyütüldüğü sonucuna varılmıştır.

Akdoğan (2019), yerel koşulların zemin davranışını ne ölçüde etkilediğini belirlemek amacıyla, İzmir Körfezi kıyısında bulunan derin alüvyonlu zeminler üzerinde çalışmalar yapmıştır. Bu kapsamda çalışmasında Akdoğan Deepsoil platformunda tek boyutlu, doğrusal olmayan zemin tepkisi modellemeleri uygulamıştır. Çalışmanın bir parçası olarak, ana kaya derinliğini değiştirerek bu parametrenin analiz sonuçları üzerindeki etkisini araştırmıştır. Akdoğan, bulgularına göre zeminin karakteri yer hareketinin frekans spektrumunu etkilediğini ve özellikle yumuşak zeminlerde düşük frekans aralıklarında büyütmenin meydana geldiğini tespit etmiştir.

Afacan ve Güler (2019), Afyonkarahisar ilindeki zemin davranışını değerlendirmek amacıyla beş farklı sondajdan elde edilen verilerden zemin profilleri oluşturmuşlardır. Bu profiller üzerinde, çeşitli deprem kayıtları DeepSoil yazılımında kullanılarak doğrusal olmayan analizler yapılmış ve bölgeye ait zemin büyütme değerleri hesaplanmıştır. Çalışmanın önemli noktalarından biri, elde edilen analiz sonuçlarının, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nin (TBDY) ilgili bölge için tanımladığı tepki spektrumlarıyla karşılaştırılmasıdır. Araştırmacılar, yönetmelikte sunulan spektral davranışın yanı sıra, zemin özellikleri ayrıntılı biçimde bilinen bu sahada doğrusal olmayan yöntemlerle daha gerçekçi zemin tepkisinin belirlenmesini amaçlamış ve böylece daha güvenli yapı tasarımlarına katkı sağlamayı hedeflemişlerdir.

Asimaki vd. (2020), yatay tabakalı Mexico City havzası için kapsamlı bir saha tepki analizi gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, bir ve iki boyutlu analizler hem frekans hem de

zaman tanım alanında yapılarak, deprem anında ortaya çıkan havza etkilerinin ve zemin büyütmelerinin frekans içerikleri incelenmiştir. Araştırmacılar, bölgede meydana gelen M_w=7.1 büyüklüğündeki 2017 Puebla-Mexico City depremine ait verileri altı farklı istasyondan toplamışlardır. Bu verilerle yapılan analizler sonucunda elde edilen büyütme ve frekans aralığı değerleri, sahadaki gözlemlerle karşılaştırılarak sonuçları değerlendirmiştir.

Ceren ve Karakan (2020), Kahramanmaraş ili Üngüt Mahallesi'nin dinamik zemin davranışını değerlendirmek amacıyla bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Araştırmada, bölgeden elde edilen iki adet sondaj kaydı kullanılarak DeepSoil yazılımında üç farklı analiz türü uygulanmıştır. Bu analizler; frekans alanında doğrusal, eşdeğer doğrusal ve zaman alanında doğrusal olmayan yaklaşımlar şeklinde gerçekleştirilmiştir. Analizlerde giriş verisi olarak 1999 Kocaeli depremine ait ivme kayıtları kullanılmıştır. Çalışmanın amacı, elde edilen sonuçları karşılaştırarak hem mevcut yapılar hem de gelecekte planlanan yapılar için zeminin dinamik özelliklerini ortaya koymaktır. Sonuçlar, ivme–zaman eğrilerinin frekans alanında yapılan doğrusal analizlerde daha yüksek değerlere ulaştığını; buna karşın, zaman alanında gerçekleştirilen doğrusal olmayan yöntemin daha düşük ivme değerleri ürettiğini göstermiştir.

Civelekler (2020), doktora çalışması kapsamında Eskişehir şehir merkezini kapsayan bir bölgede, olası bir depremin zemin tabakaları üzerindeki etkilerini ortaya koymayı amaçlamıştır. Bu doğrultuda DeepSoil 6.1 yazılımı kullanılarak, farklı özelliklere sahip 11 deprem kaydı aracılığıyla hem eşdeğer doğrusal hem de doğrusal olmayan zemin tepki analizleri yürütülmüştür. Çalışmada toplam 42 adet sondaj profiline ait veriler değerlendirilmiş ve gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen ivme–zaman eğrileri incelenmiştir. Yapılan incelemeler, bazı noktaların yüzey ivmelerinin sismik anakaya değerlerine göre belirgin şekilde arttığını, bazı sondaj lokasyonlarında ise anakayaya daha yakın bir davranış sergilendiğini göstermiştir. Analiz çıktıları değerlendirildiğinde, yüzeyde hesaplanan maksimum pik yer ivmesi (PGA) değerlerinin 0.31 g ile 0.62 g arasında değiştiği görülmüştür. Ayrıca aynı bölgedeki farklı zemin koşullarında eşdeğer doğrusal yöntemin ürettiği ivmelerin, doğrusal olmayan analiz sonuçlarına kıyasla daha yüksek değerler verdiği belirlenmiştir.

Gücek (2020), Afyonkarahisar'ın Uydükent bölgesinde yerel zemin koşullarının zemin büyütmesi üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Çalışmada, 124 adet sondaj kaydından elde edilen zemin özellikleri kullanılarak DeepSoil yazılımı aracılığıyla tek boyutlu eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiş ve bu analizlerden zemin büyütme değerleri üretilmiştir. Araştırmacı, sondaj verilerinden yararlanarak ampirik yöntemlerle hesapladığı büyütme oranlarını da sayısal analiz sonuçlarıyla karşılaştırmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda, özellikle sert olmayan veya daha yumuşak karakterdeki zeminlerde doğrusal olmayan analiz yönteminin tercih edilmesinin daha doğru sonuçlar verdiği sonucuna ulaşmıştır. Ayrıca, ampirik yaklaşımların bu tür zeminlerde yeterli güvenilirlik sağlamadığını, bu nedenle mevcut yöntemlerin geliştirilmesinin faydalı olacağını belirtmiştir.

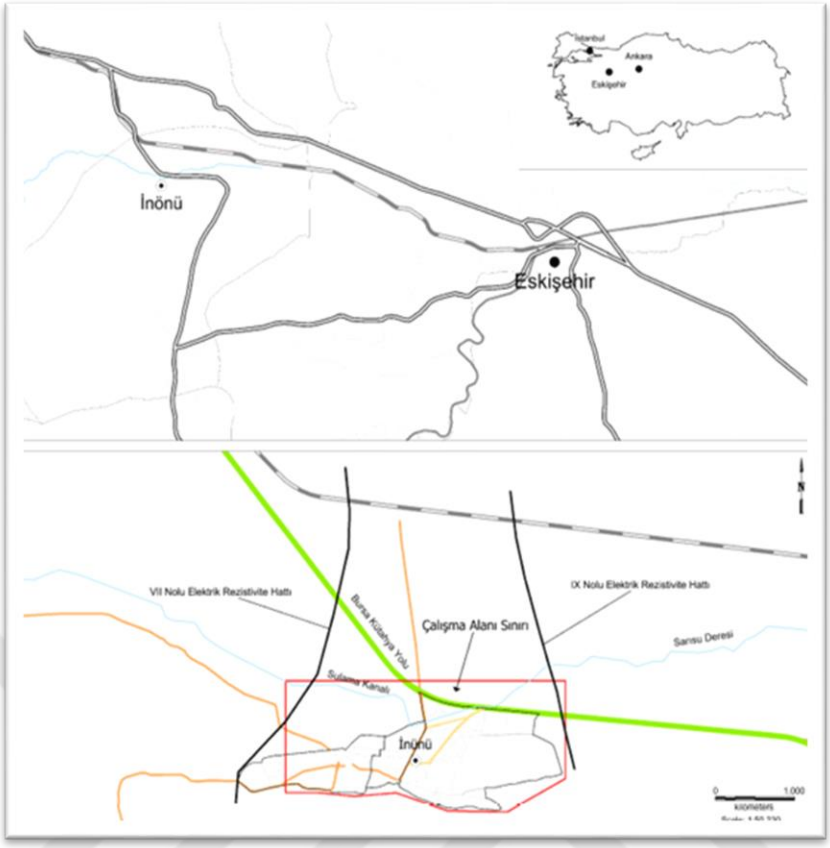
Ildır vd. (2020), Adapazarı Bölgesi Tığcılar Mahallesi'nin sismik tepkisini incelemiştir. Geçmiş yıllarda elde edilen derin sondaj verileri kullanılarak hazırlanan zemin profili üzerinde, FLAC 2D bilgisayar programı ile iki boyutlu zemin tepki analizi gerçekleştirmiştir. Analizlerde girdi verisi olarak 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi kaydı kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, aynı doğrultuda zemine daha yakın konumlanan noktalarda daha yüksek ivmelerin oluştuğunu tespit etmiştir. Genel bulgulara göre, zemin profillerinin tabanına uygulanan kuvvetli zemin hareketlerinin ivmesinin, zemin yüzeyine doğru ilerledikçe büyüdüğünü gözlemlemiştir.

3. ÇALIŞMA BÖLGESİ GENEL ÖZELLİKLER

3.1. Çalışma Bölgesinin Konumsal ve Yüzeysel Özellikleri

Çalışma bölgesi İnönü, bağlı olduğu Eskişehir il merkezinin 35 km kuzeybatısında bulunmaktadır ve lokasyon haritası Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Kuzeybatısında bulunan Bilecik il merkezine 55 km mesafededir. İnönü ilçesi coğrafik olarak Ege, Marmara ve İç Anadolu Bölgelerinin temas ettiği alanda yer almakta olup yüzölçümü 358 km^2, deniz seviyesinden yüksekliği ise ortalama 840 metredir. İnceleme alanı ulaşım yönünden Eskişehir-Bursa karayolu ile Ankara-İzmir demiryolu yakınından geçmektedir. İlçenin temel yüzey şekillerinden biri olan İnönü Ovası, tektonik hareketler sonucu oluşmuş verimli bir alandır. İlçe ekonomisinin temelini oluşturan tarım ve hayvancılık bu ova çevresinde yoğunlaşır. İlçenin adı da coğrafi yapısından gelir. Çevresinde bulunan mağaralar, kayalıklar ve doğal oyuklar ("inler") bölgeye adını vermiştir. İnönü'yü sulamak ve taşkınları önlemek amacıyla kurulmuş İnönü Barajı bölgenin su kaynakları açısından önem taşır. Ayrıca ilçede volkanik kökenli yarı termal su kaynakları da bulunmaktadır. Eskişehir'in genel coğrafi yapısı, dağlarla kuşatılmış ovalardan oluşur. İnönü'de de bozkır ve ormanlık alanlar (çoğunlukla meşe ve çam) bir arada görülür.

İnceleme sahası, i24a3 numaralı 1/25.000 ölçekli pafta sınırları içinde yer almakta olup, yaklaşık 39.81–39.83° kuzey enlemleri ile 30.12–30.17° (WGS 84) doğu boylamları arasında kalan yaklaşık 5 km^2 büyüklüğünde bir alanı kapsamaktadır (Şekil 3.1). Çalışma bölgesindeki belirgin yükseltiler; İnönü'nün kuzeybatısında konumlanan Topçutepe (1064 m), güneybatı yönünde Çalındoruk Tepe (1281 m), güneyinde Kuzudoruğu Tepe (1333 m) ve güneydoğusunda yer alan Yel Değirmeni Tepe (1230 m) olarak sıralanmaktadır. Bölgenin en önemli akarsuyu Sarısu Çayı olup, İnönü ilçesinin kuzey kesiminden geçiş yapmaktadır.



Şekil 3.1. Çalışma bölgesinin konumsal gösterimi

3.2. Çalışma Bölgesinin Jeolojisi ve Stratigrafisi

İç Anadolu'nun karakteristik karasal ikliminin etkisindeki İnönü Havzası'nda yaz ayları sıcak ve kurak geçerken kışlar ise soğuk ve yağışlı bir seyir izlemektedir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) verilerine göre bölgede yıllık sıcaklık ortalaması 10,8 °C, yağış miktarının toplamı 373,8 mm ve bağıl nem oranı %68 olarak saptanmıştır (MGM, 1992). Coğrafi konumu nedeniyle Karadeniz, Marmara ve Ege bölgeleri arasında bir geçiş kuşağı niteliği taşıyan çalışma alanı, bu bölgelerin iklimsel ve biyolojik özelliklerini bünyesinde barındırmaktadır (Türköz vd., 2013). Bu ekolojik çeşitliliğin sonucu olarak yöre florasının, 58 familyaya ait 531 bitki taksonundan oluştuğu belirlenmiştir (Ocak vd., 2005).

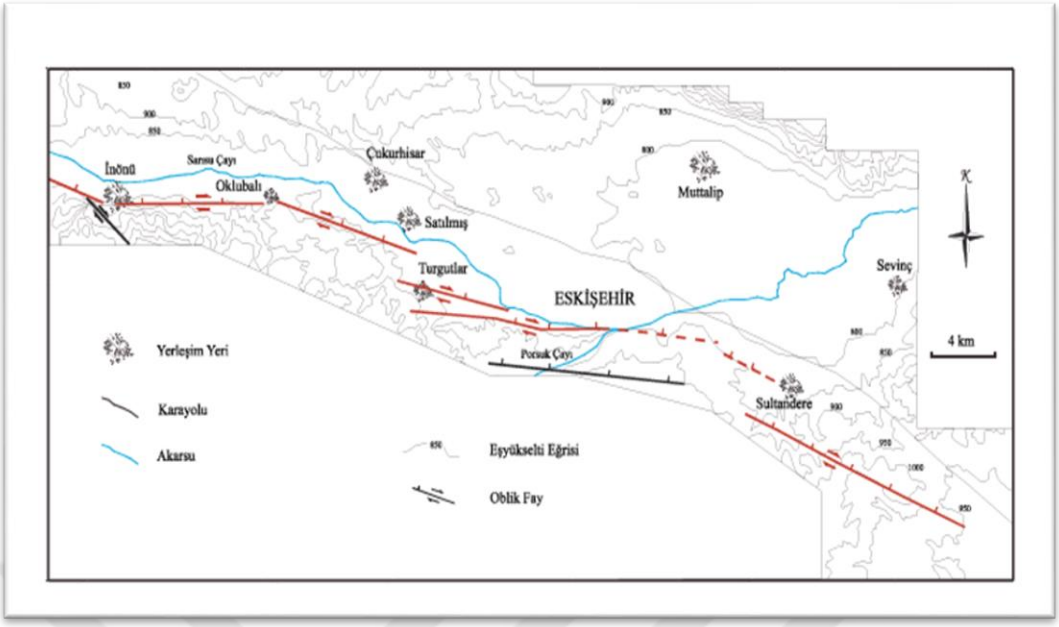
3.3. İnceleme Bölgesinin Tektonik, Hidrojeolojik ve Jeolojik Nitelikleri

Bu kısımda, çalışma sahasının jeolojik, hidrojeolojik ve tektonik özellikleri ayrı başlıklar altında incelenmiştir. Bölgenin jeolojik yapısına ilişkin bilgiler DSİ (1975) ve Gözler vd. (1996) çalışmalarından; hidrojeolojik özelliklere ait veriler DSİ (1975) raporlarından; tektonik özelliklerle ilgili değerlendirmeler ise Altunel ve Barka (1998) ile Tokay ve Altunel (2005) araştırmaları ve arazi gözlemlerinden yararlanılarak ortaya konulmuştur.

3.3.1 İnceleme bölgesinin tektonik özellikleri

Bölgenin yapısal jeolojik gelişimi, Gözler vd. (1996), Altunel ve Barka (1998) ile Tokay ve Altunel (2005) tarafından yapılan çalışmalar doğrultusunda ele alınmış; elde edilen bilgiler çalışma alanında gerçekleştirilen arazi incelemeleriyle desteklenerek özetlenmiştir.

Sivrihisar ve çevresindeki tektonik yapı, Triyas döneminde okyanusal bir kapanmanın tetiklediği bindirmeli ve ekaylı sistemlerle şekillenmeye başlamıştır. Kuzey-güney yönlü sıkışmaların etkisiyle zamanla doğu-batı uzanımlı faylar oluşmuş; Üst Kretase sonrasındaki sismik rejim ise Jura-Üst Kretase yaşlı birimlerde doğrultu atımlı fay gelişimini tetiklemiştir (Gözler vd., 1996). Neojen döneminde hakim olan kuzey-güney yönlü gerilme tektoniği ise bölgede İnönü–Eskişehir–Sivrihisar hattı boyunca uzanan normal fayların oluşumuna zemin hazırlamıştır. Literatürde Eskişehir Fay Zonu olarak tanımlanan bu sistemin, normal fay karakterinin yanında sağ yanal doğrultu atım bileşeni de barındırdığı saptanmıştır (Altunel ve Barka, 1998). Pleyistosen ve Holosen yaşlı birimlerde gözlenen kesintiler ile depolanma süreçlerindeki değişimler, bu zonu oluşturan segmentlerin güncel tektonik açıdan aktif olduğunu kanıtlamaktadır. Özellikle 1956 yılında gerçekleşen depremin bu faylar üzerinde meydana gelmesi, zonun sismik hareketliliğini destekleyen önemli bir veridir. Eskişehir ve çevresine dair tektonik unsurlar Şekil 3.2'de detaylandırılmıştır.



Şekil 3.2. Eskişehir ve çevresinin tektonik haritası [Altunel ve Barka, 1998]

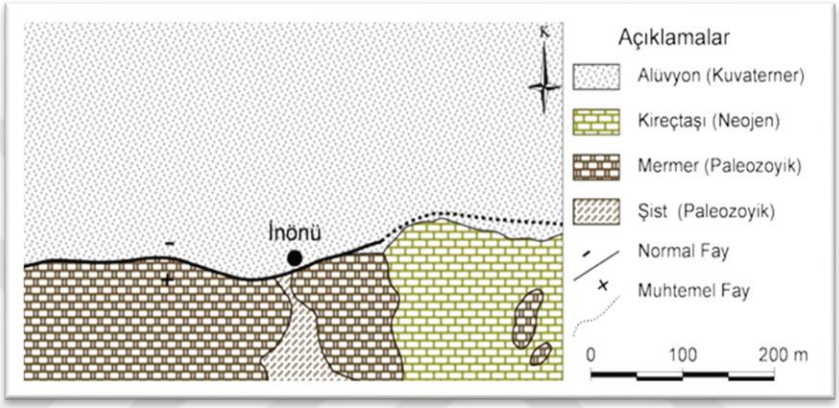
3.3.2 İnceleme bölgesinin hidrojeolojik özellikleri

Bölgede en önemli akarsu ovayı batı-doğu istikametinde kat eden Sarısu Çayı'dır. İnönü merkezi yaklaştığında sulama amaçlı olarak kanallar aracılığıyla su iletilmektedir. İnönü ovasında yeraltı suyu akımından en önemli formasyon alüvyondur. Bölgede, derinlikleri 6-10 m arasında değişen sığ kuyularda yapılan ölçüm sonuçlarına göre yeraltı suyu seviyesinin 1.33-4.85 m arasında değiştiği belirtilmektedir [DSİ, 1975].

3.3.3. İnceleme bölgesi ve çevresinin jeolojik özellikleri

Bölge Paleozoyik devri esnasında derin bir denizle kaplıdır. Bu birimlerin bölgesel metamorfizmaya uğraması sonucunda şist, gnays ve mermer türü kayaçlar oluşmuştur. Bölge muhtemelen Kaledoniyen orojenezine maruz kalarak deformasyona uğramış ve buna müteakip bölge bir dizi regresyon ve transgresyona maruz kalmıştır. Yeni çökelen bu birimler de Hersiniyen orojenezine maruz kalıp deformasyona uğramıştır. Bölge

Mesozoyikte tekrar deniz istilasına maruz kalıp sedimanter birimler çökelirken aynı zamanda bölgede volkanik faaliyet başlamıştır. Çalışma alanı ve yakın çevresinde yukarıda bahsi geçen tüm evreler boyunca çökelen kaya birimleri dönem dönem meydana gelen regresyon sonucunda aşınmasından dolayı gözlenememektedir. Çalışma alanı ve yakın çevresi içinde Palezoyik yaşlı şist ve mermerler, Neojen yaşlı kireçtaşı ve Kuvaterner yaşlı alüvyon gözlenmektedir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. İnönü ve yakın çevresinin jeolojisi (DSİ, 1975 [23]; Gözler vd., 1996 [24] ve Tokay ve Altunel, 2005 [5]'den değiştirilerek alınmıştır).

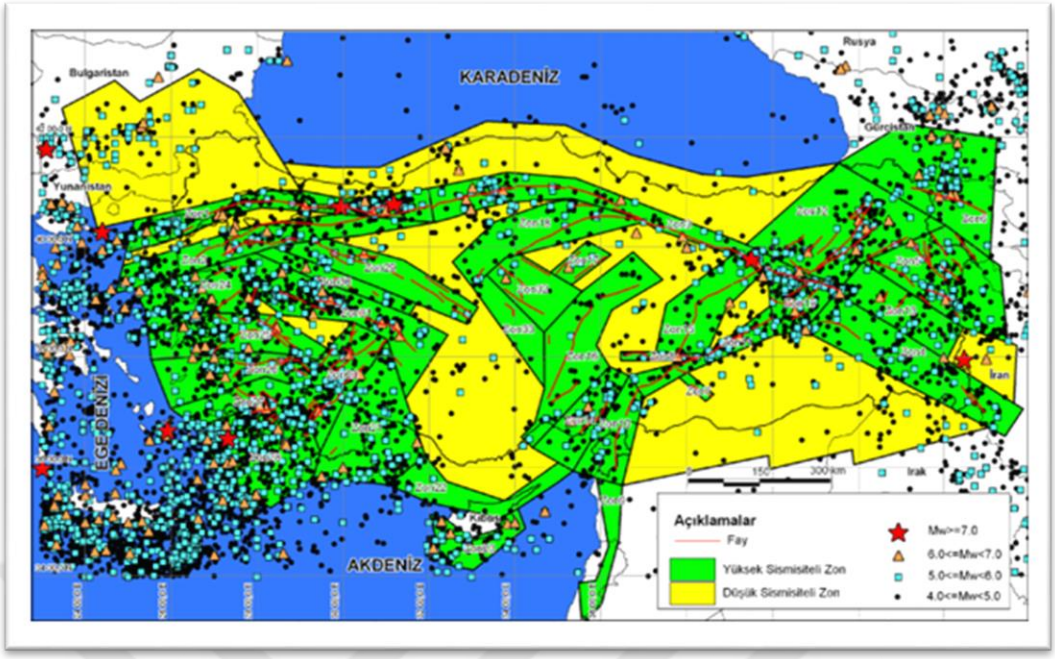
3.4. Çalışma Bölgesi Tektonik Durumu ve Depremselliği

Deprem, yer kabuğunun derinliklerinde uzun süreçler boyu biriken sismik enerjinin, fay kırılmaları veya volkanik faaliyetler neticesinde ani bir şekilde açığa çıkmasıyla oluşan dinamik bir yer hareketidir. Tarihsel süreçteki deprem kayıtları, sarsıntı şiddetinin ve meydana gelen yapısal hasarların boyutunda yerel jeolojik yapının belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir. Yerel jeolojinin sismik dalgalar üzerindeki büyütme etkisi ilk olarak Wood (1908) tarafından, 1906 San Francisco depremi sonrasında rapor edilmiştir. Bu depremde, anakaya üzerindeki yapılarda hasar minimum düzeyde kalırken, dolgu zeminler üzerindeki yapılarda yıkımın çok daha şiddetli olduğu gözlemlenmiştir.

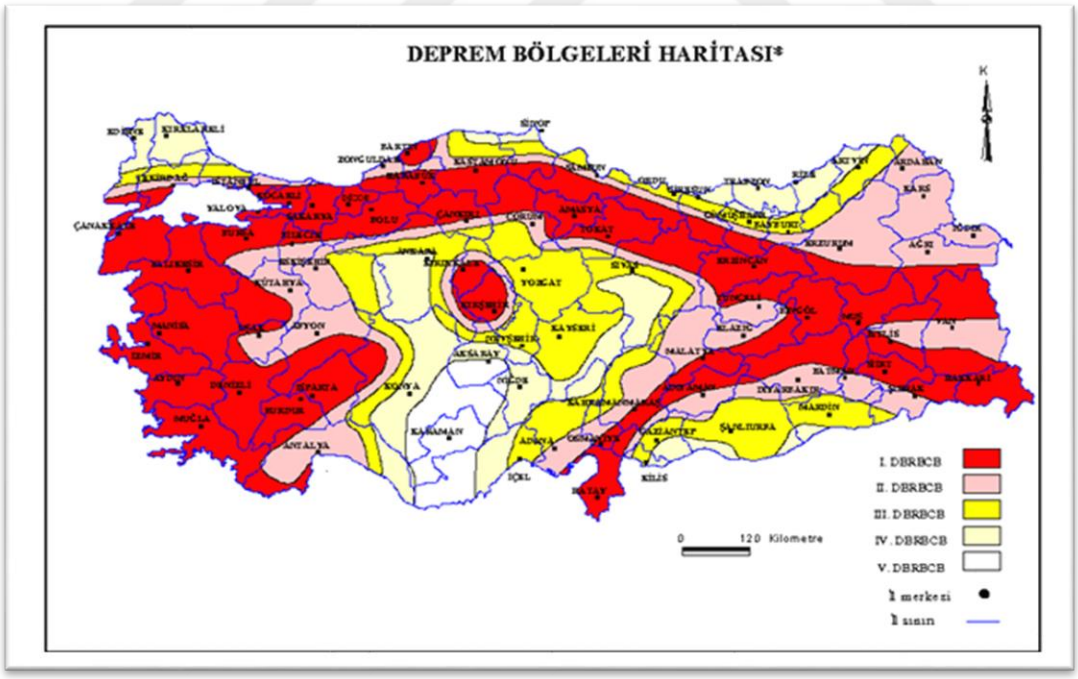
Sismik yükler altında zeminin sergilediği davranış, yapının maruz kalacağı hasarın karakterini de doğrudan belirler. Gevşek yapılı granüler zeminler, sarsıntı etkisiyle sıkışarak kalıcı yüzey deformasyonlarına yol açabilir. Bu tür zeminlerin suya doygun olması durumunda ise artan boşluk suyu basıncı, zeminin taşıma kapasitesini tamamen yitirerek bir sıvı gibi davranmasına, yani "sıvılaşma" fenomenine neden olur. Sıvılaşma neticesinde yapılarda aşırı oturmalar ve devrilmeler gözlenirken; yumuşak killi birimlerde ise dinamik gerilmeler sonucu büyük çaplı heyelanlar ve taşıma gücü kayıpları meydana gelebilmektedir.

Son yarım yüzyılda ivme kayıt cihazlarından elde edilen veriler, yerel zemin koşullarının sismik tasarım süreçlerinde en kritik parametrelerden biri olduğunu bilimsel olarak doğrulamıştır. Yer hareketlerinin tahmini; jeofizik, sismoloji ve geoteknik mühendisliği gibi çok disiplinli bir yaklaşım gerektirse de dalga yayılımındaki karmaşıklıklar nedeniyle konuya ilişkin belirsizlikler güncelliğini korumaktadır.

Bu çalışma kapsamında incelenen İnönü ilçesi, Eskişehir merkezinin 35 km batısında konumlanmakta olup, Türkiye Deprem Tehlike Haritası'na göre yüksek sismik risk taşıyan bölgeler sınıfındadır (Şekil 3.5). Mevcut verilere göre bölgenin 0.30 g büyüklüğünde bir en büyük yer ivmesi (PGA) değerine maruz kalabileceği öngörülmektedir. Ülke genelindeki kaynak zonlarının dağılımı ise Şekil 3.4 üzerinde detaylandırılmıştır.



Şekil 3.4. Ülkemizin tektonik yapısına göre kaynak zonları [Türköz, M., Tosun, H., Savaş, H., Orhan, A. ve Seyrek, E., 2013]



Şekil 3.5. Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası (AFAD, 2018)

4. TEORİK YAKLAŞIMLAR

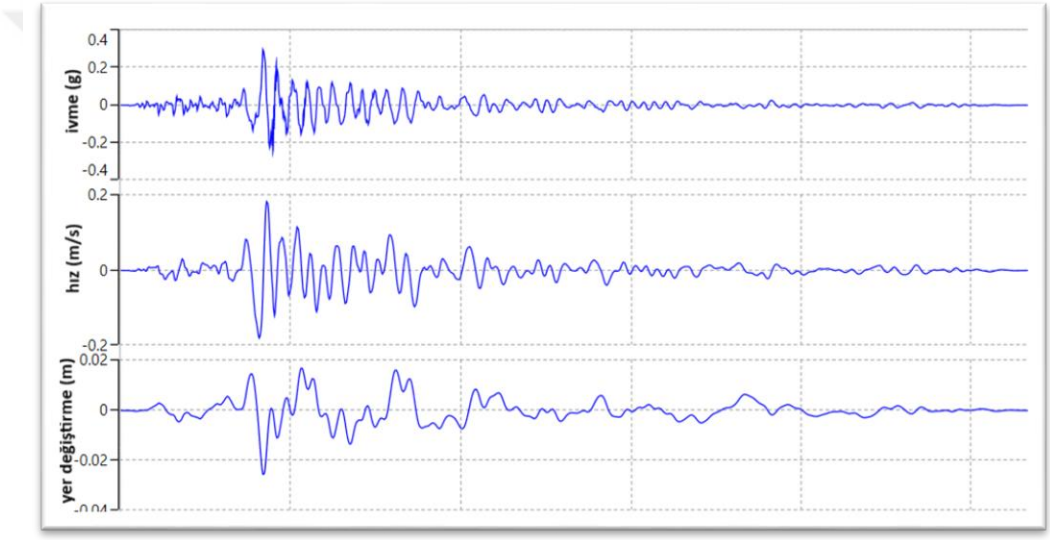
Zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışları çoğunlukla zeminlerin mekanik özellikleri ile kontrol edilir. Geoteknik mühendisliği problemlerinin dinamik yükleme ile ilgili (dalga yayılımı, makine titreşimleri, sismik yükleme, sıvılaşma ve tekrarlı geçici yükleme vb.) çeşitli türleri vardır. Dinamik yükleme ile ilgili mekanik özellikler, kayma dalgası hızları (V_s), kayma modülü (G), sönüm oranı (ξ) ve Poisson oranı (ν) olarak tanımlanmaktadır. Bu özellikler esas olarak dinamik yükleme problemlerinin tanımlanmasında kullanılmakla birlikte, bazı statik veya yarı statik geoteknik problemlerin değerlendirilmesinde de kullanılabilmektedir. Ancak literatürde geleneksel bir tanımlama olarak "dinamik zemin özellikleri" şeklinde ifade edilmektedir [Luna ve Jadi, 2000]. Mühendislik yapılarının güvenlik ve dayanım özelliklerini sağlamak için zeminin dinamik özellikleri dikkatle incelenmeli ve tasarımda kullanılması gereken ivmelerde deprem karakteristik özelliklerinin de göz önünde bulundurulması gerektiği bilinmelidir.

4.1. Sismik Yer Hareketi Parametreleri

Dinamik kuvvetlerin etkisinde yerin hareketi sebebi ile meydana gelen depremlerin karakteristik özelliklerinin belirlenmesi ve zemin-yapı davranışının elde edilen parametreler doğrultusunda değerlendirilmesi önem arz etmektedir. Yer hareketi frekans içeriği, genlik ve hareketin süresi olmak üzere üç ana özellik üzerinden incelenmektedir. Belirtilen parametreler, deprem etkilerinin zemin üzerinde oluşturacağı davranışın daha doğru tahmin edilmesine katkı sağlamaktadır (Kramer, 1996).

4.1.1. Yer hareketinin genlik özellikleri

Deprem sırasında kaydedilen yer hareketi verileri; ivme, hız ve yer değiştirme bileşenlerinin zamana bağlı değişimlerini gösteren eğrilerin elde edilmesine olanak sağlar. Bu tür grafikler, genellikle sismik veri analizine yönelik özel yazılımlar aracılığıyla ya da çeşitli matematiksel yöntemler kullanılarak oluşturulmaktadır. Örnek olarak, Coyote depremine ait kayıtlar kullanılarak elde edilen bu tür bir eğri Şekil 4.1'de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Çalışmada kullanılan Coyote yer hareketi verilerinin örnek parametreleri

4.1.1.1. Yer hareketinin tepe ivmesi

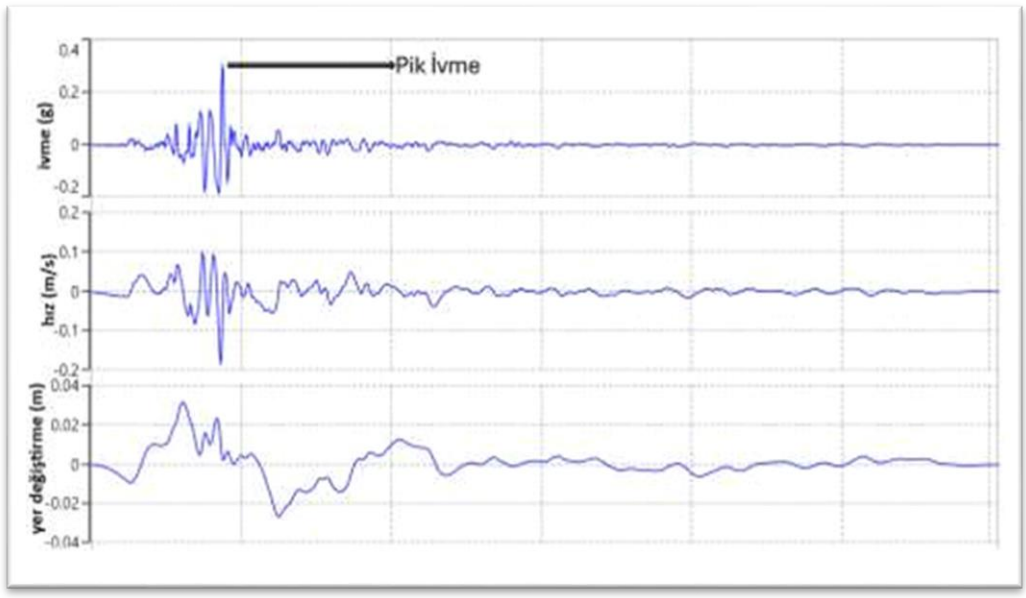
Deprem mühendisliğinde zemin hareketinin şiddetini ve büyüklüğünü tespit edebilmek için kullanılan temel parametre, Pik Yer İvmesi (PGA) olarak tanımlanır. PGA, bir deprem sırasında zeminin ulaştığı en yüksek ivme değerini ifade eder ve yapıların depreme dayanıklı tasarımı ile zemin davranış analizleri açısından kritik bir öneme sahiptir. Yer hareketini tanımlamak amacıyla genellikle yatay bileşenler dikkate alınır çünkü bu bileşenlerin yapılar üzerinde yarattığı etkiler, düşey hareketlere kıyasla daha belirgin ve

potansiyel olarak daha yıkıcıdır. PGA, genellikle yatay bileşenlerin maksimum değerlerinin geometrik ortalaması veya bu bileşenlerin mutlak değerce en büyüğü olarak ifade edilir.

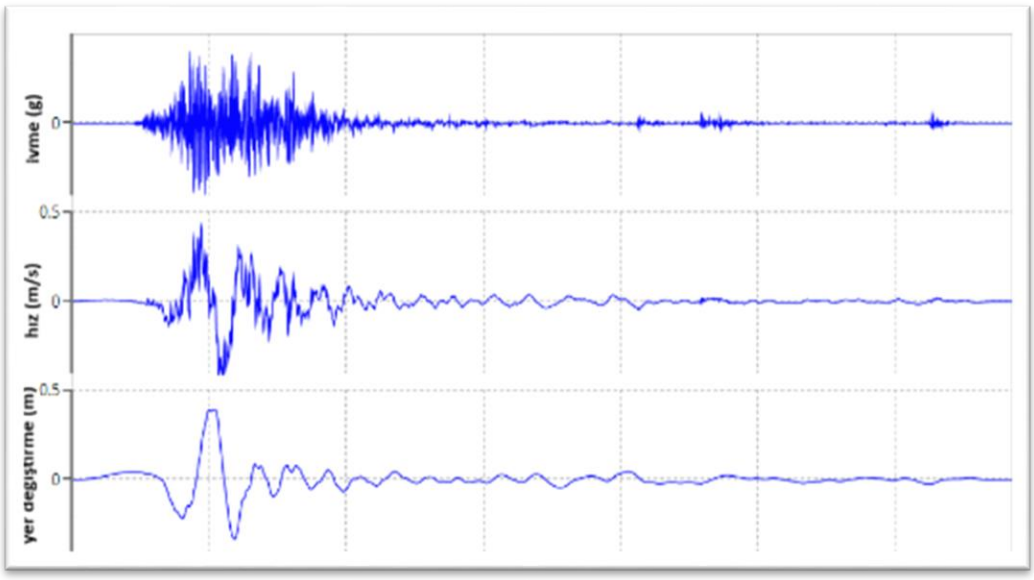
Yüksek PGA değerine sahip olan herhangi bir yer hareketinin, düşük PGA' ya sahip bir hareketten genellikle daha yıkıcı olduğu kabul edilir. Bununla birlikte tek bir pik ivme değerine sahip depremlerin yıkıcı olma potansiyeli birden fazla pik ivme değerine sahip olan depremlere göre daha azdır ancak pik ivme değerlerinin büyüklüğünün yanında süresi de depremlerin etkilerini değerlendirme noktasında önemli bir rol oynamaktadır (Kramer,1996).

İvme zaman çıktıları incelendiğinde, bazı depremlerde tek bir maksimum değer sonucu elde edilirken bazı depremlerde birden fazla yüksek pik değer elde edilmektedir. Örneğin, bu tez çalışması kapsamında yer alan kuvvetli yer hareketlerinden Şekil 4.2'de de görüldüğü gibi, Parkfield deprem kaydında tek pik ivme değeri varken, Şekil 4.3'de sunulan Darfield New Zeland depremi kaydında ise birden fazla pik ivme değeri mevcuttur. Tek bir yüksek pik değerin hakim olduğu depremlerde, bu kısa süreli yükleme çevriminin uzun periyotlu (hakim periyodu yüksek) yapılar üzerindeki etkisi sınırlı kalabilir. Buna karşın, birden fazla pik değere sahip kayıtlarda, farklı frekanslarda benzer genliğe sahip çok sayıda yükleme çevrimi oluşur. Böyle tekrarlı yüklemeler, aynı PGA değerine sahip olsa bile, birden fazla piki içeren depremlerin yapısal hasar açısından daha yıkıcı bir etkiye sahip olmasına neden olur. Dolayısıyla, eşit PGA değerlerine sahip iki deprem, frekans bileşimi ve etki süresi gibi karakteristik parametrelerdeki ayrılıklar nedeniyle yapılar üzerinde birbirinden oldukça farklı sonuçlar doğurabilir (Kramer, 1996).

Sonuç olarak, deprem etkilerini tam olarak değerlendirebilmek için, yalnızca PGA değerine değil, yer hareketinin süresi, frekans içeriği ve çevrim sayısı gibi diğer karakteristik özelliklerine de odaklanılması gerekmektedir.



Şekil 4.2. Parkfield 2004 (M=6) deprem kaydına ait ivme değerleri



Şekil 4.3. Darfield New Zelland 2010 (M=7) yer ivmesi kayıtları

4.1.2. Yer hareketinin frekans karakteristikleri

Deprem yer hareketinin karakteristiği, titreşim bileşenlerinin farklı frekanslardaki dağılımı olan frekans içeriği ile tanımlanır. Bu içerik, düşük frekanslı (uzun süreli) ve yüksek frekanslı (ani ve kuvvetli) hareketleri kapsar ve yapısal davranış ile hasar türü üzerinde

belirleyici rol oynar. Bu nedenle sismik tasarımda, yapının doğal frekansının (periyodunun) yer hareketinin frekans içeriğiyle uyumu kritik öneme sahiptir.

Kramer (1996) tarafından yapılan analizler, yer hareketinin şiddetini tanımlayan temel parametrelerin (en yüksek (pik) ivme, hız ve yer değiştirme) farklı frekans aralıklarına karşı duyarlılığını ve yapısal etkilere yansımasını ortaya koymuştur. Ayrıca bu parametrelerin sismik tasarım sürecinde tek tek değil, birlikte ve yapının periyodu ile ilişkilendirilerek değerlendirilmesi, depremin olası etkilerine karşı daha gerçekçi ve dayanıklı yapılar tasarlanmasını sağlar.

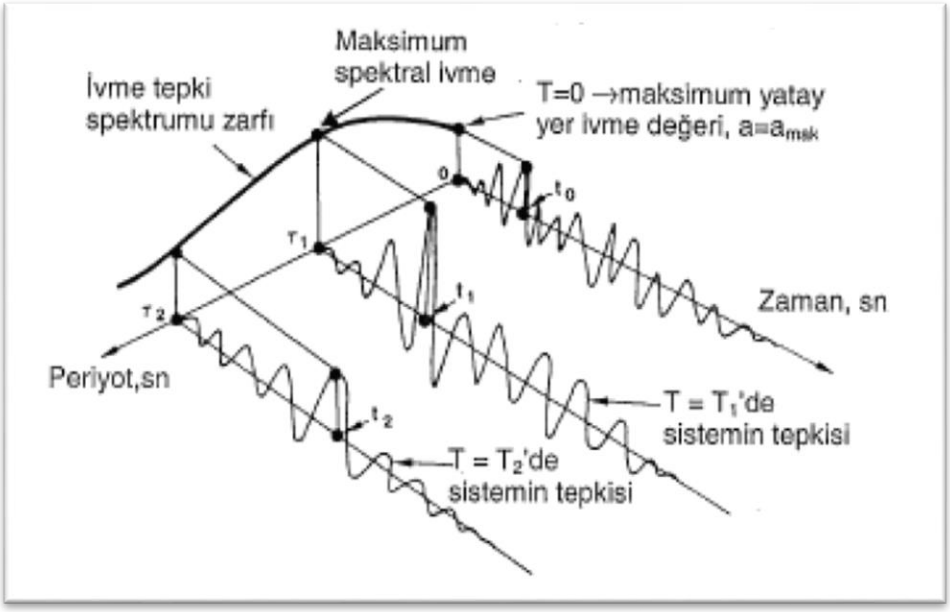
4.1.2.1. Fourier spektrumları

Deprem yer hareketlerinin dinamik yapısını incelemede temel yöntemlerden biri olan Fourier Analizi, değişken yer hareketlerini farklı frekans ve genlikteki sinüzoidal bileşenlerin toplamı olarak tanımlar. Bu analizin görsel sonucu olan Fourier Genlik Spektrumu (FGS), sarsıntı enerjisinin frekanslar üzerindeki dağılımını göstererek hareketin karakterini belirler. Spektrumdaki yüksek frekanslar ani sarsıntıları, düşük frekanslar ise geniş salınımları temsil ederken; enerjinin dar bir aralıkta toplanması düzenli, geniş bir aralığa yayılması ise karmaşık bir yer hareketi yapısına işaret eder (Chopra, 2017; Kramer, 1996).

4.1.2.2. Tepki spektrumları

Deprem mühendisliğinde, belirli bir yer hareketine karşı bir yapının veya sistemin vereceği maksimum dinamik tepkiyi belirlemek amacıyla kullanılan temel analiz yöntemi Tepki Spektrumları'dır (Response Spectra). Fourier spektrumu yalnızca yer hareketinin frekans özelliklerini sunmasına karşın, tepki spektrumu bu yer hareketinin farklı doğal periyotlara ve sönüm oranlarına sahip Tek Serbestlik Dereceli (TSD) sistemler üzerindeki

etkileşimini de kapsayarak daha kapsamlı bir değerlendirme sunar (Ohsaki, 1976) ve tek serbestlik dereceli sistemlere ait tepki spektrumu kavramı Şekil 4.4'te gösterilmektedir. Bu spektrum, bir yapının deprem etkisi altında göstereceği en büyük davranışın; Spektral İvme (S_a), Spektral Hız (S_v) ve Spektral Yer Değiştirme (S_d) büyüklükleri ile ifade edilmesine olanak tanır. Sa değeri, yapının kütlesiyle çarpıldığında oluşabilecek en yüksek taban kesme kuvvetinin belirlenmesine yardımcı olur. S_v, yapıya aktarılan enerji düzeyini temsil ederken; S_d, yapıda meydana gelebilecek en büyük yer değiştirme ve şekil değiştirme seviyelerini göstererek olası gerilme ve deformasyon büyüklükleri hakkında bilgi sağlar. Ohsaki (1976), bu spektral büyüklüklerin kuvvetli yer hareketlerinin yapıda yaratacağı maksimum etkileri doğrudan yansıttığını, bu nedenle tasarım çalışmalarında Fourier spektrumlarına kıyasla daha etkin ve yaygın biçimde kullanıldığını belirtmektedir.



Şekil 4.4. Tek serbestlik dereceli sistemlerde tepki spektrumu tanımı (Kramer, 1996).

Gerçekleştirilen çalışmalar, bir deprem yer hareketinin yalnızca maksimum ivme (PGA) değeri ile değerlendirilmesinin yeterli olmadığını göstermektedir. Elnashai ve Sarno (2008) tarafından yapılan araştırmalar, daha düşük maksimum ivmeye sahip ancak uzun süreli deprem hareketlerinin, kısa süreli ve yüksek ivmeli hareketlere kıyasla yapılarda daha fazla hasara neden olabildiğini ortaya koymuştur. Bu durum, yapısal hasarın yalnızca ivme

büyüklüğüne değil, yer hareketinin süresi ve enerji içeriğine de bağlı olduğunu göstermektedir. Bunun yanı sıra, zemin koşullarının yer hareketinin karakteristiklerini önemli ölçüde etkilediği bilinmektedir (Kramer, 1996). Kaya zeminlerde düşük periyotlarda daha yüksek spektral ivme değerleri gözlemlenirken, yumuşak ve derin zeminlerde daha büyük periyotlarda hem spektral ivme hem de spektral yer değiştirme değerlerinin arttığı belirlenmiştir.

Bu çerçevede, zeminin yer hareketine verdiği tepkiyi temsil eden zemin tepki spektrumu, depreme dayanıklı yapıların tasarımında dikkate alınması gereken temel parametrelerden biri olarak değerlendirilmektedir. Güvenli yapı tasarımı için yer hareketinin şiddeti kadar süresi ve zemin koşullarına bağlı dinamik büyütme etkilerinin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

4.1.3. Deprem yer hareketi süresi

Depremlerdeki kuvvetli yer hareketinin etkin süresi, biriken sismik enerjinin fay hattı boyunca ne kadar zamanda boşaldığını gösteren ve yapısal hasarın boyutunu doğrudan etkileyen kritik bir parametredir. Bu süre, genellikle hareketin eşik bir ivme değerini aştığı ilk andan son ana kadar geçen zaman dilimi olarak tanımlanır. Enerjinin uzun bir zaman aralığında serbest kalması, yer yüzeyindeki titreşimlerin daha uzun süre devam etmesine ve dolayısıyla yapıların daha fazla sayıda sarsıntı döngüsüne maruz kalmasına neden olur. Bu durum, hasarın artmasına yol açar; zira Naeim (2001)'in belirttiği gibi, tekrarlanan gerilme ve yüklemeler neticesinde yapılarda rijitlik ve dayanım hızla azalır.

Özellikle gevşek kumlu doygun zeminlerde, uzun süreli hareketler boşluk suyu basıncının artmasına ve zemin davranışının sıvılaşmaya yatkın hale gelmesine neden olabilir. Bu bağlamda, Elnashai ve Sarno (2008) tarafından yapılan çalışmalar, yer hareketinin şiddeti ile süresi arasındaki ilişkiyi vurgulamaktadır: Maksimum ivme (PGA) değeri daha düşük olsa bile, uzun süre devam eden bir yer hareketi; kısa süreli fakat daha

yüksek ivmeli bir sarsıntıya göre yapıda daha ciddi hasarlara yol açabilir. Özetle, yüksek büyüklüğe sahip bir depremin kısa sürmesi yıkıcı etkiyi azaltabilirken, düşük büyüklükteki bir depremin uzun süreli olması önemli yıkıcı hasarlar meydana getirebilir.

4.2. Zemin Dinamiğine İlişkin Tanımlayıcı Parametreler

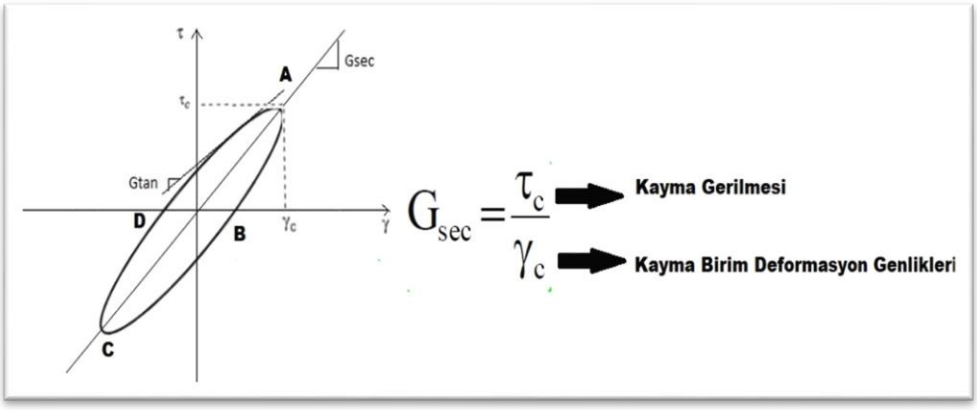
Geoteknik deprem mühendisliğinin temelini oluşturan zemin davranış analizleri, dinamik yükler altındaki zemin tepkisinin mühendislik tasarımlarına doğru aktarılması amacıyla yürütülür. Sismik yüklemeler sırasında zeminin kayma modülü, sönüm oranı ve gerilme–birim şekil değiştirme ilişkilerinde görülen değişimler, yapı–zemin etkileşimini şekillendirerek yapısal güvenlik üzerinde belirleyici bir rol oynar. Bu bağlamda, zeminlerin dinamik karakteristiklerinin isabetli bir şekilde saptanması, depreme dayanıklı ve güvenli tasarım süreçleri için temel bir zorunluluktur.

Zeminlerin dinamik yapısındaki farklılıklar, depremlerdeki yapısal yıkımların temel kaynağıdır. Örneğin, 1985 Michoacan depreminde Mexico City'deki binalarda görülen ağır hasarın, yerel zemindeki aşırı büyütme etkisinden kaynaklandığı bilimsel olarak ortaya konulmuştur. Günümüzde zemin davranış analizleri; sismik büyütme, sıvılaşma riski ve sahaya özel tasarım spektrumlarının belirlenmesinde vazgeçilmez bir yöntemdir.

4.2.1. Sismik davranışta kayma modülü (G) ve sönüm oranı (D)

Sismik hadiseler gibi dinamik etkiler hem doğal zemin formasyonlarına hem de mühendislik yapılarına tekrarlı ve çevrimsel yükler uygulamakta, bu da zemin davranışının analizi ve dinamik parametrelerin doğru tespiti zorunluluğunu ortaya koymaktadır (Kramer, 1996; Seed & Idriss, 1970). Tekrarlı gerilmeler karşısında zeminde meydana gelen şekil değiştirmeler, zemin tepki analizinin temel değişkenleri olan kayma modülü (G) ve sönümleme oranı (S_d) gibi dinamik parametreler ile kontrol edilmektedir (Vucetic & Dobry,

1991). Deprem sırasındaki tekrarlı gerilmeler altında, zeminlerin davranışının doğrusal olmayan bir yaklaşımla ele alınması gerekir; çünkü bu durum, malzemenin rijitlik ve enerji tüketimindeki çevrimsel (histeretik) değişimleri içerir. Bolisetti ve meslektaşlarının (2014) vurguladığı üzere, bu doğrusal olmayan davranışın uygun şekilde modellenmesi, sismik zemin tepkilerinin daha gerçekçi bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Zeminin histeresis (gerilme-birim şekil değiştirme) eğrisi, malzemenin dinamik yükler altındaki deformasyonunu ve enerji sönümleme kapasitesini temsil eder: Eğrinin anlık eğimi, zeminin o andaki rijitliğini gösterir ve tanjant kayma modülü (G_{tan}) ile ilişkilendirilirken; eğrinin kapladığı alanın genişliği ise, zemin malzemenin enerji sönümleme yeteneğini belirtir ve çevrim boyunca değişen kayma modülü değerlerinin ortalamasını ifade eden sekant kayma modülü (G_{sec}) aracılığıyla sistemin genel rijitliğini tanımlar (Şekil 4.5; Seed & Idriss, 1970; Das, 2013). Bu dinamik parametrelerin doğru bir şekilde belirlenmesi, zeminlerin deprem altındaki performansını güvenilir bir şekilde değerlendirmek için hayati öneme sahiptir.



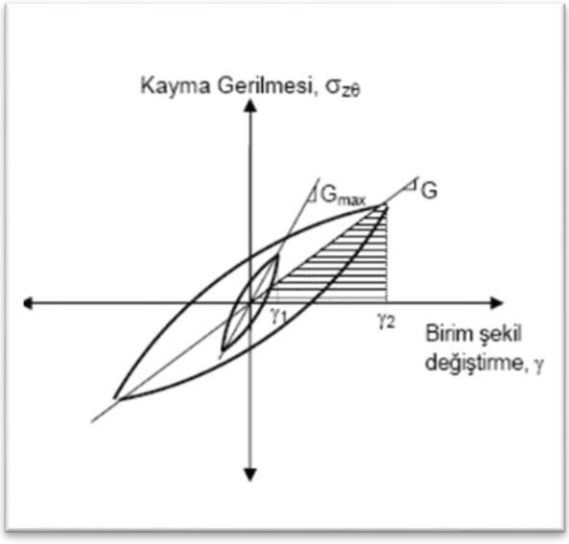
Şekil 4.5. Zeminlerde tanjant ve sekant kayma modül davranışı (Kramer, 2003)

Sonuç olarak, histeresis döngüsünde gözlemlenen eğim ve genişlik, dinamik yükler altındaki zemin davranışının anlaşılmasında ve enerji tüketiminin (sönümlemenin) belirlenmesinde kilit rol oynayan temel göstergelerdir. Eğim, zeminin anlık rijitliğini (tanjant kayma modülü, (G_{tan}) yansıtırken, genişlik ise zeminin deformasyon kapasitesini ve döngüsel yükleme sırasındaki enerji dağıtma (sönümleme) yeteneğini ortaya koyar.

Zeminlerin dinamik rijitliğinin temel ölçütü olan maksimum kayma modülü (G_{max}), gerilme-birim şekil değiştirme düzlemindeki histeresis döngüsünün omurga eğrisine orijinden teğet olarak çizilen doğrunun eğimi ile belirlenir. Bu değer, zeminin çok küçük deformasyonlar altındaki en yüksek başlangıç rijitliğini temsil eder. Sönümleme oranı ise, malzemenin çevrimsel yükleme sırasında tükettiği enerjiyi yansıtan histeresis ilmeği kullanılarak hesaplanır. Sönümleme oranı, histeresis ilmeğinin alanı (tüketilen enerji) ile ilmeği oluşturan doğrunun altında kalan alan (bir diğer deyişle, o çevrimde depolanan maksimum esneklik potansiyel enerjisi) arasındaki oran yardımıyla tanımlanır ve Şekil 4.6'da gösterilmiştir.

$$\text{Sönüm Oranı (D)} = \frac{1}{\pi}\left(\frac{\text{Histeresis Döngüsünün Alanı}}{\text{Depolanan Maksimum Enerjiyi Temsil Eden Alan}}\right) \tag{4.1}$$

Bu oran, zeminin bir titreşim çevriminde ne kadar enerji dağıttığını göstererek, zemin davranışının sönümleme (enerji kaybı) kapasitesini belirler.



Şekil 4.6. Maksimum kayma modülü (G_{max}) ve sönümleme oranı (D)

Maksimum Kayma Modülü (G_{max}), bir zeminin veya malzemenin ilk elastik davranış gösterdiği andaki en yüksek rijitliğini ifade eden parametredir. Bu büyüklük hem doğrusal

hem de doğrusal olmayan elastik zemin tepkisinin tanımlanmasında temel bir rol oynamaktadır. G_{max} değeri, çoğunlukla sahada ya da laboratuvar ortamında ölçülen kayma dalgası hızından yararlanılarak hesaplanmaktadır (Richart vd., 1970; Viggiani, 1991; De Alba ve Baldwin, 1991). Bu hesaplama işleminde kullanılan temel formül aşağıda verilmiştir.

$$G_{max} = \rho . Vs^2 \tag{4.2}$$

Burada ρ zeminin yoğunluğunu, V_S ise kayma dalgası hızını belirtir.

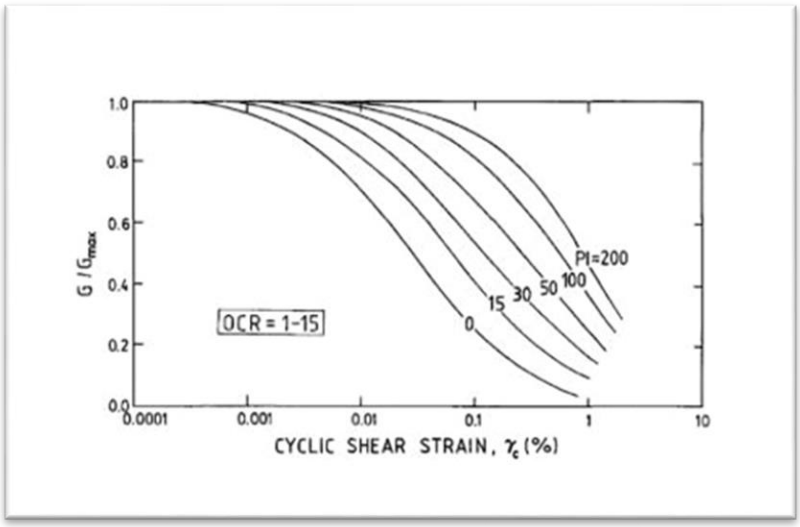
Sönümleme Oranı (D) ise, çevrimsel yüklemeler sırasında sistemde kaybolan enerji miktarını gösterir ve dinamik yükler altındaki zemin davranışını anlamada hayati bir parametredir.

$$D = \frac{W_D}{4\pi W_S} \tag{4.3}$$

Burada W_D değeri histeresis ilmeğinin alanı olmak ile birlikte W_S taralı üçgen alanıdır.

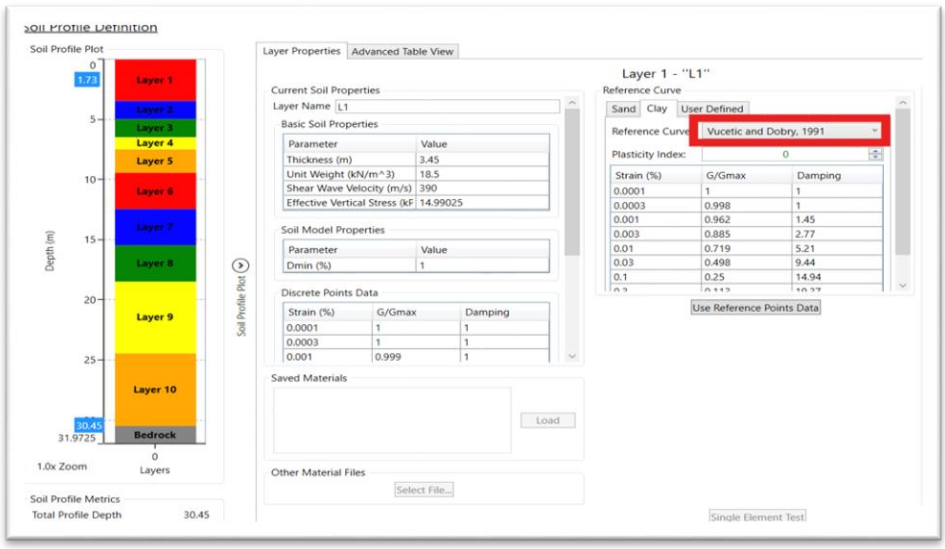
Eşdeğer doğrusal zemin modellerinde, dinamik parametrelerin birim kayma şekil değiştirmesine (γ) bağlı olarak değiştiği kabul edilir. Bu bağlamdaki en temel ilişki, zemin elasto-plastik davranış sergilediği için birim şekil değiştirme (γ) arttıkça kayma modülü oranı (G/G_{max}) değerinin azalması (rijitlik kaybı) ve buna paralel olarak sönümleme oranı (λ) değerinin de belirli bir eşikten sonra yükselmesidir (Dobry & Vucetic, 1987; Seed & Idriss, 1991). Eşdeğer doğrusal model, sekant kayma modülü (G_{sec}) ve sönümleme oranı gibi

değişken parametreleri doğrusal özelliklere sahip kabul ederek zeminlerin davranışını yaklaşık olarak modeller. Bu modelde, yük kaldırıldığında deformasyonların teorik olarak sıfıra dönmesi varsayılsa da kalıcı deformasyonların gerçekçi bir şekilde hesaba katılmasıyla daha doğru sonuçlar elde edilebileceği belirtilmiştir (Hanumantharao ve Ramana, 2008). Zemin tepkisinin modellenmesinde kullanılan temel parametrelerden biri, modelden elde edilen modül azaltma ve sönüm eğrileridir. Bu eğriler, Dobry–Vucetic (1987) ve Seed–Idriss (1991) tarafından yapılan geniş ölçekli deneysel çalışmalarla tanımlanmıştır. Öte yandan, Darendeli (2001) ise zemin türüne ve özellikle plastisite indisine göre farklı modül azalım eğrileri önermiştir. Sönümleme oranı, zemin davranışını etkileyen kritik bir parametre olup çeşitli zemin özelliklerine bağlı olarak değişir; örneğin, Şekil 4.7'de sunulduğu üzere Vucetic ve Dobry (1991) çalışmaları, plastisite indisi yüksek zeminlerde sönümleme oranının daha düşük olabileceğini ve bunun daha fazla kalıcı deformasyona yol açabileceğini göstermektedir.



Şekil 4.7. Vucetic ve Dobry (1991) kil zemin kayma modülü azalım eğrisi

Bu tez çalışması kapsamında Deepsoil 7.1 yazılımında ince daneli (kil-silt) zeminler için Vucetid-Dobry 1991, iri daneli zeminler için (kum-çakıl) Seed ve Idriss 1991 eğrileri kullanılarak analizler yapılmıştır. Şekil 4.8'de örnek gösterildiği gibi, yazılımda killi bir zemin tabakasına ait Vucetid-Dobry 1991 eğrilerinin tanımlanarak zemin davranış analizleri tamamlanmıştır.



Şekil 4.8. Killi zeminlerde Vucetic–Dobry (1991) eğrilerinin Deepsoil 7.1 yazılımında kullanımına ilişkin bir örnek

4.3. Dinamik Zemin Davranışının İncelenmesi

Zemin davranışlarının analizleri deprem mühendisliğinde yerel zemin koşullarının sismik dalgalar üzerindeki etkisini değerlendirmek için kritik öneme sahiptir. Bu analizler, ana kayadan gelen deprem dalgalarının zemin tabakaları boyunca ilerlerken uğradığı büyütme (amplifikasyon) veya sönümlenme etkilerini hesaplamayı amaçlar. Zira yumuşak zeminlerdeki aşırı büyütmeler, merkez üssünden uzakta dahi büyük yapısal hasarlara yol açabilir (Vucetic ve Dobry, 1991).

Zemin davranış analizlerinin temel amacı, yapının maruz kalacağı gerçekçi sahaya özgü tasarım spektrumları ve yüzey ivme kayıtlarını üretmektir (Ansal vd., 2011). Zemin davranışını modellemek için genellikle eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizler olmak üzere iki yaygın yöntem kullanılır. Analizler bir, iki ve üç boyutlu olarak yapılabilir.

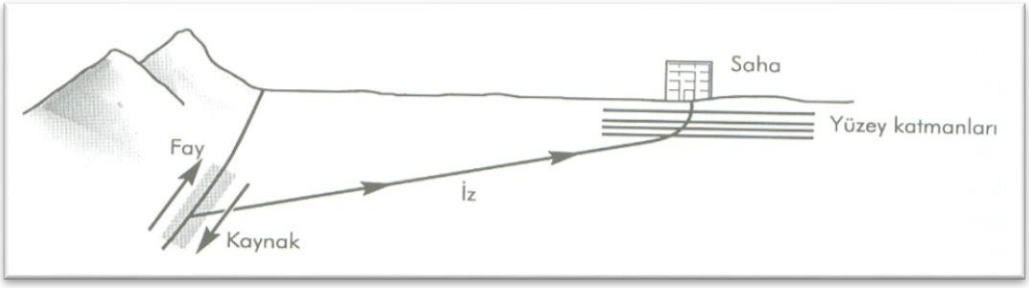
Genellikle düz ve yatay katmanlardan oluşan zeminler için tek boyutlu (1-B) analizler yeterli olurken, topoğrafyanın değişiklik gösterdiği eğimli alanlar veya rijit/gömülü

büyük mühendislik yapıları (tüneller, istinat yapıları gibi) söz konusu olduğunda daha karmaşık modellere ihtiyaç duyulur. Bu tür kompleks durumlar için, zemin ve yapı etkileşimini gerçeğe daha yakın yansıtmak amacıyla iki ve üç boyutlu analiz çalışmaları yapılmaktadır (Pitilakis, 2004a; Hudson vd., 2003). Bu çok boyutlu analizler, yanlardan gelen sismik dalga etkilerini ve yerel zemin geometrisinden kaynaklanan kompleks dalga yayılımını hesaba katar.

4.3.1. Tek boyutlu (1-B) dinamik tepki değerlendirmesi

Deprem sırasında oluşan sismik dalgalar zemin içinde yayılırken tabaka sınırlarında yansıma ve kırılmaya uğrar. Yüzeye yakın birimlerde dalga hızlarının daha düşük olması nedeniyle dalga yayılımı çoğunlukla düşey yönde gerçekleşir. Bu davranışın basitleştirilmiş temsili olarak, tabakaların yatay ve sonsuz kabul edildiği ve düşey yönde yayılan SH dalgalarının esas alındığı bir boyutlu zemin davranış analizleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Kramer (1996), bu yaklaşımın birçok durumda zemin tepkisini yeterli doğrulukla temsil ettiğini belirtmiştir.

Bir boyutlu yer tepki analizleri, zemin tabakalarının yatay kabul edildiği ve yer hareketinin düşey yönde yayılan dalgalarla temsil edildiği varsayımına dayanır. Bu yaklaşımda zemin ve ana kaya birimlerinin yatay doğrultuda sonsuz uzanımlı olduğu kabul edilir. Doğrusal analizlerde ise, zemin tepkisinin belirlenmesinde transfer fonksiyonları temel araç olarak kullanılmaktadır.



Şekil 4.9. Faydaki hareketlerin sonucunda sismik dalgaların zemin içerisindeki yayılımı (Kramer, 1996).

Deprem mühendisliğinde, sismik dalgaların anakayadan yüzeye doğru yükselirken zemin ortamının özelliklerine bağlı olarak maruz kaldığı değişimlerin belirlenmesi kritik öneme sahiptir. Anakayada başlayan yer hareketinin yumuşak zemin tabakalarından geçerken uğradığı rijitlik ve sönümleme değişiklikleri, yüzeyde farklı spektral parametrelerin ve amplifikasyon (zemin büyütmesi) seviyelerinin oluşmasına yol açar (Kramer, 1996). Zemin davranış analizleri bu fenomeni modellemek, yani zemin içerisinde yayılan deprem dalgalarının yüzeyde yaratacağı hareketin şiddetini ve frekans karakterini doğru bir şekilde belirlemek amacıyla gerçekleştirilir. Bu analizler, zeminlerin dinamik rijitliği ve sönümleme oranı gibi değişken parametrelerinin birim şekil değiştirmeyle olan karmaşık ilişkisini hesaba katmak zorundadır (Seed & Idriss, 1970). Günümüzde, bu davranış analizleri iki ana yaklaşımla sınıflandırılır: Eşdeğer doğrusal analiz ve doğrusal olmayan analiz. Eşdeğer doğrusal yöntem (Schnabel vd., 1972), doğrusal olmayan zemin davranışını, etkin birim kayma şekil değiştirmesine uygun sabit parametrelerle yaklaşık olarak modelleyen bir frekans alanı yöntemidir. Buna karşılık, doğrusal olmayan analiz, histeretik gerilme-birim şekil değiştirme ilişkilerini zaman alanında doğrudan çözerek daha gerçekçi bir zemin tepkisi modellemesi sağlar (Vucetic & Dobry, 1991). Analiz yönteminin seçimi, zemin tipine ve beklenen yer hareketinin şiddetine bağlı olarak yüzeydeki deprem etkilerinin güvenilir bir şekilde tahmin edilmesi açısından temel teşkil etmektedir.

Geoteknik deprem mühendisliği uygulamalarında, zemin tepkisinin belirlenmesi amacıyla frekans alanı analizleri, hesaplama yükünün nispeten düşük olması ve pratik uygulanabilirliği sayesinde günümüzde geniş bir kullanıma sahiptir (Pitilakis, 2004b; Phillips & Hashash, 2009). Bu analiz grubunun en yaygın temsilcisi olan tek boyutlu eşdeğer

doğrusal zemin davranış analizi, dinamik parametreleri basitleştirilmiş sabitlerle (sekant kayma modülü ve sönümleme oranı) modellemektedir (Kramer, 1996; Seed & Idriss, 1970). Bununla birlikte, bu yaklaşım, özellikle zemin tabakalarının yoğun ve belirgin bir şekilde doğrusal olmayan davranış sergilediği yüksek gerilme seviyelerinde, zemin tepkisini tam ve doğru bir şekilde temsil etme konusunda sınırlılıklar gösterebilmektedir (Arduino & Kramer, 2009; Pitilakis, 2004b). Bu gibi yüksek sismik tehlikenin söz konusu olduğu kritik senaryolarda ve karmaşık zemin koşullarında, daha gerçekçi ve güvenilir sonuçlara ulaşmak amacıyla, histeretik gerilme-birim şekil değiştirme döngülerini doğrudan zaman alanında modelleyen doğrusal olmayan (non-lineer) analiz yaklaşımlarının kullanılması akademik literatürde kuvvetle tavsiye edilmektedir (Phillips & Hashash, 2009; Elgamal vd., 1995).

4.3.1.1. Tek boyutlu eşdeğer doğrusal (equivalent lineer) yaklaşım

Geoteknik deprem mühendisliğinde en yaygın kullanılan yaklaşımlardan biri olan "bir boyutlu eşdeğer doğrusal analiz" (ELA), zemin tabakalarının doğrusal olmayan davranışını yaklaşık olarak modellemek amacıyla yinelemeli bir süreç kullanır (Schnabel vd., 1972). Bu yaklaşım, zemin kütlesini sekant kayma modülü (G_{sec}) ve sönümleme oranı (D) gibi etkin parametrelerle karakterize edilen viskoelastik bir malzeme olarak ele alır; bu parametreler, oluşan etkin birim kayma şekil değiştirmesiyle tutarlı hale gelene kadar yinelemeli olarak güncellenir (Seed & Idriss, 1991). ELA'nın temelini oluşturan frekans alanı analizleri, zemin davranışını transfer fonksiyonları ile temsil eder. Transfer fonksiyonları, bilinen bir anakaya hareketinden yer değiştirme, hız, ivme ve kayma gerilmesi gibi zemin tepkilerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır (Kramer, 1996). Bu yöntemde anakaya hareketi frekans ortamına dönüştürülerek her bir frekans bileşeni transfer fonksiyonu ile ilişkilendirilir ve ters dönüşüm ile yüzey hareketi elde edilir. Transfer fonksiyonları, frekansa bağlı büyütme ve sönüm etkilerini yansıtarak sahaya özgü tepki spektrumlarının oluşturulmasında temel rol oynar (Schnabel vd., 1972; Bardet, 1997).

4.3.1.2. Doğrusal olmayan (non-lineer) dinamik tepki çözümlemesi

Sismik hareketlerin neticesinde zeminlere uygulanan tekrarlı dinamik yükler altında, zeminlerin gösterdiği davranış doğrusal olmayan (non-lineer) bir karaktere sahiptir. Bu nedenle, geoteknik deprem mühendisliğinde daha gerçekçi zemin tepkisi tahminleri için doğrusal olmayan yaklaşım (NLA) benimsenmektedir (Hosseini vd., 2010). NLA, zeminin yükleme ve boşaltma çevrimlerinde rijitlikteki sürekli azalmayı ve enerji tüketimini içeren histeretik gerilme-şekil değiştirme ilişkisini doğrudan hesaba katar (Bolisetti vd., 2014). Hosseini ve arkadaşları (2010), zeminin kayma modülünün çevrim boyunca sürekli azalmasını ve yükleme yolundan farklı bir yolda boşalmasını, zemin taneleri arasındaki enerji dağılımına işaret eden ve doğrusal olmayan davranışın temelini oluşturan en kritik etki olarak tanımlamaktadır. Zaman alanlı bir analiz yöntemi olarak kullanılan NLA, zemin davranışını gerçek gerilme-şekil değiştirme karakteristikleri aracılığıyla ortaya koyar. Geleneksel bir boyutlu eşdeğer doğrusal yaklaşım (ELA), zemin tabakalarının yatay ve sonsuz yayıldığı varsayımıyla her bir tabakada kayma modülü (G_s) ve sönüm oranı (D) değerlerini sabit olarak kabul ederken, NLA'nın temel farkı bu parametrelerin sismik çevrim boyunca sürekli olarak değişmesidir. Bu dinamik değişim, literatürde zemin sınıfına ve plastisite indisine bağlı olarak tanımlanmış, Seed vd. (1986), Vucetic & Dobry (1988) ve Darendeli (2001) gibi birçok araştırmacı tarafından geliştirilen kayma modülü-sönümleme oranı eğrileri kullanılarak analize dahil edilmiştir. Bu gerçekçi modelleme, NLA'yı özellikle kuvvetli yer hareketleri altındaki zemin davranışını tahmin etmede ELA'ya göre potansiyel olarak daha doğru ve güvenilir kılmaktadır (Phillips & Hashash, 2009).

4.3.1.3. Zemin büyütmesi

Zemin büyütmesi (site amplification), geoteknik deprem mühendisliğinin temel konularından biridir ve sismik dalgaların anakayadan yüzeye doğru ilerlerken genliklerinde meydana gelen artış olarak tanımlanır (Hays, 1986). Bu olgu, deprem dalgalarının yumuşak zemin tabakalarından geçerken hızlarının (kayma dalgası hızı, V_S) düşmesine karşılık, enerjinin korunumu ilkesi gereği genliklerinin önemli ölçüde artmasından kaynaklanır (Pitilakis, 2012). Zemin büyütmesi, yerel zemin özellikleri dikkate alınarak yapılan dinamik

analizler aracılığıyla analitik olarak hesaplanabildiği gibi, arazi ölçümlerinden elde edilen verilerin değerlendirilmesiyle de belirlenebilmektedir. Ancak zemin büyütmesinin en doğru şekilde ortaya konulması, kuvvetli yer hareketleri sırasında kaydedilen ivme kayıtlarının spektral analizinin yapılmasıyla mümkün olmaktadır (İyisan ve Haşal, 2011). Zemin büyütmesi, bir sahanın deprem hasarı üzerindeki en önemli belirleyici faktörlerden biri olup, 1985 Meksika depremi gibi felaketlerde hasarın merkez üssünden uzakta bile ciddi boyutlara ulaşmasının ana nedenlerinden biri olarak gösterilmiştir (Vucetic ve Dobry, 1991). Zemin büyütmesinin büyüklüğü ve karakteri, zeminin kalınlığı, tabakaların dinamik özellikleri, taban kaya derinliği ve topografik koşullar gibi yerel faktörlere bağlıdır. Mühendislik pratiğinde, zemin büyütme oranları, zemin yüzeyinde hesaplanan tepki spektrumunun (veya ivmenin) anakaya seviyesindeki tepki spektrumuna oranlanmasıyla elde edilir ve yapıların depreme dayanıklı tasarımı için kritik öneme sahiptir. Zemin büyütmesi, yerel zemin koşullarının deprem dalgalarının yayılımı üzerindeki etkisini ifade etmekte olup, ampirik bağıntılara dayalı dinamik analizler ya da arazi deneylerinden elde edilen verilerin değerlendirilmesi ile belirlenebilmektedir. Bununla birlikte, en güvenilir sonuçlar kuvvetli yer hareketleri sırasında kaydedilen ivme kayıtlarının spektral analizi yoluyla elde edilmektedir.

Aslında zemin büyütmesi, deprem dalgalarının anakayadan zemin tabakalarına geçerken, özellikle daha düşük dirençli ve yumuşak katmanlarda genliğinin artması olayıdır. Sismik hareketin yüzeye ulaşma sürecindeki karakteristik özellikleri, geçiş yaptığı tabakaların fiziksel yapısı ve sergilediği dinamik tepki ile doğrudan şekillenir. Bu süreç depremin periyoduna bağlı olarak değişkenlik gösterir; zira yumuşak tabakalar her sismik dalgaya aynı tepkiyi vermemekte, belirli frekans aralıklarında genlik artarken diğerlerinde sönümlenme meydana gelebilmektedir. Analizler neticesinde en yüksek büyütmenin gerçekleştiği periyot aralığı "zemin hâkim periyodu (T_0)" olarak tanımlanır ve bu değer, yüzeye yakın yumuşak tabakaların kalınlığı ile kayma dalgası hızına (V_S) göre belirlenir. Pratik uygulamalarda zemin büyütme düzeyi, genellikle zemin yüzeyinden elde edilen spektrumun anakaya spektrumuna oranlanmasıyla hesaplanmaktadır. Bu hesaplamalar, ilgili sahadaki sismik tehlike düzeyinin ve yapısal risklerin doğru bir şekilde öngörülmesi için kritik veriler sunar (Ansal vd., 2002).

Çizelge 4.1 Büyütme katsayısına dayalı sismik tehlike sınıflandırılması (ISSMFE 1993, ISSMGE/TC4 1999, Özçep 2007).

Büyütme Değeri	Tehlike Düzeyi
0.00 – 2.00	C (düşük tehlike)
2.00 – 4.00	B (orta tehlike)
4.00 – 6.50	A (yüksek tehlike)

5. ÇALIŞMADA KULLANILAN MATERYAL VE YÖNTEM

5.1. Deepsoil Tabanlı Modelleme Süreci

Deepsoil programı, 1998 yılında Illinois Üniversitesi Urbana-Champaign bünyesinde geliştirilen ve bir boyutlu sismik zemin tepki analizlerine dayanan bir yazılımdır. Günümüzde eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analiz yaklaşımlarını destekleyerek zemin davranışını zaman ve frekans alanında inceleme olanağı sunmakta ve çok katmanlı zemin profillerinin ayrıntılı biçimde modellenmesine imkân vermektedir (Hashash vd., 2017).

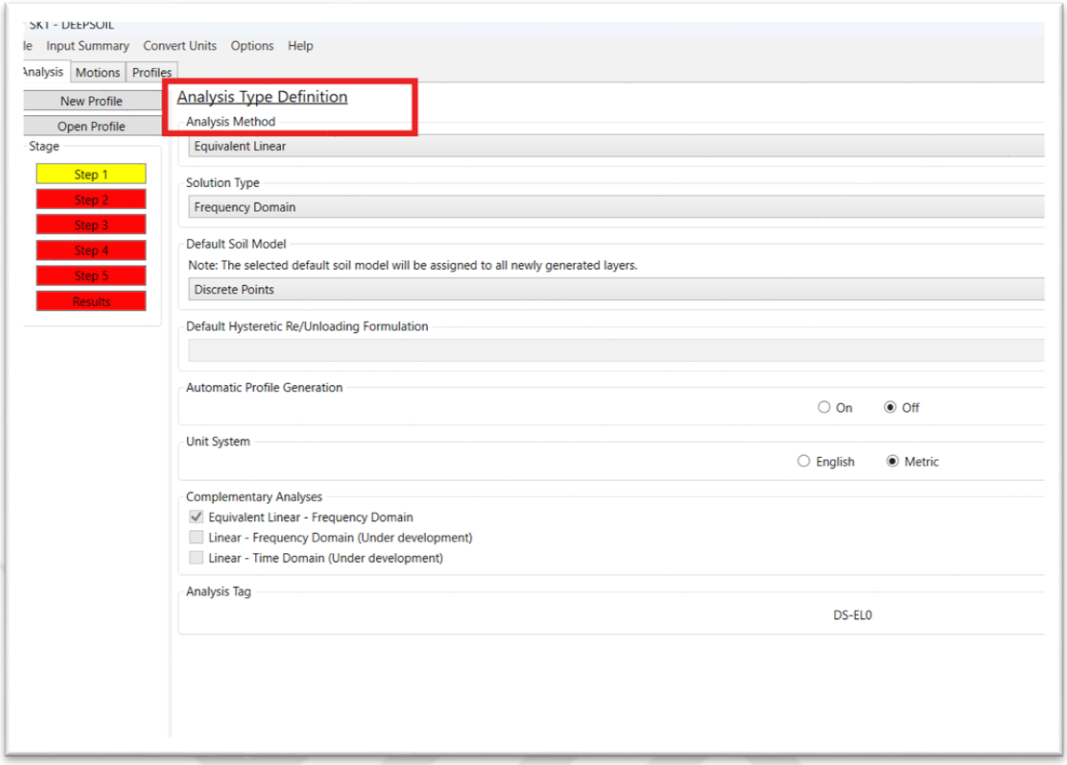
Deepsoil programı, zemin davranışını daha gerçekçi biçimde temsil eden doğrusal olmayan modeller ile frekans bağımsız sönüm yaklaşımını içermektedir. Ayrıca deprem sırasında boşluk suyu basıncı gelişimini dikkate alarak sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır (Hashash vd., 2017). Kullanıcı dostu arayüzü sayesinde zemin profili tanımı ve sonuçların görselleştirilmesi kolaylaşırken, elde edilen ivme, gerilme–zaman ve spektral çıktılar diğer mühendislik yazılımlarına aktarılabilmektedir (Hashash, 2016).

Bu çalışma kapsamında da 11 farklı deprem kaydının verileri kullanılarak Deepsoil 7.1 versiyonu ile doğrusal ve doğrusal olmayan analizler yapılmıştır.

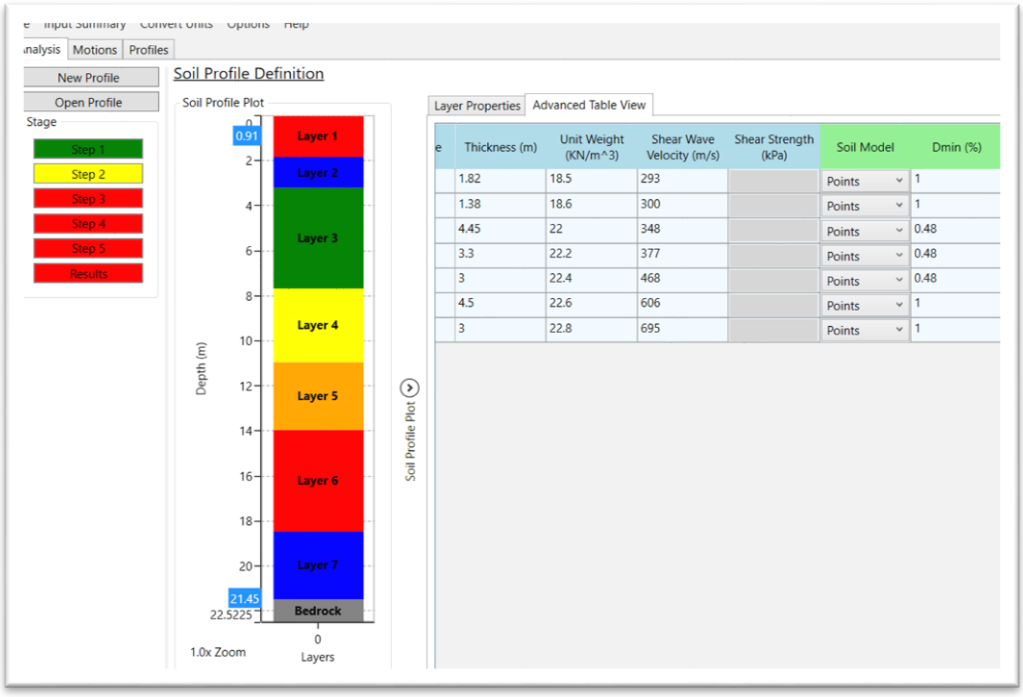
5.1.1. Deepsoil kullanılarak eşdeğer doğrusal yaklaşımın uygulanması

Güncel deprem yönetmelikleri, yapıların tasarım ve performans değerlendirmelerinde zaman tanım alanında yapılan analizlerin kullanılmasını önermektedir. Bu bağlamda, bölgesel deprem tehlikesini ve yerel zemin koşullarını yansıtan gerçek ya da sentetik ivme kayıtlarının analizlerde tercih edilmesi gerekmektedir. Seçilecek kayıtların, tasarım spektrumunun öngördüğü periyot aralığıyla uyumlu olması zorunludur ve bu nedenle birden fazla kaydın kullanılması ile ölçeklendirilmesi önerilmektedir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) de bölgeye özgü deprem spektrumunun belirlenmesine ilişkin ayrıntılı bir yaklaşım sunmaktadır. Bu çalışma kapsamında da yönetmelikte belirtilen esaslar doğrultusunda farklı bir ivme kaydı kullanılarak tek boyutlu zemin tepki analizleri, eşdeğer doğrusal yöntem temel alınarak frekans tanım alanında gerçekleştirilmiştir.

Eşdeğer doğrusal (EL) analizler, Deepsoil yazılımında frekans tanım alanında gerçekleştirilmektedir (Hashash, 2016). Programda analizler yapılmaya başlandığında ilk aşama yapılacak olan analiz metodunu belirleyerek seçmektir ve programın bu aşamadaki ekran çıktısı Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Bu adımdan sonra yapılacak olan analizin türü ve tanım alanı (frekans tanım alanı) seçildikten sonra, analizin ikinci aşamasında zemin tabakalarına ait temel geoteknik parametreler programa girilir (Şekil 5.2). Bu parametreler arasında birim hacim ağırlıkları, tabaka kalınlıkları ve kayma dalgası hızları bulunmaktadır. Bunlara ek olarak programda kayma modülü azalım ve sönüm oranı artım eğrileri ise programa girilen veriler doğrultusunda programın içerisinde önceden tanımlanmış olarak yer alan mevcut referans eğrilerinden seçilir. Kum olarak tanımlanan zeminlerde düşük, orta ve yüksek olmak üzere rölatif sıklık düzeyine göre sınıflandırma yapan Seed ve Idriss (1970) eğrileri tercih edilirken; plastisite indisi (PI) parametresini programa işlememiz gereken killi zemin türlerinde ise Vucetic ve Dobry (1991) eğrileri tercih edilir.

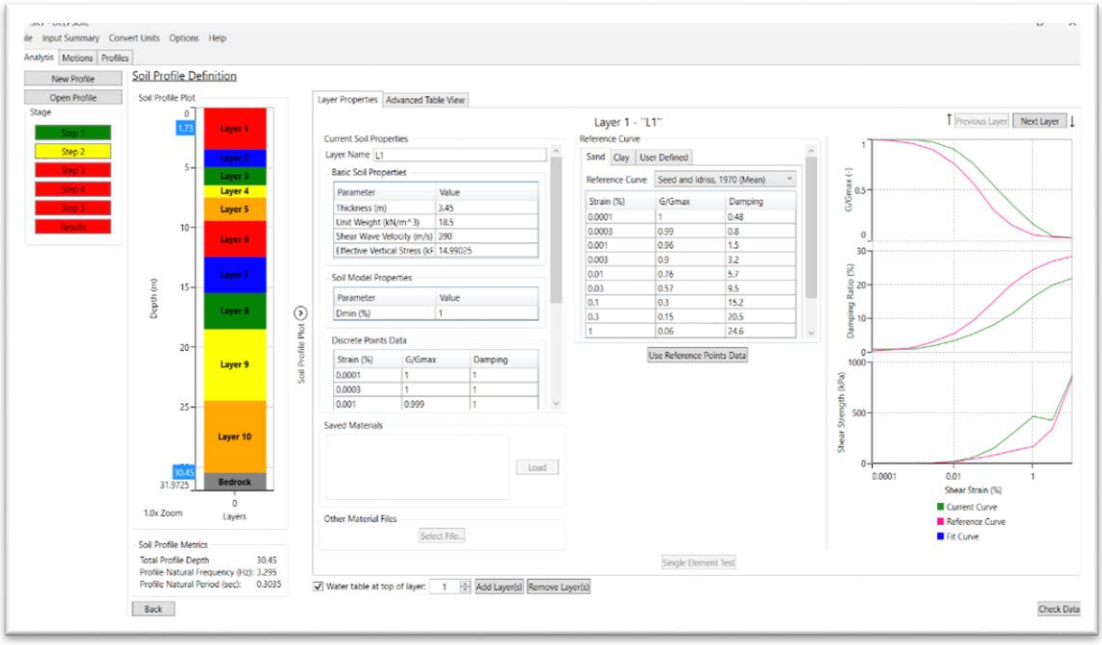


Şekil 5.1. Analiz türü seçme, Deepsoil



Şekil 5.2. Eşdeğer doğrusal analiz için tanımlanan bir örnek sondaj verisi (Deepsoil)

Bu çalışma kapsamında da bahsi geçen seçimler üzerinden analizler yapılmıştır. Yapılan işlemler sonrasında ‘Use Fit veya Use Reference Point Data’ butonu sayesinde seçilen referans eğrileri çalışma için kullanılan zemin tabakası verilerine uyarlanarak bu eğrilerin dinamik davranışları analiz için temel oluşturmaktadır (Şekil 5.3).



Şekil 5.3. Zemin parametrelerinin girdisi ve referans eğrisi seçimi

Bu çalışmada giriş parametreleri ve anakaya özellikleri belirlendikten sonra, 11 deprem kaydı kullanılarak dinamik analizler yürütülmüştür. Bu süreçte ivme, hız ve spektral değerler gibi temel tepki parametreleri sayısal olarak elde edilmiş ve değerlendirme amacıyla kaydedilmiştir.

5.1.2. Deepsoil programı ile doğrusal olmayan (non-lineer) analiz

Deepsoil yazılımı içerisinde gerçekleştirilen doğrusal olmayan (NL) analizler, zeminlerin güçlü yer hareketleri veya büyük depremler etkisi altındaki esnek olmayan davranışını doğru bir şekilde modellemek amacıyla kullanılmaktadır (Hashash, 2016). Bu

analiz yöntemi, zeminlerin elastik olmayan yanıtını yakalamayı hedefler. NL modellemede, zemin malzemelerinin kayma modülü (G) ve sönüm oranı (ξ) sabit kalmak yerine, uygulanan yer hareketinin genliğine ve gerinim seviyesine bağlı olarak sürekli değişim gösterir (Kramer, 1996). Yüksek genlikli hareketler altında zeminler, plastikleşme gibi tipik doğrusal olmayan tepkiler sergileyebilir.

Doğrusal olmayan analizlerde, zemin profilinin dinamik özellikleri zaman tanım alanında iteratif olarak güncellenmekte ve bu sayede zemin sıvılaşması gibi kritik davranışlar gerçekçi biçimde temsil edilebilmektedir (Matasović ve Vucetic, 1993; Hashash vd., 2017). Deepsoil'de gerçekleştirilen bu analizler, zeminlerin deprem koşullarına verdiği tepkilerin yüksek doğrulukla modellenmesine olanak sağlamakla birlikte, eşdeğer doğrusal yaklaşıma kıyasla daha fazla hesaplama gereksinimi duymaktadır (Hashash, 2016).

Bu tez çalışmasında, literatürde yaygın olarak tercih edildiği üzere on bir farklı deprem ivme kaydı kullanılarak analizler gerçekleştirilmiş ve tek boyutlu zemin davranışı ilk aşamada zaman tanım alanında doğrusal olmayan (NL) yaklaşımla incelenmiştir. Deepsoil yazılımında doğrusal olmayan analizlerin yalnızca zaman tanım alanında yapılması nedeniyle, çözüm doğruluğunu sağlamak için maksimum frekans değerinin 30 Hz'in altına düşmemesi önerilmektedir (Hashash, 2016). Bu koşulun sağlanabilmesi amacıyla, özellikle derin zemin profillerinde tabakalar yeterince küçük kalınlıklar halinde tanımlanmış ve böylece yüksek frekanslı bileşenlerin doğru şekilde temsil edilmesi hedeflenmiştir. Uygun tabakalama ve zaman adımı seçimi, çözümün kararlılığı ve analiz doğruluğu açısından kritik öneme sahiptir (Kramer, 1996).

$$f = \frac{Vs}{4H} \tag{5.1}$$

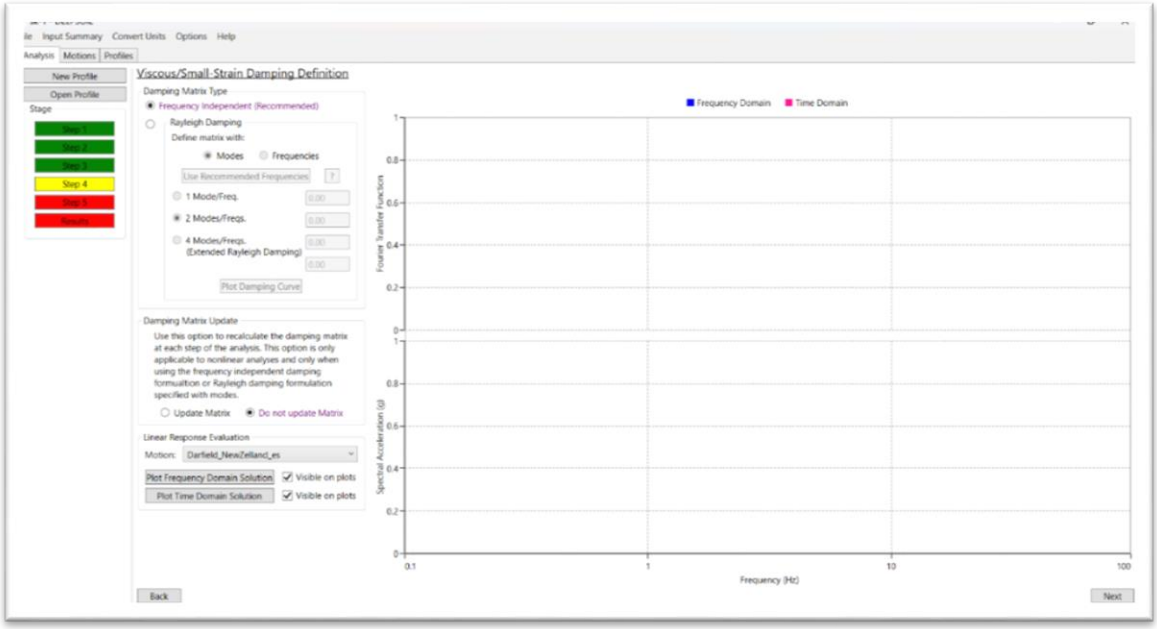
Eşitlikte kullanılan semboller aşağıda tanımlanmıştır;

Vs = Kayma Dalgası Hızı

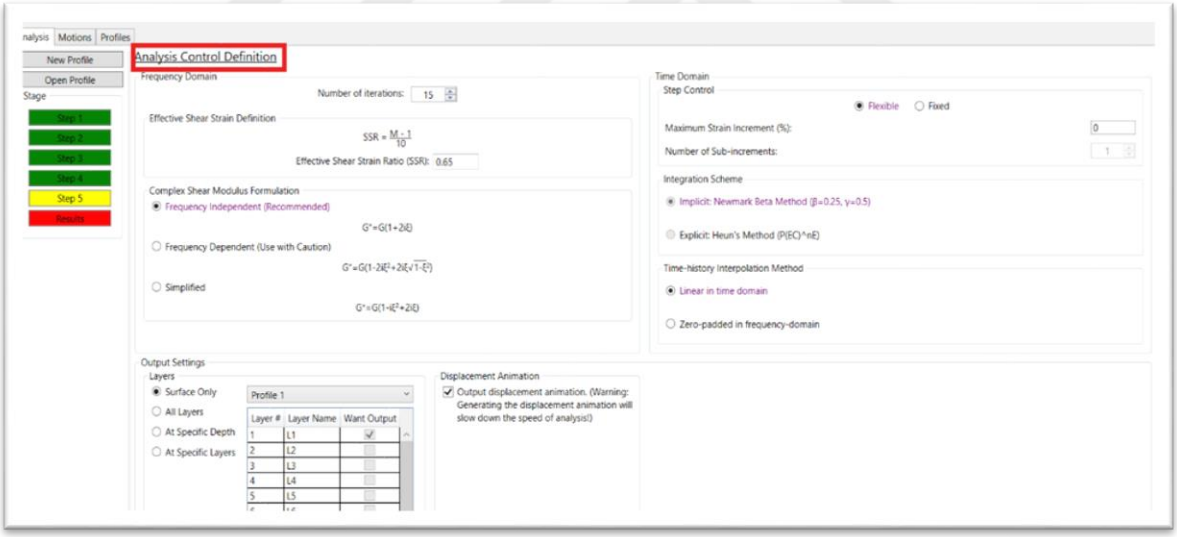
H = Tabaka Kalınlığı

Doğrusal olmayan (NL) analizlerde, anakaya özellikleri tanımlanırken genellikle elastik anakaya varsayımı ile hareket edilir ve bu tanımlamalar tamamlandıktan sonra analiz akışında diğer bir adıma geçilir. Daha sonrasında frekans alanında yapılan doğrusal ve eşdeğer doğrusal analizlerde bulunmayan adım kritik bir rol oynamaktadır ki bu; viskoz sönümleme matrisinin tanımlanmasıdır (Şekil 5.4). Kullanıcı, bu matrisi iki temel yaklaşımdan birini seçerek belirleyebilir: program tarafından önerilen frekanstan bağımsız sönümleme formülasyonu veya klasik Rayleigh sönümlemesi (Hashash, 2016). Bu seçim, zemin-yapı sistemindeki enerji dağılımının modelleme hassasiyetini doğrudan etkilemektedir.

Doğrusal olmayan (NL) analizlerde bir sonraki aşama, zaman tanım alanında çözümün kararlılığı ve doğruluğu açısından kritik olan adım kontrol parametrelerinin tanımlanmasıdır (Şekil 5.5). Bu bölümde gerilme artışının uygulanma biçimi belirlenir; maksimum gerilme artışı için çoğunlukla program tarafından önerilen %0,005 değerine sahip flexible seçeneği kullanılmaktadır (Hashash, 2016). Gerilme artışının kaç adımda gerçekleştirileceğini tanımlayan fixed parametresi de bu aşamada ayarlanır. Flexible seçeneği aktif olduğunda ara değerler doğrusal enterpolasyon yöntemiyle hesaplanır. Tüm kontrol parametreleri ve analiz yapılacak zemin tabakaları tanımlandıktan sonra doğrusal olmayan dinamik analiz başlatılır (Hashash, 2016).



Şekil 5.4. Deepsoil'e viskoz sönümleme matrisinin girilmesi



Şekil 5.5. Deepsoil programına analiz kontrol parametrelerinin girilmesi

Doğrusal olmayan (NL) analizlerin tamamlanmasının ardından, her bir zemin tabakası ve deprem kaydı için elde edilen sonuçlar grafiksel olarak sunulmaktadır (Hashash, 2016). Deepsoil yazılımı, zaman tanım alanında gerçekleştirilen NL analizlerin güvenilirliğinin değerlendirilmesi amacıyla sonuçların eşdeğer doğrusal (EL) analiz çıktıları ile birlikte verilmesini önermektedir. Bu karşılaştırma, zemin davranışındaki farklılıkların

ortaya konulması açısından önem taşımaktadır (Phillips vd., 2011). Analiz sonucunda elde edilen sayısal çıktılar, değerlendirme ve raporlama amacıyla elektronik tablo ortamına aktarılabilmektedir.

5.2. Deprem Verilerinin Seçimi ve Ölçek Uyarlaması

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018), deprem etkisine dayanıklı yapı tasarımında kullanılacak ivme kayıtlarının belirlenmesi için çeşitli kriterler tanımlamaktadır. Yönetmelik, seçilecek kayıtların tasarımda esas alınan kuvvetli yer hareketi düzeyine uygun olmasını ve bu uyumun sağlanmasında deprem büyüklüğü, fay uzaklığı, kaynak mekanizması ve yerel zemin özelliklerinin temel faktörler olarak dikkate alınmasını öngörmektedir. Bu nedenle jeoteknik deprem mühendisliği çalışmalarında, sentetik kayıt oluşturmak yerine eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerde gerçek deprem kayıtlarının kullanılması tercih edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan ivme kayıtlarından biri, dünya genelinde aktif deprem kuşaklarından elde edilen verileri içeren Pacific Earthquake Engineering Research Center'ın (PEER) Ground Motion Database veri tabanından temin edilmiştir. PEER veri tabanı, deprem istasyonlarında kaydedilmiş ivme, hız ve yer değiştirme kayıtlarını kullanıcılara dosya formatında sunarak geniş bir erişim olanağı sağlamaktadır.

Bu tez kapsamında PEER veri tabanındaki deprem kayıtları, sismik tehlike, zemin özellikleri, fay mekanizması ve deprem büyüklüğü gibi ölçütler dikkate alınarak seçilmiştir. Analizlerde kullanılan kayıtlar, $M_W > 6.0$ büyüklüğünde ve doğrultu atımlı faylar üzerinde gerçekleşmiş depremlere aittir. İncelenen bölgenin zemin özellikleri ile sismik tehlike durumu (V_{S30} = 360–760 m/s, fay uzaklığı ≈ 0–40 km) göz önüne alınarak, bu koşullara yakın karakteristiklere sahip farklı istasyonların ivme kayıtları seçilmiş ve analiz setine dahil edilmiştir.

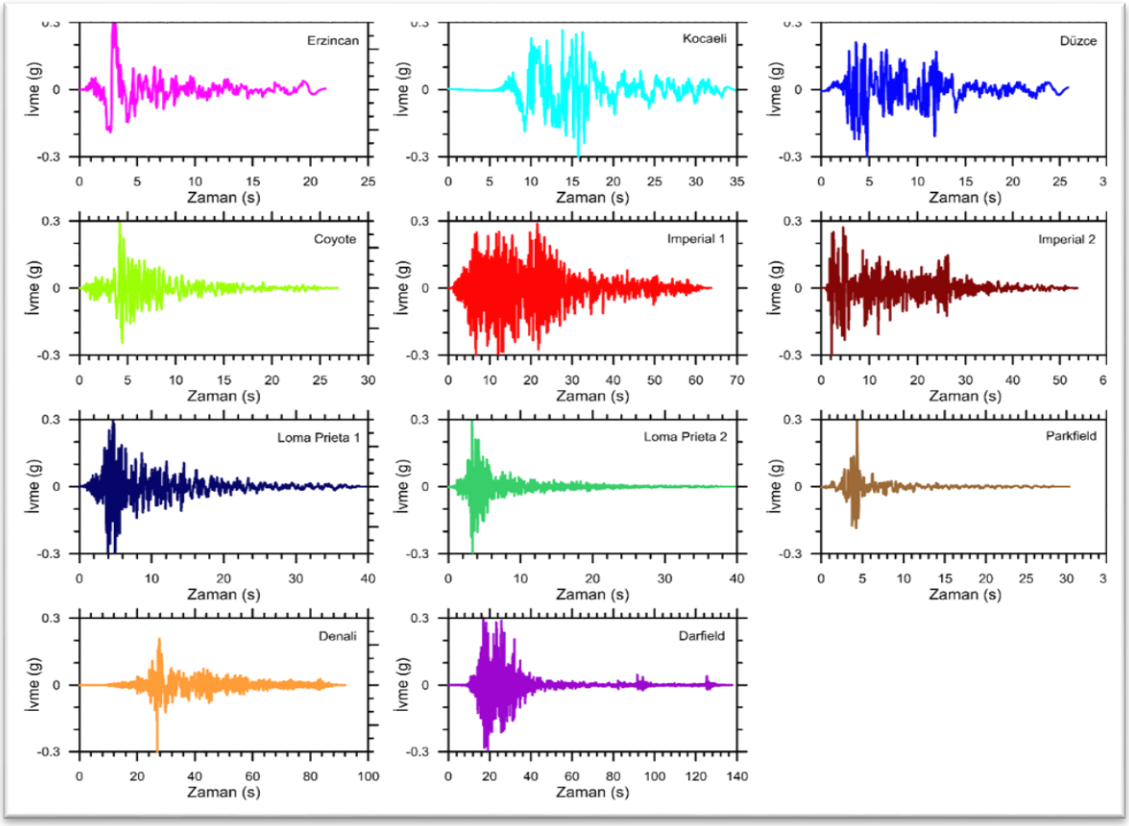
Bu seçilen kayıtların detaylı listesi, ilgili özellikleriyle birlikte Çizelge 5.1'de sunulmuştur.

Çizelge 5.1. Tez çalışmasında kullanılan yer hareketi verileri (PEER, 2006).

Depremin Adı	Gerçekleşme Yılı	Kayıt İstasyonu	Moment Büyüklüğü (Mw)	Fay Türü
Denali Alaska	2002	TAPS Pump-10	7.9	Doğrultu Atımlı
Kocaeli (Yarımca)	1999	Yarımca	7.2	Doğrultu Atımlı
Düzce	1999	Düzce-Merkez	7.14	Doğrultu Atımlı
Erzincan	1992	Merkez	6.69	Doğrultu Atımlı
Imperial Valley I	1979	Calipatria Fire	6.5	Doğrultu Atımlı
Imperial Valley II	1940	El Centro Array-9	6.9	Doğrultu Atımlı
Loma Prieta I	1989	Gilroy Array 3	6.9	Doğrultu Atımlı
LomaPrieta II	1989	Gilroy Array 4	6.9	Doğrultu Atımlı
Parkfield	1966	Benioff	6.1	Doğrultu Atımlı
Darfield New Zelland	2010	DSLC	7	Doğrultu Atımlı
Coyote Lake	1979	SJB Overpass	5.7	Doğrultu Atımlı

Çalışma kapsamında kullanılan programın 7.1 yazılım versiyonu kullanılarak eşdeğer doğrusal yaklaşım (Equivalent Lineer Method) ve doğrusal olmayan (non-lineer) yaklaşım prensibi temelinde zemin tepki analizleri gerçekleştirilmiştir (Hashash, 2016). Bu analizler, 17 farklı sondaj profilinde 11 adet birbirinden ayrı şiddetli yer hareketinin verileri kullanılarak yürütülmüş ve toplamda 187 adet analiz tamamlanmıştır. Analizler öncesinde, çalışma alanı sınırları içinde yer alan İnönü'ye ait Pik Yer İvmesi (PGA) değerlerinin AFAD Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulamasında 0.251-0.33 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Bu gözlemden hareketle, analizlerde kullanılacak deprem kayıtları, bölgenin sismik tehlikesiyle uyumlu olacak şekilde PGA = 0.3 seviyesine ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ndeki DD2 yer hareketi düzeyi esas alınarak ölçeklendirilmiştir. Ölçeklendirilmiş bu kayıtlar kullanılarak nihai zemin tepki analizleri

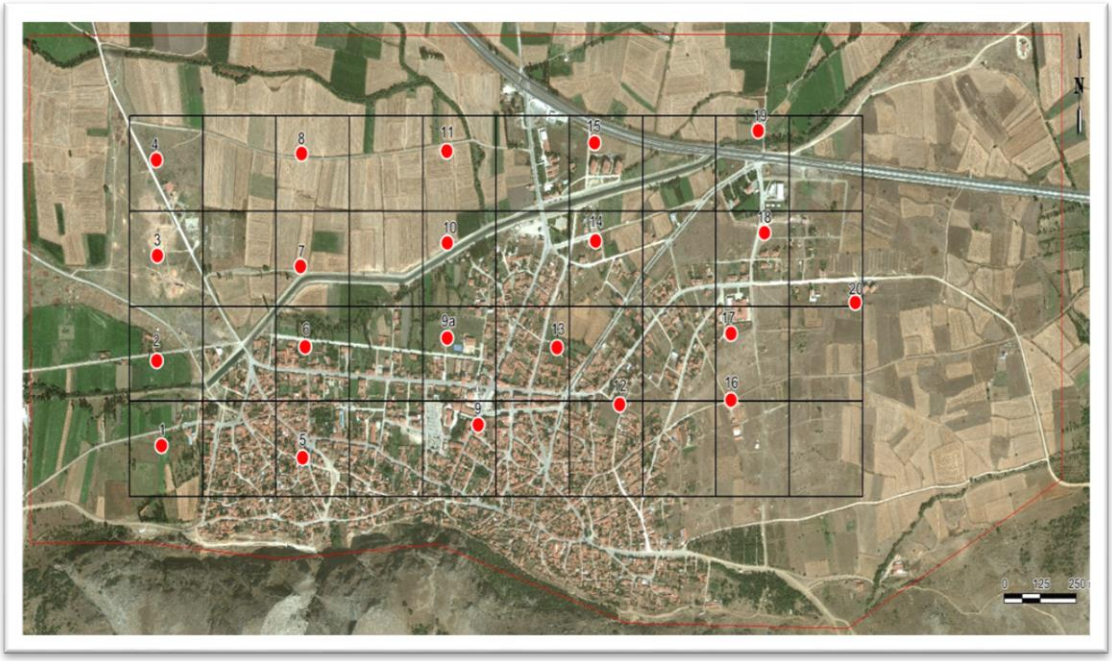
gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kullanılan ölçeklendirilmiş deprem verileri Şekil 5.6'da sunulmaktadır.



Şekil 5.6. EL ve NL analizlerde kullanılan PGA=0.3 g olarak ölçekli deprem kayıtları

5.3. Sondaj Lokasyonlarının Alanlara Göre Ayrımı

Çalışma bölgesi, sınırlar içerisinde yer alan 30 m derinliğe sahip 17 sondaj ile sondajlara yakın lokasyonlarda gerçekleştirilen MASW çalışmalarının konumları dikkate alınarak belirlenmiştir. Proje kapsamında sondaj noktaları, jeolojik koşullar göz önünde bulundurularak başlangıçta 250 m × 250 m karelaj esasına göre planlanmış; ancak bütçe kısıtları nedeniyle bu karelaj korunarak kuzey–güney doğrultusunda 250 m, doğu–batı doğrultusunda ise 500 m aralıklarla uygulanmıştır. Karelaj esasına göre sondaj dağılımları ise Şekil 5.7'de sunulmaktadır. Bazı çalışmalarda zeminin sismik davranışı, mevcut veriler kullanılarak belirlenen grid hücreleri bazında değerlendirilmektedir.



Şekil 5.7. Zemin davranışın analiz çalışmaları kapsamında çalışma alanının hücrelere ayrılması

5.4. Çalışmada Kullanılan Sondajların Zemin Özellikleri

Eskişehir il merkezine yaklaşık 33 km mesafede, Bursa-Kütahya karayolu üzerinde konumlanan İnönü ilçesi, bu incelemenin odak noktasını oluşturmaktadır. Çalışma kapsamında kullanılan veriler, Türköz vd. (2013) tarafından ESOGÜ BAP projesi dahilinde gerçekleştirilen 17 adet sondaj kuyusundan ve bu lokasyonlarda yürütülen Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi (MASW) yönteminden elde edilen sismik bulgulara dayanmaktadır. Sondaj verileri ışığında yapılan litolojik değerlendirmeler, inceleme alanının baskın olarak "alüvyon" birimlerinden oluştuğunu göstermektedir. Bu zemin yapısı, stratigrafik olarak üst kesimlerde ince taneli, derinlere doğru ise iri taneli malzemelerin hakim olduğu bir dizilim sunmaktadır. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne göre sahada; yüksek ve düşük plastisiteli kil-silt (CH, MH, CL, ML) katmanları ile killi-siltli kum (SC, SM, SP) ve yer yer killi-siltli çakıl (GC, GM) birimleri tanımlanmıştır. Alüvyonun genel bileşimi incelendiğinde, malzemenin ortalama %60'ının ince taneli (silt-kil), %33'ünün kum ve %7'sinin çakıldan meydana geldiği saptanmıştır. Ayrıca alüvyon kalınlığının Sarısu Çayı

civarında artış gösterdiği, kuzey-güney doğrultusunda ise tedrici bir azalma sergilediği tespit edilmiştir.

Zeminin indeks özelliklerine bakıldığında, tabakaların kıvam karakteristiklerinin geniş bir aralıkta değişim gösterdiği anlaşılmaktadır. Laboratuvar analizleri sonucunda likit limit (LL) değerlerinin %25-%83 arasında farklılık gösterdiği ve ortalama %57 seviyesinde olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde, plastisite indeksi (PI) değerleri %6 ile %59 arasında farklılık gösterse de genel ortalamanın %30 civarında olduğu görülmektedir. Bu veriler plastisite diyagramına aktarıldığında, numunelerin ağırlıklı olarak A-hattının üzerinde ve %50 likit limit sınırının sağ tarafında konumlandığı, dolayısıyla sahanın temel olarak yüksek plastisiteli kil-silt karakterli zeminlerden oluştuğu sonucuna varılmaktadır.

Bölgenin hidrojeolojik yapısı incelendiğinde, yeraltı suyu seviyesinin yüzeye oldukça yakın olduğu ve 0.5 m ile 1.5 m derinlikler arasında seyrettiği gözlemlenmiştir. Su seviyesinin kuzey yönüne doğru gidildikçe derinleştiği, sahanın güneydoğu kesimindeki kaya birimlerinde ise topografyaya bağlı olarak yüzeysel su akışlarının mevcut olduğu saptanmıştır (Türköz vd., 2013).

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

6.1. Eşdeğer Doğrusal Tepki Analizinin Bulguları

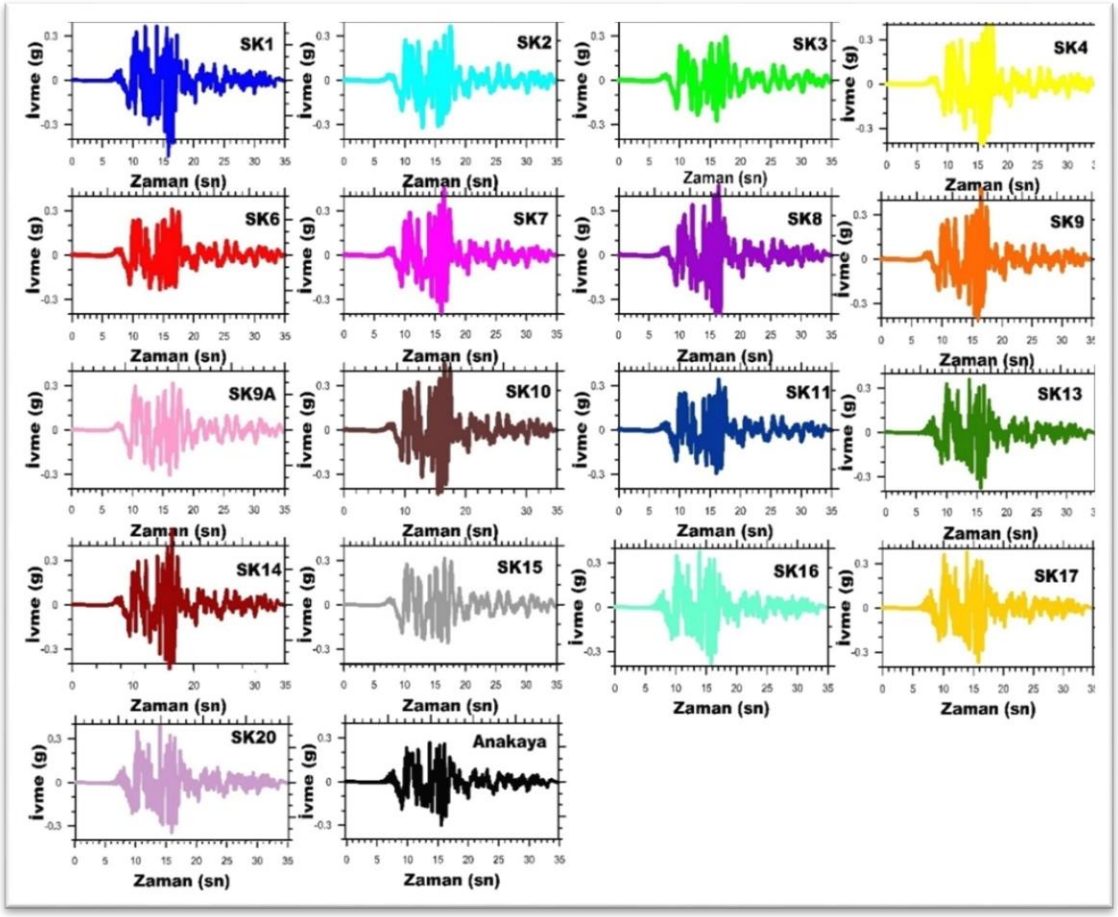
6.1.1. Yüzeyde oluşan maksimum ivme büyüklükleri

İnönü/Eskişehir bölgesindeki farklı sondaj noktalarında ve referans bir anakaya noktasında, seçilen farklı deprem kayıtları (Kocaeli Yarımca, Denali Alaska, Coyote, Darfield Yeni Zelanda, vd.) kullanılarak zemin tepki analizleri yapılmıştır. Eşdeğer doğrusal analiz çalışmaları sonucunda zemin büyütme analizlerinin temel çıktısı İvme Zaman Serilerini (ACC Time Histories) grafikleri oluşturulmuştur. Her bir grafik grubu (bir deprem kaydına ait veri seti), ilgili depremin anakaya seviyesinde tanımlanması sonucunda, zemin profili boyunca (SK1, SK2 gibi) meydana gelen yer hareketi tepkilerini ortaya koymaktadır.

Çalışma alanında ilk aşamada, 1999 Kocaeli depremine ait Yarımca istasyonu kaydı kullanılarak 17 farklı sondaj lokasyonu için ayrı ayrı analizler gerçekleştirilmiş ve bu analizlerden elde edilen ivme–zaman eğrileri Şekil 6.1'de sunulmuştur. Söz konusu kayıt kullanılarak yapılan eşdeğer doğrusal analizlerin ayrıntılı değerlendirilmesi sonucunda, SK1 ve SK14 numaralı sondajlarda pik ivme değerlerinin yaklaşık 15. saniye civarında 0.45 g mertebesine ulaştığı görülmüştür. SK8 ve SK9 sondajlarında ise 0.5 g pik ivmelere 17 sn'de ulaştığı gözlemlenmiştir. Tüm sondaj noktalarında anakayadan yüzeye doğru genel olarak ivme genliklerinde artış gözlenmiştir. Anakaya kaydı ile karşılaştırıldığında, özellikle 10-15.saniye arasındaki güçlü hareket süresi (strong motion duration) boyunca tepe ivme değerleri (PGA) önemli ölçüde büyümüştür. SK4, SK7 ve SK10 sondajlarında pik ivmelerin yaklaşık 0.4 g seviyelerine 16 sn'de ulaştığı görülmektedir. Anakaya seviyesinde kaydedilen maksimum ivme değerinin yaklaşık 0.30 g olduğu, zemin tabakaları boyunca yüzeye doğru

çıkıldıkça bu değerin bahsedildiği gibi bazı sondaj noktalarında 0.35-0.5 g aralığına yükseldiği gözlemlenmiştir.

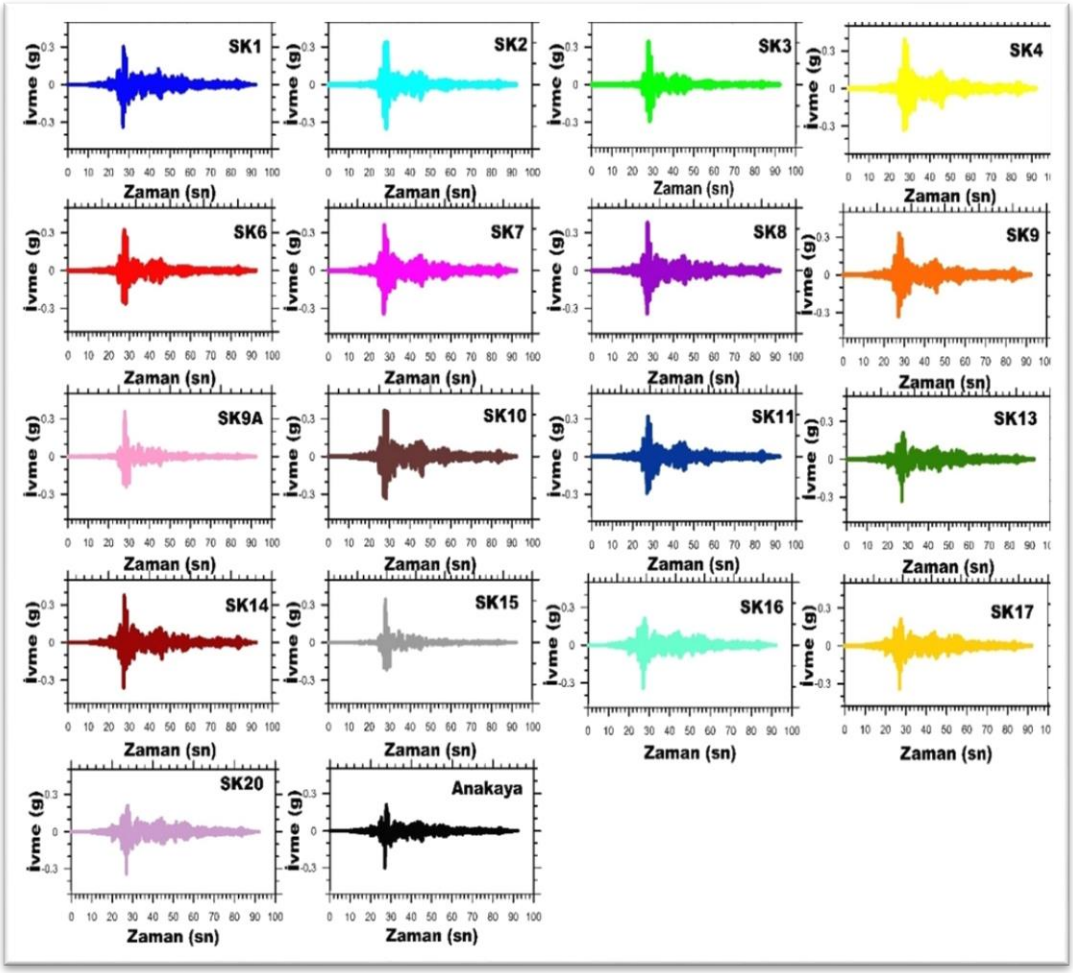
Burada, bölgedeki yerel zemin etkilerinin bir yansımasını görmekteyiz. Bu durum, zemin tabakalarının deprem dalgalarını belirli oranlarda büyüttüğünü ve bazı sondajlarda yüzeydeki ivme değerlerinin anakaya seviyesine kıyasla yaklaşık olarak 1.5 kat arttığını göstermektedir.



Şekil 6.1. Kocaeli 1999 Yarımca deprem verisine göre eşdeğer doğrusal analiz sonucu elde edilen ivme-zaman grafikleri

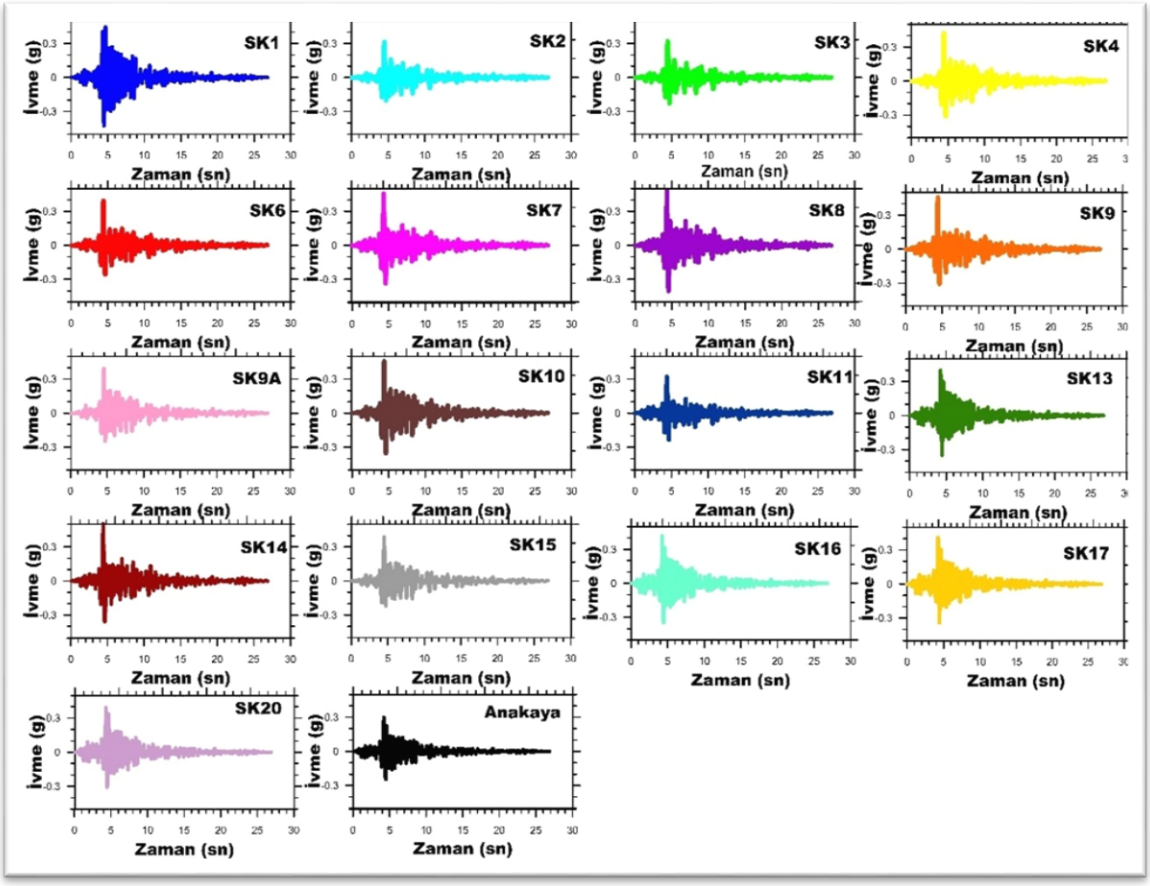
Analizlerde ikinci deprem verisi olarak Denali Alaska 2002 istasyonuna ait veri kullanılarak gerçekleştirilen analizler sonucunda çalışma alanındaki 17 sondaj için

oluşturulan ivme zaman grafikleri Şekil 6.2.'de verilmiştir. Bu deprem kaydı diğerlerine göre daha uzun bir zaman eksenine sahiptir (yaklaşık 100 saniye). Anakaya kaydının genliği nispeten düşüktür. Anakaya düzeyinde ivme genliği yaklaşık 0.25 g civarındadır. Zemin tabakalarının sönüm ve rijitlik özelliklerine bağlı olarak ivme genlikleri yüzeye doğru artış göstermiştir. Yumuşak zemin tabakaları, anakaya genliğini belirgin şekilde arttırmıştır. SK13, SK16, SK17 ve SK20 sondajlarında yüzey ivmesi anakayaya yakın davranış göstermiştir. Diğer sondaj noktalarında ise 0.35-0.4 g aralığında ivme değerleri elde edilmiştir.



Şekil 6.2. Denali (2002) depremi için eşdeğer doğrusal analiz sonrası ivme-zaman grafikleri

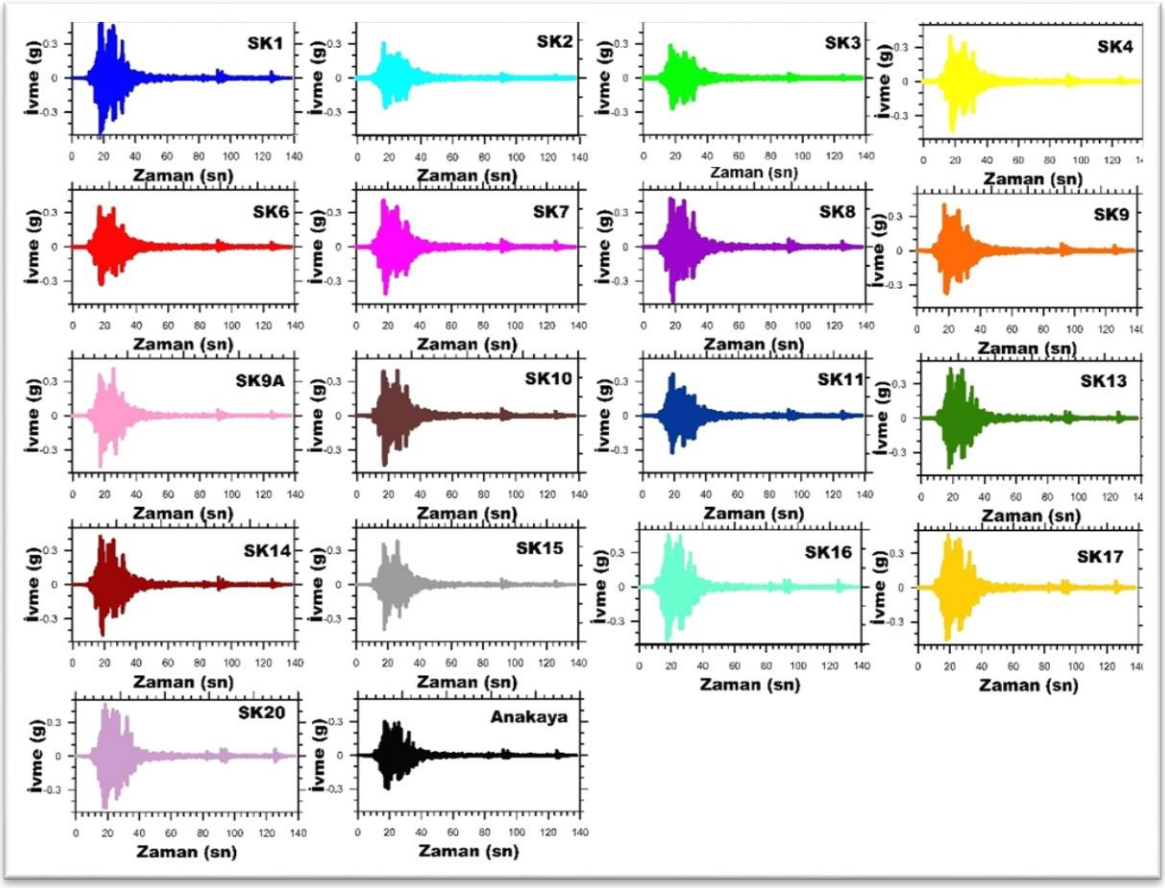
Analizlerde üçüncü deprem verisi olarak Coyote Lake 1979 istasyonuna ait veri kullanılarak gerçekleştirilen analizler sonucunda çalışma alanındaki 17 sondaj için oluşturulan ivme zaman grafikleri Şekil 6.3.'te gösterilmiştir. Sondaj noktalarındaki kayıtlara bakıldığında pik ivmenin 5.saniye civarlarında meydana geldiği gözlemlenmektedir. Grafikler incelendiğinde SK2, SK3, SK9A, SK11 sondajlarında pik ivmelerin 0.35 g; SK1 ve SK16 sondajlarında ise pik ivmelerin 0.4 g değerlerine ulaştığı belirlenmiştir.SK8, SK9 ve SK14 sondajlarında maksimum pik değerleri 0.5 g olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.3. Coyote Lake (1979) depremi için EL tepki analizinden elde edilen ivme-zaman grafikleri

Darfield Yeni Zelanda 2010 depremine ait ivme kaydı analiz sonuçları Şekil 6.4'te gösterilmiştir. Anakaya kaydı, yaklaşık 0.30 g mertebesinde bir pik ivme genliği sergilemektedir. Bu deprem, uzun süreli (140 saniye) bir kayıttır. Çıkan sonuçlar

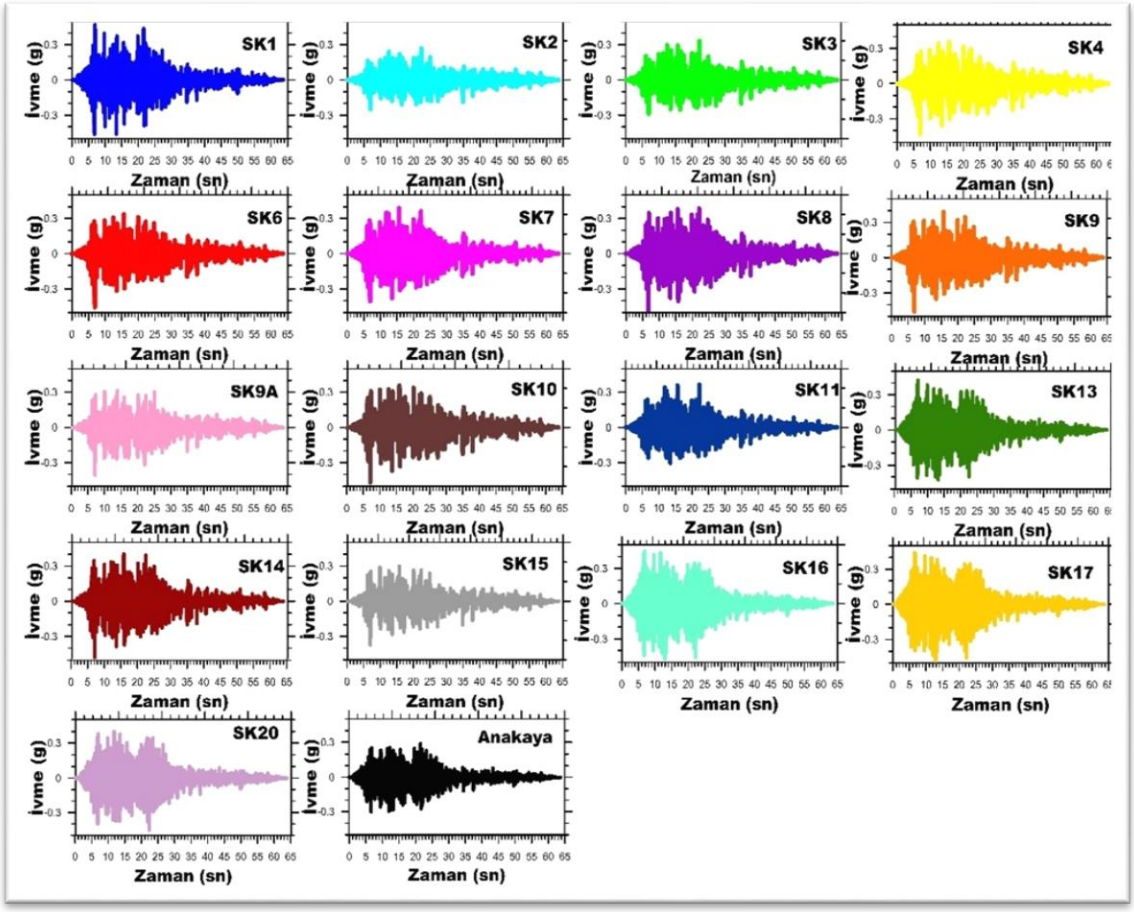
incelendiğinde SK1 ve SK8 sondajları 0.5 g pik ivmelere yaklaşık 18 saniyede ulaşmaktadır.SK10 ve SK13 sondajlarında ise pik ivmelerin 18 saniyede 0.4 g değerlerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Ancak SK2, SK3 ve SK11 gibi sondajlarda anakayaya yakın ivme değerleri elde edilmiştir.



Şekil 6.4. Darfield Yeni Zelanda (2010) depremi için eşdeğer doğrusal tepki analizi sonucu elde edilen ivme-zaman grafikleri

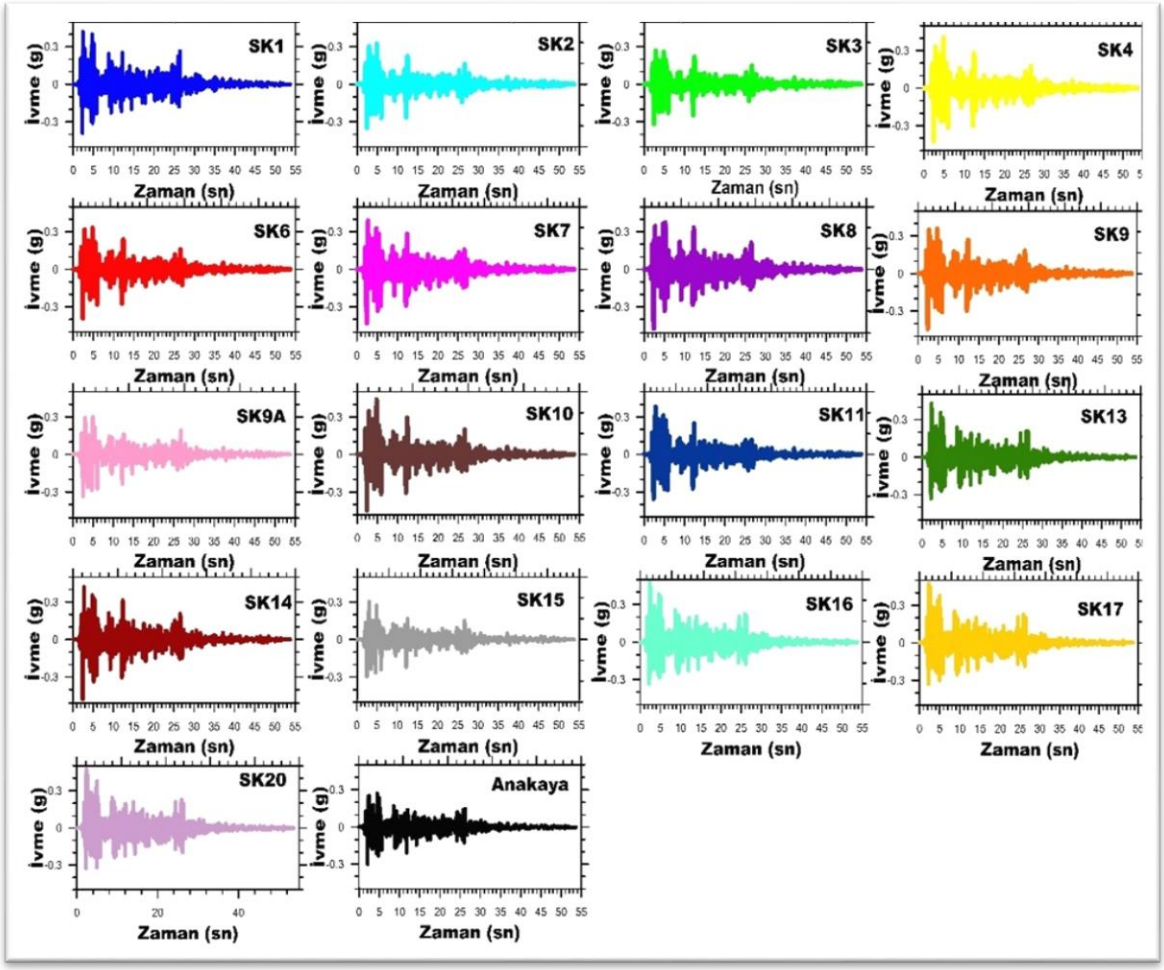
Imperial Valley I (1979) deprem ivme kaydı yaklaşık 65 saniye süren orta-uzun süreli bir yer hareketini temsil etmektedir ve Şekil 6.5'te gösterilmektedir. Tüm sondaj noktalarında ivme genliğinde anakayaya göre belirgin bir artış gözlemlenmektedir. SK2, SK3 ve SK15 sondajlarında pik ivmelerin 0.3-0.33 g aralığında anakaya ivmesine yakın değerler olduğu gözlemlenmektedir. Ancak SK1, SK8 ve SK9'da 5. saniyede 0.5 g

maksimum pik ivmelere ulaştığı görülmektedir. Aynı deprem verisinde farklı pik ivme değerlerinin oluşması yerel zemin etkisinin göstergesidir.



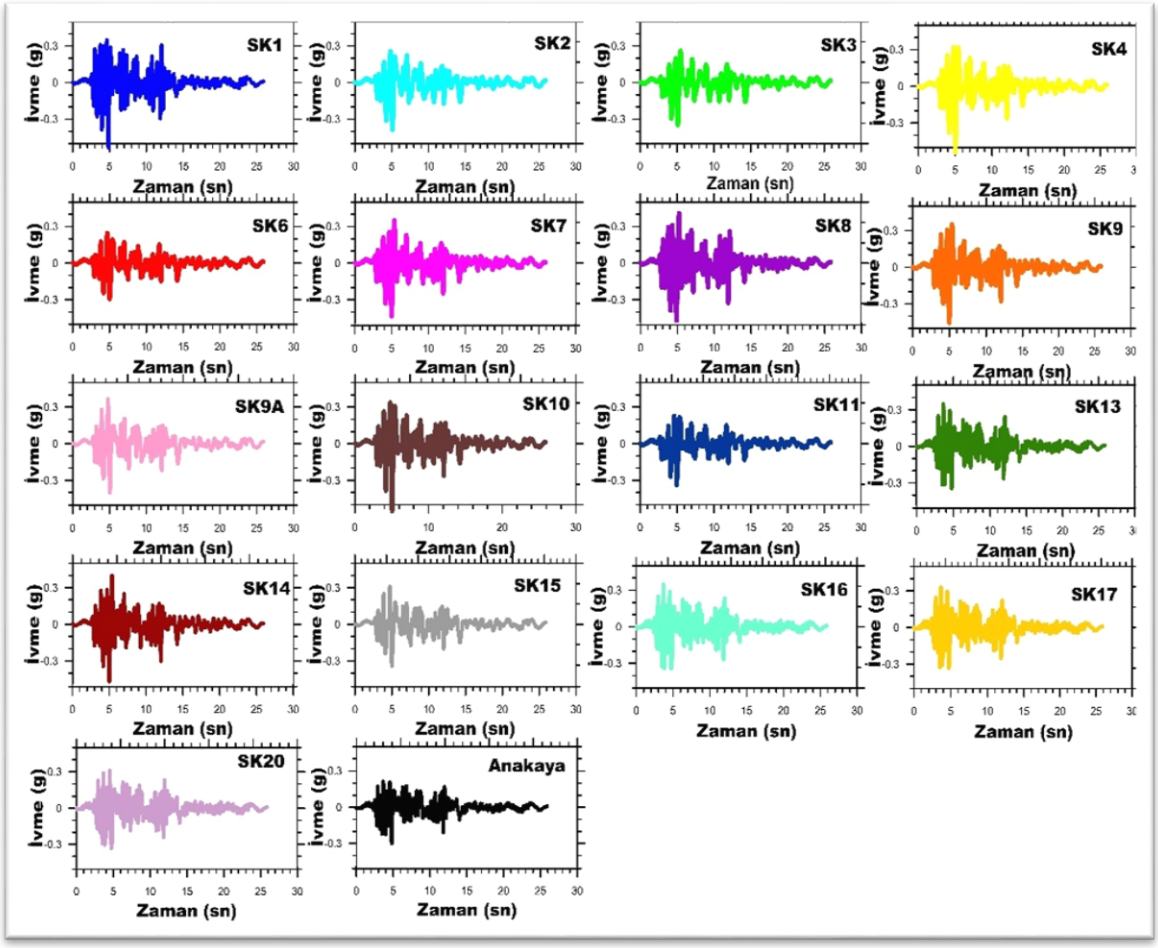
Şekil 6.5. Imperial Valley I (1979) depremi için EL tepki çözümlemesi sonucu ivme - zaman grafikleri

Imperial Valley II (1940) deprem ivme zaman grafiklerine göre bu yaklaşık 55 saniye süren orta-uzun süreli bir yer hareketidir. Güçlü hareket dönemi 5 ile 25 saniye arası yoğundur ve bu süre zarfında zemin tepkisi maksimum genliğe ulaşır. Anakaya grafiği incelendiğinde, tepe ivme değerinin yaklaşık 0.3g civarında olduğu görülmektedir. Imperial Valley 2 deprem verisi kullanılarak yapılan eşdeğer doğrusal analizler sonucunda Şekil 6.6'da sunulan ivme- zaman grafikleri elde edilmiştir. SK16, SK17 ve SK20 sondaj noktalarında maksimum pik ivme değerleri 0.35-0.45g seviyelerine ulaşmaktadır.



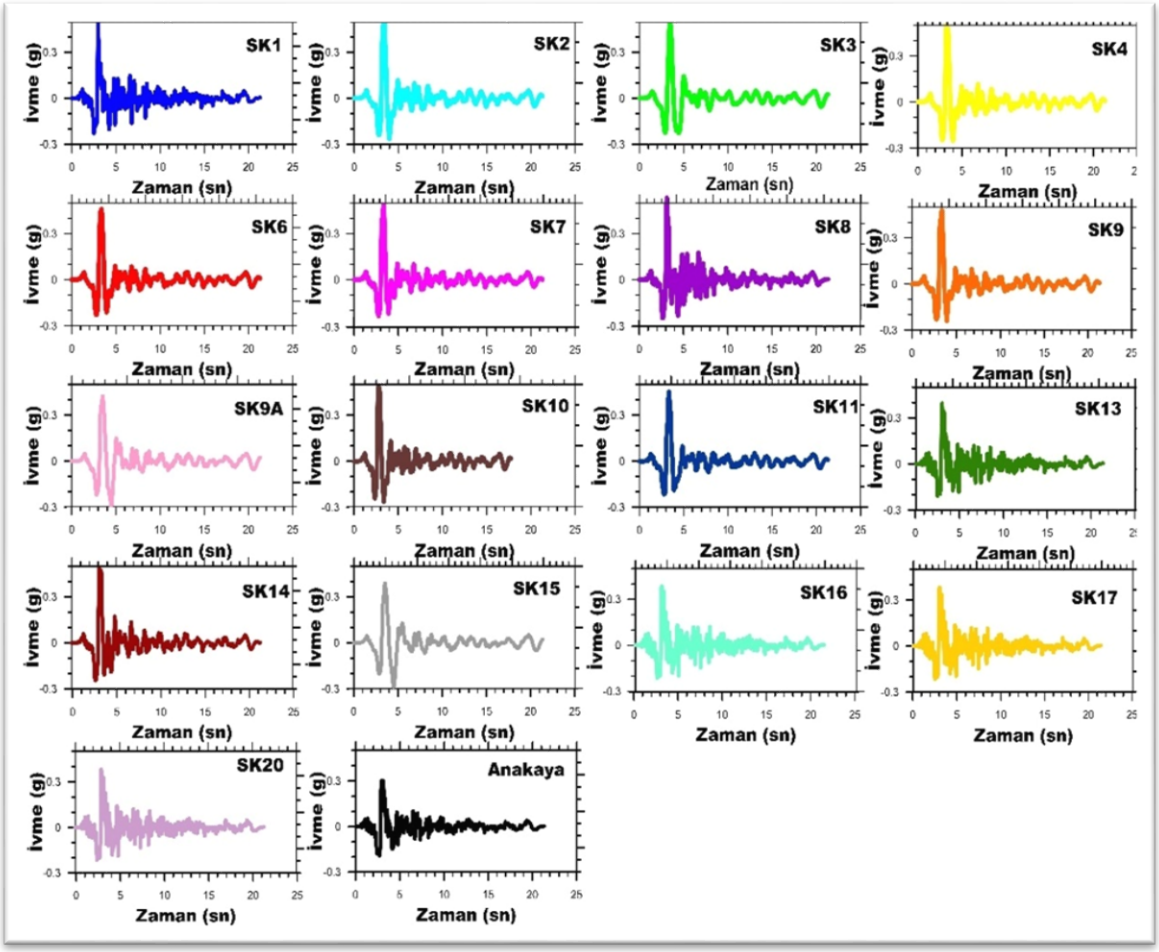
Şekil 6.6. Imperial Valley II (1940) deprem kaydı için eşdeğer doğrusal analiz ivme-zaman grafikleri

Düzce deprem verisi kullanılarak yapılan eşdeğer doğrusal analizler sonucunda ortaya çıkan ivme-zaman grafikleri Şekil 6.7'de gösterilmektedir. Zemin tabakalarına ait tüm sondaj noktalarında, ivme genliğinde anakayaya göre belirgin bir artış gözlemlenmektedir. Deprem kayıtlarına göre güçlü hareketin 5 ile 15. saniyeler arasında gerçekleştiği görülmektedir. Düzce deprem verisi kullanılarak elde edilen ivme-zaman grafikleri detaylı incelendiğinde, yaklaşık 5 sn'de pik ivmeye ulaştığı ve bu değerin SK-1, SK-4, SK-10 noktalarında 0.4 ila 0.5g arasında bir değer olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.



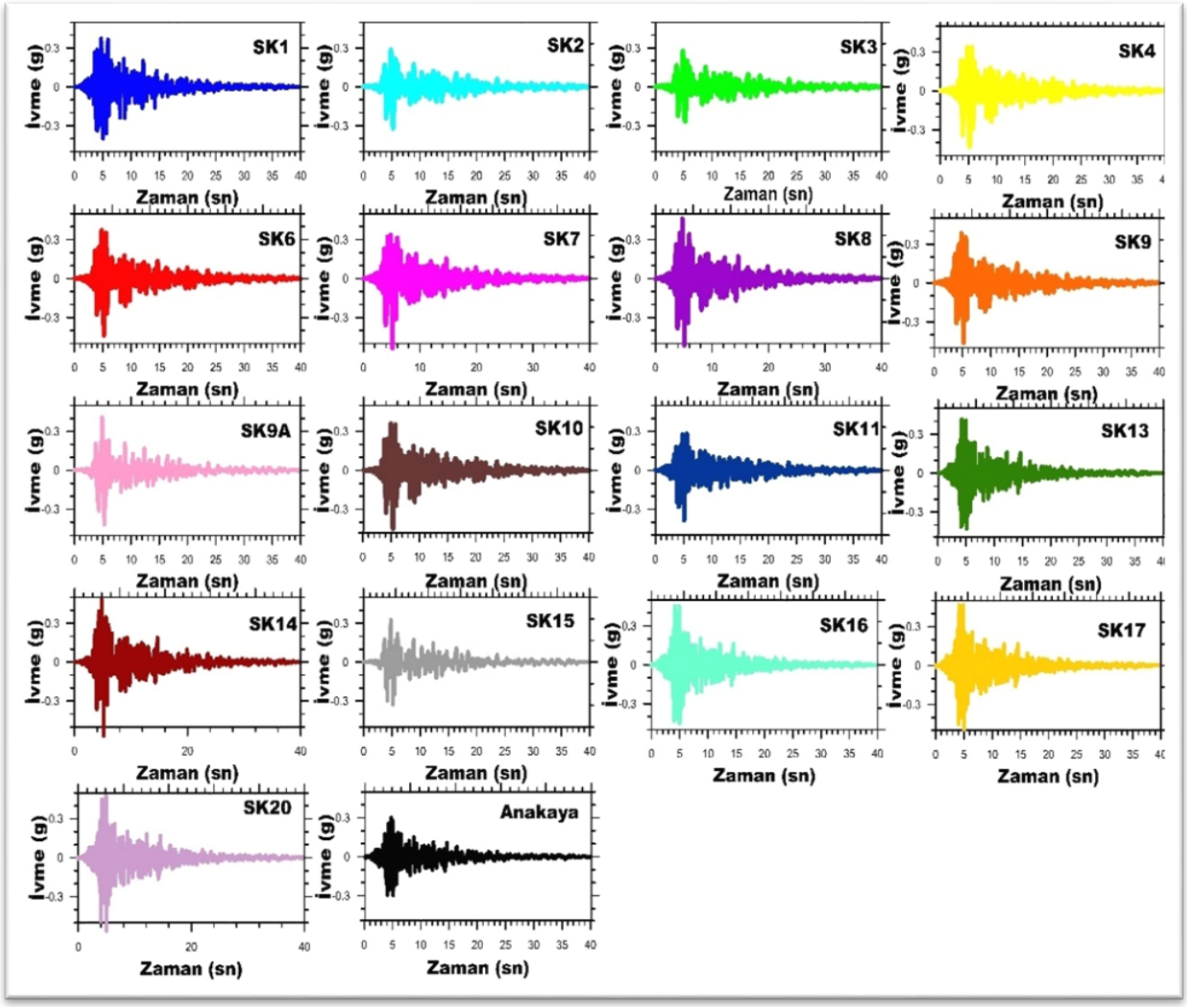
Şekil 6.7. Düzce deprem kaydı için eşdeğer doğrusal yöntem sonucu ivme-zaman grafikleri

Erzincan deprem kaydının İnönü zemin profili üzerindeki ivme zaman serisi (ACC) analiz sonuçları Şekil 6.8'de gösterilmektedir. Bu deprem kaydı, Türkiye'de meydana gelen diğer bir güçlü deprem kaydı olmakla birlikte, yerel sismik tehdidin değerlendirilmesi için önemlidir. Kayıt, yaklaşık 22 saniye sürmekte olup, enerjisinin büyük bir kısmını ilk 5 saniye içinde yoğunlaştırmıştır. Erzincan depremi kullanılarak elde edilen ivme-zaman grafikleri incelendiğinde, pik ivmelerin yaklaşık 3,5 sn' de oluştuğu gözlemlenmiştir. Maksimum pik ivmelerin ise SK13, SK16, SK17 ve SK20 sondajlarında 0.4 g; SK1, SK3, SK7, SK9, SK10, SK14 sondajlarında 0.5 g ve SK2, SK4, SK8 sondajlarında 0,53 g değerlerine ulaştığı belirlenmiştir (Şekil 6.8).



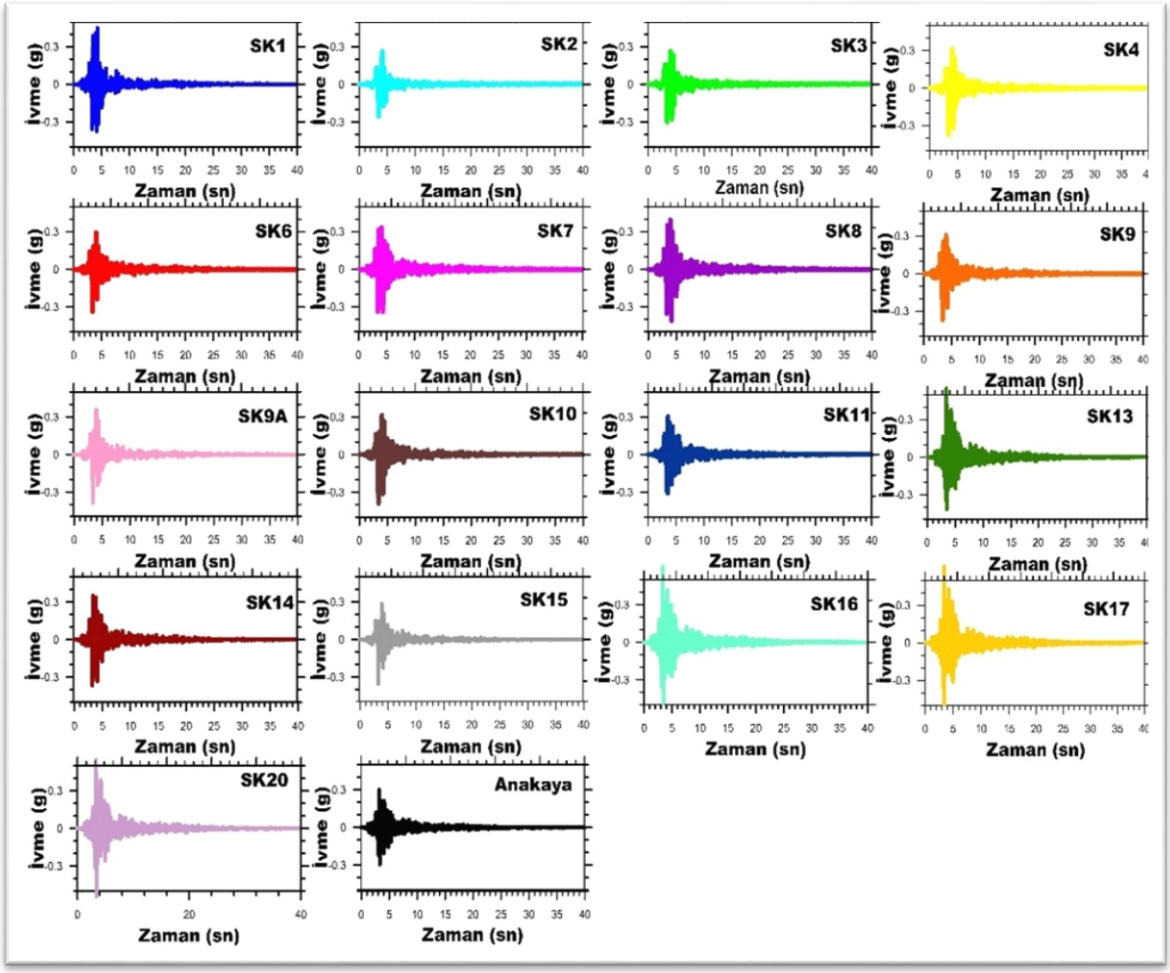
Şekil 6.8. Erzincan depremine ait verilerin EL analizi sonucu ivme-zaman grafik çıktıları

Loma Prieta 1 Depremi Gilroy deprem istasyonuna ait ivme kaydı kullanılarak gerçekleştirilen analizler sonucu elde edilen ivme-zaman grafikleri Şekil 6.9'da sunulmaktadır. Kayıt yaklaşık 35-40 saniye süren yer hareketleridir. Güçlü hareket süresi, ilk 5 saniye içerisinde yoğunlaşmaktadır. Anakayada gerçekleşen ivme değeri 0.3g'dir. Burada maksimum pik ivmelerin SK9, SK14, SK16, SK17 ve SK20 sondaj noktalarında 0.5 g değerlerine ulaştığı görülmektedir.



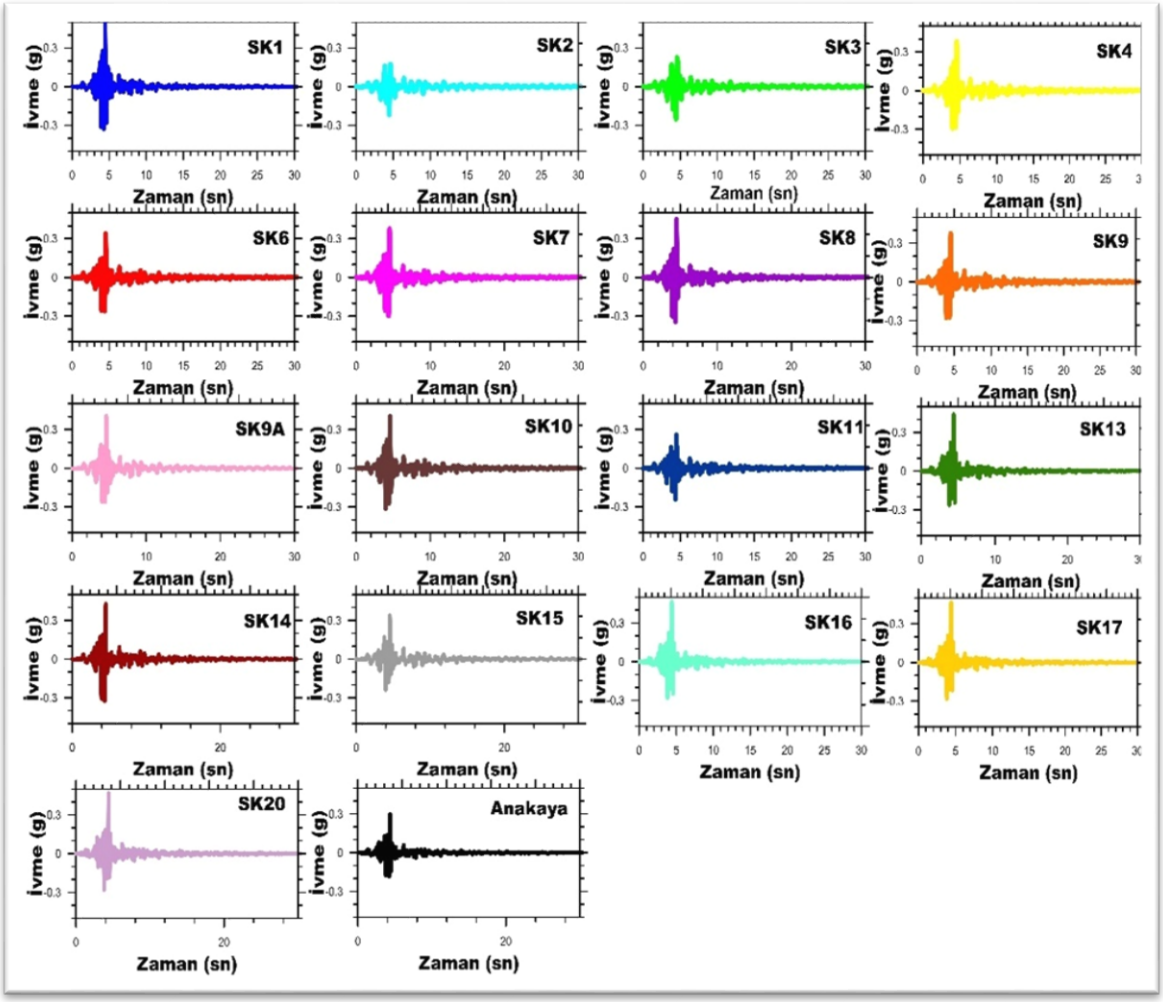
Şekil 6.9. Loma Prieta I (Gilroy istasyonu) deprem verisinin EL analizi ile elde edilen ivme zaman grafikleri

Loma Gilroy II deprem kaydı kullanılarak yapılan eşdeğer doğrusal analizler sonucunda elde edilen ivme-zaman grafikleri Şekil 6.10'da gösterilmiştir. Burada maksimum pik ivmelerin SK13, SK16, SK17 ve SK20 sondaj noktalarında 0.45 g-0.5 g aralığında olduğu görülmektedir. SK8 ve SK9 sondajlarında maksimum pik ivmeler 0.4 g'ye ulaşmaktadır.



Şekil 6.10. Loma Prieta II (Gilroy) depremi için eşdeğer doğrusal tepki çözümlemesi sonrası ivme-zaman grafikleri

1966 Parkfield depremi kaydıyla gerçekleştirilen analizlerden elde edilen sonuçlar Şekil 6.11'de gösterilmiştir. Bu grafikler detaylı incelendiğinde maksimum pik ivmeler SK1, SK16, SK17 ve SK20 sondaj noktalarında yaklaşık 0.5 g'ye ulaşmaktadır.



Şekil 6.11. Parkfield deprem kaydının EL yöntemiyle işlenmesi sonucu ivme-zaman grafikleri

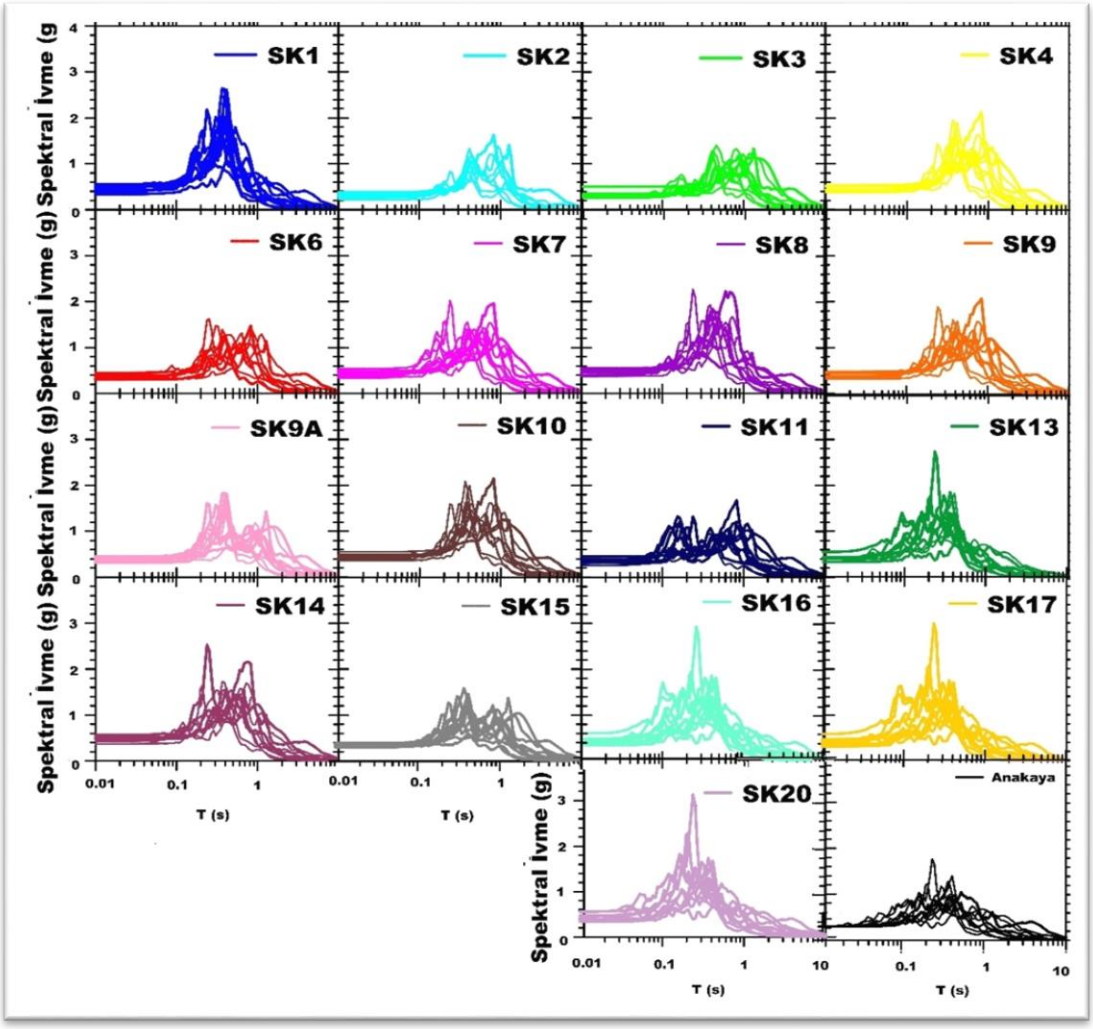
Sonuçlardan elde edilen grafiklere göre genel olarak Acc serilerinde gözlemlenen en önemli bulgu, deprem hareketinin spektral içeriği veya süresi ne olursa olsun, Pik Yer İvmesi (PGA) değerinin anakayadan yüzeye doğru tutarlı bir şekilde artmasıdır. Eşdeğer lineer analizin sonuçları göz önüne alındığında, en büyük pik ivmelerin SK1, SK16, SK17 ve SK20 noktalarında oluştuğu buna karşın anakayaya yakın ivme değerlerinin ise SK2 ve SK3 noktalarında oluştuğu sonucuna varılmıştır. SK1'de SPT-N 13-25 değerleri arasında olması zemin sıkılığının da düşük olduğunu teyit eder ve aynı zamanda SK1'in yüzey katmanında V_S oranı yaklaşık olarak 3.02 olarak hesaplanmıştır. Bu oran, zemin katmanının suya doygun ve gevşek olduğunu gösterir.

SK16, SK17 ve SK20 noktalarında ise SPT-N değerleri diğer sondajlara göre daha yüksektir. Her ne kadar V_{S30} değerleri bu noktaları TBDY 2018'e göre ZB ve ZC sınıfına yerleştirse de özellikle SK16 ve SK17'deki yüzeye yakın düşük V_S değerleri bu zemin profilinde maksimum pik ivme değerlerine ulaşmasını açıklamaktadır.

Deprem kayıtları içerisinde en uzun süren Darfield Yeni Zellanda depremidir. Erzincan deprem kaydının sonuçlarına göre ise SK10 sondajında hareket diğer noktalara göre daha kısa sürmektedir. Bu noktada enerjinin daha hızlı sönümlendiğini söyleyebiliriz ve bu nokta daha rijit zemin tabakalarından oluştuğu sonucuna varabiliriz. Imperial Valley-1 deprem kaydında ise tek bir pik ivmeden ziyade farklı periyotlarda iki veya üç pik ivme değerlerine ulaşabildiği görülmektedir.

6.1.2. Saha Koşullarına Bağlı Tepki Spektrumları

Bu bölümde, çalışma alanı için gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analizler sonucunda davranış spektrumuna ait parametreler belirlenmiş ve Sa–T (Spektral İvme–Periyot) eğrileri oluşturulmuştur. Oluşturulan grafik incelendiğinde (Şekil 6.12) SK16, SK17 ve SK20 sondajlarında yaklaşık 0.3 saniyelerinde 3.2 g olarak elde edilmiştir. SK2, SK3 ve SK15 gibi sondaj noktalarında daha düşük spektral ivme değerleri elde edilmiştir Anakayaya göre spektral ivme değeri yaklaşık 2 kat artmıştır. En düşük spektral pik ivme değeri ise SK3 noktasında, 1.4 g olarak elde edilmiştir. Burası diğer noktalara göre anakayaya hemen hemen daha yakın ivme değerlerine sahip bir davranış göstermiştir. Ayrıca bu değere 0.4-0.5s aralığında ulaşmaktadır.



Şekil 6.12. Eşdeğer doğrusal analiz çalışmalarında 11 farklı deprem verisi kullanılarak elde edilmiş spektral ivme- periyot grafikleri

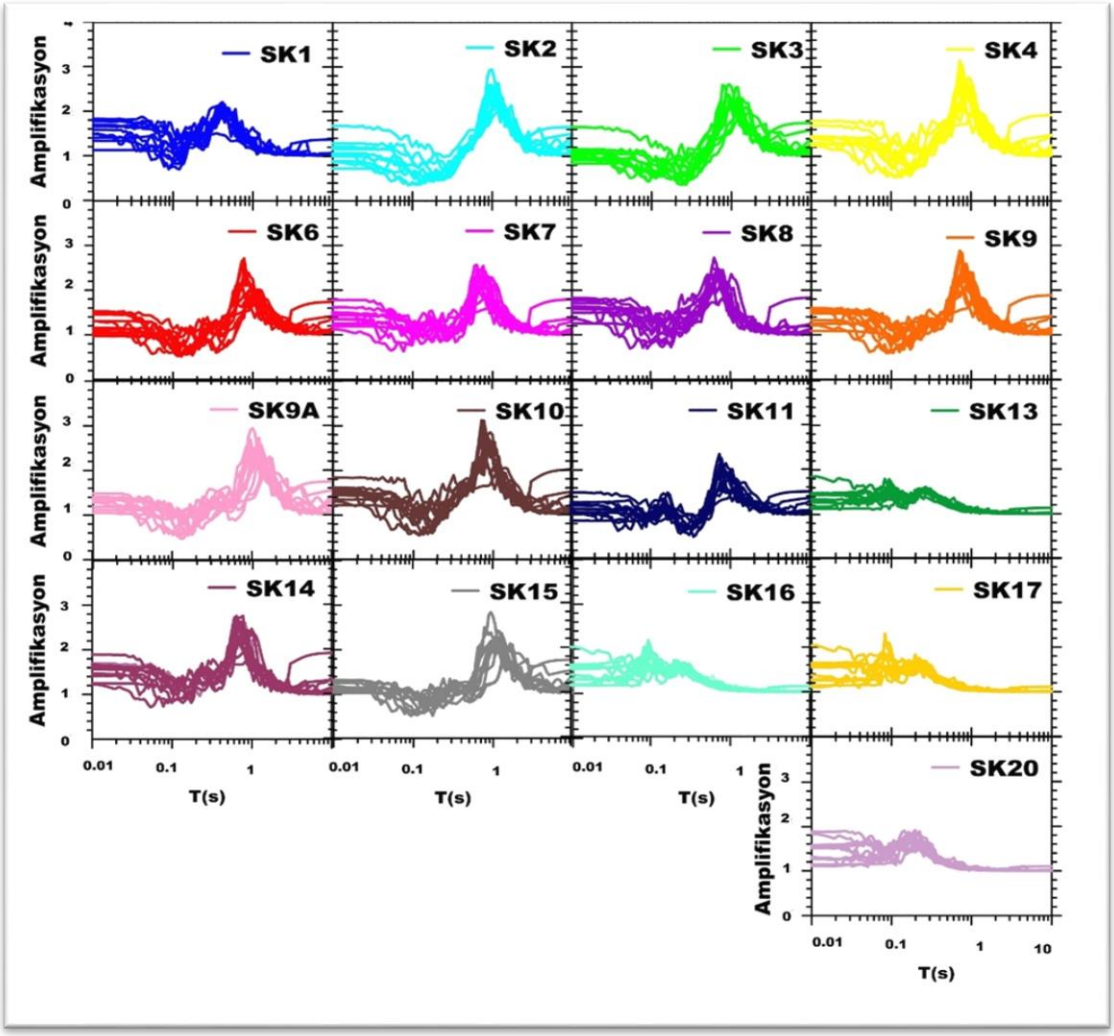
6.1.3. Zemin büyütmesinin (amplifikasyon faktörü) hesaplanan değerleri

Zemin büyütmesi, kuvvetli yer hareketleri sırasında sismik dalgaların anakayadan yüzeye doğru yayılırken genliklerinde meydana gelen artışı ifade etmektedir (Kramer, 1996; Seed ve Idriss, 1982). Bu olgu, özellikle tabakalı ve yumuşak zeminlerde belirginleşerek deprem dalgalarının genliğini ve hâkim titreşim periyotlarını zemin özelliklerine bağlı olarak değiştirebilmektedir. Bu durum, deprem kaynağına uzak bölgelerde dahi yapıların doğal periyotları ile yer hareketinin periyodunun çakışmasına neden olarak yarı-rezonans koşulları oluşturmakta ve önemli yapısal hasarlara yol açabilmektedir (Bard, 1999; Boore, 2004).

Zemin büyütmesi, genellikle amplifikasyon faktörü (zemin büyütme oranı) ile nicel olarak ifade edilir ve deprem sırasında yapılarda oluşabilecek hasar potansiyelini belirleyen temel bir parametredir. Bu oran, zemin yüzeyinde elde edilen tepki spektrumunun anakaya spektrumuna oranlanmasıyla tanımlanmaktadır. Zeminlerin deprem dalgalarına verdiği tepki, dinamik özelliklerine bağlı olup özellikle yumuşak zeminlerde frekansa (periyoda) bağımlı bir davranış sergiler. Yumuşak zeminler belirli periyotlarda dalga genliğini büyütebilirken, bazı periyotlarda sönümleyici etki gösterebilir. En yüksek büyütmenin gözlendiği periyot, zemin tabakalarının kalınlığı ve kayma dalgası hızına bağlı olarak değişmekte olup zeminin hâkim periyodu (T_0) olarak tanımlanır. Bu parametre, yapı–zemin etkileşimi ve rezonans riskinin değerlendirilmesinde kritik öneme sahiptir.

Bu bölümde, İnönü bölgesinde yer alan 17 farklı sondaj noktasından elde edilen zemin profilleri kullanılarak, seçilen 11 farklı anakaya (bedrock) deprem kaydı altında zeminin dinamik tepkisi incelenmiştir. Analizler, genellikle Eşdeğer Doğrusal (Equivalent Lineer) yöntem ile gerçekleştirilmiş olup, elde edilen sonuçlar büyütme faktörü (Amplification Factor) – Periyot (T) grafikleri şeklinde sunulmuştur. Çalışma kapsamında eşdeğer doğrusal analizler sonucunda elde edilen amplifakyon faktörü- periyot grafikleri Şekil 6.13'de sunulmaktadır.

Burada amplifikasyon (büyütme oranı)'ların 2 ve 3 arasında değişiklik gösterdiği, en yüksek büyütme değerlerinin SK4 ve SK10 sondajında yaklaşık 3.2 değerine ulaştığı, en düşük büyütme değerinin ise SK20 sondajında 1.8 olduğu belirlenmiştir (Şekil 6.13).



Şekil 6.13. NL analizlerinde 11 farklı deprem kaydından türetilen büyütme (amplifikasyon) grafikleri

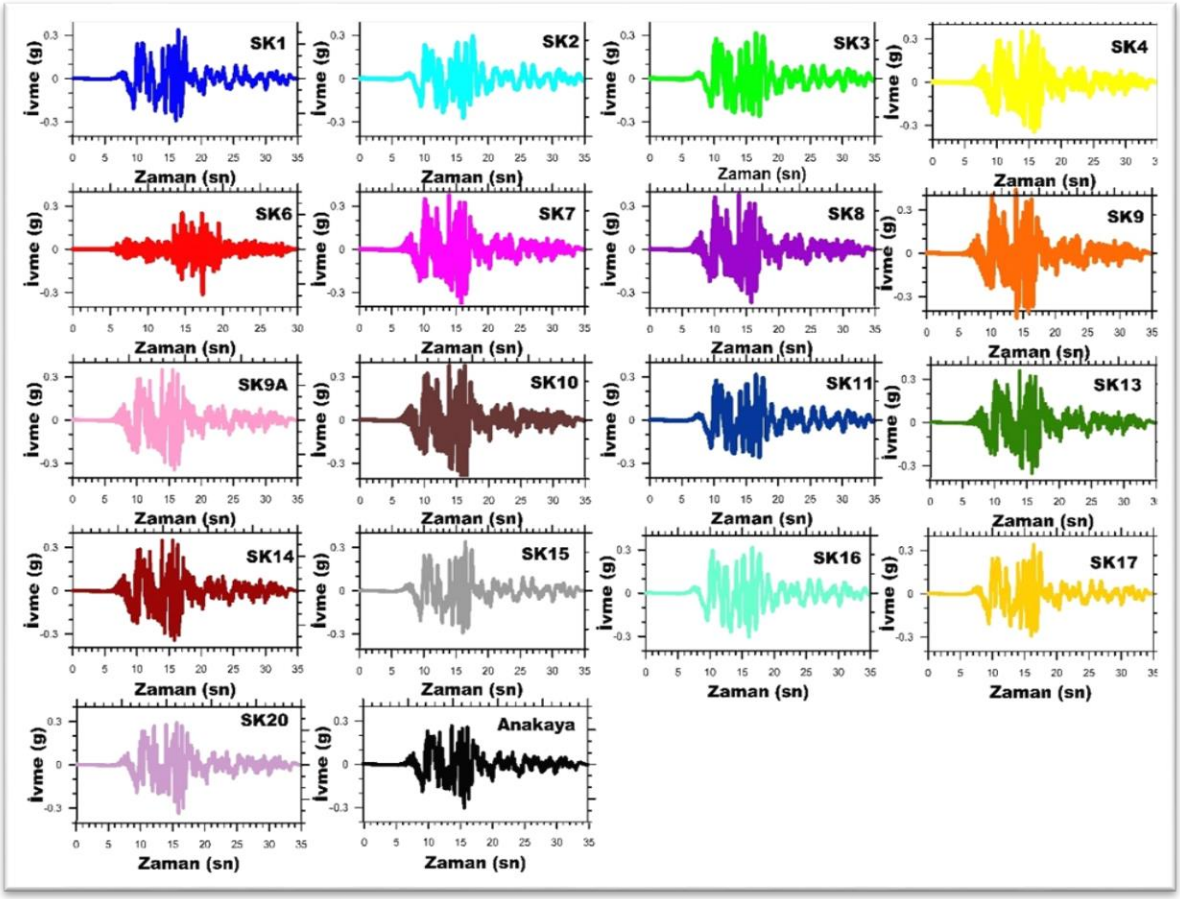
6.2. Doğrusal Olmayan Tepki Analizlerinden Elde Edilen Bulgular

Bu tez kapsamında yürütülen doğrusal olmayan (non-lineer) analizlerde, 11 adet gerçek deprem ivme kaydı kullanılarak 17 farklı sondaj lokasyonu için ayrı ayrı değerlendirmeler yapılmıştır. Analizler, DeepSoil 7.1 yazılımında tanımlanan örnek zemin profili esas alınarak gerçekleştirilmiş olup, her bir sondaj için bu profil ilgili zemin özellikleriyle uyumlu şekilde modele uygulanmıştır. Birim kayma genliğine bağlı kayma modülü ve sönüm oranı değişimi eğrileri tanımlanan zemin tabakalarının her biri için kumlu

zeminlerin analizinde Seed ve Idriss (1991) ve killi zeminlerin analizinde ise Darendeli (2001) eğrileri kullanılmıştır.

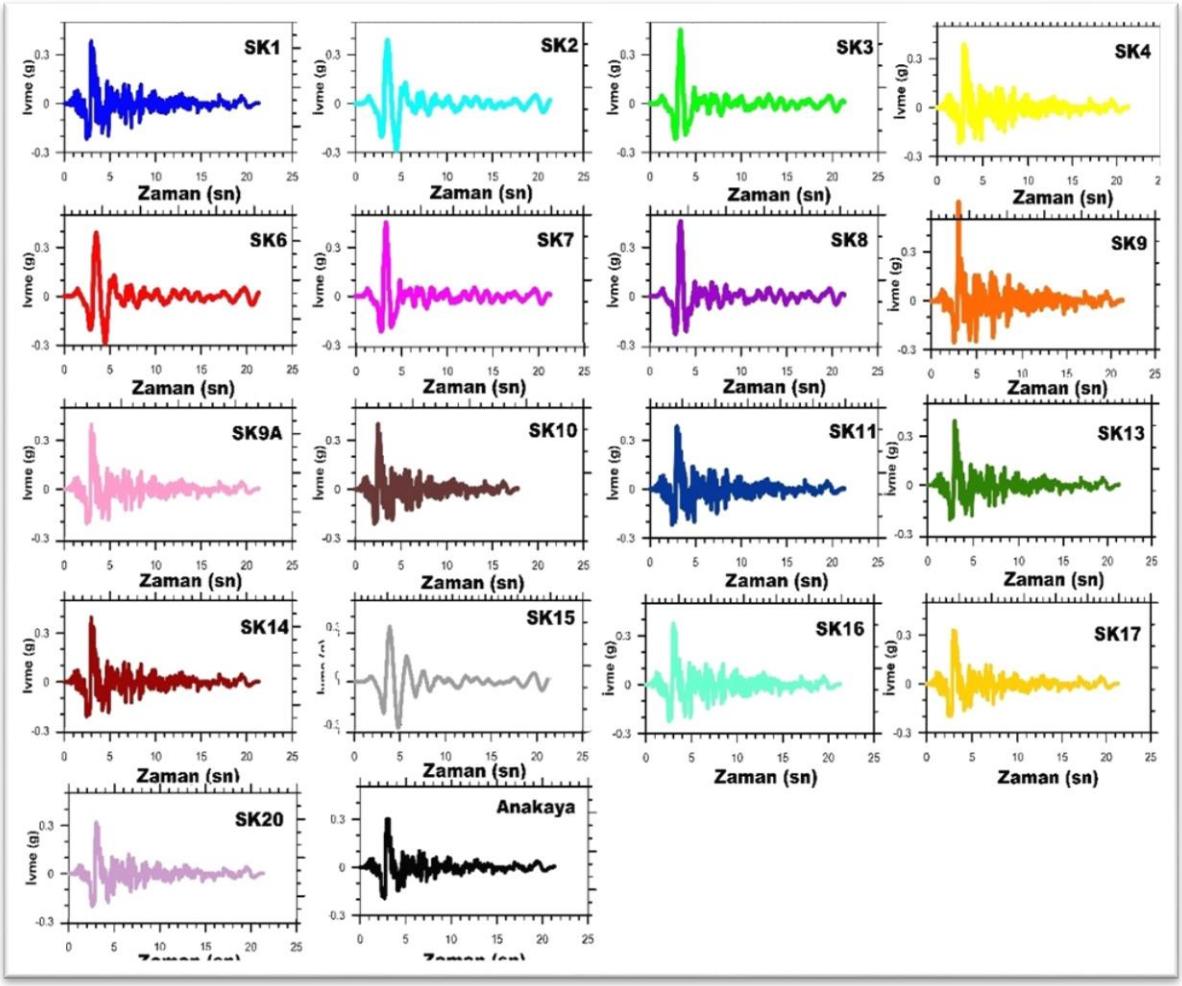
6.2.1. Sahaya özel zemin yüzeyinde oluşan ivme değerleri

Doğrusal olmayan analizlerin ilk aşamasında kullanılan Kocaeli–Yarımca 1999 deprem kaydı ile yapılan değerlendirmeler sonucunda, maksimum pik ivme değerinin SK9 sondajında yaklaşık 4–5 saniyelik zaman aralığında 0.5 g düzeyine ulaştığı belirlenmiştir. Buna karşılık SK2, SK3 ve SK6 numaralı sondaj lokasyonlarında elde edilen ivme değerlerinin ise anakaya seviyesine oldukça yakın olduğu görülmektedir (Şekil 6.14).



Şekil 6.14. Kocaeli (Yarımca-1999) depremi için non-lineer analiz sonrası ivme-zaman grafikleri

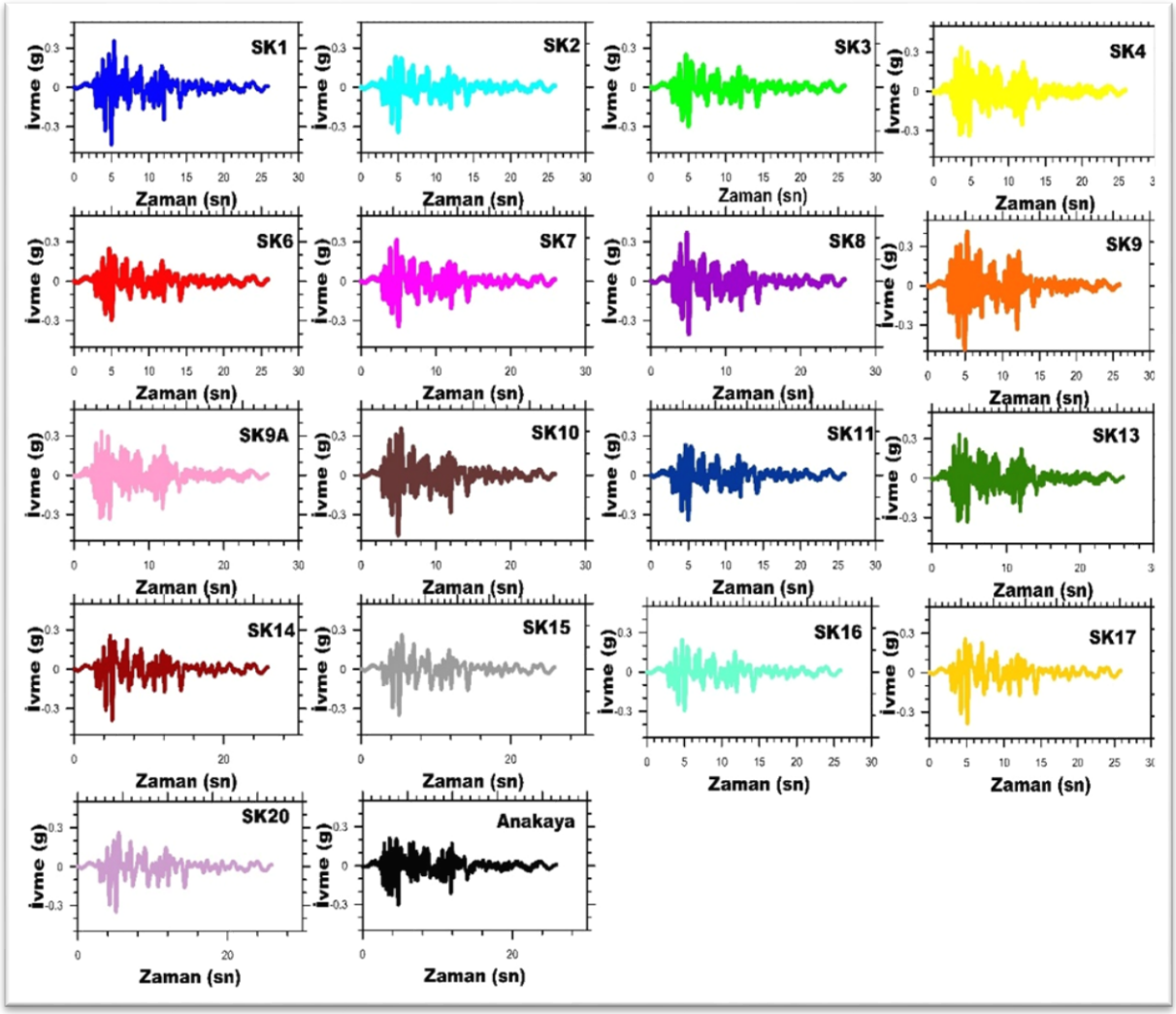
Erzincan 1992'ye göre elde edilen ivme-zaman grafikleri Şekil 6.15'te gösterilmiştir. Bu analizler sonucunda maksimum pik ivme değeri SK9 sondajında 0.53 g olarak elde edilmiştir. SK3, SK7 ve SK8 sondaj noktalarında ise maksimum pik ivme değerleri 0.35-0.4g arasındadır. SK17 sondajında ise anakayaya yakın en düşük pik ivme değeri görülmüştür. Ayrıca SK10 sondaj noktasında salınım diğerlerine göre daha kısa sürmüştür. SK10 sondajının kayma dalgası hızı ve SPT-N değerlerinin diğer sondajlara göre daha yüksek olduğu, bunun da yine yerel zemin etkilerinin bir yansıması olduğu sonucuna varılmaktadır.



Şekil 6.15. Erzincan 1992 deprem verisine göre doğrusal olmayan analiz yöntemi sonucu elde edilen ivme-zaman grafikleri

Düzce 1999 deprem verisine göre elde edilen grafikler incelendiğinde pik ivmeler yaklaşık 0.4-0.5 g olarak SK1, SK9 ve SK10 sondajlarında 5.saniye civarlarında görülmektedir.

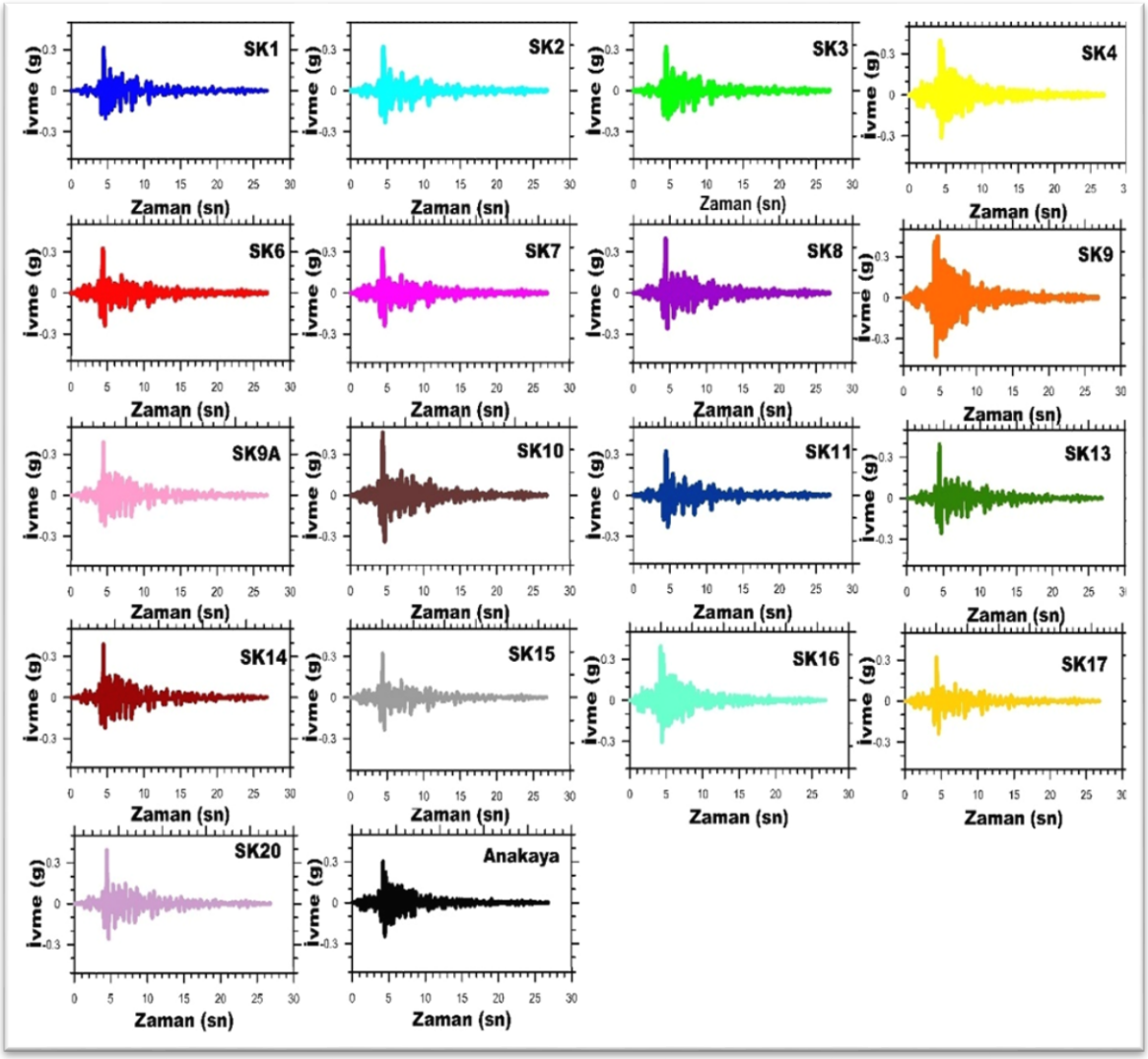
SK2, SK3, SK6 ve SK16 sondaj noktalarında anakayaya daha yakın ivme değerleri elde edilmiştir (Şekil 6.16).



Şekil 6.16. Düzce 1999 deprem kaydına göre doğrusal olmayan analiz yöntemi sonucunda elde edilen ivme-zaman grafikleri

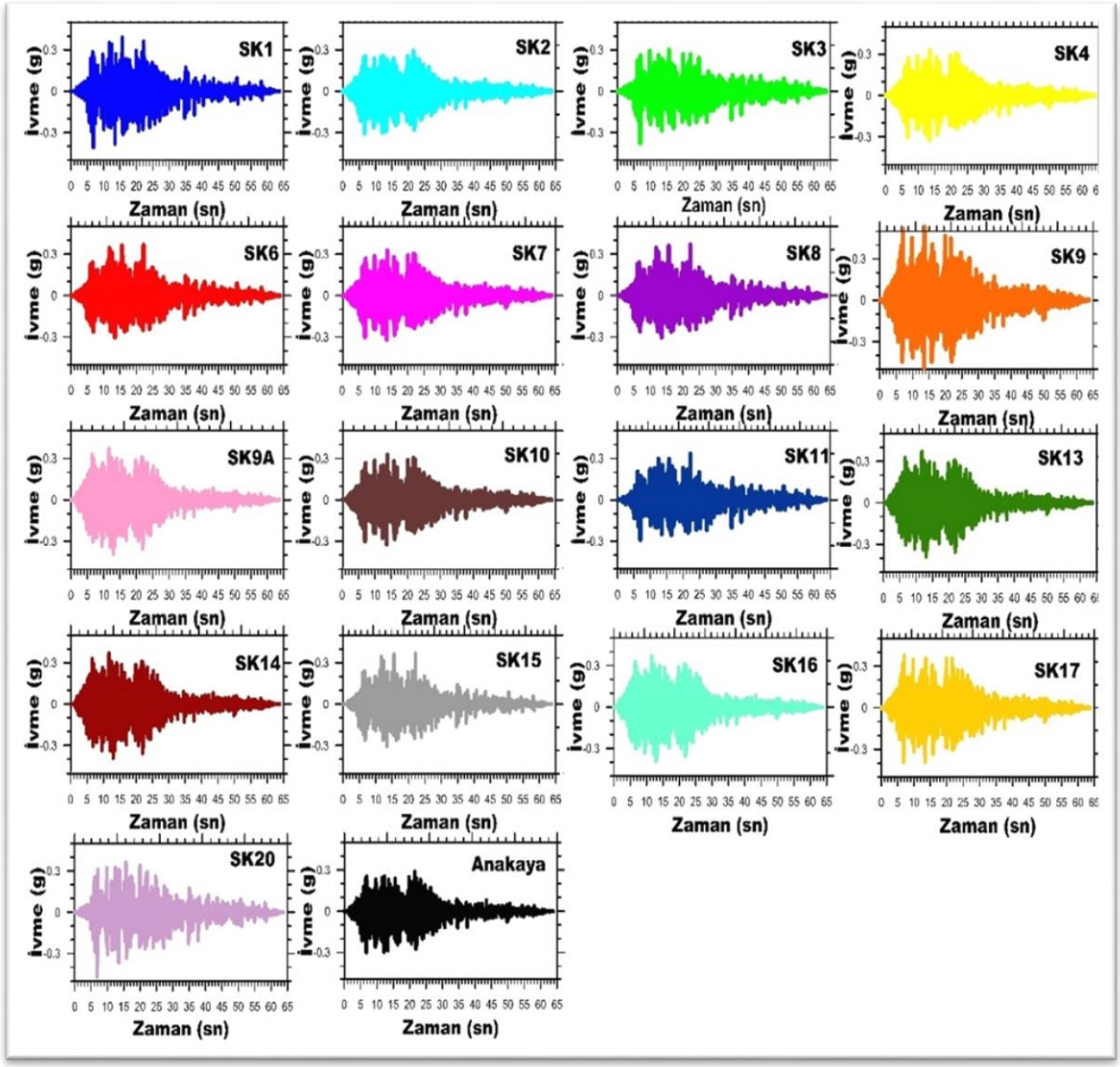
1979 Coyote depremine ait ivme verisiyle gerçekleştirilen analizler, SK9 ve SK10 sondajlarında maksimum ivmenin 4.5–5 saniye civarında 0.4–0.45 g düzeyine çıktığını

göstermektedir. Anakayaya yakın ivme değerleri SK1, SK2, SK3, SK6, SK7, SK11 ve SK15 sondaj noktalarında oluşmuştur (Şekil 6.17).



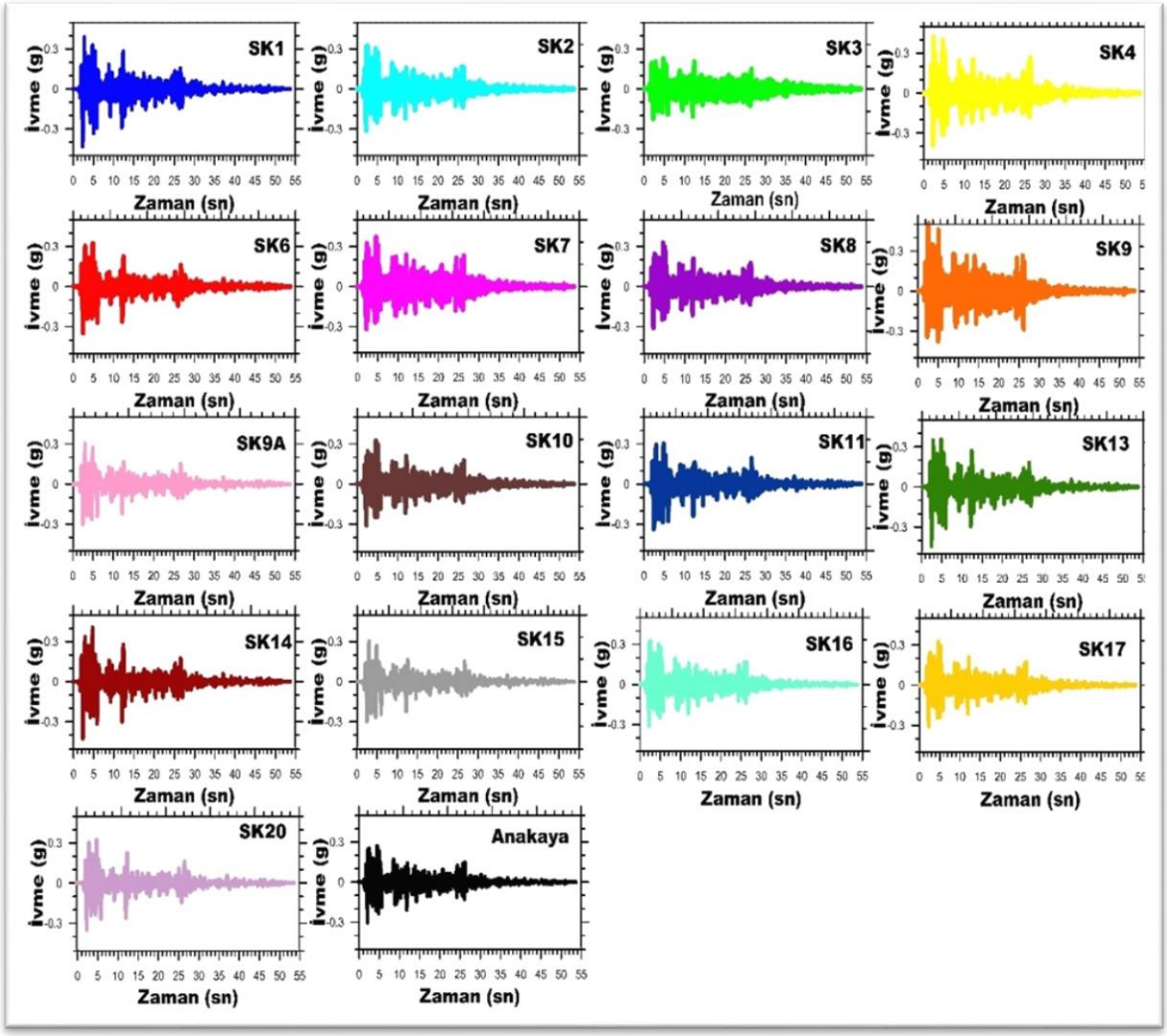
Şekil 6.17. Coyote Lake (1979) depremi için non-lineer tepki analizlerinden elde edilen ivme-zaman grafikleri

Imperial Valley I (1979) deprem kaydının verilerine göre yapılan analizler sonucunda maksimum pik ivmenin SK9 sondajında 0.52 g değerine ulaştığı belirlenmiştir. SK2, SK4 ve SK7 sondaj noktaları anakayaya yakın ivme değerleri göstermiştir (Şekil 6.18).



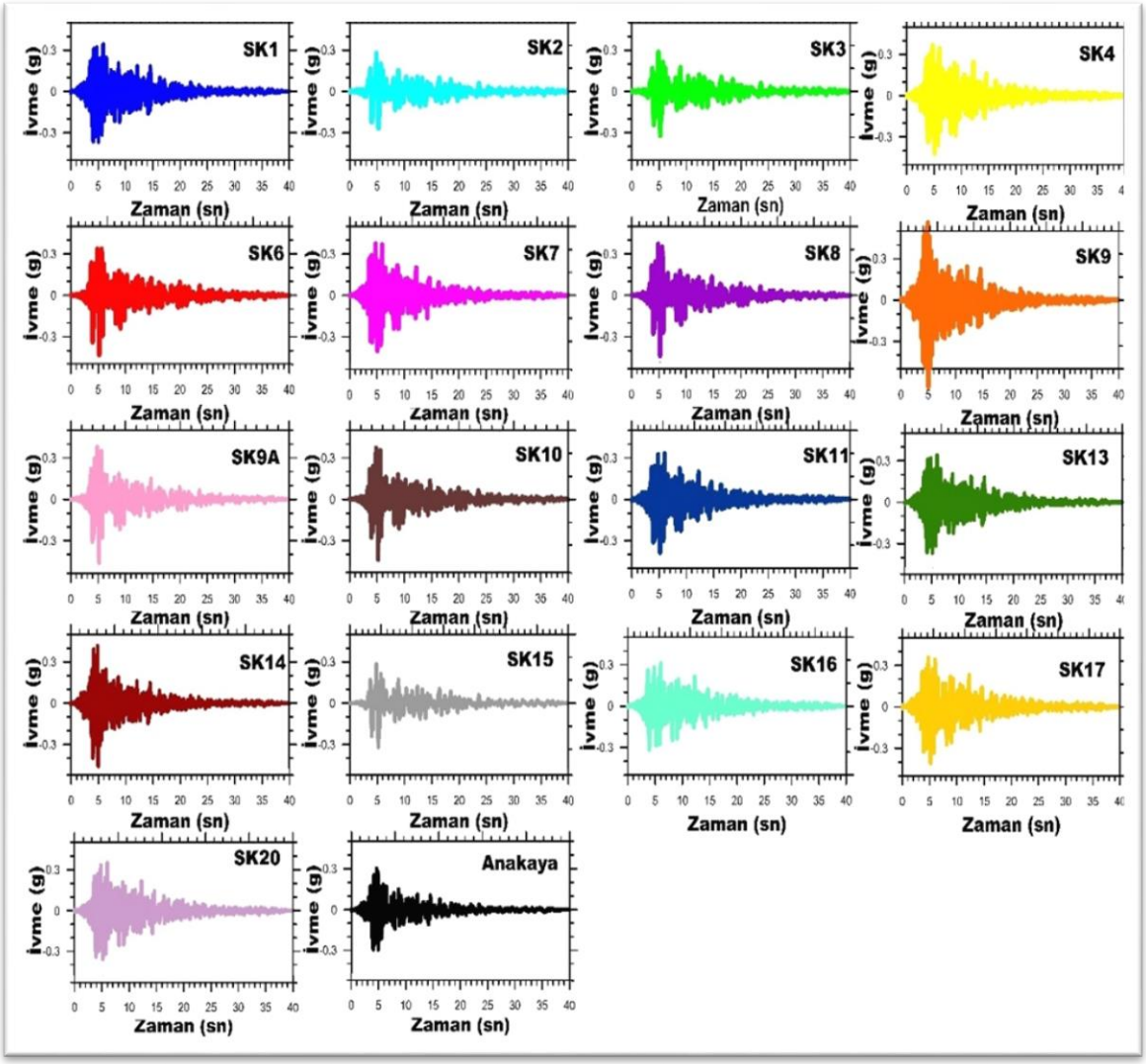
Şekil 6.18. Imperial Valley I (1979) deprem verisinin doğrusal olmayan tepki analizi sonrası ivme-zaman grafikleri

Imperial Valley II (1940) deprem kaydı kullanılarak yapılan analiz çalışmaları sonucunda elde edilen grafikler Şekil 6.19'da sunulmaktadır. Bu grafikler detaylı incelendiğinde maksimum pik ivmeler SK1, SK4 ve SK14 sondajlarında 0.4 g, SK9 sondajında ise 0.5 g olarak elde edilmiştir. En düşük ivme değerinin ise SK3, SK9A, SK10, SK11 ve SK15 noktalarında anakayaya yakın değerlerde olduğu görülmektedir.



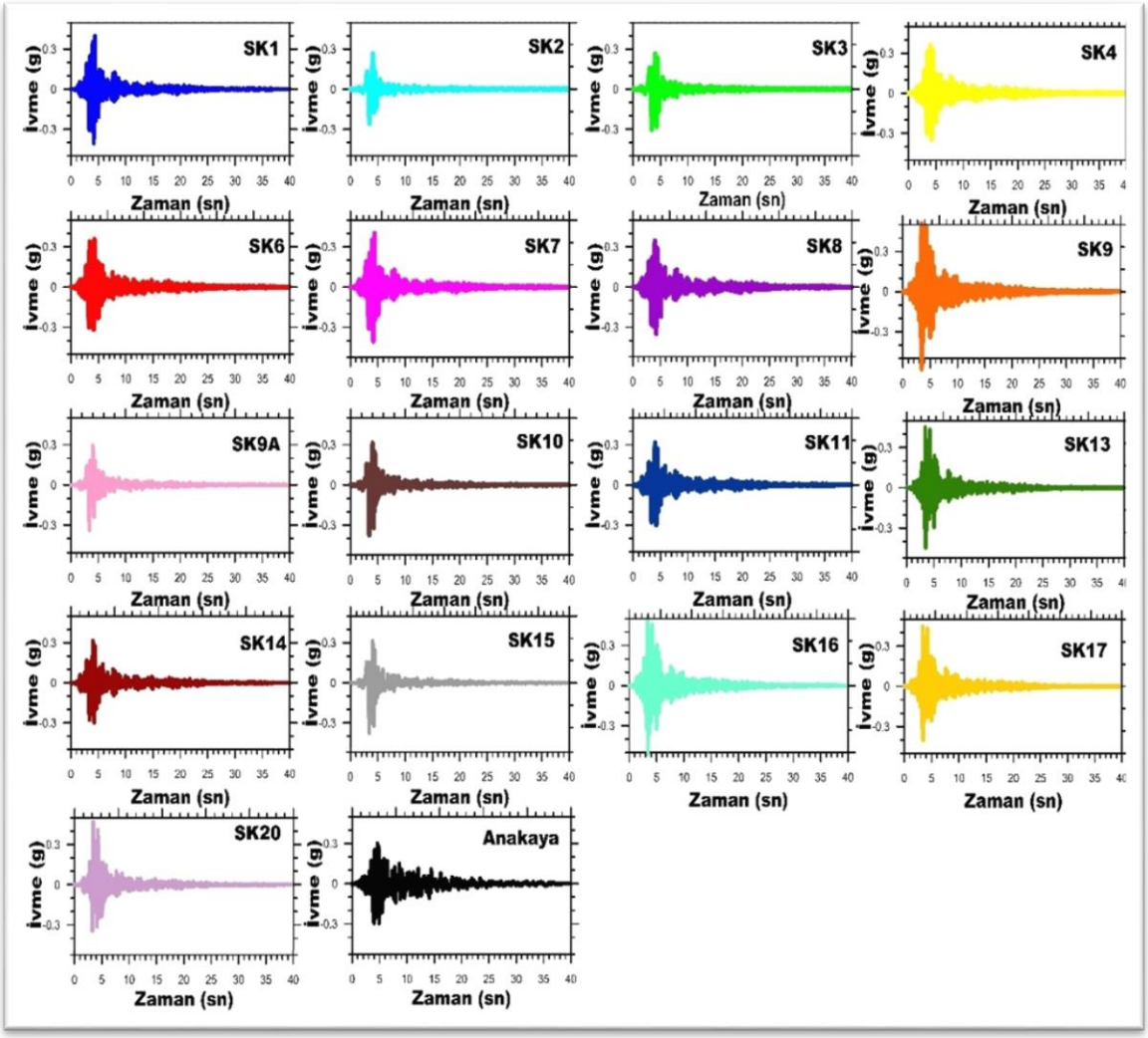
Şekil 6.19. Imperial Valley II (1940) depremi için NL analiz sonucu elde edilen ivme-zaman grafikleri

Loma Prieta I (1989) deprem kaydına göre yapılan doğrusal olmayan analizler sonucunda elde edilen grafiklere göre maksimum pik ivmenin SK9 sondajında 5.saniyede 0.6 g'ye ulaştığı görülmektedir. SK1, SK4, SK6, SK7, SK8 ve SK10 sondajlarında maksimum pik ivmeler yaklaşık 0.4 g olarak elde edilmiştir. SK2 ve SK3 sondajları ivme değerleri anakayaya yakın değerler göstermektedir (Şekil 6.20).



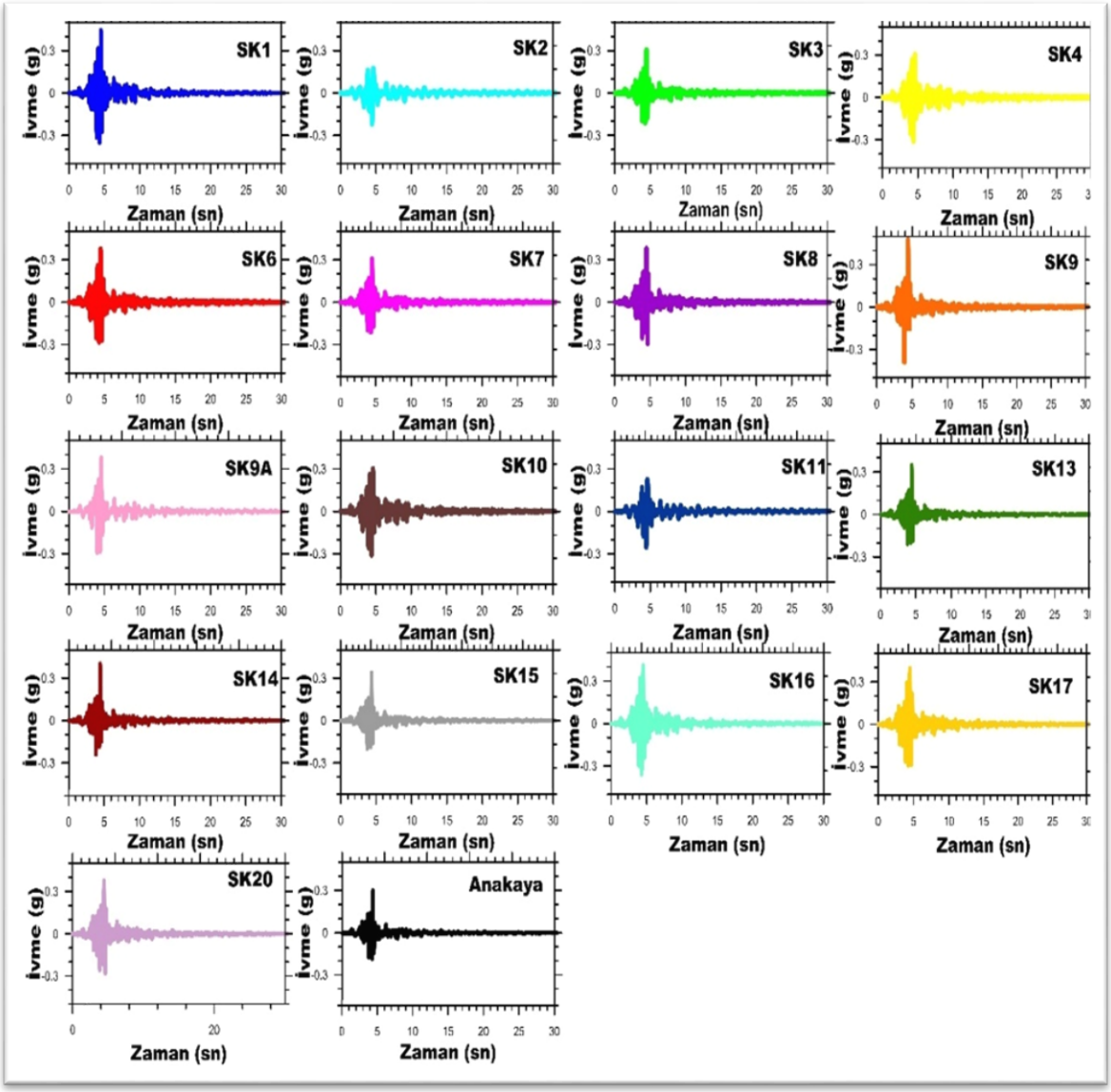
Şekil 6.20. Loma Prieta I (1989) deprem kayıtlarının non-lineer tepki analizi sonrası ivme-zaman grafikleri

Loma Prieta-2 1989 deprem kaydına göre yapılan analizler sonucunda maksimum pik ivmelerin 3-4 saniye aralığında SK9 sondajında 0.6g ve SK16 sondajlarında 0.5g değerlerine ulaştığı görülmektedir. SK2 ve SK3 sondajında ise pik ivme değerinde anakayaya görece daha küçük değerler elde edilmiştir (Şekil 6.21).



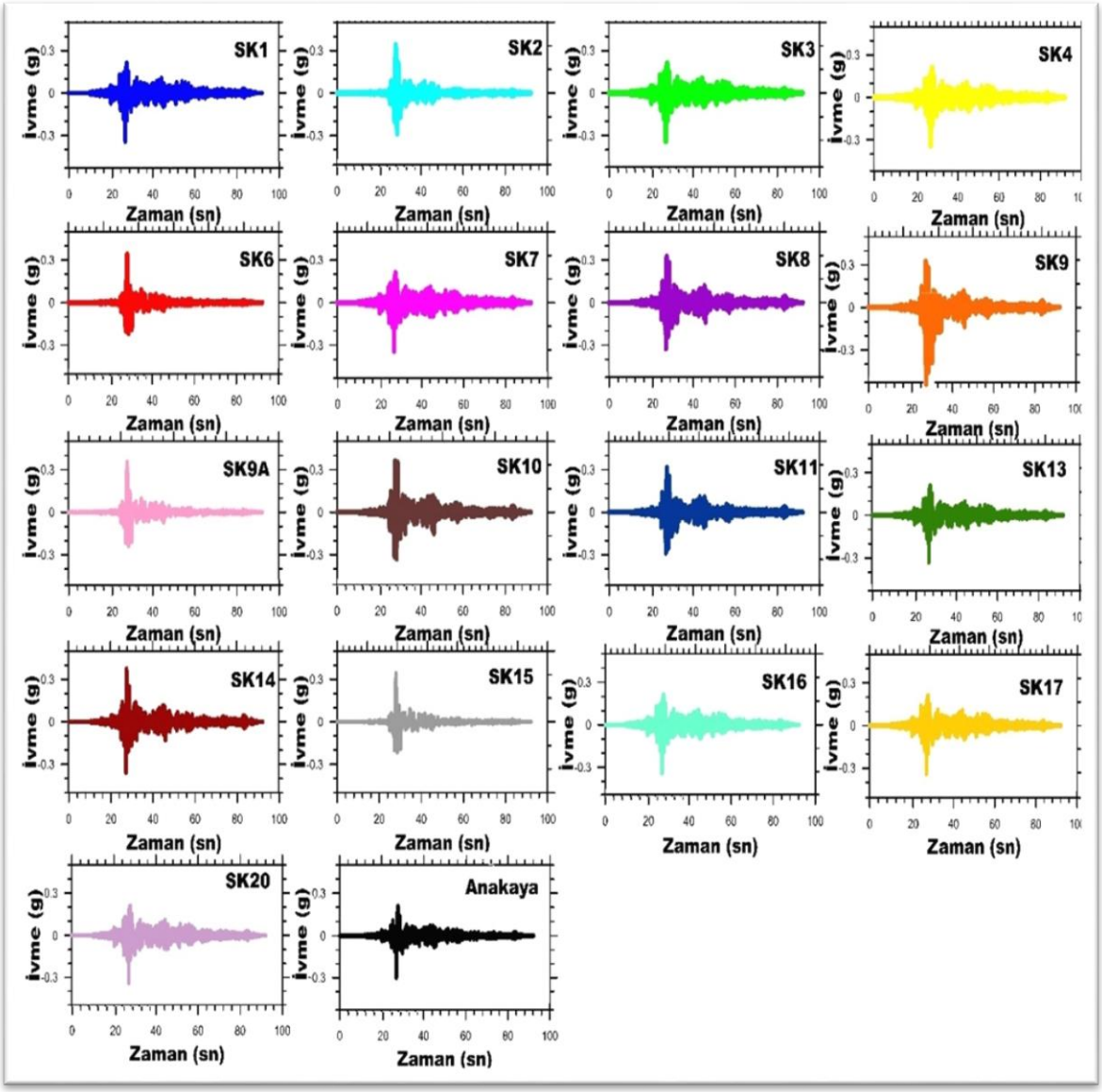
Şekil 6.21. Loma Prieta II (1989) deprem kaydı için NL tepki modeli sonucu ivme-zaman grafikleri

Parkfield deprem kaydına göre yapılan analizlerin grafikleri incelendiğinde pik ivmeler SK1 sondajında 0.4 g ve SK9 sondajlarında yaklaşık 0.5 g civarlarında görülmektedir (Şekil 6.22).



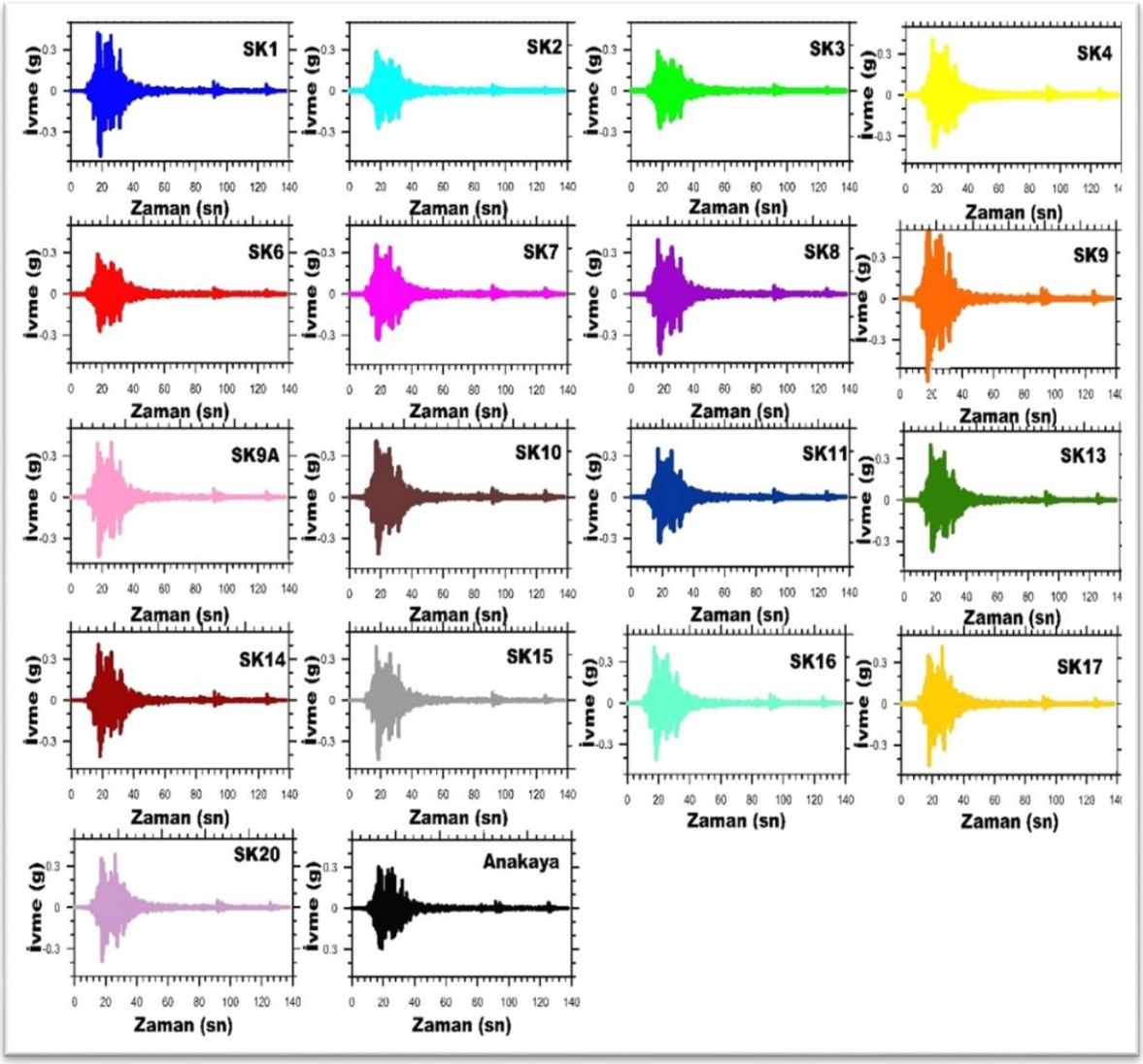
Şekil 6.22. Parkfield (1966) depremi için doğrusal olmayan tepki incelemesi sonrası ivme-zaman grafikleri

Denali Alaska (2002) deprem kaydına göre yapılan analiz çalışmaları neticesinde pik ivme SK9 sondajında 0.52 g ve SK14 sondajında ise yaklaşık 0.4 g olarak 28. saniyede görülmektedir. Anakayaya en yakın en yüksek ivme (pik) değerini gösteren SK3, SK4, SK7, SK13, SK16, SK17 ve SK20'de ivme değerleri maksimum 0.3 g'dir ve Şekil 6.23'te gösterilmiştir.



Şekil 6.23. Denali Alaska (2002) depremi için NL zemin tepki analizi sonucu ivme-zaman grafikleri

Darfield (Yeni Zelanda) 2010 depremine ait ivme kaydı ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizlere ilişkin ivme–zaman eğrileri Şekil 6.24'te gösterilmektedir. Yapılan değerlendirmeler, SK9 sondajında maksimum pik ivme değerinin yaklaşık 20. saniyede 0.6 g seviyesine ulaştığını ortaya koymaktadır. Buna karşılık anakaya davranışına en yakın pik ivme değerleri SK2, SK3 ve SK6 sondajlarında gözlenmiş olup, bu noktalarda da pik ivme değerlerinin 20. saniye civarında oluştuğu belirlenmiştir (Şekil 6.24).

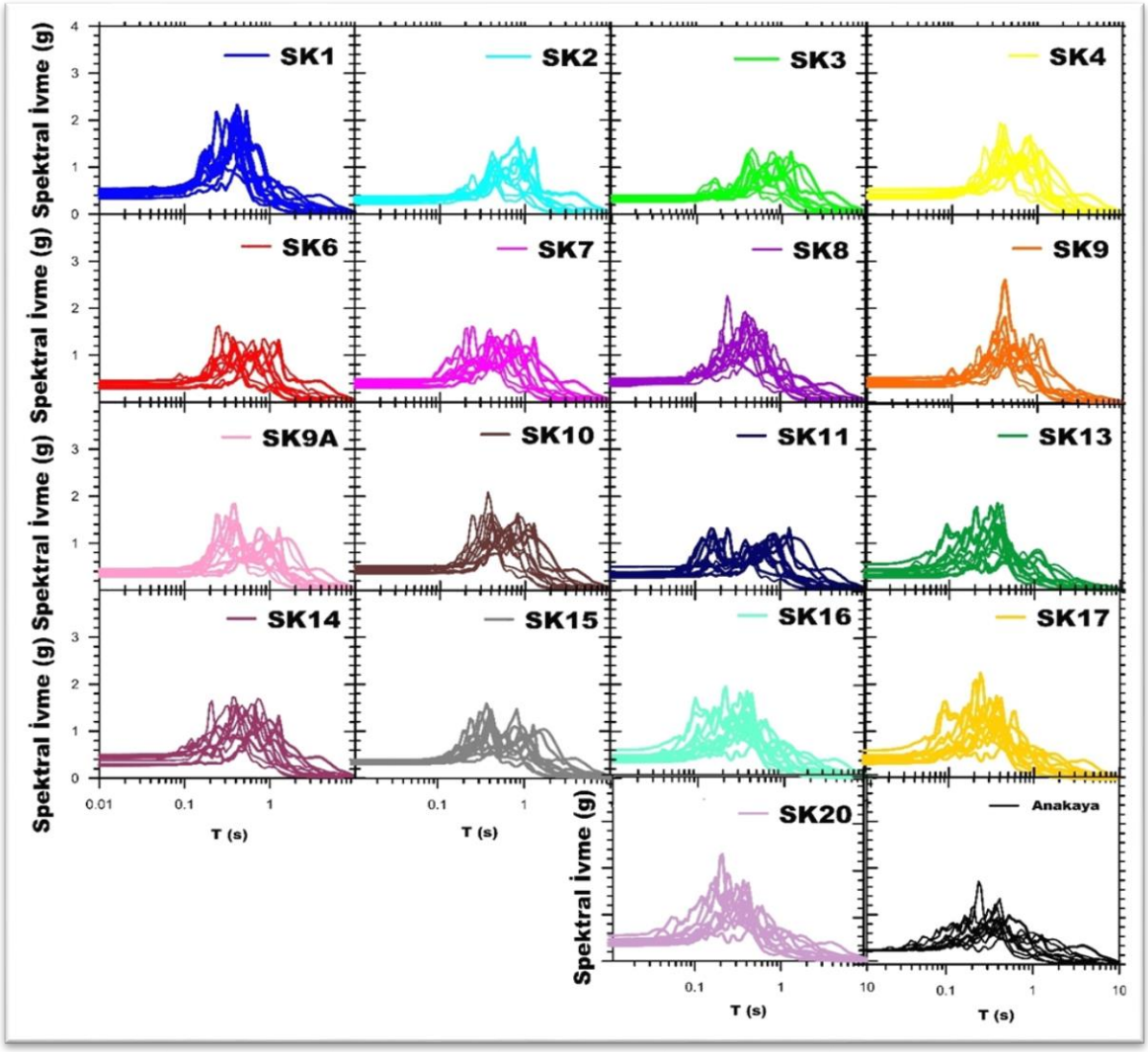


Şekil 6.24. Darfield New Zelland (2010) deprem kayıtlarının non-lineer analiz sonrası ivme-zaman grafikleri

6.2.2. İnönü bölgesine özel zeminin tepki spektrumu

Bu bölümde, doğrusal olmayan analizlerden elde edilen sonuçlar kullanılarak İnönü yöresine özgü zemin davranışına ait tepki spektrumu parametreleri hesaplanmış ve bu değerlere dayanarak spektral ivme (Sa) – periyot (T) ilişkisini gösteren grafikler oluşturulmuştur.

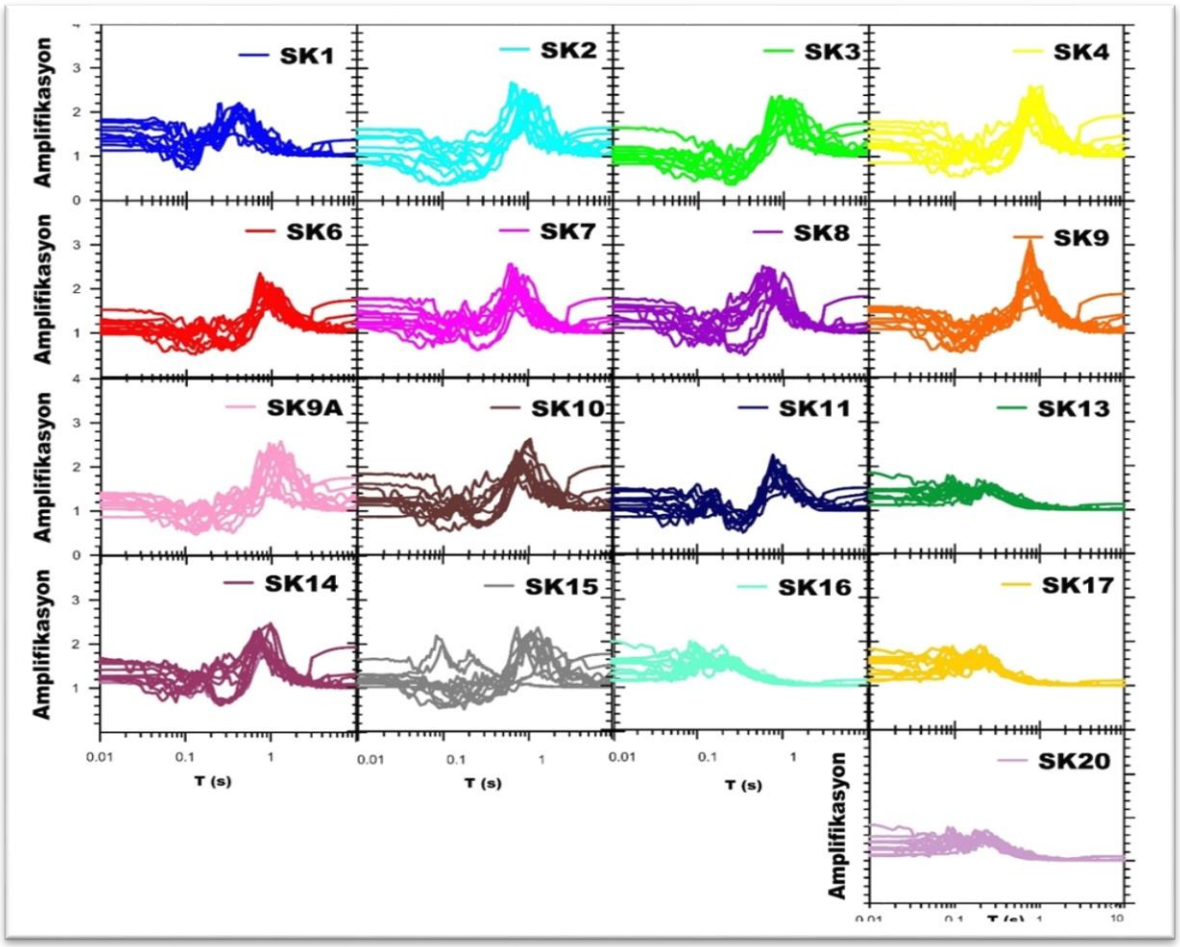
Doğrusal olmayan analizlerden elde edilen sonuçlar kullanılarak, çalışma alanına ait Spektral İvme (S_a) ile Periyot (T) ilişkisini gösteren grafikler üretilmiş ve Şekil 6.25'te sunulmuştur. Analizler sonucunda SK9 sondaj noktasında 0.4. saniyede maksimum spektral pik ivme oluşmuştur. Burada maksimum pik ivme değeri ise yaklaşık olarak 2.4 g' ye ulaşmaktadır. SK2, SK6, SK7 ve SK14 sondaj noktalarında maksimum spektral ivme değerlerinin anakaya değerine yakın değerler olduğu görülmektedir (Şekil 6.25).



Şekil 6.25. İnönü bölgesi ait NL analizlerinde kullanılan 11 deprem kaydından üretilen spektral ivme-periyot grafikleri

6.2.3. Sahaya özel zeminin büyütme değerleri (amplifikasyon faktörü)

Doğrusal olmayan analizler sonucunda elde edilen Amplifikasyon–Periyot (T) eğrileri Şekil 6.26'da verilmiştir. İnönü bölgesine ait 17 sondaj noktasında kullanılan 11 deprem kaydının değerlendirilmesiyle büyütme katsayılarının 1.2–1.4 ile 3.0 arasında değiştiği belirlenmiştir. En yüksek büyütme SK4, SK9 ve SK10 sondajlarında, en düşük değerler ise SK13 ve SK20 noktalarında gözlenmiştir. Genel olarak kısa ve uzun periyotlar için sondajlar arasında benzer davranış eğilimleri görülmüştür.



Şekil 6.26. İnönü bölgesi non-lineer çözümlemelerinde hesaplanan amplifikasyon (büyütme) grafikleri

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, Eskişehir İnönü ilçesini kapsayan 17 sondaj noktası ve bu sondaj noktalarına yakın konumları temsil eden sismik veriler kullanılarak, yerel zemin koşullarının deprem etkisi altındaki dinamik davranışı incelenmiştir. Çalışma kapsamında, her bir sondaj profili için elde edilen SPT-N değerleri ve kayma dalgası hızları (V_{S30}) değerleri kullanılarak zemin profilleri oluşturulmuş; bu profiller üzerinde 11 farklı gerçek deprem kaydı (Kocaeli–Yarımca 1999, Erzincan 1992, Düzce 1999, Denali Alaska 2002, Coyote 1979, Darfield Yeni Zelanda 2010, Imperial Valley 1–2, Loma Prieta Gilroy 1–2, Parkfield 1966) kullanılarak eşdeğer doğrusal (EL) ve doğrusal olmayan (NL) zemin tepki analizleri DeepSoil programının 7.1 yazılım versiyonu ile gerçekleştirilmiştir. Böylece İnönü bölgesi için sahaya özgü ivme-zaman (Acc), spektral ivme (S_a) ve büyütme (amplifikasyon) değerleri elde edilmiş ve değerlendirilmiştir. Sondajlardan elde edilen litoloji, SPT-N ve V_S profilleri birlikte değerlendirildiğinde, İnönü çalışma alanında genel olarak alüvyon zemin yayılım göstermekte, bu alüvyon zeminde yer yer kil–silt ve kum–çakıl karışımı tabakalı zeminlerin hakim olduğu görülmektedir.

TBDY (2018)'de tanımlanan yerel zemin sınıflarıyla karşılaştırıldığında, İnönü çalışma alanındaki zeminlerin büyük kısmının ZC ve ZD zemin grupları aralığında yer aldığı, bazı sondaj noktalarında (örneğin daha yüksek V_{S30} ve yüksek SPT-N değerlerine sahip profillerde) ZB'ye yakın zemin sınıfını temsil ettiği gözlemlenmektedir. İnönü havzasını temsil eden bu 17 sondaj içerisinde birbirine yakın konumlarda yer alan sondajlarda dahil, çok farklı spektral parametreler elde edilmiştir. Bu da İnönü ilçesini kapsayan saha için sondaj bazlı dinamik davranış analizlerinin dikkate alınmasının gerekli olduğunu göstermektedir.

Eşdeğer doğrusal analizler sonucunda elde edilen ivme-zaman grafikleri detaylı incelendiğinde, kullanılan deprem kayıtlarına bağlı olarak yüzeyde oluşan pik yer ivmesi (PGA) değerlerinin anakaya seviyesine göre çoğu sondaj noktasında arttığını ortaya

koymaktadır. Eşdeğer doğrusal analiz sonuçlarına göre; SK1, SK7, SK8, SK9, SK10 ve SK14 gibi sondajlarda yüzey ivmelerinin anakayaya göre daha belirgin arttığını, SK2 ve SK3 sondajlarında tepe ivmelerinin çoğunun deprem kaydı için anakayaya yakın seviyelerde kaldığı belirlenmiştir. SK1, SK7, SK8, SK9, SK10 ve SK14 sondajlarının üstte nispeten SPT-N ve V_S değerleri düşük, daha yumuşak zemin tabakalarından oluşması nedeniyle deprem dalgalarının genliğini artırmaya daha yatkın davranış göstermektedir. SK2 ve SK3 sondajları ise, SPT ve V_S değerleri daha yüksek, daha sıkı zemin tabakalarından oluşmasından dolayı zemin dinamik analiz sonuçlarında anakaya ivme değerine yakın ivme değerleri elde edilmiştir.

Eşdeğer doğrusal analizlerden elde edilen Spektral ivme–Periyot (S_a–T) eğrileri incelendiğinde, İnönü bölgesi için zeminlerin hakim periyotlarının genellikle 0.2–0.6 s aralığında yoğunlaştığı görülmüştür. Maksimum spektral ivme değerlerinin, SK11 sondajında yaklaşık 1.6 g iken SK20 sondajında 0.2–0.3 s civarındaki periyotlarda yaklaşık 3.2 g seviyelerine ulaşabilmektedir.

Eşdeğer doğrusal analizlerden elde edilen büyütme (amplifikasyon) faktörleri, birçok sondaj noktasında yaklaşık 2 ile 3.0 arasında değişmektedir. Bazı zemin profillerinde (örneğin SK4, SK9, SK9A ve SK10 gibi) yaklaşık 3 değerlerinde büyütme oranları elde edilmiştir. En düşük büyütme oranı ise görece olarak daha sıkı zemin profillerine sahip sondajlarda (örneğin SK16 gibi) görülmektedir. Ayrıca elde edilen yüksek büyütmeler, İnönü'de yerel zemin koşullarının deprem dalgalarının genliğini yer yer iki–üç kat civarlarına kadar büyütebildiğini ortaya koymaktadır.

Aynı 11 deprem kaydı kullanılarak yapılan doğrusal olmayan (non-lineer) analizlerde her bir zemin profilinde kayma modülü ve sönüm oranının birim kayma genliğine bağlı değişimini temsil eden Seed & Idriss (1991) ve Darendeli (2001) modelleri dikkate alınmış ve zeminin doğrusal olmayan davranışı incelenmiştir. Doğrusal olmayan analizlerden eşdeğer doğrusal analizlere göre daha küçük spektral parametreler elde edilmiştir. Ancak, SK9 sondajında doğrusal olmayan analizler sonucunda, yüzey PGA

değerlerinin 0.4–0.5g seviyelerine ulaştığı ve İnönü içinde en kritik büyütme potansiyeline sahip noktalardan biri olduğu görülmüştür. Bazı deprem kayıtlarında SK1, SK4, SK9, SK14, SK16 ve SK17 sondajlarında da 0.35–0.4 g mertebelerini aşan ivme değerleri görülmüş, bu noktaların hem eşdeğer doğrusal hem de doğrusal olmayan analizlerde yüksek yer ivmesi üreten zemin profillerine sahip olduğu belirlenmiştir. Buna karşılık SK2 ve SK3 gibi sondajların yüzey ivmeleri anakaya ivmesine daha yakın değerler göstermiştir.

Doğrusal olmayan analizlerden elde edilen spektral ivme–periyot eğrileri detaylı incelendiğinde, en düşük maksimum spektral ivme SK11 sondajında 1.4 g iken SK9 sondajında ise 2.6 g seviyelerine kadar çıkabildiğini göstermiştir. İnönü çalışma alanı için doğrusal olmayan analizlerden elde edilen amplifikasyon değerlerinin genel olarak 1.2-1.4 ile 3.0 arasında değiştiği; değer olarak en yüksek büyütmenin SK9 sondajında, en düşük büyütmenin de SK13 ve SK20 gibi daha rijit/sıkı zemin profillerinde oluştuğu belirlenmiştir.

Elde edilen bulgular, İnönü sahasının yerel zemin özelliklerinin bir sonucu olarak yorumlanmaktadır. Özellikle yumuşak, yeraltı suyu seviyesinin yüksek ve kumlu zemin tabakalarının hakim olduğu sondaj noktasında doğrusal olmayan etkilerin zemin büyütmesini önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymaktadır. Eşdeğer doğrusal (EL) ve doğrusal olmayan (NL) analizlerin sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, İnönü çalışma alanı için şu genel sonuçlara ulaşılmıştır:

- Sert / kayaya yakın zemin profillerinde (örneğin SK2 ve SK3 gibi), eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analiz sonuçları birbirine oldukça yakın çıkmış; bu tür zeminler için eşdeğer doğrusal yaklaşımın tasarım açısından çoğu durumda yeterli bir ilk yaklaşım sunduğu görülmüştür.

- Buna karşın, yumuşak zemin tabakalarına ve yüksek yeraltı su seviyesine sahip (örn. SK9) zemin profilinde, doğrusal olmayan analizlerin tekrarlı gerilmeler altında zemin davranışını daha gerçekçi temsil ettiği, bu nedenle bu tür zeminlerde eşdeğer doğrusal

analizlere ek olarak mutlaka doğrusal olmayan analizlerin de değerlendirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Bu bulgular, İnönü ilçesinde yerel zemin özelliklerinin sahanın büyütme davranışını etkilediği ve eşdeğer doğrusal–doğrusal olmayan analizlerin bir arada değerlendirilmesinin önemini göstermektedir.

Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar dahilinde, bazı sondaj noktalarının (özellikle SK4, SK7, SK8, SK9, SK10 ve SK14 gibi) birçok deprem kaydı için yüksek PSA ve amplifikasyon değerleri ürettiğini, buna karşın SK2 ve SK3 gibi noktaların daha düşük zemin büyütmesine sahip olduklarını göstermiştir. Bu durum, küçük bir ilçe olan İnönü yerleşim alanında dahi yerel zemin koşullarının önemli ölçüde farklılık gösterebildiğini ortaya koymaktadır. Kritik bölgelerde, orta–yüksek katlı yapı tasarımlarında sahaya özgü zemin tepki analizlerinin yapılması ve mümkünse doğrusal olmayan analizlerin de dikkate alınması uygun olacaktır. Özellikle yumuşak zeminlerde, yüksek yeraltı su seviyesi ve düşük Vs değerleri söz konusu olduğunda, doğrusal olmayan analizlerin dikkate alınması, sadece eşdeğer doğrusal analizlere dayalı tasarım yapılmasına göre daha güvenli sonuçlar verecektir.

Tez kapsamında genel değerlendirme yapacak olursak, edilen başlıca genel sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- İnönü yerleşim alanında zemin davranışı homojen değildir; aynı deprem kaydı altında farklı sondaj noktaları arasında belirgin PGA, PSA ve amplifikasyon farkları oluşmaktadır.

- Eşdeğer doğrusal analizler genel olarak daha düşük spektral ivme ve büyütme değerleri üretmekte; doğrusal olmayan analizler ise özellikle yumuşak zeminlerde yüksek gerinim koşullarında zemin davranışını daha gerçekçi şekilde temsil etmektedir.

- Bazı zemin profilleri (özellikle SK9), hem EL hem de NL analizlerde yüksek amplifikasyon ve spektral ivme değerleri ile öne çıkmakta; bu profile sahip alanlar İnönü için sismik açıdan kritik zemin büyütmesi bölgeleri olarak değerlendirilmektedir.

- Daha sıkı/rijit zemin profillerine sahip sondajlarda (SK2, SK3 vb.) zemin davranışı anakayaya daha yakın olup, büyütmeler sınırlı kalmaktadır. Bu nedenle, bu alanların yapı tasarımı açısından daha güvenli zemin koşullarına sahip olduğu görüşüne varılmaktadır.

- İnönü bölgesinde gerçekleştirilecek yeni yapı ve altyapı projelerinde, özellikle kritik öneme sahip tasarımlarda, bölgeye özgü zemin tepkisinin hem eşdeğer doğrusal hem de doğrusal olmayan analiz yöntemleriyle değerlendirilmesi, yapısal güvenliğin artırılması açısından büyük önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma İnönü ilçesi için sismik yükler altında zemin davranışını ortaya koyarak, hem bölgeye özgü zemin koşullarının daha iyi anlaşılmasına hem de gelecekte yapılacak mikrobölgeleme, kentsel planlama ve yapı tasarımı çalışmalarına altlık oluşturacak sahaya özgü dinamik zemin parametrelerini sunmaktadır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Afacan, K. B., & Güler, E. (2019). *Yeni deprem yönetmeliği performansının zemin büyütme analizi ile belirlenmesi*. Proceedings of the 5th International Conference on Earthquake Engineering and Seismology (5ICEES), Ankara.

AFAD. (2023). *Türkiye deprem tehlike haritası açıklama raporu*. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı.

Akdoğan, P. (2019). *Dynamic soil amplification in saturated soil profiles using effective stress based nonlineer methods* [Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. Dokuz Eylül Üniversitesi Kütüphanesi.

Akin, M., Kramer, S., & Topal, T. (2016). Dynamic soil characterization and site response estimation for Erbaa, Tokat (Turkey). *Natural Hazards*, *82*(3), 1833–1868.

Alcik, H. (2018). Investigation of local site responses at the Bodrum peninsula (Southwest of Turkey) using the mainshock and aftershocks of the 20 July 2017 Mw 6.6 Bodrum–Kos earthquake. *Annals of Geophysics*, *61*(3). https://doi.org/10.4401/ag-7637

Altunel, E., & Barka, A. (1998a). Eskişehir Fay Zonu'nun neotektonik özellikleri. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, *41*(1), 1–14.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Altunel, E., & Barka, A. (1998b). Eskişehir Fay Zonu'nun İnönü-Sultandere arasındaki neotektonik aktivitesi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, *41*(2), 41–52.

Ansal, A., Tönük, G., Kurtuluş, A., & Erdik, M. (2011). Site-specific seismic characteristics and performance-based design. *Bulletin of Earthquake Engineering*, *9*, 1631–1656.

Arduino, P., & Kramer, S. L. (2009). Advances in nonlineer site response analyses. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *135*(8), 1161–1172.

Arslan, E. (2019). *Zemin büyütmesinin eşdeğer lineer analiz yöntemiyle belirlenmesi: Bursa Osmangazi örneği* [Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Kütüphanesi.

Asimaki, D., Mohammadi, K., Ayoubi, P., Mayoral, J. M., & Montalva, G. (2020). Investigating the spatial variability of ground motions during the 2017 Mw 7.1 Puebla–Mexico City earthquake via idealized simulations of basin effects. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *132*, 106073. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106073

Bard, P. Y. (1999). *Microtremor measurements: A tool for site effect estimation*. Proceedings of the Second International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Bolisetti, C., Whittaker, A. S., & Coleman, J. L. (2014). Lineer and nonlineer site response analysis for deep soil profiles. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *62*, 51–64.

Boore, D. M. (2004). Can site response be predicted? *Journal of Earthquake Engineering*, *8*(1), 1–41.

Cassaro, M. A. (1987). *Seismic response of soft clays*. State University of New York at Buffalo.

Ceren, K., & Karakan, E. (2020). Zemin analizleriyle dinamik davranış özelliklerinin belirlenmesine yönelik pilot bir çalışma: Kahramanmaraş ili Üngüt Mahallesi örneği. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, *6*(1), 146–156. https://doi.org/10.21324/dacd.582328

Civelekler Okur, E. (2021). *Eskişehir ili ve yakın çevresinin sahaya özel dinamik zemin davranış analizleri ve sismik mikrobölgeleme haritalarının oluşturulması* [Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Kütüphanesi.

Civelekler, E., Okur, D. V., & Afacan, K. B. (2018). *Eşdeğer analiz yöntemi ile belirlenen zeminin büyütme değerlerinin CBS kullanılarak haritalanması: Eskişehir örneği*. VII. Uzaktan Algılama–CBS Sempozyumu (UZAL–CBS 2018), Eskişehir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Chopra, A. K., Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, 5th Edition, Pearson, 2017.

Darendeli, M. B. (2001). *Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves* (Doctoral dissertation). University of Texas at Austin.

Deepankar, C., & Purnanand, S. (2009). Equivalent-lineer seismic analyses of MSW landfills using DeepSoil. *Engineering Geology*, *107*, 98–108.

Dever, A., Gözler, M., Erkan, Y., & Şen, Ş. (1996). *Eskişehir ve çevresinin jeolojisi*. MTA Genel Müdürlüğü Yayınları.

Dobry, R., & Vucetic, M. (1987). Dynamic properties and seismic response of cohesive soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, *113*(9), 982–994.

DSİ. (1975). *Eskişehir ve İnönü ovaları hidrojeolojik etüt raporu*. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı.

Elnashai, A. S., & Sarno, L. D. (2008). *Fundamentals of earthquake engineering*. Wiley.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Eskişar, T., Kuruoğlu, M., Altun, S., Özyalın, Ş., & Yılmaz, H. R. (2014). Site response of deep alluvial deposits in the northern coast of İzmir Bay (Turkey) and a microzonation study. *Engineering Geology*, *172*, 95–116.

Fahjan, Y. (2008). Selection and scaling of real earthquake accelerograms to fit the Turkish design spectra. *Teknik Dergi*, *19*(3), 4423–4444.

Francesco, C., Antonio, C., Antonio, F., Salvatore, G., & Valentina, L. (2016). A seismic geotechnical hazard study in the ancient city of Noto (Italy). *Procedia Engineering*, *158*, 535–540.

Gözler, M. Z., Cevher, F., Ergül, E., & Asutay, H. J. (1996). *Orta Sakarya ve güneyinin jeolojisi* (Rapor No: 9973). MTA Genel Müdürlüğü.

Gücek, S. (2020). *Arazi deneylerine dayalı zemin büyütmesi ve sıvılaşma analizleri: Afyonkarahisar–Uydukent yerleşim örneği* [Doktora Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. Afyon Kocatepe Üniversitesi Kütüphanesi.

Güler, E. (2021). *Zeminlerin dinamik özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesi ve zemin büyütme analizlerinin yapılması* [Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Kütüphanesi.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Hasançebi, N., & Ulusay, R. (2006). Evaluation of site amplification and site period using different methods for an earthquake-prone settlement in western Turkey. *Engineering Geology*, *87*, 85–104.

Hashash, Y. M., Phillips, C., & Groholski, D. (2010). *Recent advances in non-lineer site response analysis*. Fifth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, 1-22.

Hashash, Y. M. A. (2016). *DEEPSOIL v6.1 user manual*. University of Illinois.

Hashash, Y. M. A., Phillips, C., & Groholski, D. R. (2017). Assessment of site response analysis procedures. *Earthquake Spectra*, *33*(3), 859–883..

Hays, W. W. (1986). *Evaluation of soil amplification effects*. National Research Council.

Ildır, M., Vural, İ., & Kılıç, S. (2020). Sıvılaşma potansiyeli yüksek Adapazarı zeminleri için büyütme faktörünün araştırılması. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, *8*(2), 266–273.

Karasu, M. E. (2009). *Bakırköy ilçesinin mikrobölgelemesi* [Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. Yıldız Teknik Üniversitesi Kütüphanesi.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice Hall.

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*, *184*, 108729. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.108729

Mert, M. (2018). *Zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerle değerlendirilmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Kütüphanesi.

MGM. (1992). Eskişehir Meteoroloji İstasyonu Gözlem Kayıtları (1929-1991). Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Ankara.

Mirshekari, M., & Ghayoomi, M. (2015). *Simplified equivalent lineer and nonlineer site response analysis of partially saturated soil layers*. IFCEE 2015, American Society of Civil Engineers, 2131-2140.

Naeim, F. (2001). *The seismic design handbook*. Springer.

Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Railway Technical Research Institute Quarterly Reports, 30*(1).

KAYNAKLAR DİZİNİ

Nar, D. (2016). *Kocaeli Gölcük ilçesi çöküntü bölgesi yerel zemin özelliklerinin sismolojik ve bir boyutlu zemin davranış analizleri ile karşılaştırılması* [Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. Kocaeli Üniversitesi Kütüphanesi.

Ocak, A., Tokur, S. ve Ertekin, A. S. (2005). Flora of Eskişehir and its surroundings. *Turkish Journal of Botany*, 29(4), 269-284.

Ohsaki, Y. (1976). *Earthquake engineering*. University of Tokyo Press.

Okan, N. (2005). *Yenişehir (Bursa) ilçesinde zemin büyütmesinin jeoteknik açıdan değerlendirilmesi* (Yüksek lisans tezi). Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Phillips, C., & Hashash, Y. M. A. (2009). Damping formulation for nonlineer site response analyses. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29, 1143–1158.

Pitilakis, K. (2004). Site effects and soil–structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24, 187–190.

Phillips, C., & Hashash, Y. M. A. (2009). Damping formulation for nonlineer site response analyses. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 29*, 1143–1158.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1970). *Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses*. EERC Report 70-10, University of California, Berkeley.

Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1982). *Ground motions and soil amplification factors*. EERC Report.

Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1991). *Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses*. Earthquake Engineering Research Center.

Sönmezer, Y. B., Akbaş, S. O., & Işık, N. S. (2015). Kırıkkale ili yerleşim alanı için en büyük ivme, zemin büyütmesi ve hâkim titreşim periyodu özelliklerinin değerlendirilmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 30*(4), 711–721.

TBDY. (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği.

Tokay, F., & Altunel, E. (2005). Active faults and neotectonic characteristics of the İnönü region (Eskişehir). *Turkish Journal of Earth Sciences*, TÜBİTAK.

Trifunac, M. D., & Todorovska, M. I. (2000). Can aftershock studies predict site amplification factors. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 19*, 233–255.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Tunçel, A., Özdağ, Ö. C., Pamuk, E., & Akgün, M. (2019). Mikrotremor verisi kullanılarak zeminlerin dinamik büyütme faktörü değerlerinin hesaplanması: İzmir örneği. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 34*(1), 43–52.

Türköz, M., Tosun, H., Savaş, H., Orhan, A., Seyrek, E. (2013). Dinamik zemin özelliklerinin jeofizik ve penetrasyon deneyleri ile belirlenmesi ve karşılaştırmalı analiz, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi, Proje No: 201115024.

Vucetic, M., & Dobry, R. (1991). Effect of soil plasticity on cyclic stress-strain parameters. *Journal of Geotechnical Engineering, 117*(1), 89–107.

Yalçınkaya, E., & Alptekin, Ö. (2003). Dinar'da zemin büyütmesi ve 1 Ekim 1995 depreminde gözlenen hasarla ilişkisi. *Yerbilimleri, 24*(27), 1–13.

Yeşil, Y. (2012). *Zemin büyütmesinin sismik hızlardan belirlenmesi* (Yüksek lisans tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.