Zemin Büyütmesinde Boyut Etkisinin Araştırılması

Utku TUNA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ekim 2024

Investigation of Dimension Effect on the Soil Amplification

Utku TUNA

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Civil Engineering

October 2024

Zemin Büyütmesinde Boyut Etkisinin Araştırılması

Utku TUNA

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

Danışman: Doç. Dr. Kamil Bekir AFACAN
İkinci Danışman: Öğr. Gör. Dr. Ersin GÜLER

"ESOGÜ-BAP tarafından FYL-2023-2553 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir."
Ekim 2024

ONAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Utku TUNA'nın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Zemin Büyütmesinde Boyut Etkisinin Araştırılması" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Kamil Bekir AFACAN

İkinci Danışman : Öğr. Gör. Dr. Ersin GÜLER

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Doç. Dr. Kamil Bekir AFACAN

Üye : Doç. Dr. Hasan SAVAŞ

Üye : Doç. Dr. Evren SEYREK

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, Doç. Dr. Kamil Bekir AFACAN ve Öğr. Gör. Dr. Ersin GÜLER danışmanlığında hazırlamış olduğum "Zemin Büyütmesinde Boyut Etkisinin Araştırılması" başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim.

02/10/2024

Utku TUNA

İmza

ÖZET

Deprem kaynağından yayılan sismik dalgalar, zemin tabakaları üzerinden farklı hızlarda ilerleyerek yüzeye ulaştıklarında titreşim oluştururlar. Bu titreşimlerin şiddeti ve süresi, depremin büyüklüğüne, kaynağın uzaklığına, zeminin ve anakayanın özelliklerine bağlı olarak değişir. Zemin tabakaları, sismik dalgaların genişlemesini ya da absorbe edilmesini sağlayabilir. Bu çalışmada ele alınan zemin büyütmesi ise, sismik dalgaların zemin tabakalarından geçerken genliklerinin artmasını ifade eder. Bu durum, zemin tabakalarının fiziksel ve dinamik özelliklerine bağlı olarak ortaya çıkar. Gevşek ve yumuşak zemin tabakaları, sismik dalgaların enerjisini artırarak yüzeyde daha büyük titreşimlere neden olabilirler.

Bu tez çalışması kapsamında, araştırma bölgesinin depremsellik özelliklerini yansıtan 11 deprem ivme kaydı ölçeklendirilmiş ve DeepSoil programı kullanılarak bir boyutlu doğrusal olmayan zemin büyütme analizleri yapılmıştır. İki boyutlu analizler Plaxis 2D, üç boyutlu analizler ise Plaxis 3D kullanılarak gerçekleştirilmiş ve zemin tepkileri değerlendirilmiştir. Farklı boyutlar için önerilen yöntemler karşılaştırmalı olarak uygulanmıştır. Çalışma, farklı boyutlarda yapılan analizler sonucunda bu boyutlar arasında belirli bir ilişki kurmayı hedeflemektedir. Uzun süren üç boyutlu analizlerin sonuçları, daha kısa sürede tamamlanan iki boyutlu ve bir boyutlu analizlerin sonuçları ile karşılaştırılarak, analiz sürelerinin kısaltılması amaçlanmıştır. Literatürde boyut etkisinin araştırıldığı pek çok çalışma bulunmasına rağmen, bu çalışmalarda kullanılan boyutlara alternatif olarak etkili bir yöntem önerilmemiştir. Bu çalışma, boyut etkilerini inceleyerek doğru sonuçlar elde etmeyi ve mühendislik uygulamalarında kullanılabilirliğini artırmayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Zemin Büyütmesi, Boyut Etkisi, Yer Tepki Analizleri, DeepSoil, Plaxis, 1B Analiz, 2B Analiz, 3B Analiz

SUMMARY

Seismic waves emanating from an earthquake source propagate through layers of soil at varying speeds until they reach the surface, generating vibrations upon arrival. The intensity and duration of these vibrations depend on factors such as the magnitude of the earthquake, distance from the source, and characteristics of the soil and bedrock. Soil layers can exhibit properties that either amplify or dampen seismic waves. The focus of this study, soil amplification, refers to the phenomenon where seismic wave amplitudes increase as they pass through soil layers, influenced by the physical and dynamic properties of these layers. Loose and soft soil layers, for instance, can amplify seismic energy, resulting in larger surface vibrations.

In this thesis, 11 earthquake acceleration records reflecting the seismicity characteristics of the research area were scaled and analyzed using the DeepSoil program for one-dimensional nonlinear soil amplification analyses. Two-dimensional analyses were conducted using Plaxis 2D, while three-dimensional analyses employed Plaxis 3D to evaluate soil responses. Recommended methods for different dimensions were applied comparatively. The study aims to establish a relationship between various dimensions based on the analyses conducted. The results of lengthy three-dimensional analyses were compared with those of shorter-duration two-dimensional and one-dimensional analyses to streamline analyses times. Despite numerous studies in the literature on dimension effects, effective alternative methods for the dimensions used in these studies have not been proposed. This study aims to investigate dimension effects to achieve accurate results and enhance their applicability in engineering practice.

Keywords: Soil Amplification, Dimensional Effect, Ground Response Analyses, DeepSoil, Plaxis, 1D Analysis, 2D Analysis, 3D Analysis

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sürecinde bana rehberlik eden, bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan ve eğitimim boyunca beni yönlendiren, gelişimime katkıda bulunan değerli danışman hocalarım Doç. Dr. Kamil Bekir AFACAN ve Öğr. Gör. Dr. Ersin GÜLER'e, ve Geoteknik Anabilim Dalı öğretim üyeleri Prof. Dr. Volkan OKUR, Prof. Dr. Murat TÜRKÖZ ve Doç. Dr. Hasan SAVAŞ'a, her zaman yanımda olan ve desteğini esirgemeyen sevgili Ceren PAZI'ya teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET ..... **vi**

SUMMARY ..... **vii**

TEŞEKKÜR ..... **viii**

İÇİNDEKİLER ..... **ix**

ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **xii**

ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **xvii**

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

1. GİRİŞ VE AMAÇ **1**

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI **3**

3. ZEMİNLERİN DİNAMİK ÖZELLİKLERİ **14**

3.1. Yer Hareketi Ölçümü Parametreleri 14

3.1.1. Genlik Parametreleri 14

3.1.1.1. Pik İvme, Pik Hız ve Pik Yer Değiştirmelerin Belirlenmesi 15

3.1.2. Frekans İçeriği ve Spektral Parametreler 17

3.1.2.1. Yer Hareketi Spektrumlarının Analizi 17

3.1.2.2. Spektral Parametrelerin Tanımlanması 19

3.1.3. Yer Hareketinin Süresi ve Etkileri 19

3.2. Zeminlerde Dinamik Özelliklerin Belirlenmesi 20

3.2.1. Sönümleme Oranı ve Kayma Modülünün Belirlenmesi 20

4. ZEMİNLERİN DİNAMİK ANALİZLERİ **27**

4.1.1. Yerel Zemin Koşulları 27

4.1.2. Zemin-Yapı Etkileşimi 27

4.1.3. TBDY 2018 - Sahaya Özel Zemin Davranışı 28
4.1.3.1. Zemin Sınıflandırması ve Parametreler 28
4.1.3.2. Sismik Tehlike Analizi 28
4.1.3.3. Zemin-Yapı Etkileşimi 28
4.1.3.4. Sıvılaşma Analizi 29
4.1.3.5 Zemin Dinamik Modüllerinin Belirlenmesi 29
4.1.4. Zemin Büyütmesi 31
4.1.5. Bir Boyutlu Yer Tepki Analizi 34
4.1.6. İki Boyutlu Yer Tepki Analizi 34
4.1.7. Üç Boyutlu Yer Tepki Analizi 35
5. MATERYAL VE YÖNTEM 36
5.1. Çalışma Bölgesi ve Bölgenin Depremselliği 36
5.2. Aktif Fay Hatları 37
5.5. Depremsellik ve Jeolojik Özelliklerin Önemi 41
5.7. Bir Boyutlu Analiz Özellikleri ve DeepSoil Programı 47
5.7.1. Darendeli Modeli 48
5.8. İki Boyutlu Analiz Özellikleri ve Plaxis 2D Programı 49
5.9. Üç Boyutlu Analiz Özellikleri ve Plaxis 3D Programı 52
5.10. Depremlerin Belirlenmesi 53
5.10.1. El Mayor-Cucapah, Mexico (2010) 55
5.10.2. Darfield, New Zealand (2010) 55
5.10.3. Parkfield-02, California (2004) 55
5.10.4. Kocaeli, Turkey (1999) 56
5.10.5. Düzce, Turkey (1999) 56
5.10.6. Kobe, Japan (1995) 56
5.10.7. Morgan Hill, California (1984) 56

5.10.8. Imperial Valley, California (1979).....56
5.10.9. Managua, Nicaragua (1972) 57
5.10.10. Parkfield, California (1966).....57
5.11. Seçilen Depremlerde Ölçeklendirme 64
6. BULGULAR VE TARTIŞMA.....70
6.1. Örselenmemiş Numunelerin Tanımlanması.....70
6.2. 1B Eşdeğer Doğrusal Olmayan Analiz Sonuçları 79
6.3. 2B-3B Plaxis Dinamik Analizi.....80
6.4. Farklı Boyut Analizlerinde Derinlik Boyunca İvme Değişimin Gösterimi 84
6.5. Farklı Boyut Analizlerine Göre Tepki Spektrumları.....90
6.6. Farklı Boyut Analizlerine Göre Zemin Büyütme Faktörleri.....95
6.7. Zemin Büyütmesinde Boyut Etkisinin TBDY 2018'e Göre Değerlendirilmesi 101
7. SONUÇ VE ÖNERİLER 107
KAYNAKLAR DİZİNİ.....109

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

3.1. Kocaeli depremine ait ivme-hız-deplasman grafikleri 15

3.2. Kocaeli depremine ait ivme-zaman grafiğinde pik ivme 16

3.3. Kocaeli depremine ait hız-zaman grafiğinde pik hız 16

3.4. Kocaeli depremine ait deplasman-zaman grafiğinde pik yer değiştirme 17

3.5. Kocaeli depremine ait Fourier genlik spektrumu 18

3.6. Eşit baskın periyotta farklı frekansta Fourier genlik spektrumları 19

3.7. Zeminlerde gerilme ve şekil değiştirme davranışı 20

3.8. Tekrarlı yüklemeler altındaki zeminin gerilme-gerinim ilişkisi 22

3.9. Dinamik üç eksenli deney sistem mekanizması 24

3.10. Bender eleman deney sistem mekanizması 25

3.11. Tekrarlı basit kesme deneyi sistem mekanizması 25

3.12. Rezonant kolon (RC) deney sistem mekanizması 26

4.1. Türkiye deprem tehlike haritasının yıllara göre değişimi 30

4.2. Yönetmelik esasında yerel zemin sınıfları 31

4.3. İki boyutlu dinamik tepki analizi gerektiren durumlar 35

4.4. Üç boyutlu dinamik tepki analizi gereken durumlar 35

5.1. Türkiye ve etrafındaki tektonik yapı 38

5.2. Sakarya ili jeoloji haritası 39

5.3. UD tüplerinden çıkarılmış numuneler 42

5.4. Plastisite indeksi kartı 45

5.5. SK-1, 2, 3, 4 Ortalama sondaj verileri 46

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

5.6. DeepSoil programı arayüzü 48
5.7. Normalleştirilmiş modül azalım eğrisi standart sapma modeli 49
5.8. Malzeme sönüm eğrisi standart sapma modeli 49
5.9. Plaxis 2D programı arayüzü 50
5.10. Rijitlik modül grafiği 52
5.11. Plaxis 2D programı arayüzü 53
5.12. El Mayor-Cucapah, Mexico (ivme zaman grafiği) 58
5.13. Darfield, New Zealand (ivme zaman grafiği) 58
5.14. Parkfield-02, CA (ivme zaman grafiği) 59
5.15. Duzce,Turkey (ivme zaman grafiği) 59
5.16. Kocaeli, Turkey (ivme zaman grafiği) 60
5.17. Kobe, Japan (ivme zaman grafiği) 60
5.18. Morgan Hill (ivme zaman grafiği) 61
5.19. Imperial Valley-06 (ivme zaman grafiği) 61
5.20. Managua, Nicaragua-01 (ivme zaman grafiği) 62
5.21. Parkfield (ivme zaman grafiği) 62
5.22. Imperial Valley-02 (ivme zaman grafiği) 63
5.23. El Mayor-Cucapah, Mexico (ölçeklendirilmiş ivme-zaman grafiği) 64
5.24. Darfield, New Zealand (ölçeklendirilmiş ivme-zaman grafiği) 65
5.25. Parkfield-02, CA (ölçeklendirilmiş ivme-zaman grafiği) 65
5.26. Duzce, Turkey (ölçeklendirilmiş ivme-zaman grafiği) 66

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

5.27. Kocaeli, Turkey (ölçeklendirilmiş ivme-zaman grafiği) 66

5.28. Kobe, Japan (ölçeklendirilmiş ivme-zaman grafiği) 67

5.29. Morgan Hill (ölçeklendirilmiş ivme-zaman grafiği) 67

5.30. Imperial Valley-06 (ölçeklendirilmiş ivme-zaman grafiği) 68

5.31. Managua, Nicaragua-01 (ölçeklendirilmiş ivme-zaman grafiği) 68

5.32. Parkfield (ölçeklendirilmiş ivme-zaman grafiği) 69

5.33. Imperial Valley-02 (ölçeklendirilmiş ivme-zaman grafiği) 69

6.1. Su muhtevası deneyi için kullanılan etüv 71

6.2. Elek analizi deneyi için kullanılan elekler 72

6.3. Elek analizi deneyi sonrasında elek üstü kalan malzemeler 73

6.4. SK – 1 Elek analizi grafiği 73

6.5. SK – 2 Elek analizi grafiği 74

6.6. SK – 3 Elek analizi grafiği 74

6.7. SK – 4 Elek analizi grafiği 75

6.8. Atterberg limitleri deneyi malzemeleri 75

6.9. Plastik limit deneyi numune görseli 76

6.10. SK – 1 Atterberg Limitleri Grafiği 76

6.11. SK – 2 Atterberg Limitleri Grafiği 77

6.12. SK – 3 Atterberg Limitleri Grafiği 78

6.13. SK – 4 Atterberg Limitleri Grafiği 79

6.14. Plaxis programına tanımlanmış zemin profili 83

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

6.15. Plaxis programında yapılmış bir analizin örnek çıktısı 84
6.16. İvmelerin anakayadan yüzeye doğru değişimleri (Cucapah, Mexico) 85
6.17. İvmelerin anakayadan yüzeye doğru değişimleri (Darfield, New Zealand) 85
6.18. İvmelerin anakayadan yüzeye doğru değişimleri (Parkfield-02, CA) 86
6.19. İvmelerin anakayadan yüzeye doğru değişimleri (Kocaeli, Turkey) 86
6.20. İvmelerin anakayadan yüzeye doğru değişimleri (Duzce, Turkey) 87
6.21. İvmelerin anakayadan yüzeye doğru değişimleri (Kobe, Japan) 87
6.22. İvmelerin anakayadan yüzeye doğru değişimleri (Morgan Hill) 88
6.23. İvmelerin anakayadan yüzeye doğru değişimleri (Imperial Valley-06) 88
6.24. İvmelerin anakayadan yüzeye doğru değişimleri (Managua, Nicaragua-01) 89
6.25. İvmelerin anakayadan yüzeye doğru değişimleri (Parkfield) 89
6.26. İvmelerin anakayadan yüzeye doğru değişimleri (Imperial Valley-02) 90
6.27. Bir boyutlu analiz tepki spektrumu (SK – 1) 91
6.28. Bir boyutlu analiz tepki spektrumu (SK – 2) 91
6.29. Bir boyutlu analiz tepki spektrumu (SK – 3) 92
6.30. Bir boyutlu analiz tepki spektrumu (SK – 4) 92
6.31. Bir boyutlu analizlerin özet grafiği 93
6.32. İki boyutlu analiz tepki spektrumu (SK – 1, 2) 93
6.33. İki boyutlu analiz tepki spektrumu (SK – 3, 4) 94
6.34. İki boyutlu analizlerin özet grafiği 94
6.35. Üç boyutlu analiz tepki spektrumu 95

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sekil **Sayfa**

6.36. Bir boyutlu analiz amplifikasyon faktörü (SK – 1).....96

6.37. Bir boyutlu analiz amplifikasyon faktörü (SK – 2).....96

6.38. Bir boyutlu analiz amplifikasyon faktörü (SK – 3).....97

6.39. Bir boyutlu analiz amplifikasyon faktörü (SK – 4).....97

6.40. Bir boyutlu analiz özet grafiği 98

6.41. İki boyutlu analiz amplifikasyon faktörü (SK – 1, 2) 99

6.42. İki boyutlu analiz amplifikasyon faktörü (SK – 3, 4) 99

6.43. İki boyutlu analiz amplifikasyon faktörü özet grafiği 100

6.44. Üç boyutlu analiz amplifikasyon faktörü 100

6.45. Bir boyutlu analizin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi (SK – 1).....101

6.46. Bir boyutlu analizin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi (SK – 2).....102

6.47. Bir boyutlu analizin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi (SK – 3).....102

6.48. Bir boyutlu analizin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi (SK – 4).....103

6.49. Bir boyutlu analizlerin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi özet grafiği.....103

6.50. İki boyutlu analizin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi (SK – 1,2).....104

6.51. İki boyutlu analizin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi (SK – 3,4).....104

6.52. İki boyutlu analizlerin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi özet grafiği 105

6.53. Üç boyutlu analizin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi.....105

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge **Sayfa**

5.1. Deney programı 42

5.2. Elek no ve çapları.....43

5.3. Seçilen depremler ve özellikleri.....54

6.1. Sondaj kuyu numaralarına göre ortalama su muhtevası değerleri 70

6.2. Sondaj kuyu numaralarına göre silt-kil yüzdesi değerleri.....70

6.3. Plaxis'te kullanılan verilerin derinliğe bağlı olarak değişimleri.....81

6.4. Plaxis'te kullanılan verilerin derinliğe bağlı olarak değişimleri (devam) 81

6.5. Plaxis'te kullanılan verilerin derinliğe bağlı olarak değişimleri (devam) 82

6.6. Plaxis'te kullanılan verilerin derinliğe bağlı olarak değişimleri (devam) 82

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
E	Elastisite Modülü
G	Kayma Modülü
Mw	Depremin Magnitüdü
V_s	Kayma Dalgası Hızı
$(V_s)_{30}$	Üst 30 Metrede Ortalama Kayma Hızı
c_u	Drenajsız Kayma Dayanımı
$(c_u)_{30}$	Üst 30 Metrede Ortalama Drenajsız Kayma Dayanımı
$(N_{60})_{30}$	Üst 30 Metrede Ortalama Standart Penetrasyon Darbe Sayısı
T_o	Zemin Büyütmesinin Maksimum Olduğu Periyot
f_0	Zemin Büyütmesinin Maksimum Olduğu Frekans
H	Yumuşak Zemin Tabakasının Kalınlığı
α	Empedans Oranı
ξ	Sönüm Oranı
ω	Açısal Frekans
A	Dalga Genliği
ρ	Zeminin Yoğunluğu
B	Zemin Büyütmesi Miktarı

Kısaltmalar	**Açıklama**
1D/2D/3D	Bir/İki/Üç Boyutlu
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
PGA	Pik Yer İvmesi
PGV	Pik Yer Hızı
SPT	Standart Penetrasyon Deneyi
MASW	Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi
SASW	Yüzey Dalgalarının Spektral Analizi
PEER	Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Sismik dalgalar; deprem kaynağından, zemin katmanları aracılığıyla farklı hızlara sahip bir şekilde ilerlerler. Bu dalgalar yüzeye ulaştıklarında titreşim oluştururlar. Bu titreşimlerin şiddeti ve süresi depremin büyüklüğü, kaynağın uzaklığı, ortamın fiziksel özellikleri, zeminin özellikleri gibi parametrelere bağlıdır. Anakayada harekete başlayan sismik dalgalar, özellikleri farklı tipteki gevşek zemin tabakaları içinde de hareketlerine devam ederler. Bu zemin tabakalarının özellikleri yeryüzünde gözlemlenen titreşim hareketlerinin özelliklerini büyük bir ölçüde belirler. Zemin tabakalarının bir kısmı sismik dalgaları sönümleme özelliği gösterirken, bir kısmı da büyütme özelliği gösterir. Bu değişim, genliklerin artması şeklinde olduğunda zemin büyütmesi olarak adlandırılır. (Yalçınkaya, 2010)

Bir boyutlu analizlerde, tüm sınırların yatay olduğu ve zemin tepkisine bağlı olmaksızın anakayadan düşey yönde yayılan SH dalgalarının neden olduğu durum ele alınmaktadır. Bu analizlerde zemin ve anakaya yüzeyleri yatay yönde sonsuz olarak kabul edilmektedir. Bu varsayım ile birlikte kullanılan yöntemlerle analizleri yapılan zemin tepkilerinin, çoğu depremde ölçülen tepki ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Bazı uygulamalarda karşılaşılan problemler sonucunda bir boyutlu dalga yayılım durumunu ele almanın uygun olmadığı tespit edilmiştir. Düzensiz zemin yüzeylerinde, rijit yapıların, duvarların, tünellerin bulunduğu durumlarda iki boyutlu analiz gerekmektedir. Bu tip durumlarda üç boyutlu analizin dâhi gerekli olduğu durumlarla karşılaşılmıştır. Üç boyutlu dalga yayılım durumu iki boyutlu ile benzerlik göstermektedir. Eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan yaklaşımlar kullanılarak dinamik sonlu eleman analizleri yapılmaktadır. Zemin-yapı etkileşimi konusunda çok sayıda üç boyutlu analiz çalışmaları bulunmaktadır. (Kramer, 1996)

Bu tez çalışmasında, birçok aşamadan oluşan bir boyutlu yer tepki analiz programı DeepSoil, farklı uygulamaları modellemek amacıyla iki boyutlu analizler için kullanılacak olan Plaxis 2D ve problemin türüne göre bir boyutlu, iki boyutlu analizlerin yetersiz olduğu

durumlar için, Plaxis 3D programları kullanılarak değerlendirmelerde bulunulmuştur. Her bir boyut için önerilen farklı yöntemler karşılaştırmalı olarak uygulanmıştır. Çalışmanın sonucunda söz konusu problemlere önerilen yaklaşımlar sayesinde zaman tasarrufu sağlanarak daha ekonomik çalışmalar yapılması planlanmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu çalışma kapsamında, zemin büyütmesi ve zemin-yapı etkileşimi üzerine yapılmış literatür araştırmaları incelenmiştir. Zemin büyütmesi kavramı 1970 yılında ilk defa Seed ve Idriss tarafından yapılan çalışmalarda incelenmiş olup, günümüze kadar bu konu üzerindeki çalışmalar devam etmektedir. Literatürde, bir boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu dinamik analizlerin her birinin ayrı ayrı ele alındığı; bu analizlerin zemin tepkisini değerlendirmede yaygın olarak kullanıldığı görülmüştür.

Seed ve Idriss (1970) tarafından yapılan çalışmalar, zemin tabakalarının dinamik davranışını ilk defa detaylı bir şekilde incelemiştir. Bu çalışmalarda, zemin büyütmesinin tabaka kalınlığı, yoğunluk ve su içeriği gibi faktörlere bağlı olarak nasıl değiştiği ortaya konulmuştur.

Joyner ve Chen (1975) ise farklı kalınlıklardaki zemin tabakalarının deprem dalgalarına olan tepkilerini inceleyerek, tabaka kalınlığının zemin büyütmesi üzerindeki kritik rolünü vurgulamıştır.

Yoshida ve Suetomi (1996), laboratuvar deneyleriyle farklı zemin türlerinin ve tabaka kalınlıklarının zemin büyütmesi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmaları, ince taneli zeminlerin deprem dalgalarını daha fazla büyütebildiğini göstermiştir.

Semblat (2011), araştırmasında bir boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu analizler ile sismik dalga yayılımını ve amplifikasyonu modellemiştir. Farklı yöntemlerin hangi durumlarda kullanılacağı hakkında bilgi verirken aynı zamanda karmaşık geometrilerde iki boyutlu ve üç boyutlu modellemeye ihtiyaç duyulduğundan bahsetmektedir.

Dey (2011), tek bir homojen katmanda S-dalgalarının düşey yayılımının bir dizi dinamik analizini Plaxis 2D programı kullanarak gerçekleştirmiştir. Bu çalışma, alan genişliğinin etkisi, ağ dağılımları ve ortalama eleman boyutu üzerindeki etkisi açısından bir kalibrasyon prosedürünü açıklamaktadır. Optimal modeli hızlı ve verimli bir şekilde elde

etmek için sayısal sonlu elemanlar modelleriyle bir deneme durumunu formülize etmesi açısından referans niteliği taşımaktadır.

Phanikanth vd. (2011), bu çalışmada Mumbai, Hindistan'da yerel zemin sınıflarının zemin tepkisine olan etkilerini bir boyutlu eşdeğer doğrusal zemin tepkisi analizi yaparak incelemişlerdir. Çeşitli zemin katmanları boyunca tepki spektrumu elde edilmiştir. Böylelikle verilerin yokluğunda ya da eksikliğinde benzer sahalar için Mumbai'deki yapıların depreme dayanıklı tasarımı için bir referans olmuştur.

Drosos vd. (2012), doğrusal olmayan zemin tepkisi analizi için geliştirilen bir boyutlu yapısal modeli bu çalışmada deneysel olarak kalibre etmiş ve doğrulamışlardır. Histerezis döngülerinin yanı sıra, kayma gerilmesinin fonksiyonları olarak kayma modülü ve sönüm eğrileri oluşturdukları bu çalışmada birçok yazılım ile karşılaştırma yapmışlardır.

Pitilakis vd. (2012), bu çalışmada farklı zemin koşullarında Eurocode 8'e göre tasarım spektrumlarını ve büyütme faktörlerini incelemişlerdir. Bir proje kapsamında yapılmış bu çalışmada normalize edilmiş elastik ivme spektrumları ile ampirik verileri karşılaştırılmıştır.

Calderon vd. (2012), Lima, Peru'da zeminin dinamik özelliklerini incelemek amacıyla bir çalışma yapmışlardır. Küçük ve büyük mikrotremor ile ölçüm yapılarak birçok durumda anakayaya kadar olan derinliklerde zemin hız profilleri tahmin edilmiştir. Bu profiller, amplifikasyon faktörlerini tahmin etmek için kullanılmıştır.

Diaz (2012), bu çalışmasında Kosta Rika'da iki zemin türü, 23 periyot kullanılarak; akselerografik kayıtlar, sismik parametreler ve zemin durumu ile korelasyonu ile büyütme faktörleri elde edildi. Faktörler, bağımlı değişken olarak %5 sönüm için PSA ve üç bağımsız değişken büyüklük arasındaki regresyon analizinden elde edildi.

Truong (2012), yapmış olduğu bu çalışmada düşey ve yatay yönlerde anakaya ve zemin katmanları için dinamik azaltma faktörlerinin yeni ifadelerini önermiş ve şu anda mevcut olan diğer yöntemlerle karşılaştırmıştır.

Tripe vd. (2013), sismik yer hareketinin topografik büyütmesi ile zemin tabakası büyütmesi arasındaki etkileşim hakkında çalışma yapmışlardır. Bu etkileşim, literatürde saha çalışmalarında gözlemlenen topografik büyütme değerleri ile sayısal analizlerden elde edilen değerler arasındaki farklılıkların olası bir nedeni olarak öne sürülmektedir. Topografik etkileri tahmin etmek için iki etkinin de birlikte ele alınması gerektiğini önermişlerdir.

di Lernia (2014), bu çalışmasında, doğrusal olmayan dinamik yapı zemin etkileşimini, üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemine dayalı sayısal bir yaklaşımla incelemiştir. İlk yaklaşımın amacı mevcut analitik çözümler ile kıyaslanıp doğruluğunun teyit edilmesidir. Ardından, zeminlerin doğrusal olmayan yapısı ve heterojenliği dolayısıyla zemin-yapı tepkisi üzerindeki etkilerine odaklanılır.

İnce ve Yılmazoğlu (2014), yaptıkları bu çalışmada farklı topografik özelliklere sahip bölgelerde deprem sırasında meydana gelen yüzey yer hareketini bir boyutlu ve iki boyutlu analizler ile incelemişlerdir. Bir boyutlu analizler eşdeğer doğrusal analiz ilkesine dayalı EERA ve eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizler yapabilen DeepSoil programları, iki boyutlu analizler ise Plaxis 2D programı kullanılarak yapılmıştır. Analiz sonuçları, değişen yerel zemin koşullarına ve arazi topografyasına bağlı olarak yüzey yer hareketinin özelliklerinin değiştiğini göstermiştir.

Brandt (2014), bu tezde keson temel üzerine oturan bir denizaltı yapısı üzerinde deprem analizleri yapmıştır. Buradaki amaç, zemin-yapı etkileşimini birçok farklı yöntem ile belirlemektir. Sınır koşullarının sonuca etkisini araştırmak için Plaxis 3D programında iki farklı sayısal modelleme yapılmıştır.

Baise vd. (2015), empedans kontrastının etkisini tespit etmek amacıyla kayma dalgası hızı profilleri kullanılarak Boston, Massachusetts'te 30 ayrı lokasyonda çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada hem lineer hem de eşdeğer lineer saha tepki modelleri kullanılmıştır.

Alielahi vd. (2015), bu çalışmada düşey olarak yayılan SV ve P dalgalarına maruz kalan gömülü, astarsız bir tünel içeren lineer elastik bir ortamın sismik tepkisini ele almışlardır. Tünelin altında kalan zemin yüzeyinin büyütmesinin uzun periyotlarda arttığı gözlemlenmiştir. Amplifikasyon faktörü ve ortamın karakteristik periyodunun tünelin gömülü derinliğine göre değişimi ele alınmıştır.

Bilotta vd. (2015), bu çalışmada dairesel tünellerde enine ve boyuna hareket eden farklı sismik yüklerin tepkisini simüle etmek amacıyla üç boyutlu analizler yapmışlardır. Amaç, tünel kaplama davranışının ve tüneli çevreleyen yer değiştirme alanının farklı yönlerdeki dalga yayılımını değerlendirmektir.

Özdağ vd. (2015), İzmir, Türkiye'de bir deprem senaryosu ile birlikte mikrotremor yatay/düşey spektral oranı yöntemi ile elde edilen gözlemsel zemin transfer fonksiyonları kullanarak 57 nokta için dinamik büyütme faktörü hesaplamış ve haritalamışlardır. Ayrıca, uzaysal otokorelasyon yöntemi çalışması ile bir noktada teorik transfer fonksiyonu elde edilmiştir.

Carcione vd. (2016), S-dalgası büyütme fonksiyonunun rezonans pik genliğinin ve frekansının azaltma ve anakaya esnekliğinde nasıl etkilendiğini analiz etmişlerdir. Azaltmayı tanımlamak için Zener Modeli ve Sabit Q Modeli kullanılmıştır.

Meza-Fajardo vd. (2016), yaptıkları çalışmada frekans alanında hızlı çok kutuplu sınır eleman yöntemi ile üç boyutlu standart geometrilere sahip alüvyon havzalarında sismik dalga amplifikasyonu analizlerini yapmışlardır. Üç boyutlu ve bir boyutlu analizlerin karşılaştırmasını yaptıkları bu çalışmanın sonucunda dalga amplifikasyonu için en önemli parametrelerin empedans kontrastı ve eşdeğer şekil oranı olduğu tespit edilmiştir.

Makra ve Chavez-Garcia (2016), yaptıkları bu çalışmada havza içindeki birçok noktada bir boyutlu modeller ve havza genelinde dört farklı iki boyutlu kesit kullanarak tahmin edilen saha etkilerini, üç boyutlu model sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Üç boyutlu modellemenin kullanıldığı alanlardan ve iki boyutlu modelleme ile arasındaki farklardan bahsetmişlerdir.

Poursartip vd. (2017), tipik iki boyutlu özelliklerin frekans alanında parametrik araştırmalar yoluyla topografik düzensizliklerin yer hareketi ve yerel saha tepkisi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Topografik özellikler ile baskın dalga boyu arasındaki ilişkiye bağlı olan amplifikasyon ve de-amplifikasyon modelleri bu çalışmada sunulmuştur.

de Silva vd. (2017), bu çalışmada yapının doğrusal olmayan davranışı üzerindeki etkilerini, doğrusal olmayan statik analizler ile değerlendirmişlerdir. Ortaya çıkan veriler, 1456'da Napoli, İtalya'da meydana gelen deprem verileriyle karşılaştırılmış ve bir boyutlu sismik tepki analizleri yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda, zemin-temel-yapı etkileşimi doğrusal olmayan statik ve dinamik analizleri karşılaştırılmıştır.

Dikmen ve Tanırcan (2017) tarafından Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü tarafından işletilmekte olan iki kuyuiçi ağdaki zemin büyütmesi incelenmiştir. 30 adet orta büyüklükteki deprem kaydı kullanılan bu çalışmada yatay/düşey spektral oran (HVSR) ve standart spektral oran (SSR) yöntemleri kullanılmıştır.

Mutlu vd. (2017), bu çalışmada Eskişehir, Türkiye merkez bölgesinin V_s30 haritasının üretilmesi için 87 adet zemin sondajı ve 23 adet sismik kırılma çalışması verilerini kullanmışlardır. Eurocode-8, NEHRP vb. yönetmeliklerde bu V_s değerleri ile zemin büyütmesi gibi analizlerin yapılmasına olanak sağlanmıştır. Oluşturulacak bu haritaların gelecekte bu bölgede gerçekleşecek çalışmalar için bir referans olması planlanmıştır.

Tuncel vd. (2017), bu çalışmada 112 noktada toplanan tek istasyonlu mikrotremor verileri ile senaryo deprem parametreleri kullanılarak çalışma alanının dinamik büyütme faktör dağılımlarını elde etmişlerdir. Ayrıca, zemin büyütme değerlerini hesaplamak için 43 profilde MASW olarak bilinen yüzey dalgası aktif yöntemi uygulamışlardır.

Wang vd. (2018), çalışma yapılan bölgede kaydedilen kuvvetli yer hareketi özelliklerini analiz etmişlerdir. Sarsma tablası deneyleri ve sismik yer hareketi üzerinde lös tortusunun kalınlık ve eğiminin arttırılması üzerine analizler yapmışlardır. Bu çalışmanın

sonucunda büyütme etkilerinin lös yatağının kalınlığı ve eğiminin artmasıyla daha baskın olduğu gözlemlenmiştir.

Farrugia vd. (2018), yaptıkları bu çalışmada Alberta, Kanada'daki sismik istasyonlarda saha yüzey jeolojisine dayalı olarak zemin büyütme analizlerini üç ampirik büyütme fonksiyonu oluşturmak üzere deprem kayıtlarından ve mikrotremor ölçümlerinden faydalanarak yapmışlardır.

Wang vd. (2018), yaptıkları çalışmada yerel bir test sahası kullanarak üç boyutlu spektral eleman yöntemine dayalı yer hareketi amplifikasyonunu simüle etmişlerdir. Sonuçlarda, yer hareketlerinin topografya amplifikasyonunun frekansa bağlı olduğu ortaya çıkmıştır. Büyütme modelinin, eğim açılarının yanı sıra daha küçük ölçekli topografik özelliklerle daha yakından ilişkili halde olduğunu sunmuşlardır. Aynı zamanda malzeme sönümleme etkisinin topografik etkilerden ayrıştırılabileceğini ve azalma faktörü kullanılarak modellenebileceğini göstermişlerdir.

Zhu vd. (2018), sayısal bir yaklaşım kullanarak bir boyutlu analizler ile derin havzalardaki şiddet faktörünü istatistiksel anlamda nicelleştirmeyi amaçlamışlardır. 32 adet heterojen derin havza formasyonu ve 9 sismik hareket kullanılmıştır.

İyisan vd. (2018), bir havza modeli oluşturularak zemin büyütmesi ve spektral ivme değerlerinin anakaya eğimine bağlı değişimini bir boyutlu ve iki boyutlu dinamik analizler yaparak incelemişlerdir.

Zhu vd. (2018), araştırmalarında bir boyutlu zemin büyütme analizi yaparak havza kaynaklı şiddetlenmeye odaklanmışlardır. Bir boyutlu tabanlı yaklaşımların sığ havzalarda uygulanabilirliğine, derin havzalarda ise verimli sonuçların elde edilememesinin nedenlerine değinilmiştir.

Sarıkaya (2018), yapmış olduğu bu tez çalışmasında deprem anındaki tünel-yapı-zemin etkileşiminin zemin büyütmesine olan etkilerini incelemiştir. Analizler Plaxis 2D programıyla yapılmıştır. Çalışmanın sonucu olarak tünel derinliği arttıkça tünel-yapı-zemin

etkileşimi azaldığından dolayı yüzeydeki zemin büyütmesi ve ivme değerleri azaldığı belirlenmiştir.

Gupta ve Sawant (2018), depreme eğilimli bir bölgede istinat duvarı tasarımı için deprem anındaki aktif toprak basıncını inceledikleri bir çalışma ortaya koymuşlardır. Pseudo-statik ve pseudo-dinamik yaklaşımların zemin büyütmesinin etkisi dikkate alınmadan kohezyonsuz zemin dolgusu için yaygın olarak kullanılmasına karşın bu çalışmada pseudo-dinamik yaklaşımın zemin büyütmesinin toprak basıncına olan etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmanın sonucu olarak, eğimli istinat duvarı arka yüzündeki deprem anındaki aktif toprak basınç dağılımını hesaplamak için genelleştirilmiş bir formül sunulmuştur.

Garini vd. (2018), 2003 Tokachi-oki depremi referans alınarak Hokkaido, Japonya'da üç bölge için esnek olmayan zemin büyütmesi analizi yapmışlardır. Amaç; kalibrasyon olmadan ve zemin tabakası hakkında eksik veri ile doğrusal olmayan yaklaşımların kabul edilebilir sonuçlarının elde edilebileceğini tespit etmektir. İvme-zaman geçmişleri ve zemin yüzeyindeki tepki spektrumları biçiminde hesaplanan sonuçlar, kaydedilen hareketlerle sistematik olarak karşılaştırılmıştır.

Yogatama ve Tirta (2018), SNI 1726-2012'de yer alan $(V_s)_{30}$ parametresinden türetilen saha faktörleri ile Cadet vd. (2012) çalışmalarında kullandıkları zemin profili doğal frekansı (f_0) arasında karşılaştırma yapmışlardır. Lineer visko-elastik durum dikkate alınarak, önceki iki yaklaşım için bir kıyaslama üç seri stokastik saha tepki analizi ile yapılmıştır. Her stokastik model seti için 1000 zemin profili oluşturulmuş ve spektral oran elde etmek için doğrusal tepkileri hesaplanmıştır.

Yamanaka vd. (2018), Eskişehir, Türkiye'de 15 kuvvetli hareket istasyonunda temel üzerindeki sığ ve derin tortul tabakaların S-dalgası hız modellerini tahmin etmişlerdir. Sığ bir boyutlu S-dalga hızı modellerinin tespiti için bölgedeki 8 istasyonda mikrotremor ölçümleri yapılmıştır. Bu bölgede 3 Hz'den daha düşük bir frekans aralığında zemin büyütmesinde sığ zemin tabakalarının önemli bir etkisinin olmadığı tespit edilirken derin zemin tabakalarında bu etkinin göz önünde bulundurulması önerilmiştir.

Delfebriyadi vd. (2019), anakayaya kadar derinliğe bağlı olarak zemin yüzeyindeki potansiyel deprem sarsıntısının yoğunluğunu tahmin etmek için 5745 adet simülasyonda bir boyutlu analiz yapmışlardır. Sonucunda ilgili derinlik aralıklarında spektral ivmenin büyütme değerlerinin grafikleri oluşturulmuştur.

Özyazıcıoğlu vd. (2019), bu çalışmada Erzincan, Türkiye merkez bölgede EduShake / ProShake programı kullanarak eşdeğer doğrusal zemin büyütme analizleri yapmışlardır. 8 farklı anakaya hareketi ile zemin yüzeyinde oluşan ortalama hareketin ivme-zaman grafikleri ve ortalama görünür spektral ivme grafikleri (PSA) oluşturulup TDY-2007 yönetmeliğindeki veriler ile karşılaştırılmıştır.

Afacan ve Güler (2019), seçtikleri belirli bir bölgeden 5 adet sondajı inceleyip, zemin tabakalarının tespitini ve farklı deprem kayıtlarıyla zemin büyütme analizlerini DeepSoil programıyla yapmışlardır. Sonuç olarak yüzey tepkisi hesaplanarak TBDY-2018'in bu bölge için önermiş olduğu tepki spektrumları ile karşılaştırılarak performansı değerlendirilmiştir.

Azimi vd. (2019), yaptıkları bu çalışmada zemin koşullarının zemin büyütme katsayılarına olan etkisini inceleyip, farklı yönetmeliklerdeki çeşitli tasarım ivme spektrumlarının kullanılmasında betonarme taşıyıcı sistemlerin maliyetine ve sismik performansına olan etkilerini araştırmışlardır.

Gücek ve Zorluer (2019), Afyonkarahisar, Türkiye'de Uydukent bölgesinde sismik mikrobölgeleme için geoteknik değerlendirme çalışmaları yapmışlardır. Bu bölgede önceden yapılmış olan laboratuvar deneylerinin sonuçları işlenerek zeminin fiziksel ve indeks özellikleri belirlenmiştir. Arazi deney sonuçlarından ise, farklı derinliklerdeki kayma dalgası hızlarını içeren sismik mikrobölgeleme haritası oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçların gelecekte bu bölgede gerçekleşecek çalışmalar için bir referans olması planlanmıştır.

Arslan (2019), yapmış olduğu bu tez çalışmasında Bursa, Türkiye'de Osmangazi bölgesinde daha önceden yapılmış olan sondaj verilerini ve sismik çalışmaları kullanarak eşdeğer lineer analiz yöntemi ile zemin davranış analizlerini yapmış ve zemin büyütmesini

incelemiştir. Osmangazi bölgesindeki zeminin, seçilen deprem hareketlerinden nasıl etkileneceğine dair çalışmalarda bulunulmuştur.

Ildır (2019), yaptığı bu tez çalışmasında sıvılaşma potansiyeli yüksek zeminlerde zemin büyütme faktörünü incelemiştir. Taş kolonlu ve taş kolonsuz modeller oluşturulmuş olup farklı deprem yükleri altında mevcut yapıların vaka analizleri yapılmıştır. Flac 2D programı ile oluşturulan modellerde yapılmış analizler sonucunda, düşey ve yatay ivme değişimleri incelenmiştir.

Bajaj ve Anbazhagan (2019), Ganj Havzası için zemin büyütme katsayıları ve ivme tasarım tepki spektrumları önermişlerdir. 275 adet kayma dalgası hızı profilinde, 50 yılda %10 aşılma olasılığı için sismik tehlike haritasına bağlı doğrusal olmayan tepki analizleri yapılmıştır. Önermiş oldukları yöntemde ivme tasarım tepki spektrumları, farklı havza çalışmaları ve BIS:1893 ile karşılaştırılmıştır.

Türköz (2019), çalışmasında Eskişehir, Türkiye'de yer alan İnönü ilçesinin zemin özelliklerini, Standart Penetrasyon Testi (SPT) ve Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi (MASW) yöntemleri ile değerlendirmiştir. Sismik aktivite ile ilgili çalışmalar, olasılıksal sismik tehlike analizlerine dayalı olarak yapılmıştır. Zemin büyütme analizleri; kullanılan yöntemlerden elde edilen veriler dikkate alınarak Shake2000 programı ile gerçekleştirilmiştir.

Jayalakshmi vd. (2020), Ganj Havzası'nın topografik özellikleri nedeniyle zemin büyütmesi meydana gelebileceğini düşündüklerinden dolayı spektral sonlu elemanlar yöntemi kullanarak üç boyutlu analiz yapmışlardır. Bu bölgedeki deprem verilerinin sınırlı olması sebebiyle yapılan bu çalışma sayesinde gelecekte meydana gelebilecek büyük depremler için yer hareketleri tahmin edilebilir olacaktır.

Bilican vd. (2021), bir boyutlu zemin büyütme analizlerinde kullanılan transfer fonksiyonlarını oluşturmak için yeni bir yöntem önermişlerdir. Literatürde zemin hakim periyodunu bulmak amacıyla kullanılan değiştirilmiş sonlu elemanlar taşıma matrisi yöntemi (DSETM) transfer fonksiyonlarının bulunması için kullanılmıştır. Önerilen

yöntemin uygulanabilirliği için Scilab ortamında bir program yazılmıştır. Çalışmanın sonucunda önerilen yöntem iki örnek üzerinde gösterilmiştir. Bu örneklerden elde edilen sonuçlar hem DSETM yöntemiyle hem de literatür çalışmalarıyla karşılaştırılmıştır.

Güler (2021), bu tez çalışması için Kuzey Anadolu Fay hattı üzerinde bulunan Sakarya, Türkiye'deki bir bölgeden alınan 4 adet sondaj çalışmasıyla birlikte örselenmemiş numune elde ederek laboratuvar ortamında rezonant kolon ve dinamik üç eksenli deneyler yapmıştır. 11 adet deprem ivme kaydı kullanarak TBDY-2018 yönetmeliğinde tanımlanan yöntemle ölçeklendirerek DeepSoil programıyla beraber bir boyutlu eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan zemin büyütme analizleri yapmıştır. Çalışmanın sonucunda bölgenin zemin büyütme değerleri iki farklı ölçeklendirme yöntemiyle karşılaştırılmış olup bölgenin spektral parametreleri ise TBDY-2018 yönetmeliğinin önerdiği spektrum zarfıyla karşılaştırılmıştır.

Deng vd. (2021), bu çalışmada istinat duvarı üzerindeki deprem anındaki aktif toprak basıncını sırasıyla pseudo-dinamik yöntem ve sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplamışlardır. Sonuç olarak, istinat duvarı yüksekliği arttıkça büyütme faktörlerinin arttığı gözlemlenmiştir.

Huang vd. (2021), iki boyutlu spektral eleman yöntemi kullanarak mekansal olarak değişen kayma dalgası hızıyla, zemin büyütmesi hakkında bir çalışma yapmışlardır. Analizlerin sonucunda, mekânsal değişkenlikte zemin heterojenliğinin ve dalga boyu uzunluk ölçeğinin aynı anda dikkate alınması gerektiği tespit edilmiştir.

Yavuzoğlu vd. (2021), temel topoğrafyasının soğrulma ve dispersiyonun yüzey dalgası üzerindeki etkileri modelleyip sonuçları gerçek patlama verisiyle değerlendirmişlerdir.

Jaber (2021), yaptığı bu tez çalışmasında Konya, Türkiye'de Ilgın ilçesinde yapılmış çalışmalardan elde edilen veriler ile birlikte zemin büyütmesini tespit edip, haritalarını oluşturmuştur. Zemin tepki analizleri, seçilen deprem kaydı etkisi altında DeepSoil programı

ile yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda Ilgın ilçesindeki zemin profilinin bir deprem sırasında nasıl davranacağı hakkında değerlendirmelerde bulunulmuştur.

Toyğar (2021), bu tez çalışmasında Van, Türkiye'de iki merkez ilçe olan İpekyolu ve Tuşba bölgelerinde zemin büyütme faktörlerini incelemeyi amaçlamıştır. Elde edilen zemin verileri DeepSoil programıyla analiz edilmiştir. Analizler için Van Fayı ve Çaldıran Fayı referans alınmış olup, 11 deprem kaydı seçilmiştir. Seçilen kayıtlar SeismoMatch programında TBDY-2018 yönetmeliğini önermiş olduğu spektrumla eşleştirilmiştir.

Liu vd. (2022), bu çalışmada tortul havzalarının sismik davranışının nicel olarak analiz edilmesi için üç boyutlu doğrusal olmayan sonlu eleman modeli kullanmışlardır. Girdi yer hareketi arttıkça, daha derin zemin katmanlarında odaklama ve büyütme etkilerinin daha önemli hale geldiği sonucuna ulaşmışlardır.

Arjuna vd. (2024), Malezya'daki 10 profil seçilerek, en büyük yer ivmesi ve zemin büyütmesini değerlendirmek için doğrusal olmayan (NL) yöntemler kullanılarak bir boyutlu (1D) sismik zemin tepkisi analizi gerçekleştirilmiştir. Loma Prieta, Acheh ve Ranau gibi üç deprem zaman geçmişi 0.03g, 0.07g ve 0.10g olarak ölçeklendirilip tüm sahalara uygulanmıştır. Sonuçlar, hesaplanan PGA ve zemin büyütme faktörlerinin, C tipi zeminlerde D tipi zeminlere kıyasla daha yüksek olduğunu göstermiştir. Ayrıca, NL sonuçları, Malezya'daki yumuşak zeminlerde zayıflama meydana geldiğini ortaya koymuştur.

Araştırmalar sonucunda, boyut etkisinin zemin büyütmesi üzerindeki rolü üzerine çeşitli çalışmalar yapılmış olmakla birlikte, bu analizlerin genellikle tekil olarak değerlendirildiği ve bu üç yaklaşımın bir arada incelendiği çalışmaların sınırlı olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada, üç farklı yaklaşımın karşılaştırılması yapılarak, hangi problem türlerinde hangi boyut analiz yönteminin daha uygun olduğu belirlenmiştir. Farklı analiz yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları ortaya konulmuş ve hangi koşullar altında hangi yöntemin tercih edilmesi gerektiği örneklerle açıklanmıştır.

3. ZEMİNLERİN DİNAMİK ÖZELLİKLERİ

Zeminlerin tekrar eden yükler altındaki davranışları, deprem sırasında yapılarda oluşabilecek hasar seviyelerini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, zemin davranışının saha koşullarına özel olarak belirlenmesi ve dinamik zemin parametrelerinin yapıların tasarımına entegre edilmesi büyük önem taşımaktadır. Deprem etkilerinin belirli bir bölgedeki etkilerinin incelenmesi ve yer hareketinin doğru bir şekilde tanımlanması da bu süreçte kritik rol oynamaktadır. Yer hareketi, çevre ve insanları etkileyen güçleri ifade eder ve mühendislik açısından bu hareketin özelliklerinin belirlenmesi gereklidir.

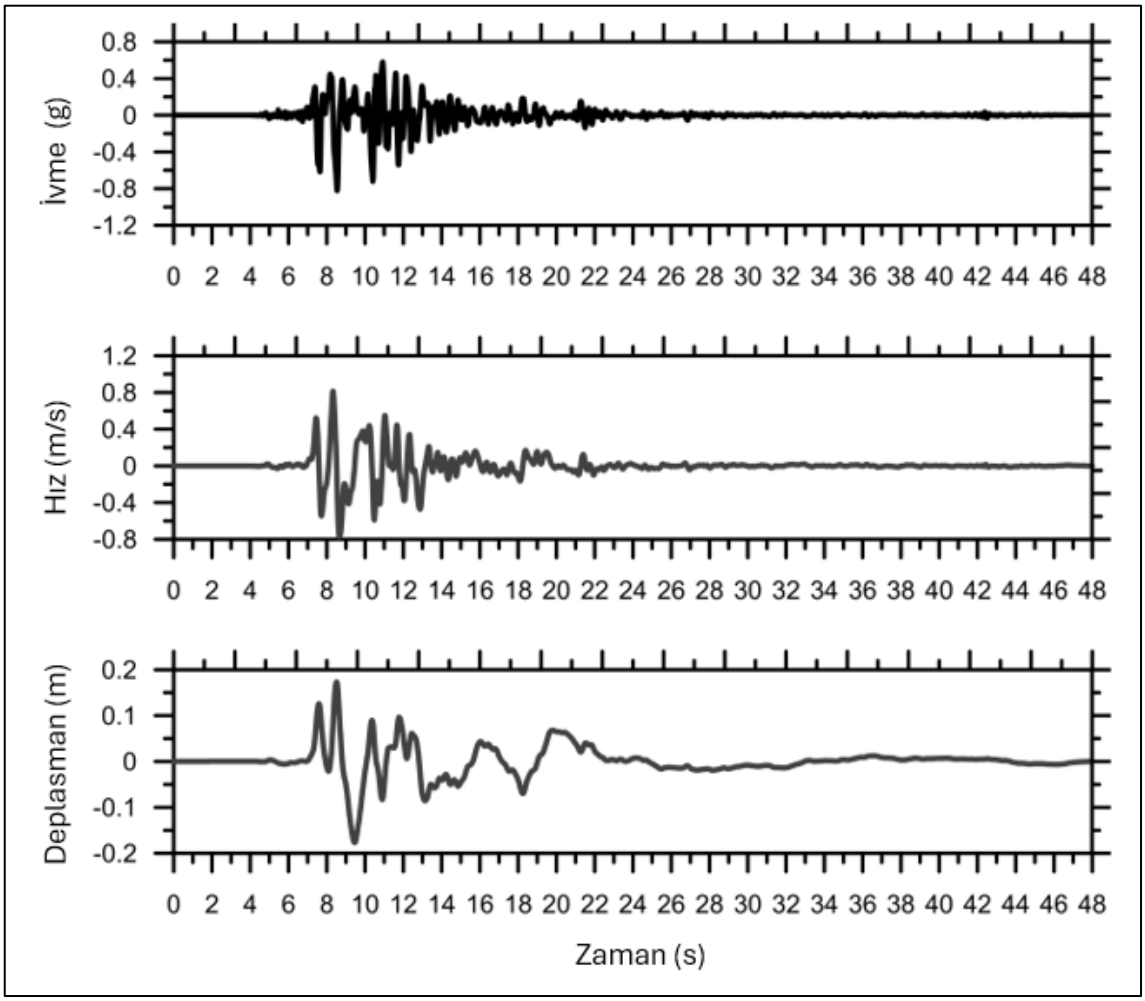
3.1. Yer Hareketi Ölçümü Parametreleri

Depremler sırasında oluşan yer hareketlerinin karakteristik özelliklerinin tespit edilmesi ve zemin davranışının bu parametreler ışığında değerlendirilmesi gerekmektedir. Yer hareketi genlik, frekans içeriği ve süre olmak üzere üç temel parametre ile tanımlanır. Bu parametreler, depremin etkilerini anlamada anahtar rol oynar (Kramer, 1996).

3.1.1. Genlik Parametreleri

Periyodik bir hareketin en yüksek değeri genlik olarak adlandırılır. Yer hareketinin tanımlanmasında ise zaman tanım alanı kullanılmaktadır. Deprem esnasında ölçülen temel parametreler ivme, hız ve yer değiştirmedir. Ölçümler genellikle ivme kaydı ile yapılır, diğer iki parametre ise integral veya türev hesaplamalarıyla elde edilir (Kramer, 1996).

Deprem kayıt istasyonlarında kaydedilen ivme-zaman grafikleri ile bu grafikten elde edilen hız ve yer değiştirme-zaman grafikleri, depremin yer hareketi özelliklerini anlamada büyük önem taşır. Örnek olarak, Kocaeli depremine ait ivme, hız ve yer değiştirme grafikleri Şekil 3.1'de sunulmuştur. Bu grafikler, deprem sırasında zeminin ve yapının tepkisini incelemek için temel verilerdir ve dinamik analizlerde sıkça kullanılır.

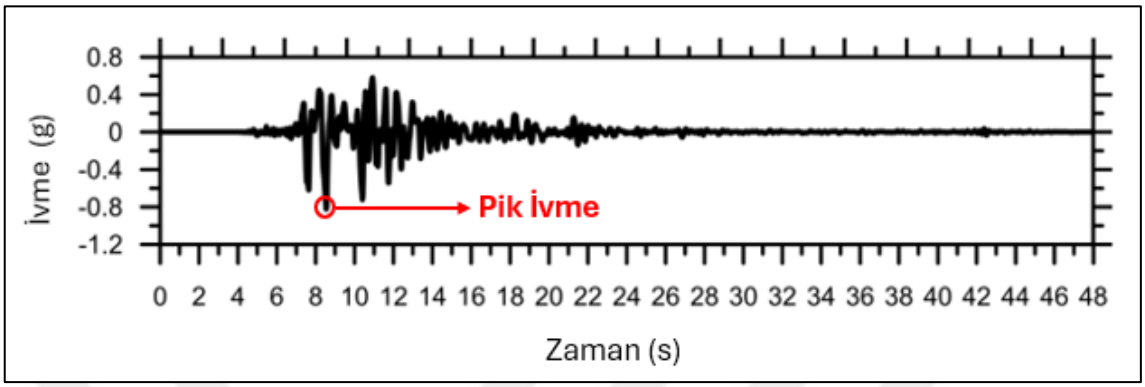


Şekil 3.1. Kocaeli depremine ait ivme-hız-deplasman grafikleri (Türköz ve Afacan, 2019)

3.1.1.1. Pik İvme, Pik Hız ve Pik Yer Değiştirmelerin Belirlenmesi

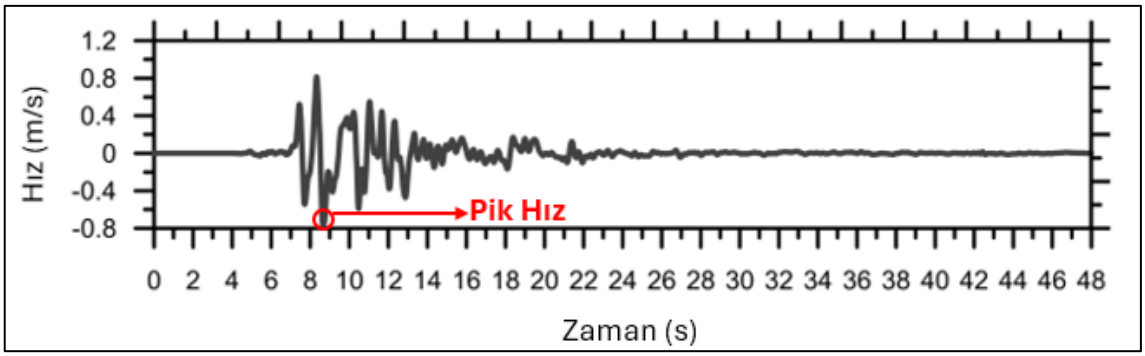
Depremin genliğini belirlemede temel bir ölçüt olan pik yatay yer ivmesi, aynı zamanda akselerogramda gösterilen yatay ivmenin mutlak değer olarak maksimum olanıdır. Depremlerde yer hareketini tanımlamak amacıyla yatay hareketler dikkate alınır. Düşey hareketler ise genellikle kullanılmaz; bunun nedeni, yer çekimi etkisiyle statik düşey kuvvetlerin deprem esnasında daha emniyetli olmasıdır. Pik ivme değeri, depremin şiddeti hakkında önemli bir bilgi sağlar ancak yer hareketinin süresi ve frekans içeriği ile ilgili detaylı bilgi vermez. Yüksek pik ivmeli bir yer hareketi genellikle düşük pik ivmeli bir hareketten daha yıkıcıdır. Ancak pik ivmenin büyüklüğü kadar, süresi de yer hareketinin

etkilerini değerlendirmede oldukça kritik bir rol oynar (Kramer, 1996). Örnek olarak, Kocaeli depremine ait pik ivme Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Kocaeli depremine ait ivme-zaman grafiğinde pik ivme

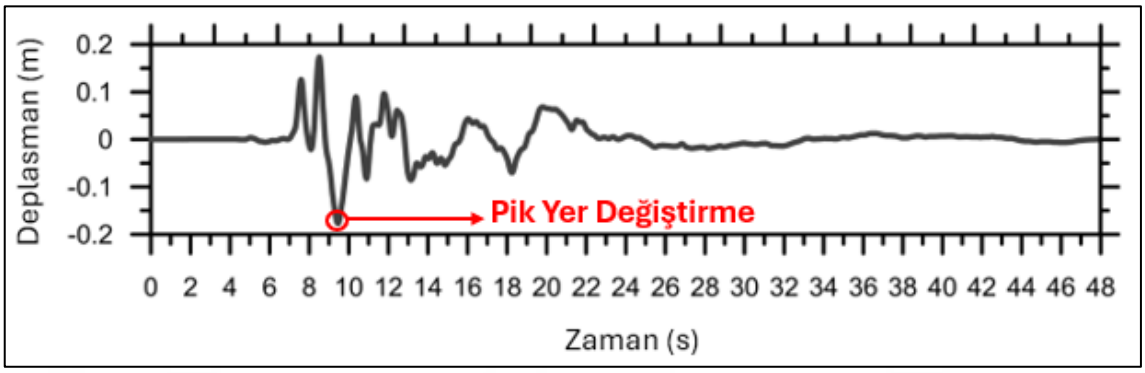
Yer hareketinin tanımlanmasında önemli bir diğer parametre pik yatay hızdır. Orta frekanslardaki yer hareketinin genliğini daha doğru bir şekilde tanımlamak için pik ivme yerine pik hız değeri daha uygun olmaktadır. Orta frekans aralığında yüklemeye maruz kalan yüksek ve esnek yapılar, köprüler gibi yapılar için oluşabilecek hasarları belirlemede pik hız değerleri daha doğru sonuçlar vermektedir. Örnek olarak, Kocaeli depremine ait pik hız Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Kocaeli depremine ait hız-zaman grafiğinde pik hız

Yer hareketinin düşük frekanslı bileşenleri ile pik yer değiştirme değerleri bağlantılıdır. Pik yer değiştirmenin, pik hız ve pik ivme gibi parametrelerle kıyaslandığında daha az kullanıldığı görülmektedir. Ancak uzun süreli yer hareketlerinin analizinde önemli

bir parametredir. Örnek olarak, Kocaeli depremine ait pik yer değiştirme Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Kocaeli depremine ait deplasman-zaman grafiğinde pik yer değiştirme

3.1.2. Frekans İçeriği ve Spektral Parametreler

Frekans içeriği, yer hareketinin genliğinin farklı frekanslar arasındaki dağılımını tanımlamaktadır. Depremler oldukça geniş frekans aralığında dağılım gösterir ve bu dağılım, deprem etkilerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Bu sebeple, yer hareketinin özelliklerinin doğru bir şekilde tanımlanması gerekmektedir.

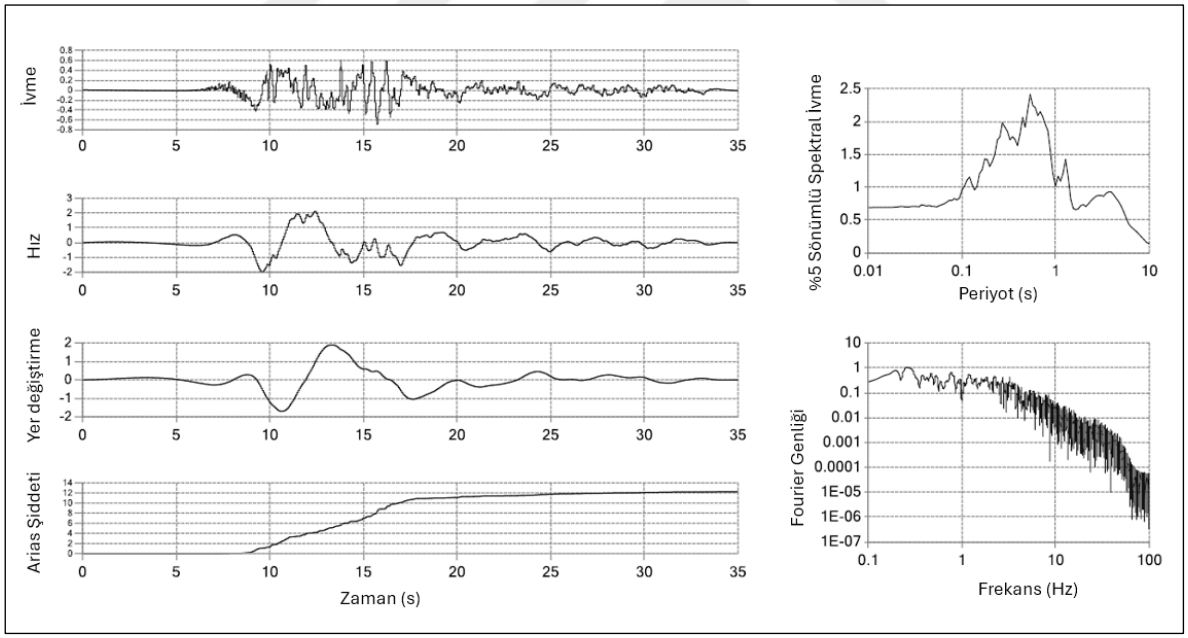
3.1.2.1. Yer Hareketi Spektrumlarının Analizi

Fourier spektrumu, harmonik hareketin frekans, genlik ve faz bileşenlerinin toplamı olarak tanımlanmaktadır. Fourier genlik spektrumu yer hareketine ait genliğin frekansa göre dağılımını gösterir ve bu genlik spektrumu dar olduğunda hareket daha düzgün iken, geniş spektrumlu hareketlerde farklı frekanslar yer alır ve bu hareketler zamana bağlı olarak sürekli değişen bir yapı sergiler (Kramer, 1996). x(t) periyodik bir fonksiyon olup, Fourier serisi ile şu şekilde ifade edilmektedir (Denklem 3.1):

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

Tepki spektrumları özellikle deprem mühendisliği uygulamalarında oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. TDS (tek dereceli serbestlikli) sistemler için, doğal frekans ve

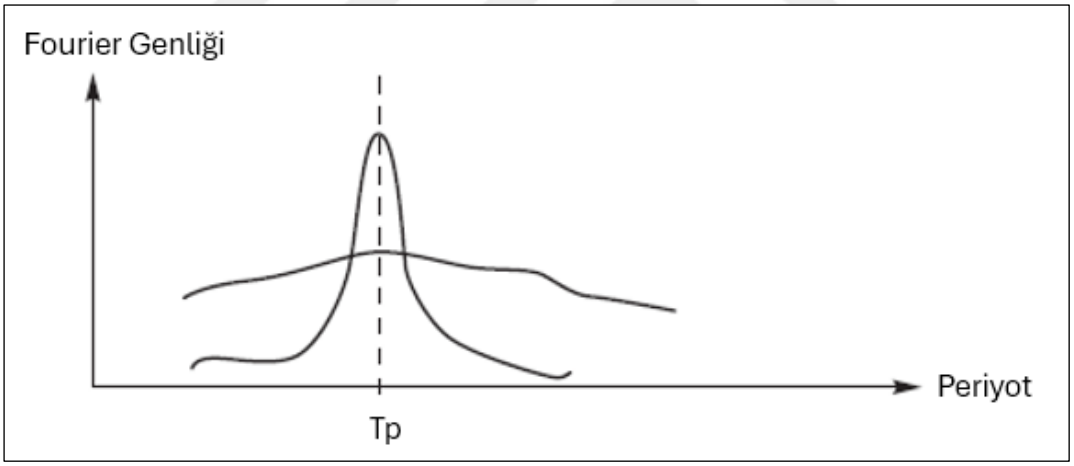
sönüm oranı dikkate alınarak belirli bir harekete verilen maksimum tepki şeklinde tanımlanmaktadır. Tasarım spektrumları, deprem etkisine maruz yeni bir yapının tasarım aşamasında yapıya etkiyecek olan deprem yüklerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Tasarım spektrumunda yer alan spektral ivme (S_a) değeri, yapıya iletilebilecek maksimum ivmeyi temsil etmekte olup sismik kuvvetlerin büyüklüğünü belirlemek için kullanılır. Spektral hız (S_v), yapıya aktarılan enerjinin maksimumunu ifade eder. Bu enerji, yapının elemanlarının deformasyon yeteneklerini de dikkate alarak tasarım yapılmasına olanak sağlamaktadır. Spektral yer değiştirme (S_d) yapıda oluşacak olan maksimum deplasman değerini tanımlar ve yapının elastik sınırlar içerisinde kalıp kalamayacağını belirlemede kullanılır. Bu spektral parametreler, yapı tasarımında deprem açısından güvenliğin sağlanması ve tasarım esnasında gerekmekte olan mühendislik hesaplamalarının yapılması yönünde kritik bir öneme sahiptir. Kocaeli depreminin Fourier genlik spektrumu Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5. Kocaeli depremine ait Fourier genlik spektrumu (Güler, 2021)

3.1.2.2. Spektral Parametrelerin Tanımlanması

Yer hareketinin yapılar üzerinde meydana getirdiği etkilerini incelemek için tepki spektrumlarına ek olarak daha fazla bilgi gerekmektedir. Bu ihtiyaç doğrultusunda, spektral parametreler geliştirilmiştir. Spektrumların karmaşık fonksiyon yapısı nedeniyle, bu parametreler yorumlama ve bilgi çıkarma süreçlerini kolaylaştırmaktadır. Bu parametrelerden biri olan baskın periyot (T_p), yer hareketinin frekansla ilgili bilgileri sağlayan tek parametre olma özelliğine sahiptir. T_p, Fourier genlik spektrumundaki en yüksek değere karşılık olarak gelen titreşim periyodu şeklinde tanımlanır. Genellikle düzleştirilmiş spektrumdan elde edilen bu parametre, istenmeyen pik durumların etkisini azaltmak için kullanılmaktadır (Kramer, 1996). Farklı frekans içeriklerine sahip yer hareketleri incelendiğinde, aynı baskın periyota sahip olabilecekleri gözlemlenmektedir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Eşit baskın periyotta farklı frekansta Fourier genlik spektrumları (Kramer, 1996)

3.1.3. Yer Hareketinin Süresi ve Etkileri

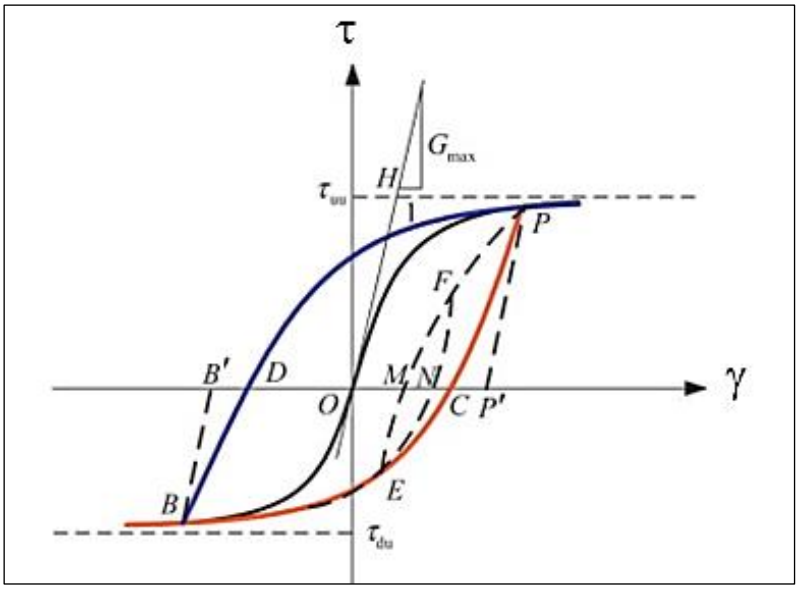
Yer hareketi süresi, fayda birikmiş olan enerji boşalımı için gereken zaman ile ilişkilidir ve bu sürenin uzunluğu, depremlerin yol açtığı hasarları artırma potansiyeline sahiptir. Faylardaki yırtılmanın uzunluğu veya büyüklüğü arttıkça, ortaya çıkan yer hareketinin süresi de uzamaktadır. Frekans özelliklerine göre incelendiğinde, kısa süreli yüksek genlikli depremler yıkıcı etkiler oluşturmayabilirken; düşük genlikli ama uzun süreli

depremler oldukça ciddi hasarlara yol açabilmektedir. Bu durum, yer hareketinin süresinin depremin yıkıcılığında önemli bir faktör olduğunu göstermektedir. Ayrıca, deprem bölgelerindeki yer altı su seviyesi, yapı kalitesi, zemin yapısı yükleme sürelerinden etkilenerek yapısal hasarın artmasına yol açmaktadır (Kramer, 1996).

3.2. Zeminlerde Dinamik Özelliklerin Belirlenmesi

Depremler, zeminlerde gerilme ve deformasyon özelliklerini etkileyerek, büyük deformasyonlar ve yapısal hasarların ortaya çıkmasına neden olabilir. Deprem bölgelerinde inşa edilecek yapılar için zemin dinamik özelliklerinin doğru bir şekilde belirlenmesi, tasarım aşamasında büyük önem taşımaktadır. Bu parametrelerin doğru tanımlanması ve mühendislik hesaplarında kullanılması, deprem anında oluşabilecek hasarların minimize edilmesine yardımcı olur. Zeminlerin sahaya özgü analizlerinde sönümleme eğrisi ve kayma modülü değerlerinin belirlenmesi gerekir. Sahaya özgü olarak oluşturulacak tasarım spektrumları ile yer yüzeyindeki hareketlerin ve tekrarlı yükler altındaki zeminlerin gösterdiği gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin tanımlanması da önem arz etmektedir.

3.2.1. Sönümleme Oranı ve Kayma Modülünün Belirlenmesi



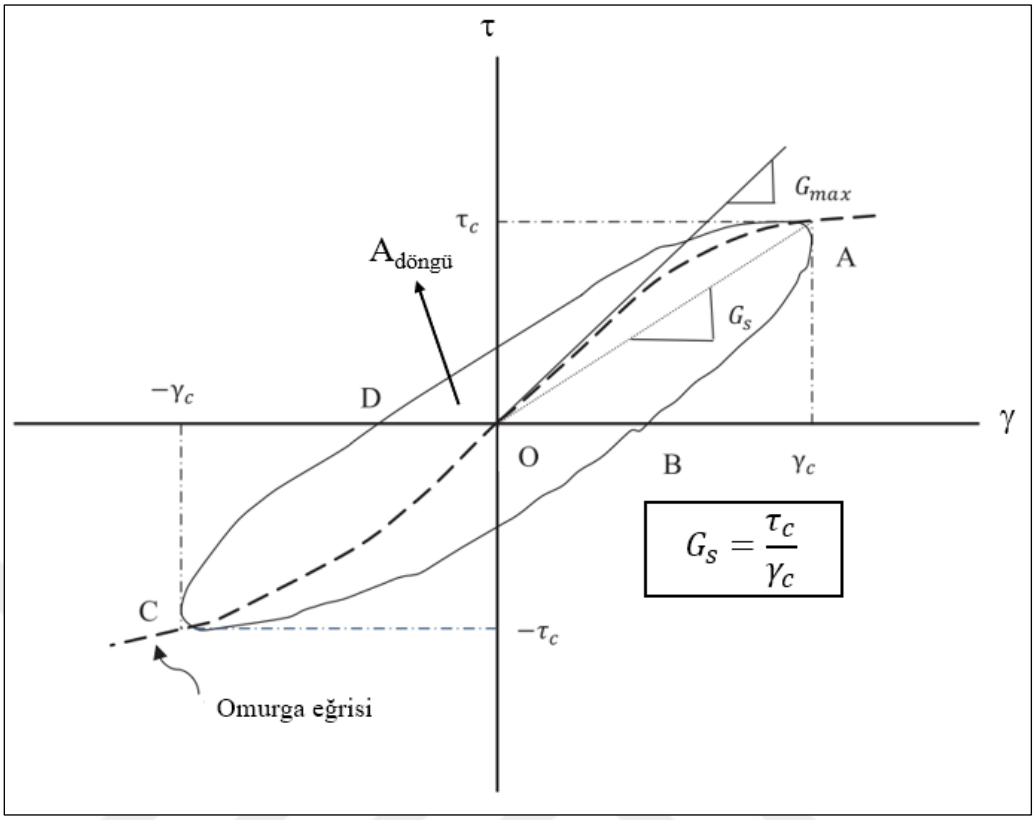
Şekil 3.7. Zeminlerde gerilme ve şekil değiştirme davranışı (Chen vd., 2013)

Tekrar eden yüklemelerin zemine uygulanması, histerezis döngüsü oluşumuna yol açar. Zeminlerde tekrarlanan yüklere maruz kaldığı davranışını anlamak için zeminin rijitliği ve geniş aralıktaki gerilme-şekil değiştirme davranışı olmak üzere iki temel özellik dikkate alınır. Zeminlerin sahip olduğu gerilme-şekil değiştirme karakteristikleri, farklı birim kayma deformasyonu seviyelerinde tekrar eden yüklemeler sonucu sönümleme oranı ve kayma modülündeki değişiklikler ile tanımlanır. Dinamik yükleme etkisiyle bir zemin numunesinin gerilme-şekil değiştirme davranışındaki farklılıkları göstermekte olan histerezis döngüsü Şekil 3.7'de sunulmaktadır. Histerezis döngüleri bir araya gelmesiyle Şekil 3.6'da siyah ile temsil edilen omurga eğrisi meydana gelir. Kırmızı ile temsil edilen eğri, düşük şekil değiştirmeli histerezis eğrisi iken; mavi ile temsil edilen eğri ise yüksek şekil değiştirmeye sahip histerezis eğrisini göstermektedir.

Kayma gerinimindeki sekant kayma modülü, τ-γ döngüsünün eğimi alınarak hesaplanabilmektedir. Denklem 3.2 ile de bu ifade gösterilmiştir. Denklemde yer alan τ, kayma gerilmesi; γ, birim kayma deformasyonu; G ise sekant kayma modülü olarak temsil edilmektedir. Bu formül, zeminlerin yükleme altında gösterdiği elastik davranışın bir göstergesi olarak kullanılır ve zeminlerdeki dinamik özellikleri belirlemede önemli bir rol oynamaktadır. Zemindeki maksimum rijitliği tanımlayan maksimum dinamik kayma modülü (G_{max}), saha deneyleri ile bulunan kayma dalgası hızı (V_s) ile hesaplanır. Bu ilişki, zeminin yoğunluğu (ρ) ve hızına (V_s) göre Denklem 3.3 ile gösterilmiştir.

$$G = {}^{\tau}/_{\gamma} \tag{3.2}$$

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



Şekil 3.8. Tekrarlı yüklemeler altındaki zeminin gerilme-gerinim ilişkisi (Senapati vd., 2019)

Zeminlere yapılan her bir yükleme döngüsünde zemin belirli deformasyona uğrayarak bir miktar enerji soğurur. Döngü sonunda kaybolan enerji miktarı, sönümleme oranı ile ifade edilir. Sönümleme oranı gerilme-gerinim histerezisinden de hesaplanabilmektedir. Sönümleme özelliği, zeminin deprem yüklerime karşı davranışı ve zemindeki dalga yayılımını anlamak ve modellemek gibi dinamik unsurları çözmek için gereklidir. Bu durum, enerjinin zemin katmanları arasında iletilme şekli ve dinamik yükleme sonrası zemin yüzeyindeki yer değiştirme şeklinin anlaşılmasına da olanak sağlamaktadır.

Şekil 3.8, dinamik yüklemeye maruz bırakılmış bir zeminde kaydedilen bir döngüyü göstermektedir. Belirli bir döngü için kaydedilen maksimum-minimum kayma gerilmeleri ortalaması τ_c olarak, maksimum-minimum kayma şekil değiştirmelerin ortalaması ise γ_c olarak temsil edilmiştir. Şekil 3.8'de temsil edilen döngünün alanı $A_{döngü}$'nün hesaplanmasıyla birlikte histeretik sönüm oranı Denklem 3.4 kullanılarak bulunmaktadır.

Kayma modülü ve zeminlerin sönüm özellikleri, dinamik geoteknik mühendisliği için kritik öneme sahip iki temel özelliktir.

$$D = \frac{1}{2\pi} * \frac{A_{döngü}}{G_s * \gamma_c^2} \tag{3.4}$$

3.3. Zemin Dinamik Özelliklerini Belirlemede Kullanılan Laboratuvar Deneyleri

Zeminlerin dinamik özellikleri belirlemede çeşitli laboratuvar deneyleri kullanılmaktadır. Bu deney sistemleri, değişken deformasyon seviyelerinde kayma modülü ve sönüm oranı değerlerini elde etme amacı taşımaktadır. Bu deneylerin sonuçları, zeminlerin dinamik davranışlarının daha iyi anlaşılmasını sağlayarak, yapıların tasarımına yönelik önemli veriler sunmaktadır. Bu bağlamda, kullanılan bazı deney sistemleri şunlardır:

- Dinamik Üç Eksenli Deney Sistemi
- Bender Eleman Deney Sistemi
- Tekrarlı Basit Kesme Deney Sistemi
- Torsional (Burulmalı) Deney Sistemi
- Rezonant Kolon Deney Sistemi

3.3.1. Dinamik Üç Eksenli Deney (TRX) Sistemi

Deney mekanizması Şekil 3.9'da gösterildiği üzere, dinamik üç eksenli deney (TRX) sisteminde, çevre basıncı altında olan numuneye deformasyon kontrolü olacak şekilde yükleme uygulanarak gerilme-gerinim davranışı elde edilmektedir. Bu davranış, numunenin dinamik parametrelerinin hesaplanmasında kritik öneme sahiptir.



Şekil 3.9. Dinamik üç eksenli deney sistem mekanizması (Afacan ve Güler, 2019)

3.3.2. Bender Eleman Deney Sistemi

Bender Eleman Deney sistemi (Şekil 3.10), zeminlerin dinamik parametrelerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Deney sisteminde, zemin numunesine gönderilen dalga, bir başlıktan diğerine ulaşarak kayma dalgası hızı hesaplanır. Dalga, numune içindeki bir başlıktan gönderilirken, diğer başlık dalgayı elektrik sinyaline dönüştürür ve bu şekilde kayma dalgasının hızını ölçer. Elde edilen bu kayma dalgası hızı, daha sonra kayma modülü değerinin hesaplanmasında kullanılır. Bu süreç, zeminlerin dinamik özelliklerini belirlemeye ve zemin davranışının daha iyi anlaşılmasına olanak tanır.



Şekil 3.10. Bender eleman deney sistem mekanizması (Öner vd., 2013)

3.3.3. Tekrarlı Basit Kesme Deney Sistemi

Tekrarlı basit kesme deney sistemi (Şekil 3.11), ile numunenin birim deformasyon ile kayma gerilmesi arasındaki ilişkisi çevrimsel olarak elde edilir.



Şekil 3.11. Tekrarlı basit kesme deneyi sistem mekanizması (Erman, 2012)

3.3.4. Torsional (Burulmalı) Deney Sistemi

Torsional (Burulmalı) deney sisteminde silindirik bir numunenin, başlık ile burulması sağlanarak deney gerçekleşmektedir. Yüklemenin frekansı kademeli olacak şekilde artırılarak en yüksek deformasyon genliği belirlenir.

3.3.5. Rezonant Kolon Deney (RC) Sistemi

Bu deney sisteminde, burulma kuvveti belirli çevre basıncı altında uygulanarak zemin burulur. Zemin numunesinin baş kısmından farklı genlik ve frekanslarda dinamik tork uygulanır ve zemin numunesi bu şekilde burulur (Şekil 3.12). Dalganın yayılımı teorisi kullanılarak elde edilen rezonans frekansı ile kayma dalgası hızı hesaplanır ve bu değerler kullanılarak kayma modülü elde edilir.



Şekil 3.12. Rezonant kolon (RC) deney sistem mekanizması (Güler ve Afacan, 2020)

4. ZEMİNLERİN DİNAMİK ANALİZLERİ

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY 2018), binaların deprem güvenliği açısından tasarlanmasında dikkate alınması gereken zemin ve yapı davranışını belirleyen temel bir düzenlemedir. Bu yönetmelik, sahaya özel zemin davranışlarının doğru bir şekilde değerlendirilmesi ve yapıların deprem yüklerine karşı güvenli bir şekilde tasarlanmasını sağlamayı amaçlamaktadır. Sahaya özel zemin davranışı, zeminlerin yerel koşullarına ve özelliklerine bağlı olarak değişen dinamik tepkilerinin analizini içerir. Bu bölümde, sahaya özel zemin davranışının önemi ve TBDY 2018'in bu konudaki gereksinimleri detaylı bir şekilde ele alınacaktır.

Deprem sırasında zeminlerin davranışı, yerel zemin koşullarına bağlı olarak büyük farklılıklar gösterebilir. Bu nedenle, bir bölgedeki zeminlerin dinamik özelliklerinin ve tepkilerinin doğru bir şekilde anlaşılması, yapıların güvenli bir şekilde tasarlanması açısından kritik öneme sahiptir. Sahaya özel zemin davranışının belirlenmesi, aşağıdaki nedenlerden dolayı önemlidir:

4.1.1. Yerel Zemin Koşulları

Farklı zemin türleri (kil, çakıl, kum vb.), farklı dinamik tepkiler gösterir. Zeminlerin yerel koşullarının belirlenmesi, yapı temellerinin doğru bir şekilde tasarlanması ve deprem sırasında oluşabilecek potansiyel zemin problemlerinin (sıvılaşma, oturma) önceden tespit edilmesi açısından önemlidir.

4.1.2. Zemin-Yapı Etkileşimi

Yapıların zeminle olan etkileşimi, deprem sırasında yapının dinamik tepkisini etkiler. Sahaya özel zemin davranışının belirlenmesi, zemin-yapı etkileşiminin doğru bir şekilde modellenmesini ve yapıların deprem güvenliğinin artırılmasını sağlar.

4.1.3. TBDY 2018 - Sahaya Özel Zemin Davranışı

TBDY 2018, binaların deprem güvenliği açısından tasarlanmasında dikkate alınması gereken zemin ve yapı davranışlarını belirleyen kapsamlı bir yönetmeliktir. Bu yönetmelik, sahaya özel zemin davranışının doğru bir şekilde değerlendirilmesi ve yapıların deprem yüklerine karşı güvenli bir şekilde tasarlanmasını amaçlamaktadır. TBDY 2018'in sahaya özel zemin davranışı konusundaki gereksinimleri şu şekildedir:

4.1.3.1. Zemin Sınıflandırması ve Parametreler

TBDY 2018, zemin sınıflarını ve her sınıf için geçerli olan dinamik parametreleri tanımlar. Zeminler, kayma dalgası hızı (V_s), sönüm oranı, zemin tabakalarının kalınlığı ve yer altı su seviyesi gibi parametrelere göre sınıflandırılır. Bu sınıflandırma, zeminlerin deprem yüklerine karşı nasıl davranacağını belirlemekte kullanılır.

4.1.3.2. Sismik Tehlike Analizi

TBDY 2018, sahaya özel sismik tehlike analizlerinin yapılmasını ve bu analizlere dayalı olarak zemin büyütme faktörlerinin belirlenmesini zorunlu kılar. Bu analizler, sahaya özel deprem yer hareketi parametrelerinin (ivme, hız, yer değiştirme) doğru bir şekilde belirlenmesini sağlar.

4.1.3.3. Zemin-Yapı Etkileşimi

Yönetmelik, zemin-yapı etkileşiminin dikkate alınmasını ve yapıların bu etkileşim altında nasıl davranacağının analiz edilmesini gerektirir. Bu, özellikle yüksek binalar, köprüler ve diğer kritik yapılar için önemlidir. Zemin-yapı etkileşimi analizleri, yapıların temel tasarımında ve deprem güvenliğinin artırılmasında kullanılır.

4.1.3.4. Sıvılaşma Analizi

TBDY 2018, sıvılaşma potansiyeli olan zeminlerin tespit edilmesini ve bu zeminlerde sıvılaşmaya karşı alınacak önlemlerin belirlenmesini zorunlu kılar. Sıvılaşma, zeminlerin deprem sırasında katı fazdan sıvı faza geçerek taşıma kapasitesinin kaybolmasıdır. Sıvılaşma analizi, yapıların deprem güvenliğini sağlamak için kritik öneme sahiptir.

4.1.3.5 Zemin Dinamik Modüllerinin Belirlenmesi

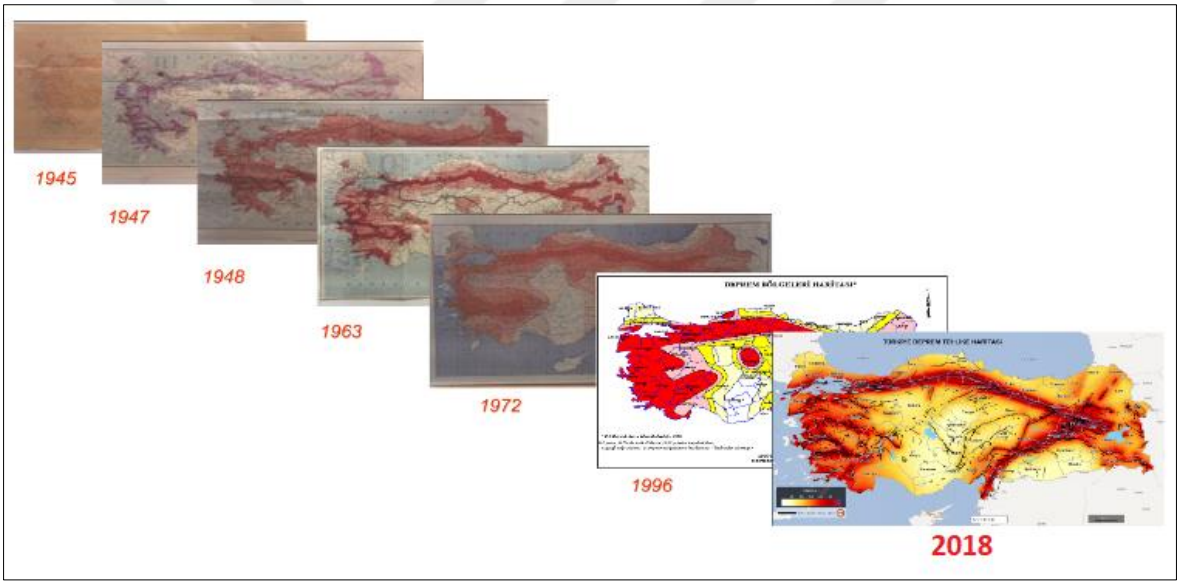
Yönetmelik, zeminlerin dinamik modüllerinin (kayma modülü, elastisite modülü) belirlenmesini ve bu parametrelerin deprem analizlerinde kullanılmasını gerektirir. Bu modüller, zeminlerin deprem yükleri altındaki rijitliğini ve deformasyon kapasitesini belirler.

Deprem riski taşımakta olan bir bölgede bir yapı inşa ederken zeminlerin deprem performansının belirlenmesi oldukça önemli ve gereklidir. Bu kapsamda, yerel zemin koşulları tanımlanmalıdır ve yapı tasarımının gerektirdiği geoteknik parametreler belirlenmelidir. Türkiye'de depremle ilgili mevzuat çalışmaları çerçevesinde, yaşanan depremlerden ve bunun sonucunda birikimlerden yola çıkılarak yeni bir "Türkiye Deprem Tehlike Haritası" oluşturulmuştur (Şekil 4.1). Buna ek olarak, yerel zemin koşulları etkisinin daha çok vurgulandığı yeni deprem yönetmeliği 2018 senesinde yayınlanmıştır. Güncel olarak kullanılmakta olan 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde (TBDY-2018), kendinden önceki yönetmelikler ile kıyaslandığında, özellikle saha özelinde yerel zemin sınıflarının belirlenmesi sürecinin genişletildiği ve deprem yer hareketi spektrumlarının, zemin özelliklerine, yapının konumuna ve faya olan mesafesine göre hesaplanması önerilmektedir.

TBDY-2018 yönetmeliğinde, yerel zemin sınıfları güncellenerek tasarım ivme spektrumları bölgeye özgü olarak haritadan seçilebilme olanağı sağlanmıştır. Bu kritik parametreler, yapı tasarımında kullanılmak üzere yeni yönetmelikten temin edilmektedir. TBDY 2018'in yürürlüğe girmesiyle birlikte, zeminler altı sınıfta incelenmeye başlanmıştır.

(Çizelge 5.1). $(N_{60})_{30}$, $(V_s)_{30}$, $(c_u)_{30}$ gibi parametreler zemin sınıfı belirlemesinde esas alınan parametrelerdir. Şekil 4.2'den de görülebileceği üzere yerel zemin sınıfları içerisinde, en zayıf zemin sınıfı, "ZF" olarak tanımlanmıştır. Bunun sonucunda "ZF" zemin sınıfı, saha özelinde araştırma-değerlendirmeye ihtiyaç duyulan zeminler olarak nitelendirilmektedir.

Sahaya özel zemin-davranış analizleri, anakayada tanımlanmış olan deprem yer hareketinin zeminin tabakalarında meydana gelen değişimi ve zeminin yüzeyindeki deprem yer hareketini saptamak amacıyla gerçekleştirilir. Buna ek olarak tasarım spektrumları ise, analizlerde farklı deprem kayıtlarından elde edilen kayıtların dinamik karakteristik özelliklerini yansıtmaktadır.



Şekil 4.1. Türkiye deprem tehlike haritasının yıllara göre değişimi (AFAD, 2024)

Yerel Zemin Sınıfı	Zeminin Cinsi
ZA	Sağlam, sert kayalar
ZB	Az ayrışmış, orta sağlam kayalar
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrışmış, çok çatlaklı zayıf kayalar
ZD	Orta sıkı – sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları
ZE	Gevşek kum, çakıl veya yumuşak – katı kil tabakaları veya PI> 20 ve w> % 40 koşullarını sağlayan toplamda 3 metreden daha kalın yumuşak kil tabakası (cu <25 kPa) içeren profiller
ZF	Sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler: **1)** Deprem etkisi altında çökme ve potansiyel göçme riskine sahip zeminler (sıvılaşabilir zeminler, yüksek derecede hassas killer, göçebilir zayıf çimentolu zeminler vb.), **2)** Toplam kalınlığı 3 metreden fazla turba ve/veya organik içeriği yüksek killer, **3)** Toplam kalınlığı 8 metreden fazla olan yüksek plastisiteli (PI >50) killer, **4)** Çok kalın (> 35 m) yumuşak veya orta katı killer.

Şekil 4.2. Yönetmelik esasında yerel zemin sınıfları (TBDY, 2018)

4.1.4. Zemin Büyütmesi

Sismik dalgalar; deprem kaynağından, zemin katmanları aracılığıyla farklı hızlara sahip bir şekilde ilerlerler. Bu dalgalar yüzeye ulaştıklarında titreşim oluştururlar. Bu titreşimlerin şiddeti ve süresi depremin büyüklüğü, kaynağın uzaklığı, ortamın fiziksel özellikleri, zeminin özellikleri gibi parametrelere bağlıdır. Anakayada harekete başlayan sismik dalgalar, özellikleri farklı tipteki gevşek zemin tabakaları içinde de hareketlerine devam ederler. Bu zemin tabakalarının özellikleri yeryüzünde gözlemlenen titreşim hareketlerinin özelliklerini büyük bir ölçüde belirler. Zemin tabakalarının bir kısmı sismik dalgaları sönümleme özelliği gösterirken, bir kısmı da büyütme özelliği gösterir. Bu değişim, genliklerin artması şeklinde olduğunda "zemin büyütmesi" olarak adlandırılır. Sahaya özgü analizlerde, deprem ivme kayıtlarının farklı noktalarda genliklerinin değiştiği gözlemlenmiştir. Yerel zemin katmanlarının yüzeyinde oluşacak deprem özelliklerini belirlemek amacıyla, yerel sismik tehlike bulgularıyla uyumlu zemin büyütme analizleri gerçekleştirilir. Sismik hareketler, çeşitli nedenlerle oluşarak ana kayadan yüzeye hareket ederken yerel zemin koşullarından etkilenerek değişir. Bu hareket, zemin türü ve dinamik özelliklerine bağlı olarak sönümlenerek veya büyüyerek yüzeye iletilir. Deprem dalgalarının

zemin tabakalarından geçerken genliklerinde meydana gelen bu artış, literatürde zemin büyütmesi olarak tanımlanır (Ansal vd., 2011; Kaptan ve Tezcan, 2012).

Deprem dalgaları anakayadan yüzeye doğru ilerlerken, çeşitli tabakalardan geçerken yansıma ve kırılmalara maruz kalırlar. Yeryüzüne ulaşan ivmeler, geldikleri açılar ve geçtikleri katmanların özelliklerine göre farklılık gösterir. Tabakalar arasındaki empedans farklılıkları, ivmelerin genliklerinde değişimlere neden olur. Daha rijit tabakalardan daha yumuşak tabakalara geçen deprem dalgalarının genliklerinde artış meydana gelir.

Bir boyutlu analizlerde, tüm sınırların yatay olduğu ve zemin tepkisine bağlı olmaksızın anakayadan düşey yönde yayılan SH dalgalarının neden olduğu durum ele alınmaktadır. Bu analizlerde zemin ve anakaya yüzeyleri yatay yönde sonsuz olarak kabul edilmektedir. Bu varsayım ile birlikte kullanılan yöntemlerle analizleri yapılan zemin tepkilerinin, çoğu depremde ölçülen tepki ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Bazı uygulamalarda karşılaşılan problemler sonucunda bir boyutlu dalga yayılım durumunu ele almanın uygun olmadığı tespit edilmiştir. Düzensiz zemin yüzeylerinde, rijit yapıların, duvarların, tünellerin bulunduğu durumlarda iki boyutlu analiz gerekmektedir. Bu tip durumlarda üç boyutlu analizin dâhi gerekli olduğu durumlarla karşılaşılmıştır. Üç boyutlu dalga yayılım durumu iki boyutlu ile benzerlik göstermektedir. Eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan yaklaşımlar kullanılarak dinamik sonlu eleman analizleri yapılmaktadır. Zemin-yapı etkileşimi konusunda çok sayıda üç boyutlu analiz çalışmaları bulunmaktadır.

Deprem sırasında zemin tabakalarında yayılan düşey S dalgasının sismik empedansı (Z), zeminin yoğunluğu (ρ) ile dalga hızının (V_s) çarpımı sonucu elde edilir. Bu ilişki, sismik empedansın zemin özellikleriyle doğrudan bağlantılı olduğunu gösterir. Başka bir deyişle, sismik empedans, zeminin yoğunluğu ile S dalgasının hızı arasındaki çarpım ile tanımlanır. Tabakalar yeryüzüne yaklaştıkça, zeminin yoğunluğu ve dalga hızları azalmaktadır (Yalçınkaya, 2004). Enerjinin korunumu prensibi dikkate alındığında, yüzeye doğru yayılan sismik enerji şu şekilde değerlendirilebilir (Denklem 4.1 ve Denklem 4.2):

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

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

Yeryüzüne yaklaşılırken, azalmakta olan yoğunluk (ρ) ve kayma dalgası hızı (V_s) empedans değerinin düşmesine yol açar. Enerjinin korunumu prensibine göre, bu durumda tanecik hızının u(t) artması gerekir (Kramer, 1996). Deprem dalgalarının taşımakta olduğu enerji, basit harmonik bir dalga için incelenirse, enerji değeri (E);

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

açısal frekans (ω), dalganın genliği (A), yoğunluk (ρ) ve ortamın dalga hızıyla (V) belirlenir (Denklem 4.3). Enerji yüzeye doğru hareket ederken ne kadar göstereceği büyütme miktarı (B) empedans oranına ve sönüm oranına bağlıdır. Zemin büyütmesi, empedans oranının artmasıyla artar, buna karşılık sönüm oranının artmasıyla azalır (Denklem 4.4).

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

$$\alpha = \frac{V_r \rho_r}{V_s \rho_s} \tag{4.5}$$

$$\xi = \frac{\eta w}{2G} \tag{4.6}$$

α: Empedans oranı

ξ: Sönüm oranı

Empedans oranı (Denklem 4.5), anakaya yoğunluğu ve hızının, zemin yoğunluğu ve hızına oranı olarak tanımlanır. Sönüm oranı değeri (Denklem 4.6) ise zemin viskozitesi (η), açısal frekans (ω) ve kayma modülü (G) ile belirlenir (Roesset, 1977; Yalçınkaya, 2010; Kramer, 1996). Bu değerler, depremin yüzeye ulaşırken nasıl bir etki yaratacağını ve zemin büyütmesini belirler. Frekansa göre zemin tabakası kalınlığı ve sismik dalga hızı ile belirlenmektedir. Zemin büyütmesinin maksimum olduğu frekans ve periyot sırasıyla Denklem 4.7 ve Denklem 4.8'de verilen şekilde hesaplanmaktadır. Zemin büyütmesinin maksimum olduğundaki periyot, zeminin hakim periyotu olarak belirlenmektedir.

$$f_0 = \frac{v_s}{4H} \tag{4.7}$$

$$T_0 = \frac{4H}{v_s} \quad (4.8)$$

V_s: Zeminin kayma dalgası hızı

T_o: Zemin büyütmesinin maksimum olduğu periyot

f_0: Zemin büyütmesinin maksimum olduğu frekans

H: Yumuşak zemin tabakasının kalınlığı

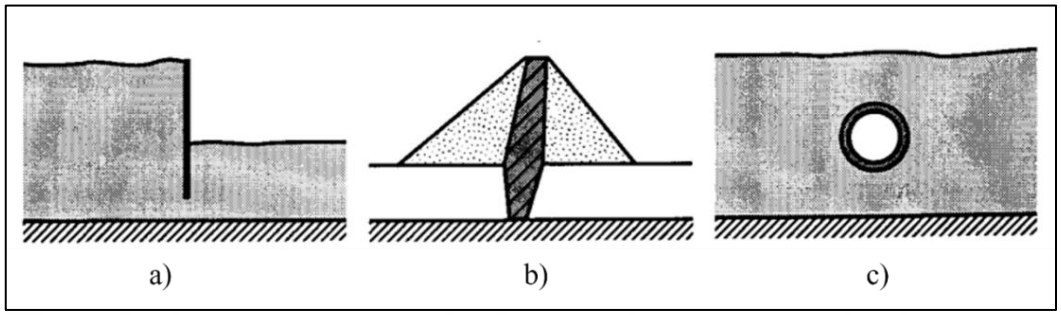
4.1.5. Bir Boyutlu Yer Tepki Analizi

Yer altında bir fay yüzeyi kırıldığında, sismik dalgalar kaynaktan her yöne doğru yayılır. Farklı jeolojik tabakaların sınırlarına ulaştıklarında kırılıp yansırlar. Genellikle, sığ derinlikteki tabakaların ses dalgalarını iletme hızı daha derinlerdeki tabakalardan daha düşüktür, bu nedenle yatay tabaka sınırlarına çarpan dalgalar genellikle daha dik bir açıyla kırılır. Yüzeye doğru ilerleyen dalgaların çoğu zaman düşey yönde kırıldığı görülür. Bir boyutlu yer tepki analizleri, tüm tabakaların yatay olduğu ve zeminin tepkisinin çoğunlukla dik yönlü SH dalgaları tarafından kontrol edildiği varsayımına dayanır. Bu tür yöntemlerle elde edilen zemin tepkileri, birçok depremde ölçülen tepkilerle uyumlu bulunmuştur (Kramer, 1996).

4.1.6. İki Boyutlu Yer Tepki Analizi

Eğimli veya düzensiz zemin yüzeylerinde, sert ve gömülü ağır yapılar veya duvarlar ile tünellerin olduğu durumlarda genellikle iki veya üç boyutlu analiz gereklidir. Farklı boyutlardaki değişkenlerin belirgin şekilde farklı olduğu durumlarda ise, bu tür problemler genellikle iki boyutlu düzlemsel deformasyon problemleri olarak ele alınabilir. Bu tür problemlerin çözümü için farklı teknikler geliştirilmiştir; bunlar arasında frekans alanında ve zaman alanında yöntemleri bulunmaktadır. Bu yöntemler sırasıyla kompleks tepki yöntemi ve doğrudan integral alma yöntemi olarak adlandırılabilir. Genellikle, iki ve üç boyutlu dinamik tepki ve zemin-yapı etkileşim problemlerinin çözümünde dinamik sonlu eleman analizleri tercih edilmektedir (Kramer, 1996).

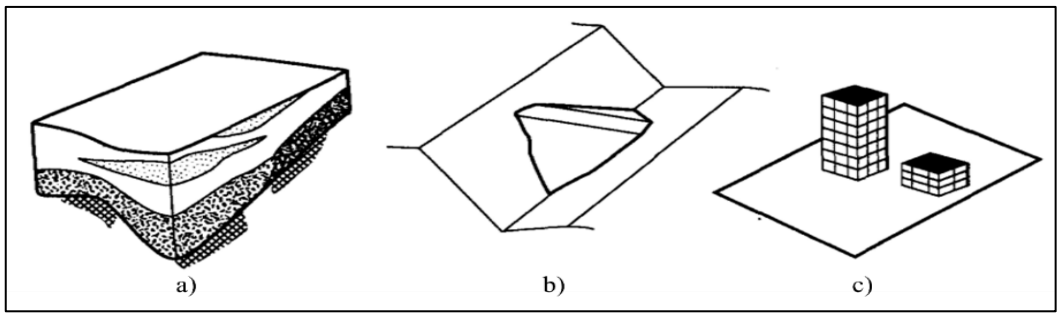
Konsol palplanş perde (Şekil 4.3.a), toprak baraj (Şekil 4.3.b) ve tüneller (Şekil 4.3.c) gibi problemler tipik olarak iki boyutlu düzlemsel birim deformasyon dinamik tepki analizleri ile çözülmektedir. (Kılıç, 2017)



Şekil 4.3. İki boyutlu dinamik tepki analizi gerektiren durumlar (Kılıç, 2017)

4.1.7. Üç Boyutlu Yer Tepki Analizi

Üç boyutlu dinamik tepki analizleri, özellikle karmaşık yapı ve zemin koşullarının olduğu durumlarda gereklidir. Bu analizler, iki boyutlu problemlerin çözümünde kullanılan yöntemlere benzer bir temel üzerine inşa edilir. Dinamik sonlu eleman analizleri, lineer ve lineer olmayan modelleri içerecek şekilde geliştirilmiştir ve özellikle zemin-yapı etkileşimi konusunda üç boyutlu analizler yaygın olarak tercih edilir (Kramer, 1996). Zemin şartlarının üç boyutta önemli olarak değiştiği saha (Şekil 4.4.a), dar vadideki toprak baraj (Şekil 4.4.b), zemin tepkisinin yapıların tepkisinden etkilendiği saha (Şekil 4.4.c) gibi durumlarda Üç boyutlu dinamik tepki veya zemin yapı etkileşim analizi gerekmektedir. (Kılıç, 2017)



Şekil 4.4. Üç boyutlu dinamik tepki analizi gereken durumlar (Kılıç, 2017)

5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1. Çalışma Bölgesi ve Bölgenin Depremselliği

Türkiye'nin depremselliği oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir. Coğrafi konumu nedeniyle, Türkiye Alp-Himalaya deprem kuşağı üzerinde yer alır ve bu kuşak dünyanın en aktif ve tehlikeli deprem bölgelerinden biridir. Ülkenin kuzeyinde, Anadolu Levhası ile Avrasya Levhası arasında yer alan Kuzey Anadolu Fay Hattı (KAF) en dikkate değer aktif faylardan biridir. Güneyde, Afrika Levhası'nın Anadolu Levhası ile çarpıştığı Doğu Anadolu Fay Hattı (DAF) bulunurken, batıda ise Ege Denizi bölgesinde genişleme rejimi hakimdir ve normal faylar bulunmaktadır. Türkiye'nin deprem tarihinde, KAF ve DAF gibi ana fay hatları birçok önemli depreme ev sahipliği yapmıştır. Örneğin, 1939 Erzincan depremi, 1999 Kocaeli depremi ve 1944 Bolu-Gerede depremi gibi büyük depremler Kuzey Anadolu Fay Hattı boyunca meydana gelmiştir. Doğu Anadolu Fay Hattı ise 2011 Van depremi, 2020 Elazığ depremi gibi oldukça önemli depremlerin yaşandığı bir bölgedir. Ege bölgesi ise sıklıkla orta büyüklükte depremlerin meydana geldiği bir bölgedir.

Türkiye'nin deprem tehlikesi oldukça yüksektir ve bu, ülkenin üzerinde bulunduğu aktif fay hatlarının yoğunluğundan kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, deprem tehlike haritaları ve risk analizleri düzenli olarak güncellenmekte ve afet yönetimi stratejileri geliştirilmektedir. Zemin büyütmesi de Türkiye'deki depremsellik çalışmalarında önemli bir faktördür. Türkiye'nin çeşitli bölgelerinde yapılan mikrotremor ve sismik tepkime analizleri, zemin büyütmesinin yerel zemin koşullarına bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Özellikle alüvyon zeminlerde ve dolgu alanlarda büyütme etkisi daha belirgin olmaktadır.

Türkiye, deprem yönetmeliği konusunda da aktif bir ülkedir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) gibi mühendislik prensiplerine dayalı yönetmelikler, yapıların güvenliği ve dayanıklılığı için standartları belirlemektedir. Bu yönetmelik, zemin sınıflandırmaları, deprem yükleri, yapı dinamikleri ve performans esaslı tasarım gibi konuları kapsamaktadır. Sonuç olarak, Türkiye'nin depremselliği, ileri düzeyde deprem bilimi ve mühendisliği çalışmalarının yapılmasını gerektirmektedir. Yerel zemin

koşullarının doğru bir şekilde belirlenmesi ve yapıların bu koşullara uygun olarak tasarlanması büyük önem taşımaktadır.

Sakarya, Türkiye'nin Marmara Bölgesi'nde bulunan bir ildir. İlin yüzölçümü yaklaşık olarak 4895 km^2 olup, bu da Türkiye'nin toplam yüzölçümünün %0,6'sını oluşturur. Sakarya ili deprem riski açısından kritik bir bölgedir ve Türkiye'nin deprem bölgelerinden birinde yer alır. Türkiye, aktif fay hatlarının kesişim noktaları üzerinde bulunması sebebiyle deprem riski yüksek bir ülkedir. Sakarya'nın da bu fay hatlarına yakın olması, ilin deprem potansiyelini arttırmaktadır.

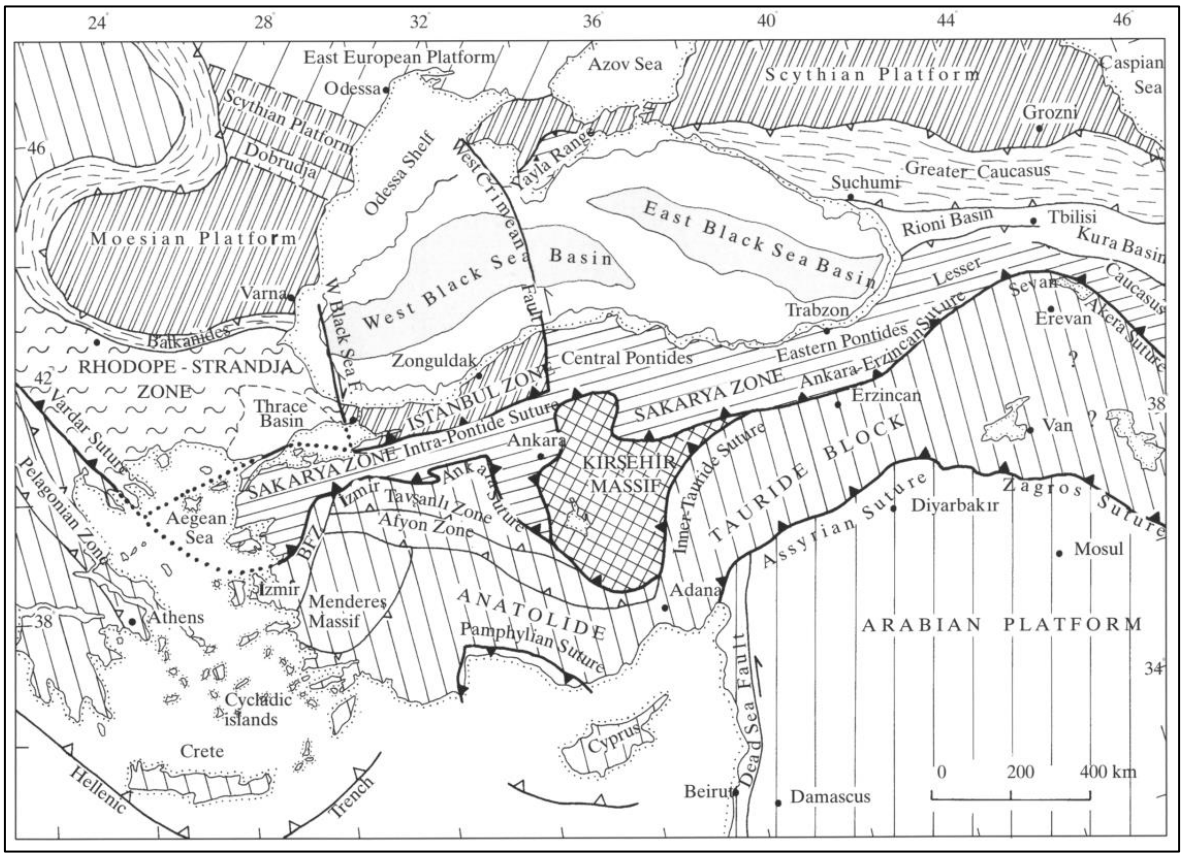
Sakarya'da deprem riski, özellikle Kuzey Anadolu Fay Hattı ve doğusunda bulunan Kuzey Anadolu Dağları üzerindeki faylarla ilişkilidir. Bu fay hatları, zaman zaman büyük depremlere yol açabilen aktif fay hatlarıdır. Sakarya'nın bu fay hatlarına yakınlığı, il genelinde deprem riskini arttırır. Türkiye'de deprem riskini değerlendirmek için kullanılan bir yöntem, deprem sınıflandırmasıdır. Deprem sınıflandırması, deprem bölgelerini ve bu bölgelerde beklenebilecek deprem şiddetini belirlemeye yardımcı olur. Bu il deprem riskine sahip olması nedeniyle yapılaşma ve altyapı çalışmaları, deprem riski göz önünde bulundurularak planlanmalı ve uygulanmalıdır. Yapıların depreme dayanıklı olması ve altyapının deprem riskine karşı güçlendirilmesi önemlidir. Sakarya, 17 Ağustos 1999 Marmara Depremi'nde büyük hasar görmüştür. Bu deprem, Sakarya'nın deprem riskinin yüksek olduğunu ve bölgenin depreme karşı hassas olduğunu göstermiştir.

5.2. Aktif Fay Hatları

Sakarya, Kuzey Anadolu Fay Hattı'nın etkisi altındadır. Bu fay hattı, batıdan doğuya doğru uzanmakta olup Sakarya il sınırları içinde aktif bir şekilde bulunmaktadır. Fay hattı, Türkiye'nin en tehlikeli faylarından biri olarak bilinir ve bu nedenle bölge, önemli bir deprem riski taşımaktadır.

Kuzey Anadolu Fay Hattı, Türkiye'nin en uzun ve en aktif fay hattı olmasının yanı sıra, tarihsel olarak büyük depremlere de neden olmuştur. Sakarya'nın deprem riski, bu hattın yakınında bulunması ve geçmişte meydana gelen büyük depremlerle doğrudan

ilişkilidir. Özellikle 1999 İzmit Depremi, Sakarya ve çevresinde ciddi yıkımlara yol açmış, bu da bölgenin sismik aktivitesinin ne denli tehlikeli olduğunu göstermiştir. Aktif fay hatlarının Sakarya üzerindeki etkileri, zemin yapısını ve yeraltı su seviyelerini de etkilemektedir. Fay hareketleri, yer altındaki zemin katmanlarının kaymasına, kırılmasına veya deformasyona uğramasına neden olabilir. Bu durum, zeminlerin taşıma kapasitesini ve stabilitesini doğrudan etkileyerek sıvılaşma riskini artırır. Türkiye ve etrafında yer alan tektonik yapı Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



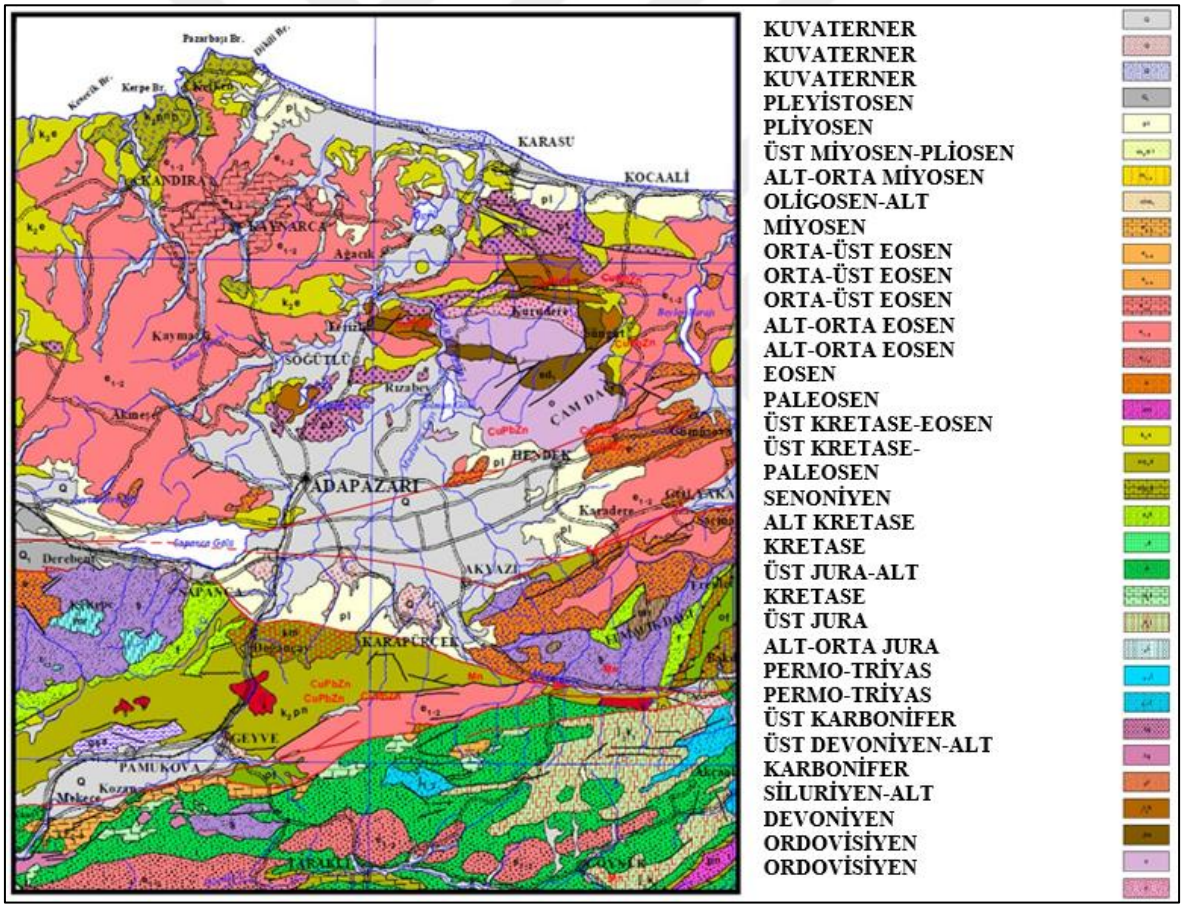
Şekil 5.1. Türkiye ve etrafındaki tektonik yapı (Okay ve Tüysüz, 1999)

5.3. Sakarya'nın Jeolojik Özellikleri ve Zemin Türleri

Bölgedeki zemin yapısı, çeşitli zemin türlerinden oluşmaktadır (Şekil 5.2). Alüvyon zeminler, Sakarya Nehri ve yan kolları tarafından taşınan malzemelerle meydana gelmiş olup, geniş alanlarda yaygın bir şekilde bulunur. Bu zeminler, suya doygun karakterleri ve gevşek yapıları nedeniyle deprem anında sıvılaşma riski taşımaktadır. Sıvılaşma, zemin

partiküllerinin suya doygun olduğu durumlarda ortaya çıkmaktadır ve bu durum zeminlerin deprem dalgaları sırasında taşıma kapasitelerini kaybetmesine yol açmaktadır.

Kil ve silt zeminleri de Sakarya'nın zemin yapısında önemli bir yer tutmaktadır. Bu zeminler, su içeriğine bağlı olarak farklı davranış özellikleri sergileyebilir. Suya doygunluk arttıkça, zeminlerin taşıma kapasiteleri düşer ve bu da yapıların oturmasına veya deformasyona yol açabilir. Sakarya'nın birçok yerinde bulunan kil zeminler, plastisite özellikleri nedeniyle büyük deformasyonlar meydana getirebilme özelliğine sahiptir. Bölgedeki kaya zeminleri ise daha sert ve dayanıklı bir yapıya sahiptir. Bu tür zeminler, deprem dalgalarına karşı daha az deformasyon göstererek yapıların güvenli bir şekilde inşa edilmesine olanak tanır.



Şekil 5.2. Sakarya ili jeoloji haritası (Akat vd. 2002)

5.3.1. Alüvyon Zeminler

Sakarya Nehri ve diğer yan kollar tarafından taşınan malzemelerle oluşmuş alüvyon zeminler, bölgedeki geniş alanlarda yaygındır. Bu zemin türü, gevşek yapılı ve suya doygun karakterde olduğu için deprem sırasındaki sıvılaşma riskine oldukça açıktır. Sıvılaşma, zemin partiküllerinin suya doygun olduğu durumlarda meydana gelir ve zemin deprem dalgaları sırasında taşıma kapasitesini kaybederek sıvı gibi davranır. Özellikle kıyıya yakın alanlar ve nehir yatakları civarındaki yapılar, bu tip zeminlerin bulunduğu bölgelerde dikkatle tasarlanmalıdır.

5.3.2. Kil ve Silt Zeminler

Kil ve silt zeminler, su içeriğine bağlı olarak önemli davranış farklılıkları sergiler. Bu zeminlerde suya doygunluk arttığında zemin genellikle yumuşar ve taşıma kapasitesi azalır. Kil zeminler ayrıca plastisite özelliklerine sahiptir, bu da onların büyük deforme olma eğiliminde olduğunu gösterir. Deprem sırasında bu zeminler büyük deformasyonlar yapabilir ve yapıların oturmasına, hatta bazı durumlarda yıkılmasına yol açabilir. Sakarya'nın pek çok bölgesinde yaygın olan bu zemin türleri, temel tasarımında dikkatli bir şekilde değerlendirilmelidir.

5.3.3. Kaya Zeminler

Sakarya'nın bazı bölgelerinde yer alan kaya zeminler, daha sert ve dayanıklı zemin yapısı sunar. Bu zeminler, deprem dalgalarına karşı daha az deformasyon gösterir ve bu sayede yapıların daha güvenli bir şekilde inşa edilmesine olanak tanır. Temel inşası sırasında kayalar üzerinde yapı tasarlamak, genellikle daha güvenli ve stabil bir zemin sağlar. Ancak bu zeminlerin de deprem sırasında kırılma ve çatlama riski vardır; dolayısıyla mühendislik analizleri gereklidir.

5.4. Jeoteknik Özellikler

Sakarya'nın zemin ve kaya yapısının jeoteknik özellikleri, bölgenin deprem karşısındaki dayanıklılığını belirleyen önemli parametrelerdir. Bu özellikler, zemin taşıma kapasitesi, oturma özellikleri ve stabilite gibi kritik parametreleri içerir. Zemin taşıma kapasitesi, yapının güvenliğini doğrudan etkiler ve özellikle temel tasarımı sırasında büyük önem taşır.

Zemin oturması, yük altında zeminin zamanla deformasyona uğramasıdır. Bu, yapının oturmasına ve zamanla zemin kaynaklı hasarlara yol açabilir. Stabilite ise, özellikle eğimli arazilerde önemli olup, toprak kaymalarını önlemek için analiz edilmelidir.

5.5. Depremsellik ve Jeolojik Özelliklerin Önemi

Sakarya'nın depremsellik ve jeolojik özellikleri, bölgedeki yapıların deprem güvenliği açısından doğru bir şekilde tasarlanmasını gerektirmektedir. Sahaya özel zemin davranışının belirlenmesi, bu açıdan büyük öneme sahiptir. Zeminlerin dinamik özellikleri, zemin büyütmesi ve zemin-yapı etkileşimi gibi faktörler, yapıların deprem yüklerine karşı güvenli bir şekilde tasarlanmasını sağlamak için dikkate alınmalıdır. Bu nedenle, Sakarya'nın jeolojik ve depremsellik özellikleri, zeminlerin dinamik analizlerinde ve yapı tasarımlarında temel veri kaynağı olarak kullanılmaktadır.

5.6. Laboratuvar Çalışmaları

Sakarya ilinde yapılan sondaj çalışmasından elde edilen örselenmemiş zemin numuneleri UD tüplerinden çıkarılarak, zemin tanımlama deneyleri yapılmıştır. Su Muhtevası, Elek Analizi, Atterberg Limitleri deneyleri yapılarak zemine ait özellikler belirlenmiştir. Dört sondaj kuyusundan alınan örselenmemiş numunelerin deney programı gösterilmiştir (Çizelge 5.1).

Çizelge 5.1. Deney programı

SK No	Örselenmemiş Numune No	Derinlik (m)	Deney No
SK-1	Numune - 1	5,00-5,50	Deney - 1.1
	Numune - 2	9,50-10,00	Deney - 1.2
	Numune - 3	15,50-16,00	Deney - 1.3
SK-2	Numune - 1	5,00-5,50	Deney - 2.1
	Numune - 2	9,50-10,00	Deney - 2.2
SK-3	Numune - 1	5,00-5,50	Deney - 3.1
	Numune - 2	10,00-10,50	Deney - 3.2
	Numune - 3	15,00-15,50	Deney - 3.3
SK-4	Numune - 1	5,00-5,50	Deney - 4.1
	Numune - 2	9,50-10,00	Deney - 4.2
	Numune - 3	15,50-16,00	Deney - 4.3

Hidrolik dikey numune çıkarıcıyla birlikte UD tüplerinden çıkarılan numuneler (Şekil 5.3), yapılacak deneyler öncesinde özenle hazırlanarak deney yapılacak hale getirilmiştir. Numunenin belirli bölgesinden parça alınarak bu haliyle tartılmış ve daha sonrası deney tablasına konulmuştur. 105-110^{o}C aralığındaki sıcaklıkta etüvde 24 saat boyunca bekletilmiştir. Etüvde kuruyan numune bir kez daha tartılarak aradaki fark ile su muhtevası hesaplanmıştır. Sonuçlar ortalama olarak %40-45 aralığında su muhtevasının olduğu şeklindedir.



Şekil 5.3. UD tüplerinden çıkarılmış numuneler

İri malzemelerin sınıflandırılması için Elek Analizi Deneyi yapılmıştır. Çizelge 5.1'deki Elek No ve Elek Çapı baz alınarak yapılan deneyler sonucunda %80 - %85 aralığında ince dane oranı tespit edilmiştir.

Çizelge 5.2. Elek no ve çapları

Elek No	**Çap D (mm)**
3"	75
11/2"	37,5
3/4"	19
3/8"	9,51
4	4,75
8	2,36
16	1,18
30	0,6
50	0,3
100	0,15
200	0,075

İri malzemelerin sınıflandırılmasında c_u ve c_c kullanılır. (c_u: Üniformluk katsayısı, c_c: Eğrilik katsayısı) Bu değerlerin hesaplamaları Denklem 5.1'de gösterilmiştir.

- W(Well) iyi derecelenmiş,
- P(Poor) kötü derecelenmiş

Zemin içeresindeki iri dane oranı elek analizin sonuçlarına göre bulunur. Hangi iri dane oranı fazla ise grup sembolü o fazla danenin sembolü alınarak yapılır. Elek analizine bağlı dane dağılım eğrisi çizilir.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \qquad C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} D_{60}} \tag{5.1}$$

D_{10}: Zeminin %10'u geçtiği dane çapı

D_{30}: Zeminin %30'u geçtiği dane çapı

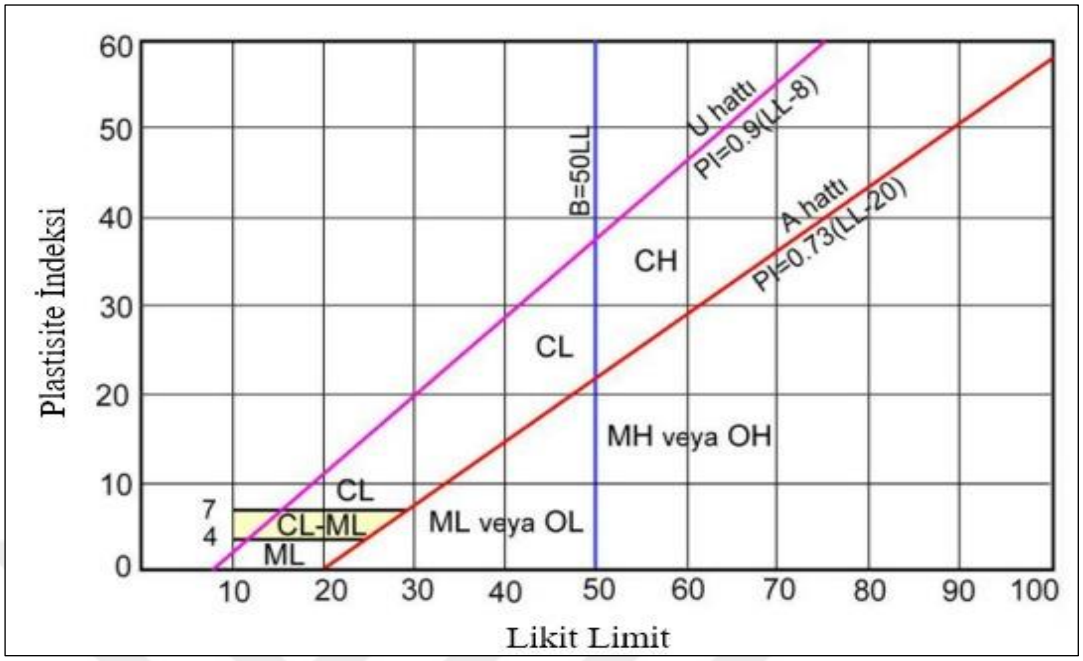
D_{60}: Zeminin %60'ı geçtiği dane çapı

İnce taneli zeminlerin sınıflandırılması için ise Atterberg Kıvam Limitleri Deneyi yapılmıştır. İnce taneli zeminlerin mühendislik davranışlarının büyük oranda içerdikleri su muhtevasına bağlı olarak değişiklik gösterir.

- Likit limit (LL): Likit safha ile plastik safha sınır su muhtevası değeridir.
- Plastik limit (PL): Plastik safha ile yarı katı safha sınır su muhtevası değeridir.
- Plastisite İndisi (PI): Plastik safhadaki su muhtevası aralığıdır.

40 no'lu elekten elenen numunenin bir miktarı Atterberg Kıvam Limitleri Deneyi için ayrılmıştır. Numuneye su eklenerek istenilen kıvama getirilmiştir. Bu şekilde hazırlanan numune Casagrande cihazına yerleştirilmiştir. Bu deneyin ardından LL sonuçları elde edilmiştir. Daha sonrasında Likit Limit deneyi yapılan numuneden bir parça alınarak 3 mm çapında bir silindir oluşturulmuştur.

Silindir oluşturulurken numunede çatlaklar oluştuğu anda deney tablasına alınarak yeniden etüve konmuş ve su muhtevası belirlenmiştir. Bu su muhtevası değeri zeminin PL sonucunu elde etmeyi sağlamıştır.



Şekil 5.4. Plastisite indeksi kartı (Casagrande, 1948)

Son olarak bu LL ve PL değerleri Plastisite İndeksi Kartı'na (Şekil 5.4) işlenerek zeminin sınıfı belirlenmiştir. Zemin profili CL, CH ve ML sınıfı zeminlerden oluşmaktadır.

- CL: Siltli Kil / Düşük Plastisiteli Kil
- CH: Yüksek Plastisiteli İnorganik Kil
- ML: Killi Silt / Düşük Plastisiteli Silt

Şekil 5.5'te ise genel sondaj verileri gösterilmiştir. Zemin Cinsi, Litoloji, Ortalama SPT-N, Vs, Maksimum Tabaka Kalınlığı, cu (kPa), ϕ (°), μ, k, E_{50}, E_{oed}, E_{ur} değerleri Şekil 5.5'te gösterilmiştir. İlgili hesaplamalar sonucunda tüm sondaj kuyularındaki ortalama değerler ile oluşturulmuş özet tablo;

Derinlik	Cinsi	Litoloji	Ortalama SPT-N	Ortalama N_{60}	Vs	Maksimum Tabaka Kalınlığı	c_u (kPa)	ϕ (°)	μ	k	E_{50}	E_{oed}	E_{ur}
1.50 m	KİLLİ SİLT ML		7.00	5.00	141	1.00	24.65	1	0.35	0,00001	6,000	15,000	18,000
3.00 m			8.00	6.00	151	1.10	29.58	1	0.35	0,00001	7,000	17,500	21,000
4.50 m													
6.00 m	SİLTLİ KİL CL		11.50	10.00	182	1.30	49.30	1	0.35	0,00001	10,000	25,000	30,000
7.50 m	KİLLİ SİLT ML												
9.00 m	SİLTLİ KİL CL		18.00	17.00	229	1.60	83.81	1	0.33	0,00001	15,000	37,500	45,000
10.50 m			19.50	20.00	238	1.70	98.60	1	0.33	0,00001	17,000	42,500	51,000
12.00 m	KİLLİ SİLT ML		23.00	23.00	260	1.90	113.39	1	0.33	0,00001	20,000	50,000	60,000
14.50 m			43.00	43.00	359	2.60	211.99	1	0.30	0,00001	40,000	100,000	120,000
17.00 m			31.50	32.00	305	2.20	157.76	1	0.30	0,00001	35,000	87,500	105,000
19.50 m			52.00	52.00	396	2.80	256.36	1	0.30	0,00001	45,000	112,500	135,000

Şekil 5.5. SK-1, 2, 3, 4 Ortalama sondaj verileri

Tez çalışmasına, daha önceden belirlenmiş olan bir bölgeden sondaj çalışmalarının verilerinin işlenmesiyle başlanmıştır. İlgili verilerin işlenmesinin ardından boyut etkilerinin araştırılması adına üç farklı program kullanılmıştır.

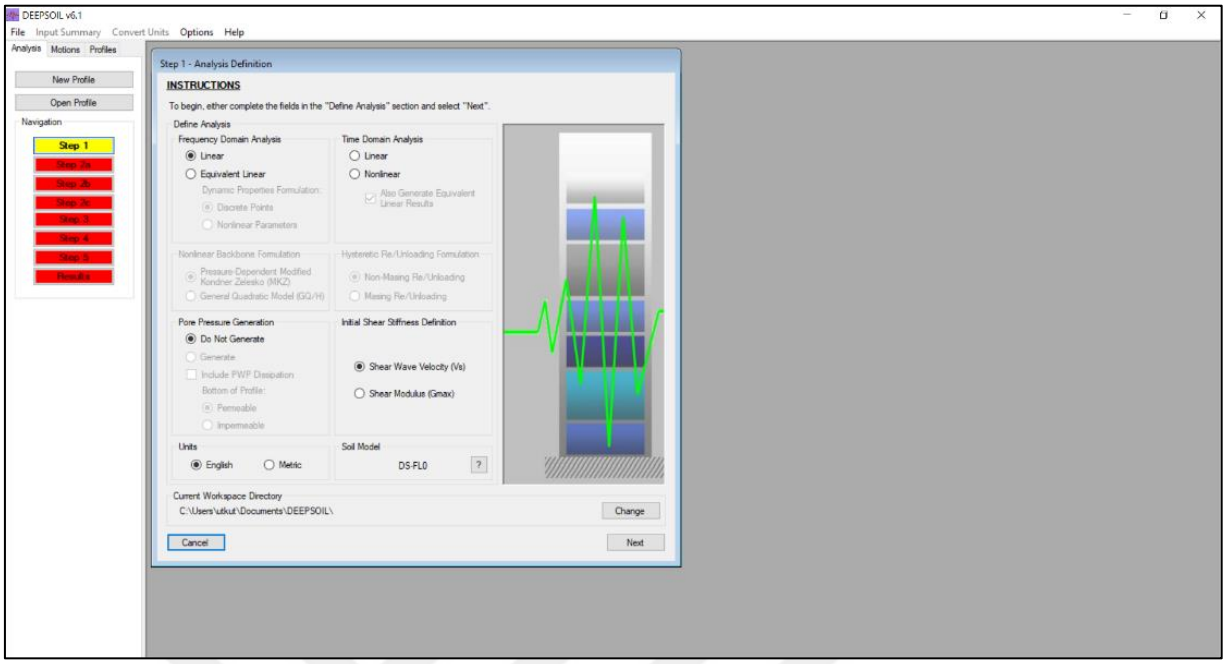
Bu amaç doğrultusunda,

- 1D çalışmalar için DeepSoil,
- 2D çalışmalar için Plaxis 2D,
- 3D çalışmalar için Plaxis 3D programları kullanılarak yapılan modellemeler aracılığıyla sonuçlara ulaşılmıştır.

5.7. Bir Boyutlu Analiz Özellikleri ve DeepSoil Programı

DeepSoil, zemin dinamiği ve deprem mühendisliği alanlarında kullanılmakta olan bir yazılım aracıdır. Bu yazılım, zeminin dinamik tepkisini analiz etmek için geliştirilmiştir ve genellikle yer hareketi tahminleri ile yapı-zemin etkileşim analizlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Yapıların deprem performanslarının değerlendirilmesine ve bu sayede tasarımlarının optimize edilmesi yönünde yapılan mühendislik uygulamalarına katkı sağlamaktadır. Özellikle deprem mühendisliği alanında, yapıların zemin üzerindeki etkilerini değerlendirerek, bu etkileri minimize etmek için kullanılır. Program, zeminin malzeme özelliklerini, taban yüzeyinin geometrisini ve yapıya uygulanan deprem yüklerini göz önünde bulundurarak, zeminin deprem etkisi altındaki davranış şeklini simüle etmektedir. Bu tez çalışmasında zemin büyütme analizlerinin, 1 boyutlu analiz kapsamında DeepSoil programı kullanılmıştır.

Şekil 5.6'da gösterilen program arayüzünde, analiz yöntemi, hesaplama prosedürü, boşluk suyu basıncının değişimi ve kullanılacak birim sisteminin seçimi yapılmaktadır. Ardından, tanımlanan zemin tabakalarına ilişkin tabaka adı, kalınlık, birim hacim ağırlığı ve kayma dalgası hızı gibi parametreler girilmektedir. İkinci aşamada, her bir tabakanın kayma gerilmesi değerleri, kayma modülü-birim şekil değiştirme eğrisi ve sönümleme eğrilerinin belirlenmektedir. Programa tanımlanan eğriler, gerçekleştirilecek analizlerde referans olarak kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, program içinde zemin türüne göre farklı referans eğrilerin kullanılması da mümkündür. Bu aşamadan sonra, uygun ivme kayıtları kullanılarak analizler gerçekleştirilmektedir. (Hashash, 2016)



Şekil 5.6. DeepSoil programı arayüzü

5.7.1. Darendeli Modeli

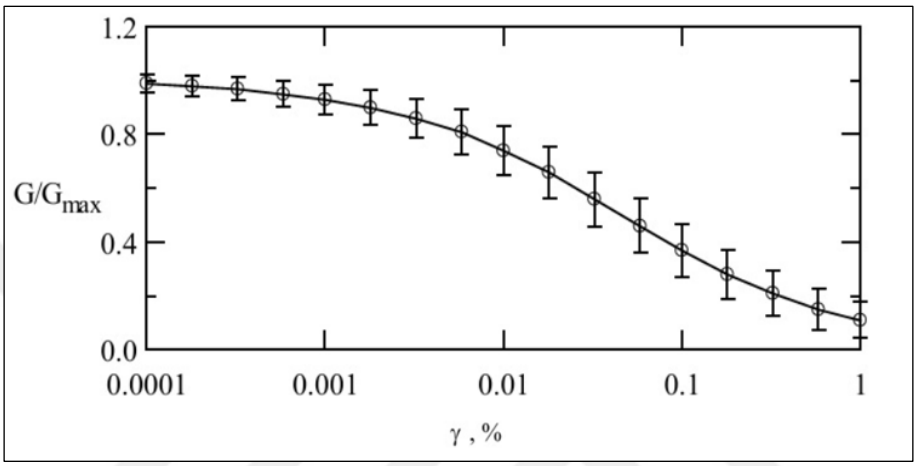
Darendeli (2001) modeli, zeminlerin dinamik davranışını değerlendirmek ve modül azalım eğrilerini tanımlamak için kullanılmakta olan bir yöntemdir. Özellikle zeminlerin deprem gibi dinamik yüklemelere karşı tepkisini anlamak için önem arz etmektedir. Modül azalım eğrisi, zeminlerin dinamik modülünün gerilme altında nasıl değiştiğini gösteren bir eğridir. Modül azalım eğrisi, genellikle Denklem 5.2 ile tanımlanır. Burada G ve G_{max} sırasıyla gerilme altındaki kayma modülü ve maksimum dinamik kayma modülünü temsil etmektedir. γ, γ_r ve a ise sırasıyla birim kayma deformasyonu, referans kayma deformasyonu ve genellikle zemin tipine bağlı olarak 1-1.05 arasında değişen model parametresidir.

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1+(\frac{\gamma}{\gamma_r})^a} \tag{5.2}$$

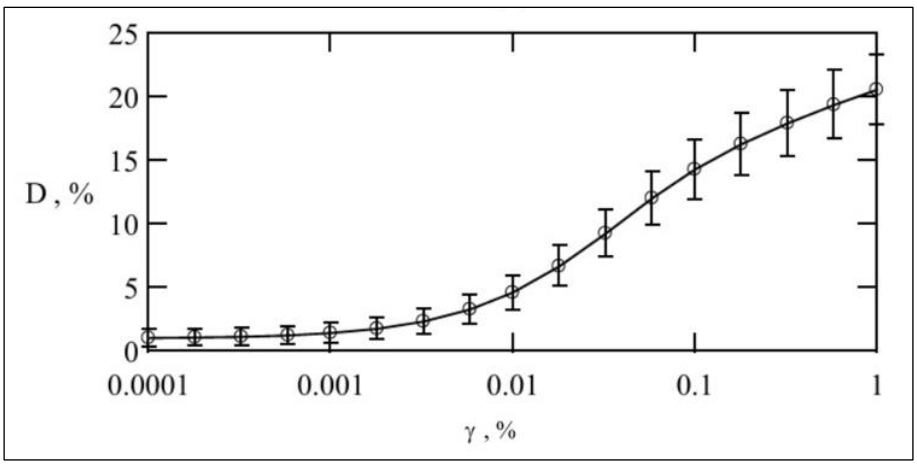
Darendeli modelinde referans kayma değişimi, Denklem 5.3 ile tanımlanmaktadır. Burada PI plastisite indeksi; OCR aşırı konsolidasyon oranı ve σ'_0 ise efektif düşey gerilmedir.

$$\gamma_r = (0.035 + 0.001 * PI * OCR^{0.25}) * (\sigma'_0)^{0.5} \tag{5.3}$$

Darendeli modeli, özellikle deprem mühendisliğinde, zeminlerin dinamik tepkisini belirlemek için kullanılır. Model, zeminlerin yüksek deformasyon koşullarında kayma modülünün nasıl değiştirdiğini göstermektedir. Şekil 5.7'de normalleştirilmiş modül azalım eğrisi standart sapma modeli; Şekil 5.8'de malzeme sönüm eğrisi standart sapma modeli gösterilmiştir.



Şekil 5.7. Normalleştirilmiş modül azalım eğrisi standart sapma modeli (Darendeli, 2001)



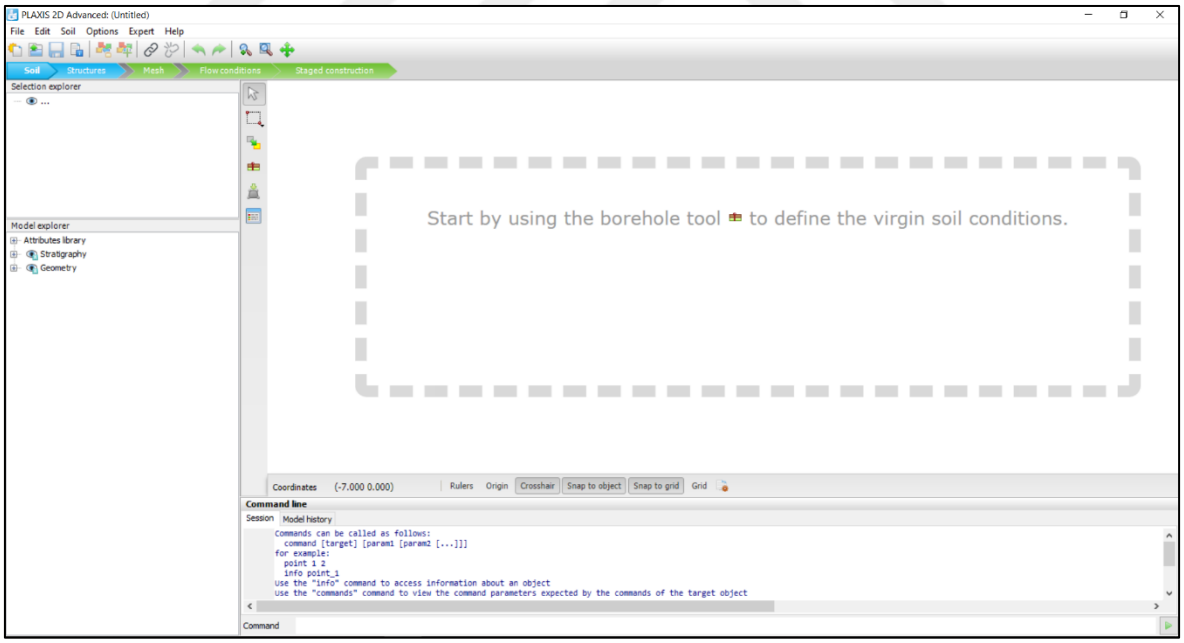
Şekil 5.8. Malzeme sönüm eğrisi standart sapma modeli (Darendeli, 2001)

5.8. İki Boyutlu Analiz Özellikleri ve Plaxis 2D Programı

Plaxis 2D (Şekil 5.9), geoteknik mühendisliği alanında sıklıkla kullanılan bir sonlu elemanlar analiz yazılımıdır. Bu yazılım, iki boyutlu zemin-yapı etkileşim problemlerini

incelemek ve çözmek amacıyla geliştirilmiştir. Plaxis 2D, farklı zemin tiplerinin ve yapı geometrilerinin modellenmesine imkan tanırken, zeminin karmaşık davranışlarını simüle etmek amacıyla çeşitli matematiksel modeller sunar. Ayrıca, yapıların zemin üzerindeki etkilerini değerlendirmek için yapısal analiz özelliklerine de sahiptir.

Plaxis 2D, özellikle zeminlerin deformasyon analizleri, stabilite problemleri ve yer altı suyu hareketlerinin modellenmesinde önemli bir araç olarak öne çıkmaktadır. Program, zemin tabakalarının kayma dayanımı, yer değiştirme ve boşluk suyu basıncı gibi kritik parametrelerin analiz edilmesine olanak tanımaktadır. Plaxis 2D'deki gelişmiş sonlu elemanlar modeli sayesinde, sismik analizler, derin kazı ve tünel tasarımı gibi zorlu mühendislik projelerinde güvenilir sonuçlar elde edilmektedir. Bu kapsamda, programın geniş yelpazedeki analiz yetenekleri, zemin ve yapı etkileşiminin daha gerçekçi bir şekilde incelenmesine olanak tanımaktadır. Tez kapsamında zemin büyütme analizlerinin, 2 boyutlu gerçekleştirilen analizler kapsamında Plaxis 2D programı kullanılmıştır.



Şekil 5.9. Plaxis 2D programı arayüzü

Bu çalışmada, zemin davranışını karmaşık yükleme koşulları altında daha gerçekçi bir şekilde modelleyebilme yeteneği nedeniyle Hardening Soil (Pekleşen Zemin) modeli tercih edilmiştir. Bu model, zemin parametrelerinin dinamik değişimlerini ve dayanım

farklılıklarını izleyebilme özelliğine sahiptir. Hardening Soil model içerisinde yer alan E_{50}, E_{oed} ve E_{ur} parametreleri yer almaktadır. Bu parametrelerin grafik üzerindeki hesaplamaları Şekil 5.10'da gösterilmiştir. Bu parametrelerin Denklem 5.4, Denklem 5.5 ve Denklem 5.6 ile hesaplanabilmektedir ve özellikleri şu şekilde özetlenebilir:

- **E_{50}:** En yüksek deviatörik gerilmenin %50'sine karşılık gelmekte olan gerilmenin orijine yerleştiren doğrunun eğimini temsil etmektedir.

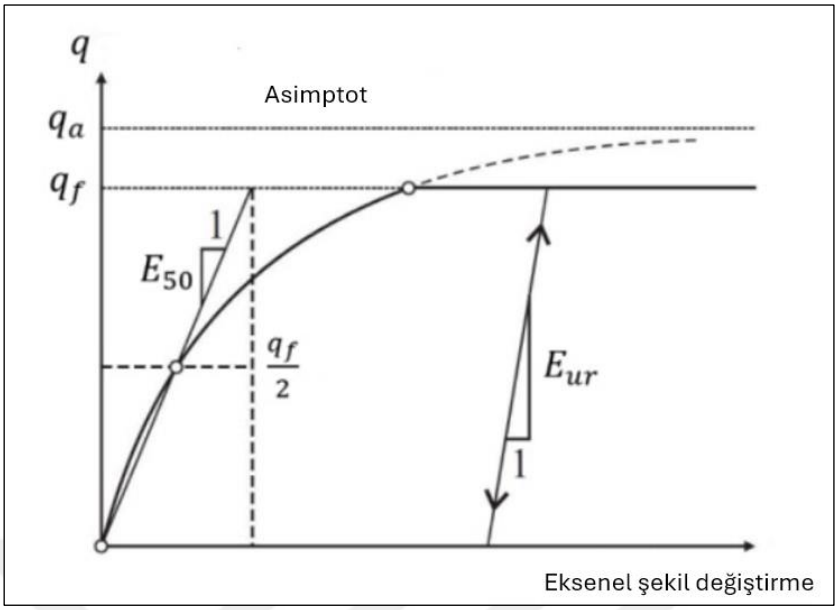
$$\mathrm{E}_{50} = E_{50}^{ref}\left(\frac{ccos\varphi-\sigma_3 sin\varphi}{ccos\varphi-p^{ref} sin\varphi}\right)^m \tag{5.4}$$

- **E_{oed}:** Zeminlerin düşey yük altındaki sıkışmasını ifade etmektedir. Özellikle tek yönlü yükleme altındaki zeminlerin deformasyonunu değerlendirmektedir. Bu parametre, zeminlerdeki sıkışma ve dayanım özelliklerini belirlemede önemli rol oynamaktadır.

$$\mathrm{E}_{oed} = E_{oed}^{ref}\left(\frac{ccos\varphi-\sigma_3 sin\varphi}{ccos\varphi-p^{ref} sin\varphi}\right)^m \tag{5.5}$$

- **E_{ur}:** Zeminlerin yükleme kaldırıldığında ve yeniden yüklendiğinde göstermekte olduğu davranışı tanımlamaktadır. Bu parametre, zeminlerdeki yükleme yeniden yükleme döngülerindeki elastik deformasyonu belirlenmektedir. Zeminlerin yükleme geçmişi ve mevcut gerilme durumu ile ilişkilidir.

$$\mathrm{E}_{\mathrm{ur}} = E_{ur}^{ref}\left(\frac{ccos\varphi-\sigma_3 sin\varphi}{ccos\varphi-p^{ref} sin\varphi}\right)^m \tag{5.6}$$



Şekil 5.10. Rijitlik modül grafiği

5.9. Üç Boyutlu Analiz Özellikleri ve Plaxis 3D Programı

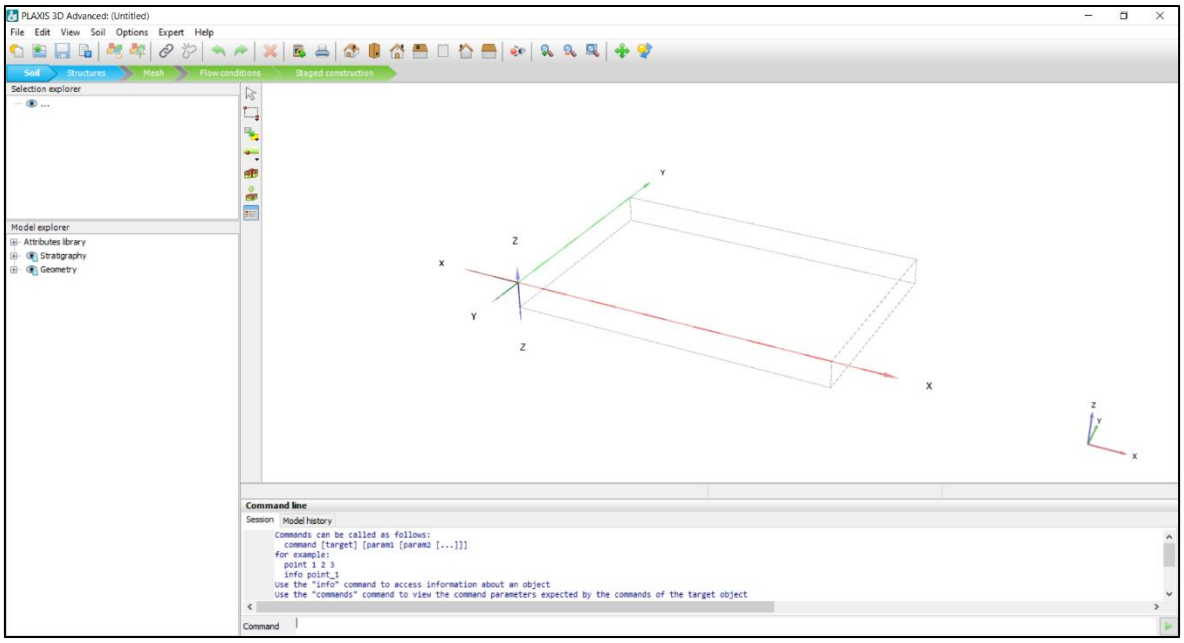
Plaxis 3D (Şekil 5.11), geoteknik mühendisliğinde sıklıkla kullanılan bir sonlu elemanlar yazılımıdır. Plaxis 2D'nin aksine, 3 boyutlu yapı-zemin etkileşim problemlerini çözmek için tasarlanmıştır. Zeminin 3 boyutlu davranışını simüle ederek, yapıların zemin üzerindeki etkilerini daha gerçekçi bir şekilde değerlendirme imkanı sunar. Programın temel özellikleri genel olarak aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Zemin ve yapı geometrilerinin üç boyutlu modellenmesine olanak tanır. Bu özelliği sayesinde, oldukça karmaşık zemin profillerinin ve yapıların geometrilerinin daha doğru ve gerçekçi bir şekilde modellenebilmesine imkan sağlar.

- Yazılım, çeşitli zemin tiplerinin 3 boyutlu davranışını modeller. Bu, zeminin diğer karmaşık davranışlarını simüle etmek için çeşitli modeller kullanılmasını içerir.

- Plaxis 3D, yapıların zemin üzerindeki etkilerini değerlendirmek için yapısal analiz özelliklerini bulundurmaktadır. Bu özellik, yapıların zemin üzerindeki deformasyonlarını ve çeşitli yüklemelere karşı tepkilerinin hesaplamalarını da içermektedir.

Özellikle tünel, baraj tasarımı ve yapı-zemin etkileşimlerinin karmaşık modellenmesi gibi uygulamalarda tercih edilir. Plaxis 3D yazılımının, Plaxis 2D'den farklı olarak daha kapsamlı ve daha detaylı analiz imkanı sunmasına karşın genellikle daha fazla hesaplama kaynağı gerektirmektedir. Bu tez kapsamında zemin büyütme analizlerinin 3 boyutlu analiz kısmında Plaxis 3D kullanılmıştır.



Şekil 5.11. Plaxis 2D programı arayüzü

5.10. Depremlerin Belirlenmesi

Sahaya özgü analizlerde, seçilecek depremlerin, bölgenin depremsel özelliklerini doğru bir şekilde yansıtması büyük önem taşımaktadır. Bina taşıyıcı sistemlerinin zaman tanım alanında gerçekleştirilecek deprem hesaplamalarında kullanılacak olan deprem kayıtlarının seçimi, tasarıma esas alınacak deprem yer hareketi düzeyi ile uyumlu olan deprem büyüklükleri, fay uzaklıkları, kaynak mekanizmaları ve yerel zemin koşulları göz önünde bulundurularak gerçekleştirilecektir. Binanın konumlandığı alanda, tasarıma esas deprem yer hareketi düzeyine uygun geçmiş deprem kayıtları mevcut olduğunda, öncelikle bu kayıtların kullanılması gerekmektedir (TBDY, 2018).

Çizelge 5.3. Seçilen depremler ve özellikleri

Deprem	**İstasyon**	**RSN**	**Yıl**	**Magnitüd**	**PGA**	**Rrup (km)**	**Rjb (km)**	**V_s30 (m/s)**
El Mayor-Cucapah, Mexico	Cerro Prieto Geothermal	5825	2010	7.2	0.29	10.92	8.88	242.05
Darfield, New Zealand	LINC	6927	2010	7.0	0.46	7.11	5.07	263.20
Parkfield-02, CA	Parkfield - Cholame 4AW	4104	2004	6.0	0.30	5.53	4.81	283.38
Kocaeli, Turkey	Yarimca	1176	1999	7.51	0.23	4.83	1.38	297.00
Duzce, Turkey	Duzce	1605	1999	7.14	0.40	6.58	0	281.86
Kobe, Japan	Amagasaki	1101	1995	6.9	0.28	11.34	11.34	256.00
Morgan Hill	Gilroy Array #4	458	1984	6.19	0.22	11.54	11.53	221.78
Imperial Valley-06	El Centro Array #4	179	1979	6.53	0.48	7.05	4.90	208.91
Managua, Nicaragua-01	Managua, ESSO	95	1972	6.24	0.37	4.06	3.51	288.77
Parkfield	Cholame - Shandon Array #5	30	1969	6.19	0.44	9.58	9.58	289.56
Imperial Valley-02	El Centro Array #9	6	1940	6.95	0.28	6.09	6.09	213.44

Bu doğrultuda, Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi (PEER) tarafından sağlanan deprem ivme kayıtları detaylı bir şekilde incelenmiş ve toplamda 11 adet deprem ivme kaydı seçilmiştir. Yapılan tarama sonucu elde edilen bu on bir deprem kaydı, Çizelge 5.3'te sunulmuştur.

5.10.1. El Mayor-Cucapah, Mexico (2010)

El Mayor-Cucapah Depremi, 4 Nisan 2010 tarihinde Meksika'nın Baja California bölgesinde meydana gelmiştir. Depremin magnitüdü (Mw) 7.2 olup, yaklaşık 120 km uzunluğunda bir kırılma yaratmıştır. Deprem, kuzeyde Kaliforniya'dan güneyde Mexicali'ye kadar geniş bir alanda güçlü sarsıntılara neden olmuştur. Deprem, Mexicali ve Calexico şehirlerinde ciddi yapısal hasarlara ve altyapı bozulmalarına yol açmıştır. Artçı sarsıntılar arasında en büyüğü 5.7 (Mw) büyüklüğünde olup, ana şoktan hemen sonra meydana gelmiştir.

5.10.2. Darfield, New Zealand (2010)

Darfield Depremi, 4 Eylül 2010 tarihinde Yeni Zelanda'nın Canterbury bölgesinde meydana gelmiştir. Depremin magnitüdü (Mw) 7.1 olup, 10 km derinlikte oluşmuştur. Deprem, Greendale Fay Hattı boyunca yaklaşık 30 km uzunluğunda bir yüzey kırılması yaratmış ve Christchurch kentinde geniş çaplı yapısal hasarlara neden olmuştur.

5.10.3. Parkfield-02, California (2004)

Parkfield Depremi, 28 Eylül 2004 tarihinde Kaliforniya'da meydana gelmiştir. Depremin magnitüdü (Mw) 6.0 olup, San Andreas Fay Hattı üzerinde gerçekleşmiştir. Bu deprem, özellikle bölgedeki sismik aktivitelerin düzenli izlenmesi ve değerlendirilmesi açısından önem taşımaktadır.

5.10.4. Kocaeli, Turkey (1999)

Kocaeli Depremi, 17 Ağustos 1999 tarihinde Türkiye'nin Marmara bölgesinde meydana gelmiştir. Depremin magnitüdü (Mw) 7.6 olup, Kuzey Anadolu Fay Hattı üzerinde yaklaşık 150 km uzunluğunda bir kırılma yaratmıştır.

5.10.5. Düzce, Turkey (1999)

Düzce Depremi, 12 Kasım 1999 tarihinde Türkiye'nin Batı Karadeniz bölgesinde meydana gelmiştir. Depremin magnitüdü (Mw) 7.2 olup, Kuzey Anadolu Fay Hattı üzerinde gerçekleşmiştir.

5.10.6. Kobe, Japan (1995)

Kobe Depremi, 17 Ocak 1995 tarihinde Japonya'nın Hyogo Eyaleti'nde meydana gelmiştir. Depremin magnitüdü (Mw) 6.9 olup, 16 km derinlikte gerçekleşmiştir. Deprem, Kobe şehri ve çevresinde büyük yapısal hasarlara neden olmuştur.

5.10.7. Morgan Hill, California (1984)

Morgan Hill Depremi, 24 Nisan 1984 tarihinde Kaliforniya'da meydana gelmiştir. Depremin magnitüdü (Mw) 6.2 olup, Calaveras Fay Hattı üzerinde gerçekleşmiştir. Deprem, Morgan Hill kasabası ve çevresinde orta derecede yapısal hasarlara neden olmuştur. Bu deprem, sismik tehlike değerlendirmelerinde önemli bir veri kaynağı olarak kullanılmaktadır.

5.10.8. Imperial Valley, California (1979)

Imperial Valley Depremi, 15 Ekim 1979 tarihinde Kaliforniya'nın Imperial County bölgesinde meydana gelmiştir. Depremin magnitüdü (Mw) 6.5 olup, Imperial Fay Hattı üzerinde gerçekleşmiştir. Deprem, geniş bir alanda yüzey kırılmaları ve zemin

deformasyonlarına yol açmıştır. Tarım alanlarında ve altyapıda ciddi hasarlar meydana gelmiştir.

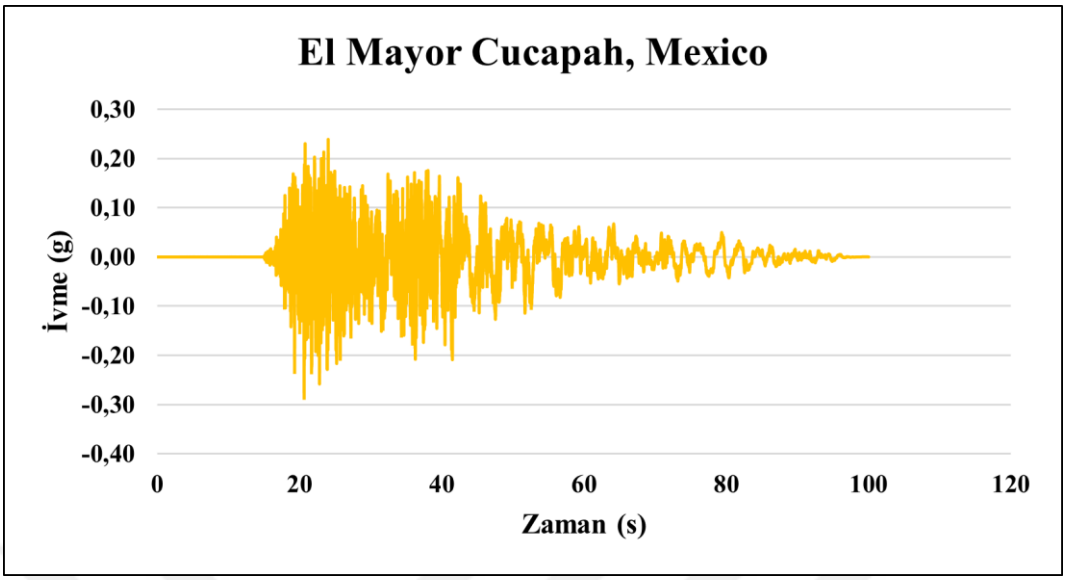
5.10.9. Managua, Nicaragua (1972)

Managua Depremi, 23 Aralık 1972 tarihinde Nikaragua'nın başkenti Managua'da meydana gelmiştir. Depremin magnitüdü (Mw) 6.3 olup, 5 km derinlikte gerçekleşmiştir. Deprem, şehir merkezinde geniş çaplı yapısal hasarlara ve altyapı bozulmalarına yol açmıştır.

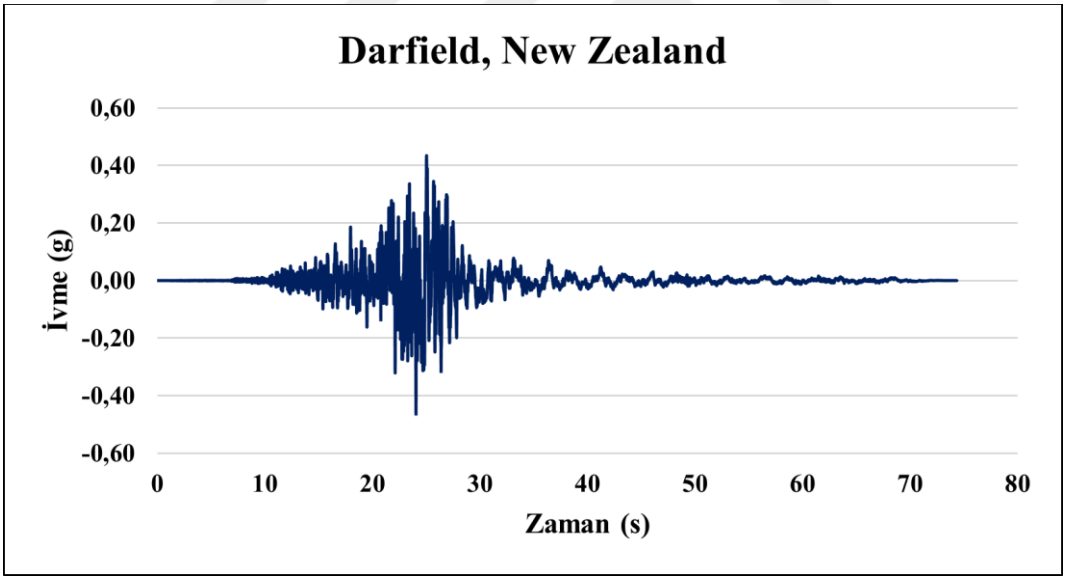
5.10.10. Parkfield, California (1966)

Parkfield Depremi, 28 Haziran 1966 tarihinde Kaliforniya'da meydana gelmiştir. Depremin magnitüdü (Mw) 6.0 olup, San Andreas Fay Hattı üzerinde gerçekleşmiştir. Deprem, Parkfield kasabası ve çevresinde orta derecede yapısal hasarlara neden olmuştur. Bu deprem, bölgedeki sismik aktivitelerin düzenli aralıklarla izlenmesi ve değerlendirilmesi açısından önemli bir olaydır.

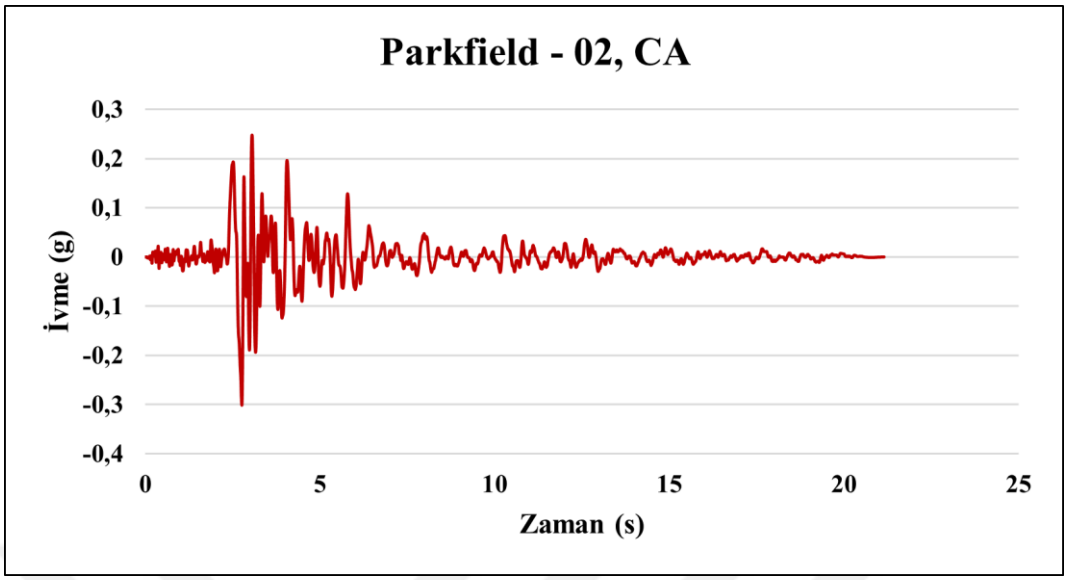
Analizlerde kullanılacak olan ivme-zaman grafikleri Şekil 5.12 – 5.22'de verilmiştir. (Güler, 2021)



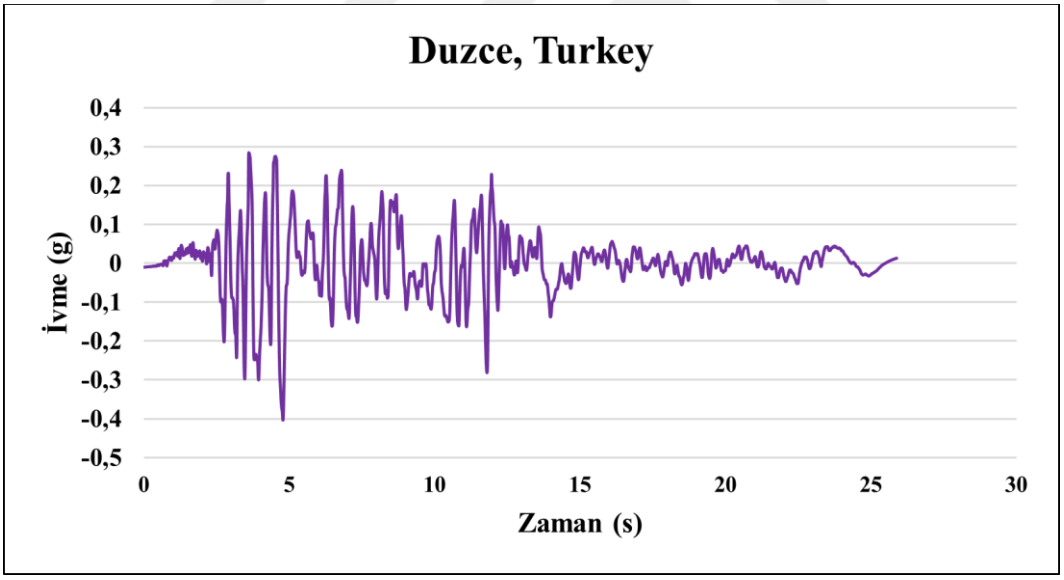
Şekil 5.12. El Mayor-Cucapah, Mexico (ivme zaman grafiği)



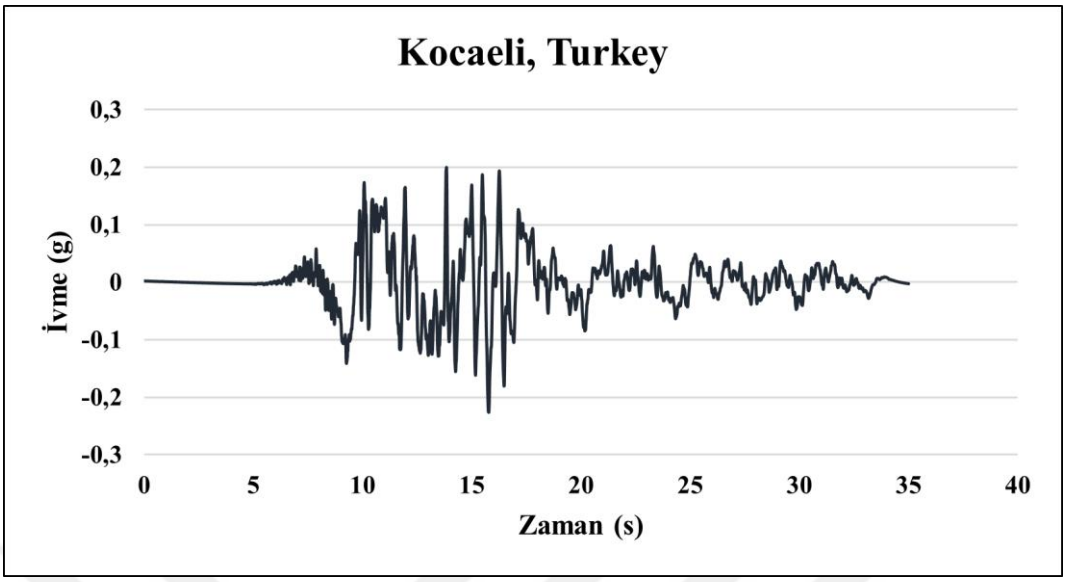
Şekil 5.13. Darfield, New Zealand (ivme zaman grafiği)



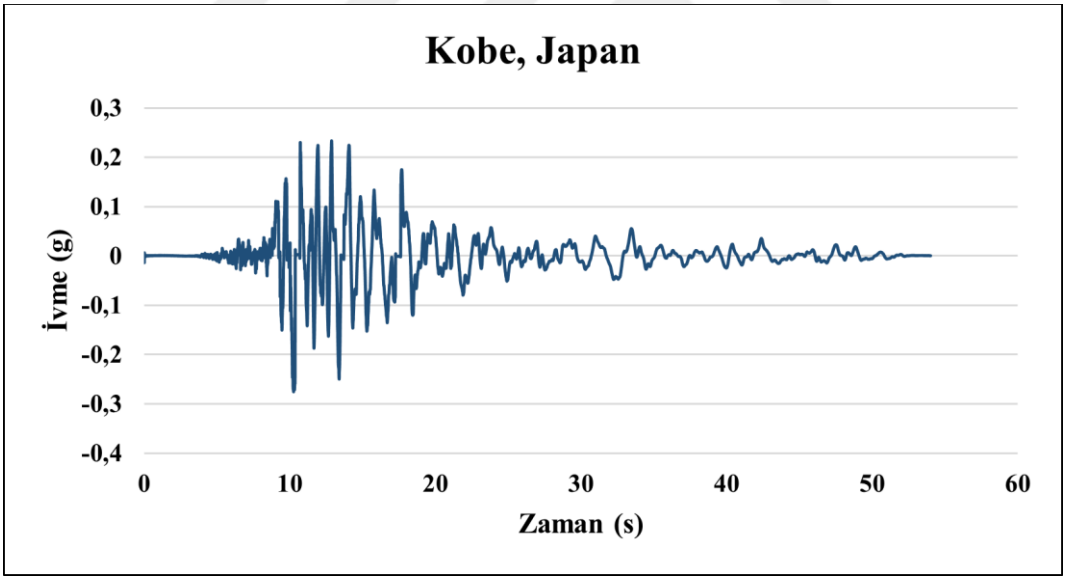
Şekil 5.14. Parkfield-02, CA (ivme zaman grafiği)



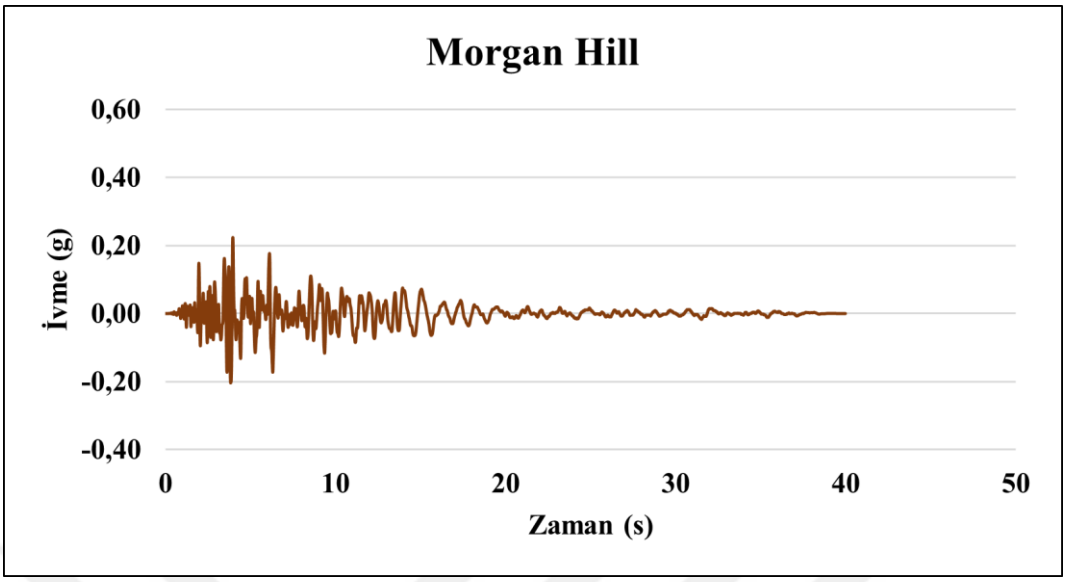
Şekil 5.15. Duzce,Turkey (ivme zaman grafiği)



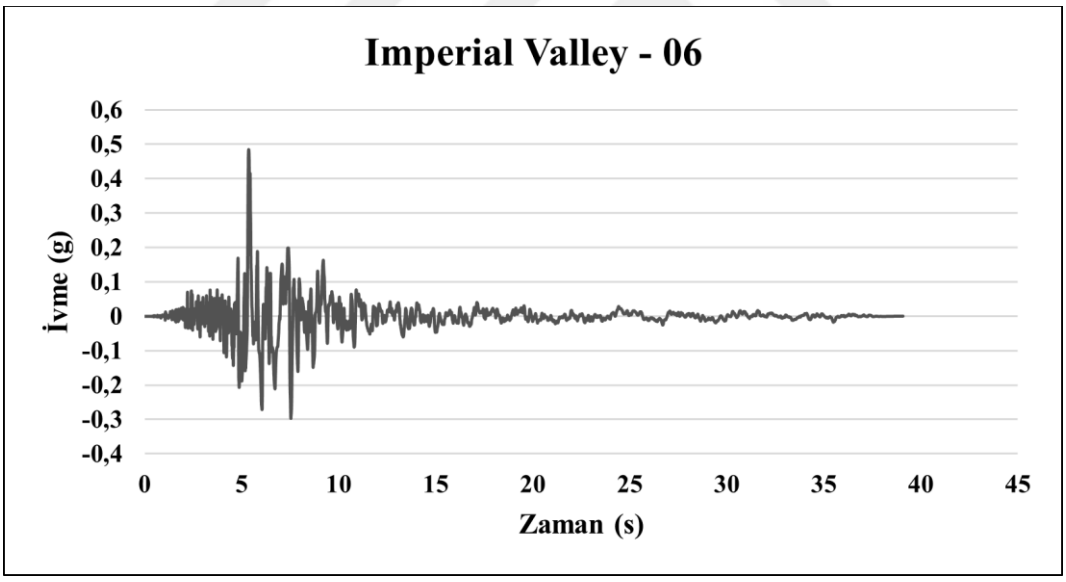
Şekil 5.16. Kocaeli, Turkey (ivme zaman grafiği)



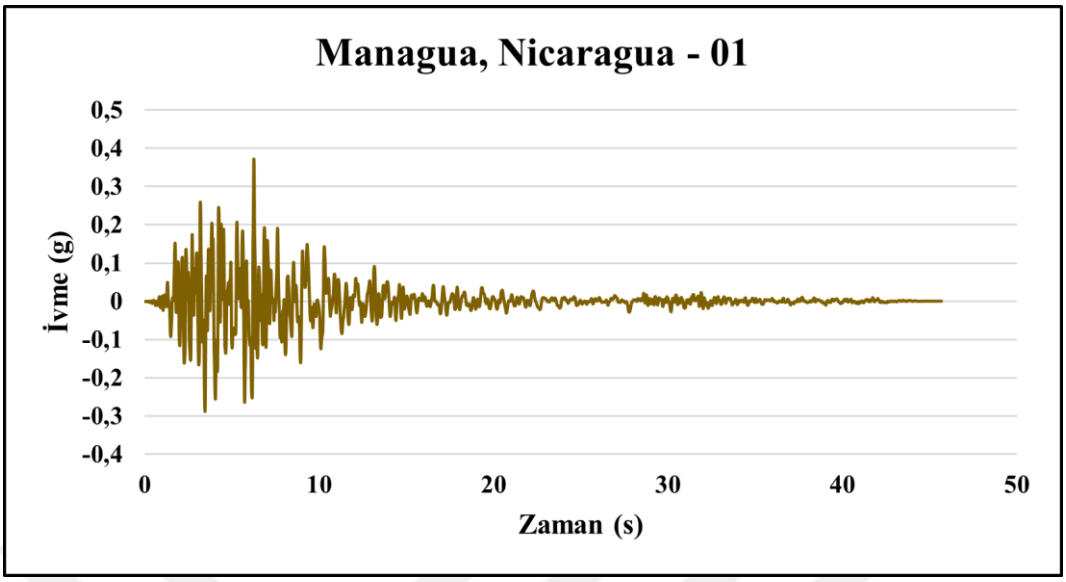
Şekil 5.17. Kobe, Japan (ivme zaman grafiği)



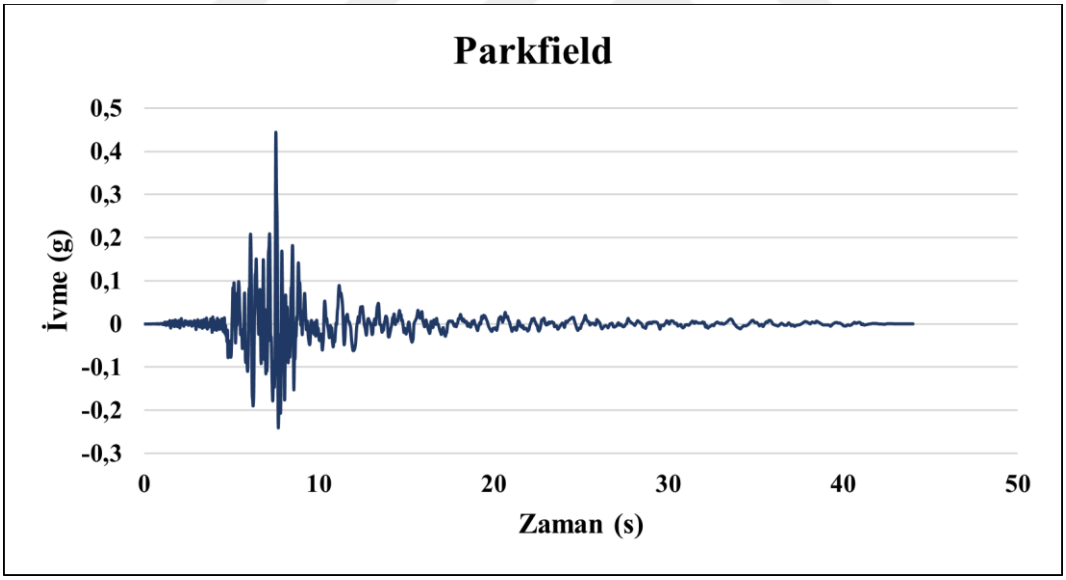
Şekil 5.18. Morgan Hill (ivme zaman grafiği)



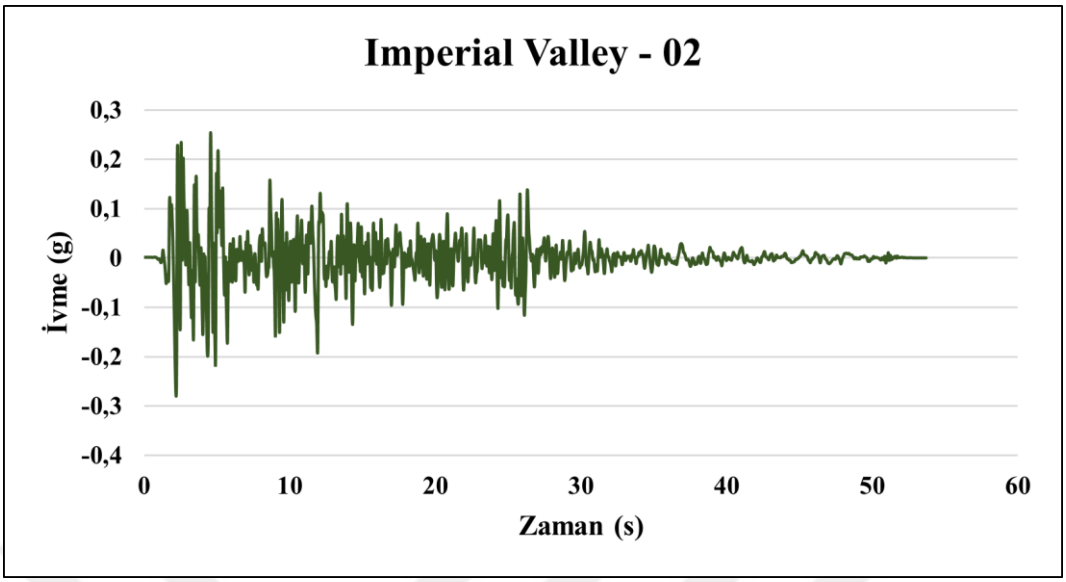
Şekil 5.19. Imperial Valley-06 (ivme zaman grafiği)



Şekil 5.20. Managua, Nicaragua-01 (ivme zaman grafiği)



Şekil 5.21. Parkfield (ivme zaman grafiği)

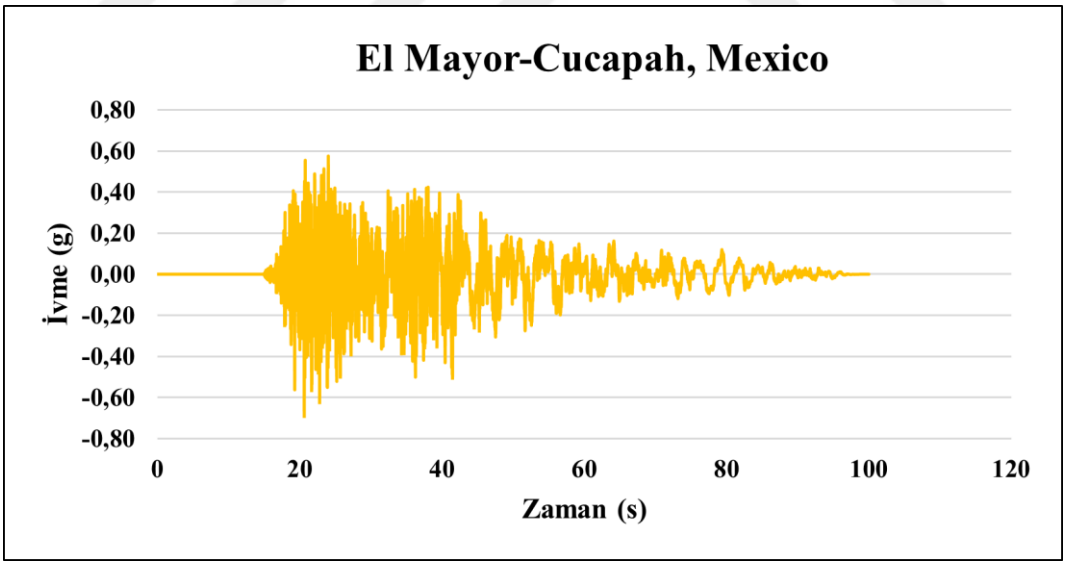


Şekil 5.22. Imperial Valley-02 (ivme zaman grafiği)

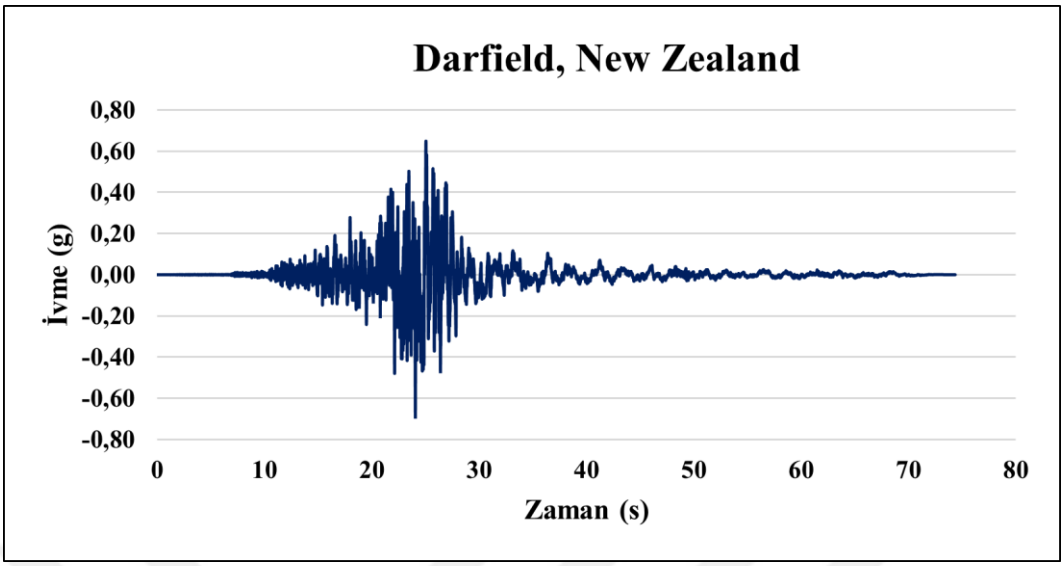
5.11. Seçilen Depremlerde Ölçeklendirme

Sahaya özgü analizler için depremlerin, çalışma bölgesinin deprem karakteristiğine uygun bir şekilde ölçeklendirilmesi gereklidir. Bu ölçeklendirme işlemi genellikle zaman-tanım ve frekans-tanım olmak üzere iki farklı yöntem kullanılarak gerçekleştirilir. Bu tez çalışmasında, zaman-tanım alanında (basit ölçeklendirme) yöntemi kullanılarak analizler yapılmıştır.

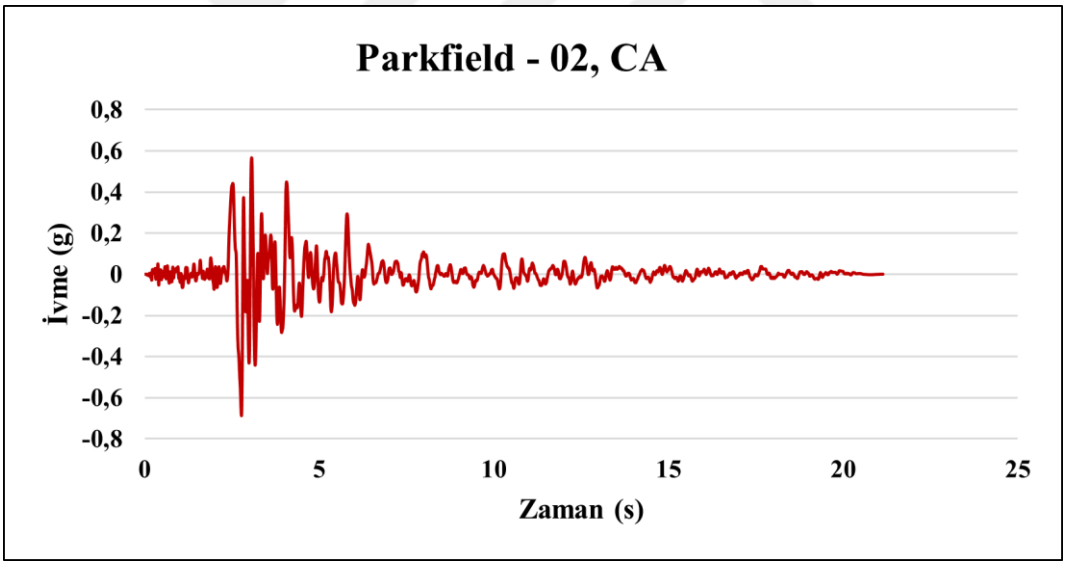
Son dönemde mühendislik alanında yaşanan ilerlemelerle birlikte, deprem kayıtlarının ölçeklendirilmesinde çeşitli yöntemler benimsenmiştir. Frekans-tanım alanındaki yöntemler tasarım ivme spektrumuna uygun bir kayıt elde etmek için kaydın frekans içeriğini değiştirir. Buna karşılık, zaman-tanım alanında yapılan ölçekleme işlemleri, kaydın frekans içeriğini değiştirmeden sadece genliğini değiştirmektedir. Analizlerde kullanılacak olan ölçeklendirilmiş ivme-zaman grafikleri Şekil 5.23 – 5.33'te verilmiştir. (Güler, 2021)



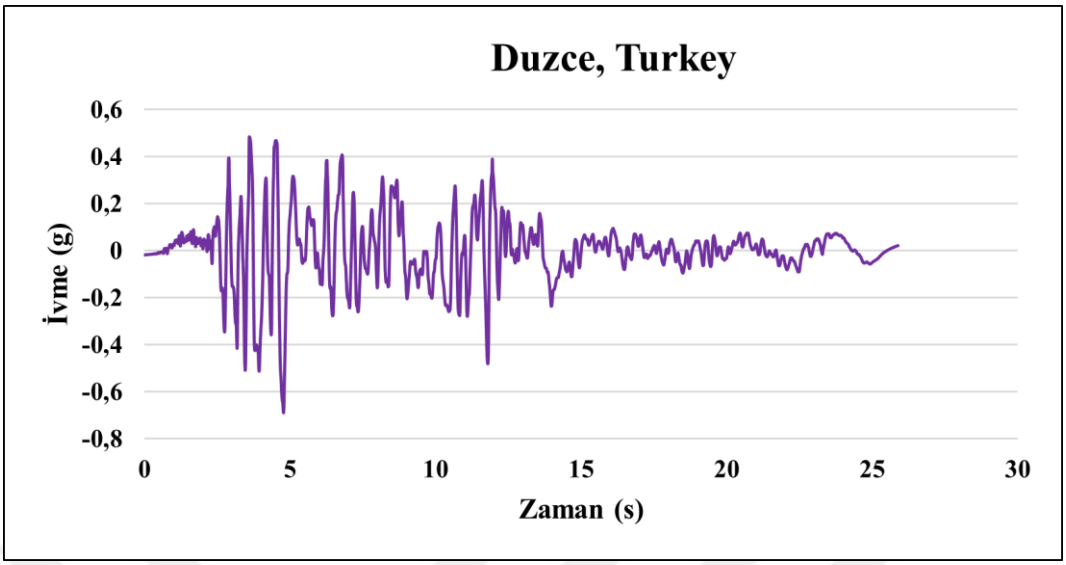
Şekil 5.23. El Mayor-Cucapah, Mexico (ölçeklendirilmiş ivme-zaman grafiği)



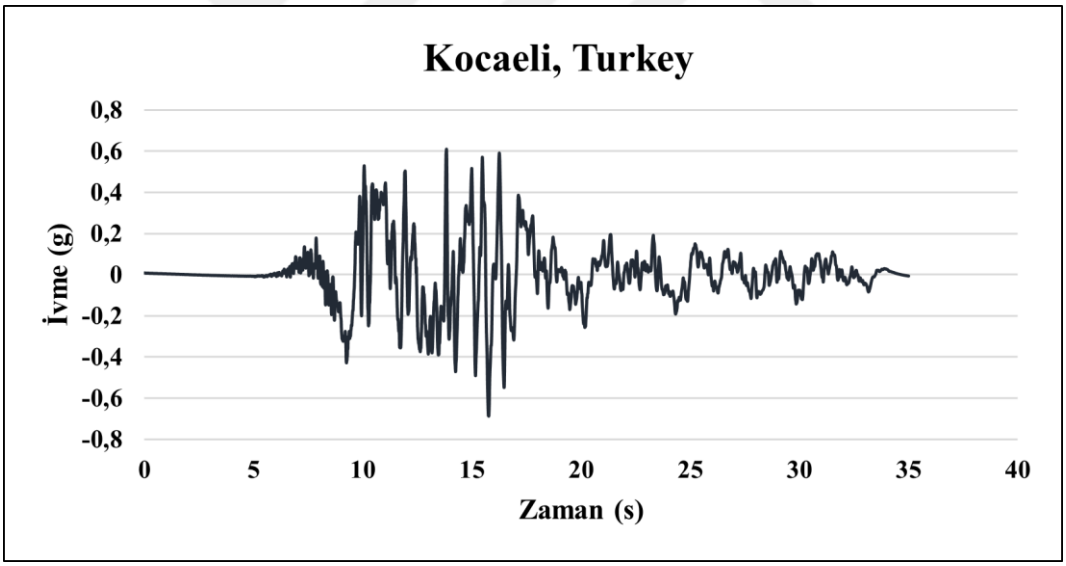
Şekil 5.24. Darfield, New Zealand (ölçeklendirilmiş ivme-zaman grafiği)



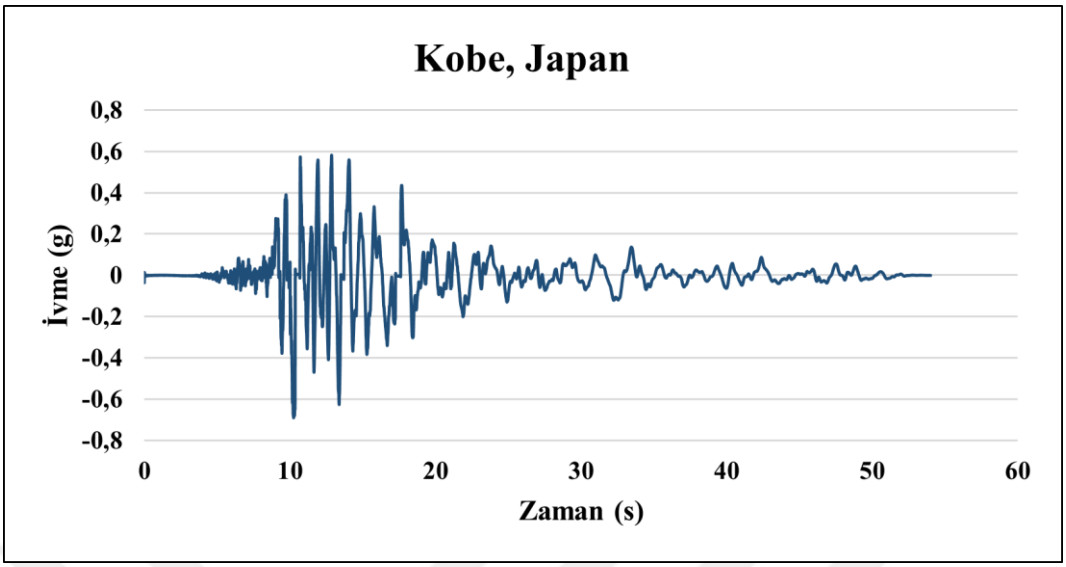
Şekil 5.25. Parkfield-02, CA (ölçeklendirilmiş ivme-zaman grafiği)



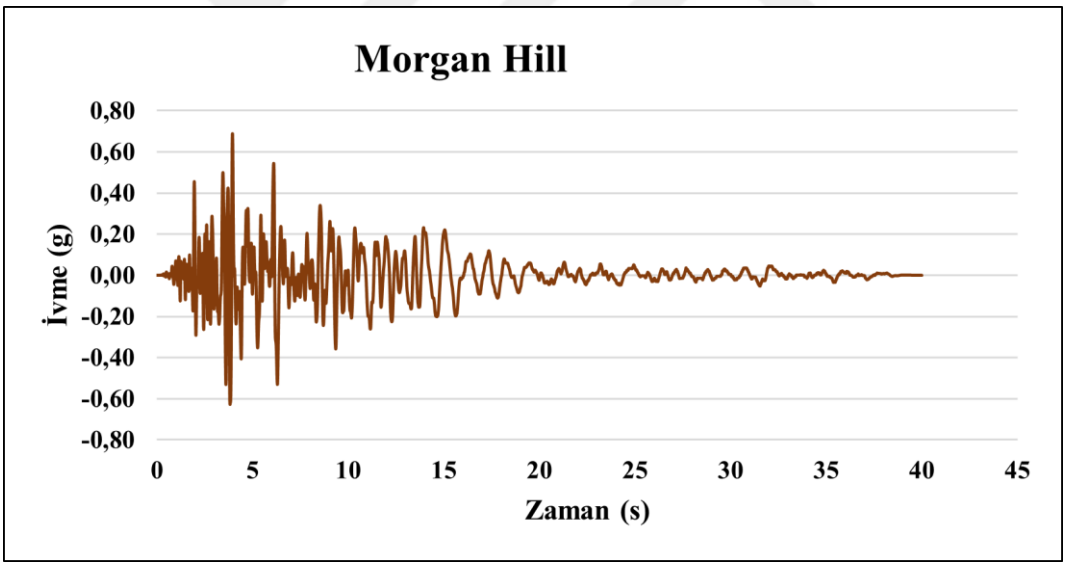
Şekil 5.26. Duzce, Turkey (ölçeklendirilmiş ivme-zaman grafiği)



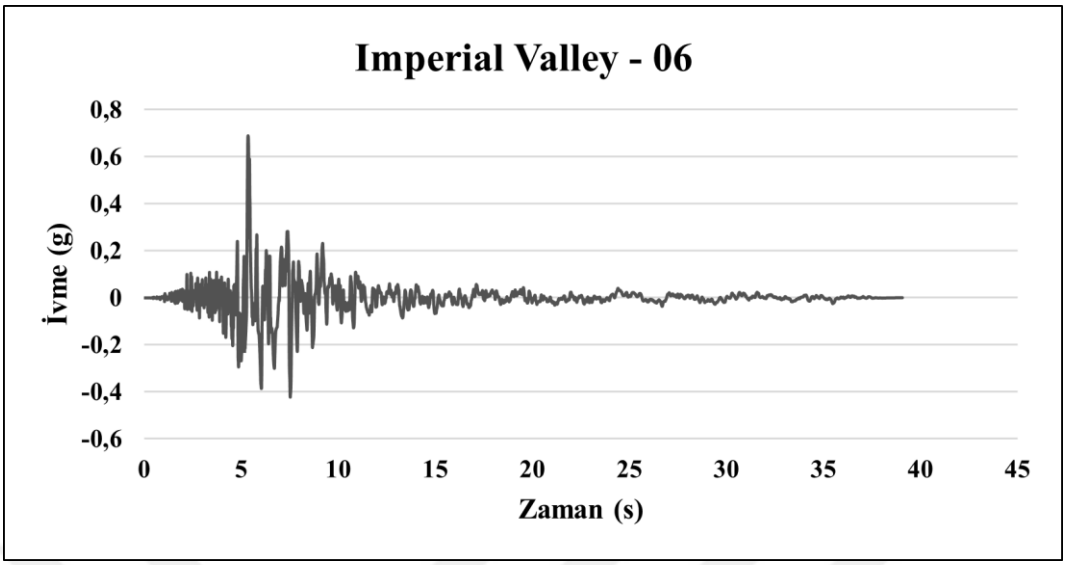
Şekil 5.27. Kocaeli, Turkey (ölçeklendirilmiş ivme-zaman grafiği)



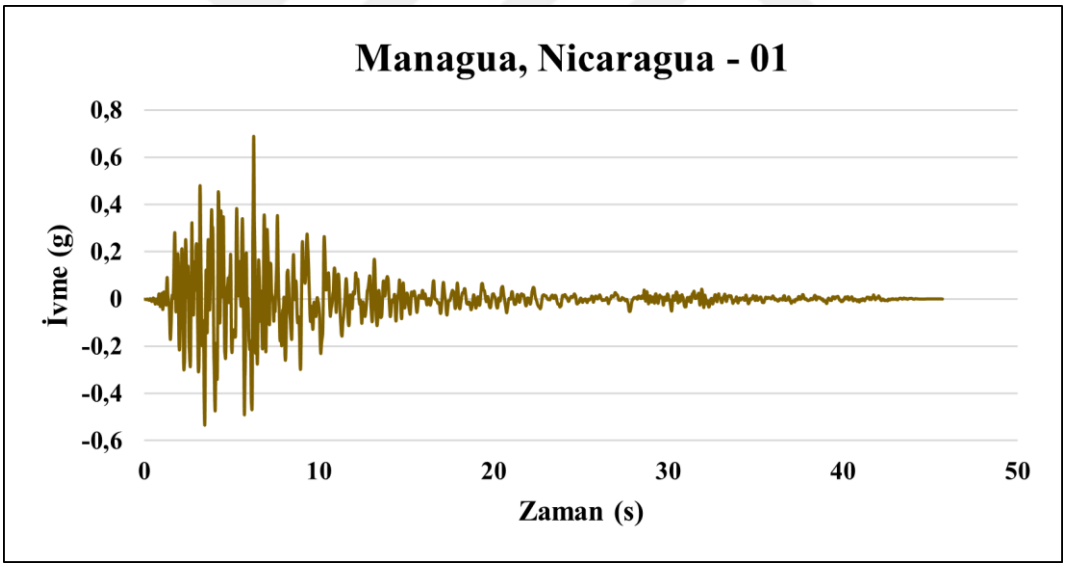
Şekil 5.28. Kobe, Japan (ölçeklendirilmiş ivme-zaman grafiği)



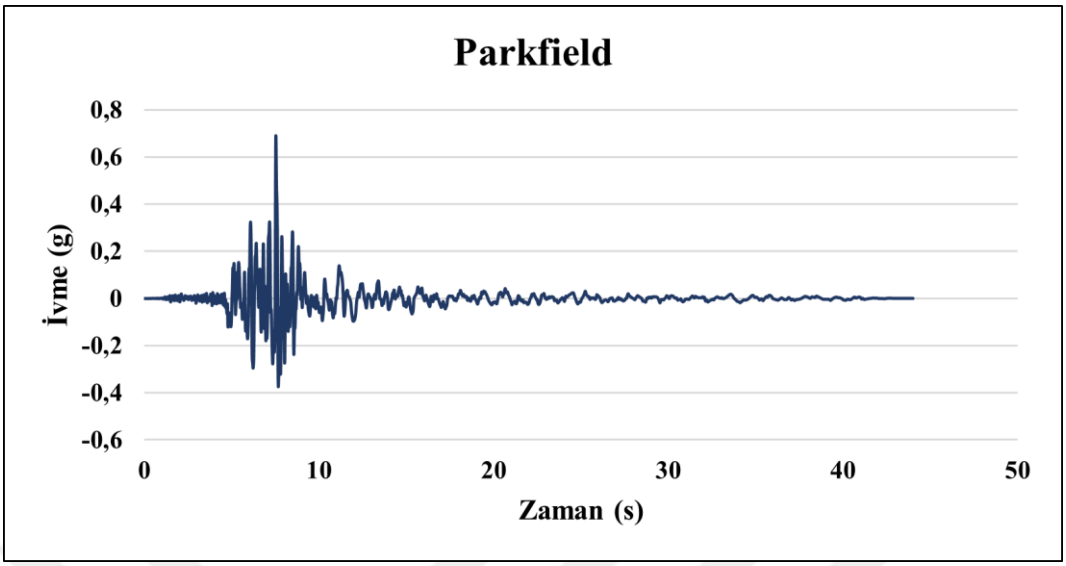
Şekil 5.29. Morgan Hill (ölçeklendirilmiş ivme-zaman grafiği)



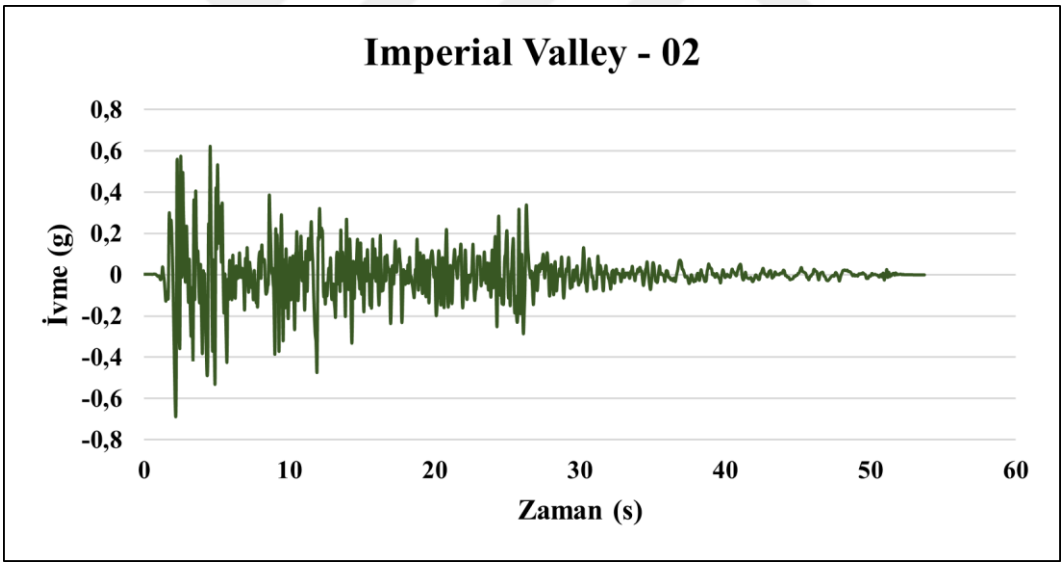
Şekil 5.30. Imperial Valley-06 (ölçeklendirilmiş ivme-zaman grafiği)



Şekil 5.31. Managua, Nicaragua-01 (ölçeklendirilmiş ivme-zaman grafiği)



Şekil 5.32. Parkfield (ölçeklendirilmiş ivme-zaman grafiği)



Şekil 5.33. Imperial Valley-02 (ölçeklendirilmiş ivme-zaman grafiği)

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

6.1. Örselenmemiş Numunelerin Tanımlanması

Örselenmemiş numuneler üzerinde öncelikle tanımlama deneyleri yapılmıştır. Bu kapsamda su muhtevası, elek analizi, Atterberg limitleri deneyleri yapılmış ve Çizelge 6.1'de sonuçlar gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre dört farklı sondaj noktasında derinlik boyunca zemin tanımlanmıştır. Zemin tanımlaması kapsamında yapılan su muhtevası deneylerindeki ortalama w değerleri % olarak aşağıdaki tabloda belirtilmiştir.

Çizelge 6.1. Sondaj kuyu numaralarına göre ortalama su muhtevası değerleri

SK No	Ortalama w Değeri (%)
SK – 1	35,76
SK – 2	32,39
SK – 3	33,55
SK – 4	36,44

Çizelge 6.2. Sondaj kuyu numaralarına göre silt-kil yüzdesi değerleri

SK No	Silt-Kil Yüzdesi (%)
SK – 1	80,8
SK – 2	78,4
SK – 3	79,2
SK – 4	83,4



Şekil 6.1. Su muhtevası deneyi için kullanılan etüv

Zemin tanımlaması kapsamında yapılan elek analizi deneyleriyle tespit edilen değerler aşağıdaki gibidir. Silt-kil yüzdesinin %80 – %85 aralığında olduğu belirlenmiştir. Şekil 6.2'de elek analizi deney seti ve Şekil 6.3'te elek sonrası kalan numuneler gösterilmektedir.

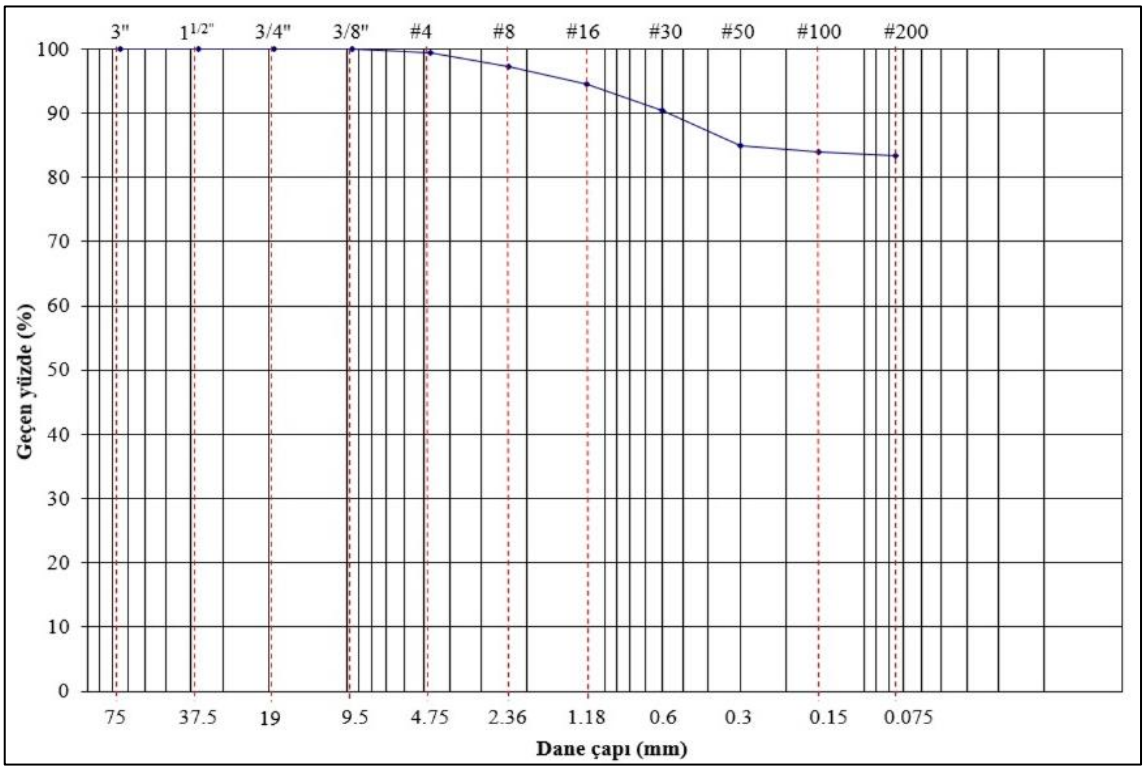


Şekil 6.2. Elek analizi deneyi için kullanılan elekler

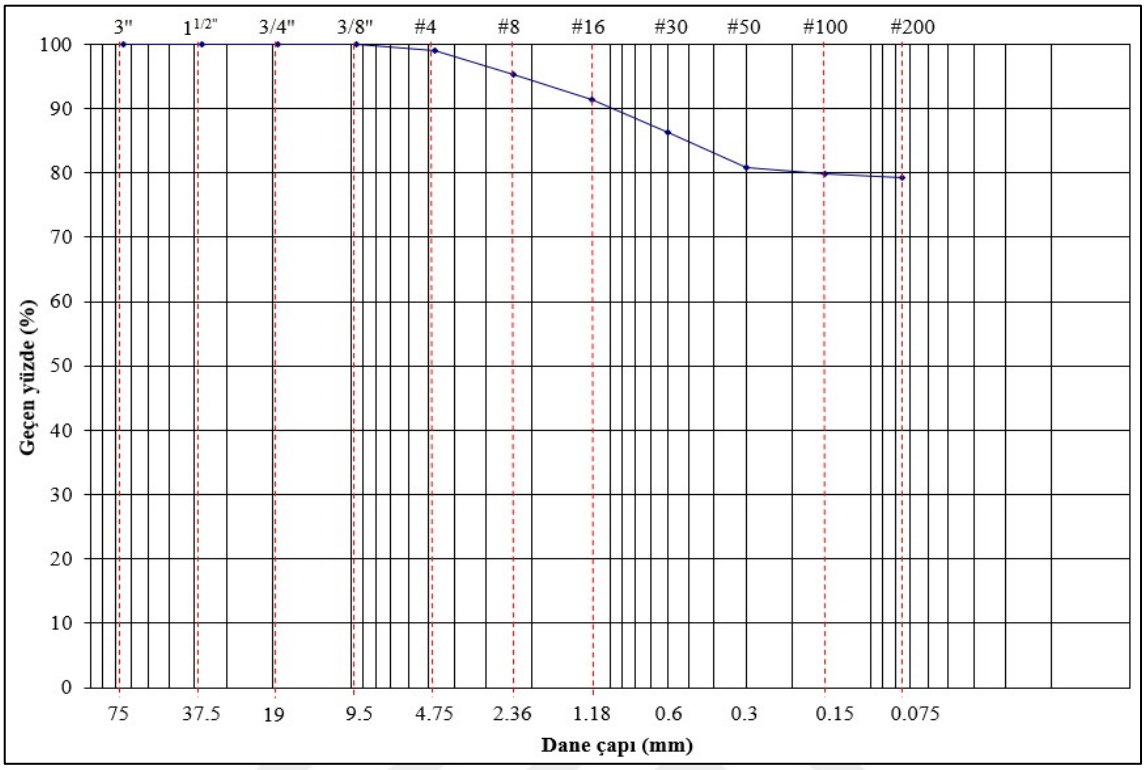


Şekil 6.3. Elek analizi deneyi sonrasında elek üstü kalan malzemeler

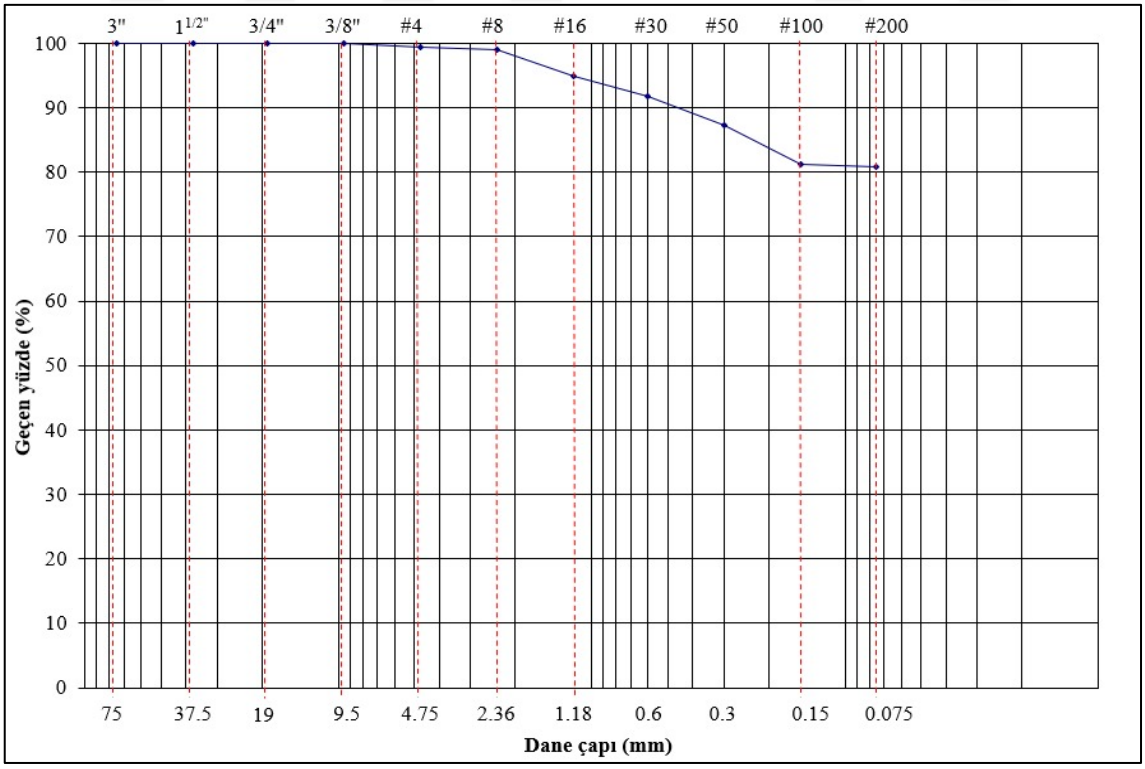
Yapılan elek analizi deneylerine ait grafikler ve sonuçlar Şekil 6.4-6.7 olarak gösterilmiştir.



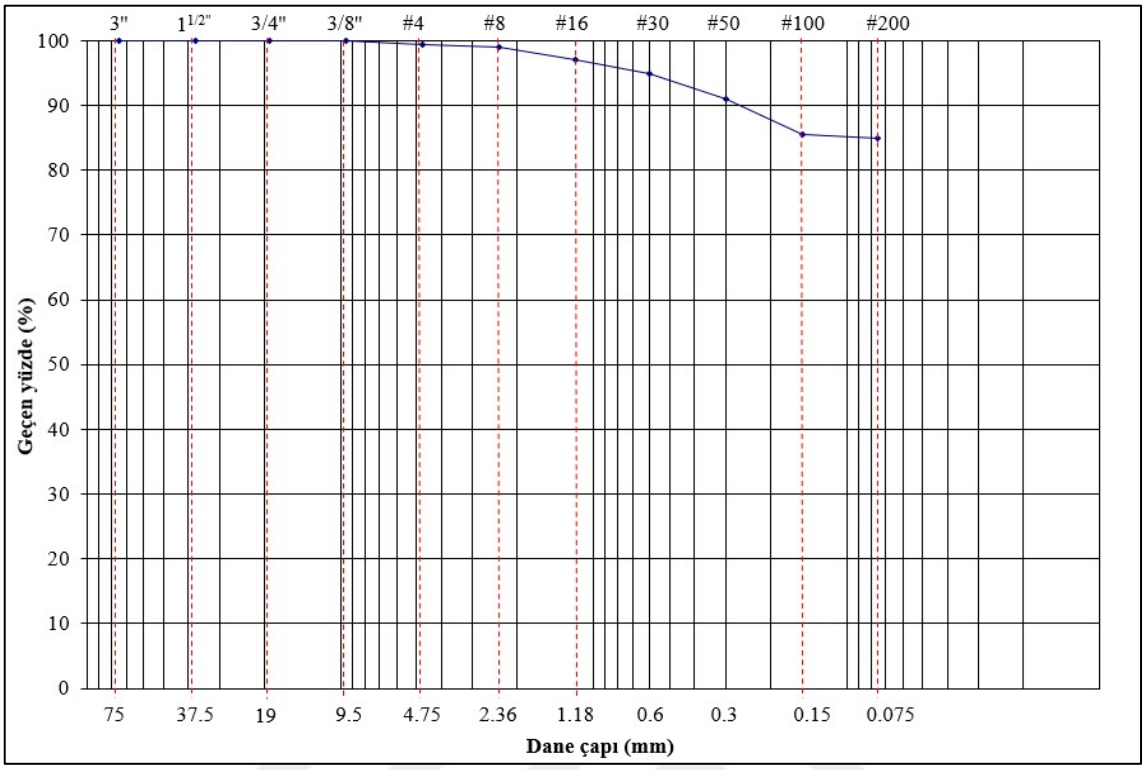
Şekil 6.4. SK – 1 Elek analizi grafiği



Şekil 6.5. SK – 2 Elek analizi grafiği



Şekil 6.6. SK – 3 Elek analizi grafiği



Şekil 6.7. SK – 4 Elek analizi grafiği

Zemin tanımlaması kapsamında yapılan Atterberg limitleri deneyleriyle tespit edilen değerler aşağıdaki gibidir. İlgili sondaj kuyularındaki hesaplardan örnek olarak bazı derinliklerde yapılan hesaplar seçilmiş ve deney seti Şekil 6.8'de gösterilmiştir.



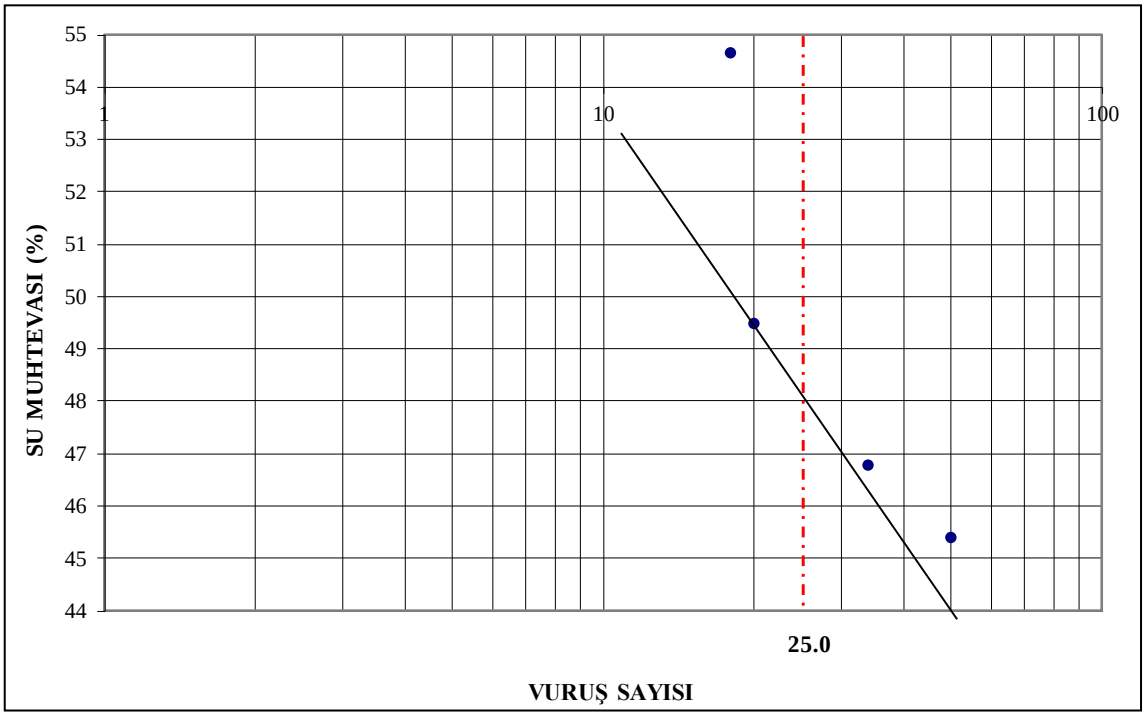
Şekil 6.8. Atterberg limitleri deneyi malzemeleri

Deney programına göre yapılan plastik limit şekil 6.9'da gösterilmiştir. Ayrıca her bir sondaj kuyusunda elde edilen deney grafikleri Şekil 6.10-6.13'te gösterilmiştir.



Şekil 6.9. Plastik limit deneyi numune görseli

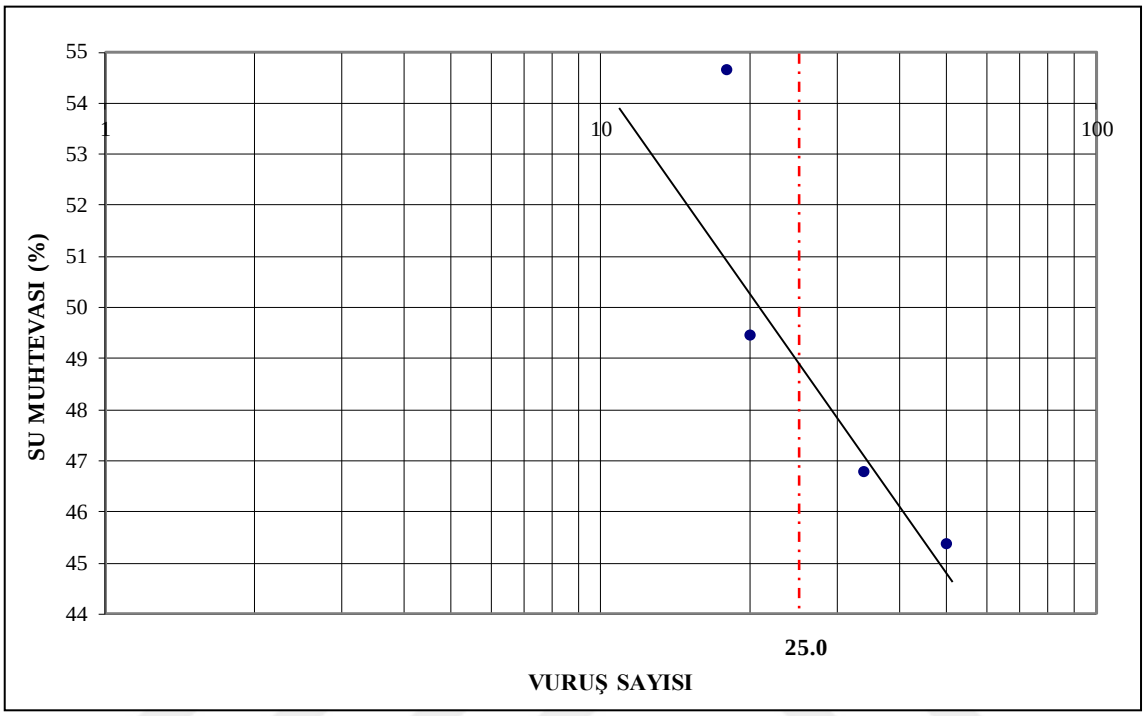
- SK – 1'den 18,00-19,50 m aralığı seçilmiştir.
- LL: 48 | PL: 20 | PI: 14



Şekil 6.10. SK – 1 Atterberg Limitleri Grafiği

- SK – 2'den 16,50-18,00 m aralığı seçilmiştir.

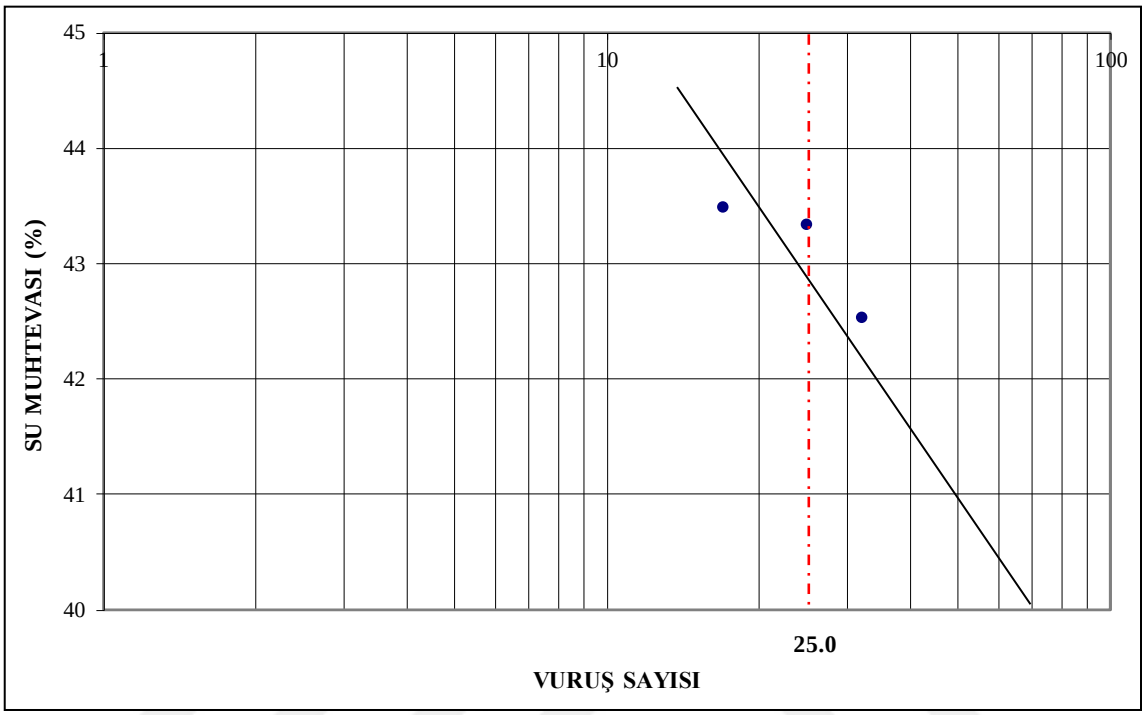
- LL: 49 | PL: 28 | PI: 21



Şekil 6.11. SK – 2 Atterberg Limitleri Grafiği

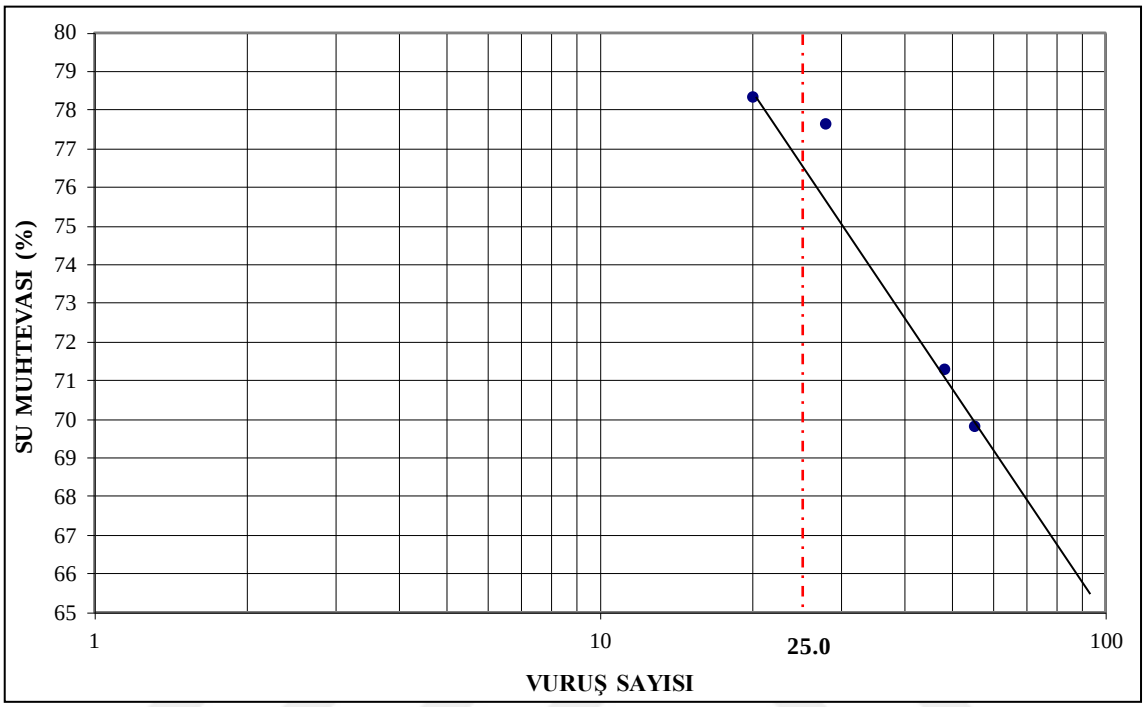
- SK – 3’ten 12,00-13,50 m aralığı seçilmiştir.

- LL: 43 | PL: 23 | PI: 21



Şekil 6.12. SK – 3 Atterberg Limitleri Grafiği

- SK – 4'ten 18,00-19,50 m aralığı seçilmiştir.
- LL: 77 | PL: 33 | PI: 45



Şekil 6.13. SK – 4 Atterberg Limitleri Grafiği

Şekil 5.4'teki Plastisite indeksi kartı (Casagrande, 1948) incelendiğinde ilgili sondaj kuyularına ait seçilmiş derinliklerdeki zemin sınıflarının CL ve CH sınıfı zeminler olduğu sonucuna varılmaktadır.

6.2. 1B Eşdeğer Doğrusal Olmayan Analiz Sonuçları

Zeminlerin tanımlanmasının ardından öncelikle 1B analizler yapılmıştır. Bu kapsamda DeepSoil programı kullanılarak zemin büyütme analizleri doğrusal olmayan (NL) analizler yapılmıştır. Analizlerde Darendeli 2001 modeli kullanılarak tanımlanan zemin parametreleri programa girilmiştir. Seçilen 11 adet deprem ivme kaydı ölçeklendirilmiş ve 1B zemin büyütme analizleri yapılmıştır. Elde edilen veriler ile derinliğe bağlı olarak PGA, yüzey tepki spektrum, zemin büyütme grafikleri elde edilmiştir.

6.3. 2B-3B Plaxis Dinamik Analizi

Zemin büyütmesinde boyut etkisinin incelenmesi amacıyla Plaxis programında 2B ve 3B analizler yapılmıştır. Plaxis programına tanımlanan zemin özellikleri Şekil 6.9'da görüleceği üzere analize hazırlanmıştır.

Araştırma bölgesinde yapılan sondaj çalışmaları sonucu elde edilen örselenmemiş numunelere yapılmış tanımlama deneyleri sonrasında zemin sınıflarının plastisite indeksi kartına göre genel olarak CL, CH ve ML sınıflarında olduğu tespit edilmiştir. Daha sonrasında sahaya özgü depremsellik özelliklerini yansıtan deprem ivme kayıtları seçilmesinin ardından, ölçeklendirme uygulanarak zemin büyütme analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler Plaxis 2D ve 3D programı ile yapılmıştır. Analizlerde yeraltı su seviyesi yüzeyde (z=0 m) olarak alınmıştır.

Plaxis yazılımı, kullanıcıların zeminleri veya diğer malzemeleri modellemeleri için çeşitli seçenekler sunmaktadır. Bu seçenekler arasında Lineer Elastik model, Mohr-Coulomb modeli, Pekleşen Zemin modeli, Pekleşmiş Zemin ile Küçük-Gerilme Rijitliği modeli, Yumuşak Zemin modeli, Yumuşak Zemin Sünme modeli, Birleşik Kaya modeli, Modifiye Cam-Kili modeli, NGI-ADP modeli, UDCAM-S modeli, Sekiguchi-Ohta modeli, Hoek-Brown modeli, UBC3D-PLM modeli ve Beton modeli bulunmaktadır. Toplamda on dört farklı malzeme modeli, mühendislerin ihtiyaçlarına göre detaylı ve etkili analizler gerçekleştirmelerine olanak tanımaktadır.

Bu çalışmada Pekleşen Zemin modeli, diğer bir adıyla "Hardening Soil" model seçilmiştir. Bu modelin seçilmesinin başlıca nedeni zemin davranışını karmaşık yükleme koşulları altında gerçekçi bir biçimde temsil etme kapasitesidir. Bu model, zemin parametrelerinin dinamik olarak değişimini ve dayanım değişimlerini takip edebilme yeteneği sayesinde, projeye özgü optimizasyonlar yapılmasına olanak tanır. Böylece, tasarım sürecinde daha güvenilir ve doğru sonuçlar elde edilmesi sağlanmış olur.

Plaxis'te kullanılan γ_{unsat}, γ_{sat}, c_u, ϕ, μ, k, E_{50}, E_{oed} ve E_{ur} gibi verilerin derinliğe bağlı olarak değişimleri aşağıdaki Çizelge 6.3-Çizelge 6.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 6.3. Plaxis'te kullanılan verilerin derinliğe bağlı olarak değişimleri

	Derinlik	γ_{unsat}	γ_{sat}	c_u	ϕ	μ	**k**	E_{50}	E_{oed}	E_{ur}
SK - 1	1,50 m	17	18	24,65	1	0,35	0,00001	6.000	15.000	18.000
	3,00 m	17	18	29,58	1	0,35	0,00001	7.000	17.500	21.000
	4,50 m	17	18	32,56	1	0,35	0,00001	8.000	20.000	24.000
	6,00 m	17	18	49,30	1	0,35	0,00001	10.000	25.000	30.000
	7,50 m	17	18	64,91	1	0,33	0,00001	12.500	31.250	37.500
	9,00 m	17	18	83,81	1	0,33	0,00001	15.000	37.500	45.000
	10,50 m	17	18	98,60	1	0,33	0,00001	17.000	42.500	51.000
	12,00 m	17	18	113,39	1	0,33	0,00001	20.000	50.000	60.000
	14,50 m	17	18	211,99	1	0,30	0,00001	40.000	100.000	120.000
	17,00 m	17	18	157,76	1	0,30	0,00001	35.000	87.500	105.000
	19,50 m	17	18	256,36	1	0,30	0,00001	45.000	112.500	135.000

Çizelge 6.4. Plaxis'te kullanılan verilerin derinliğe bağlı olarak değişimleri (devam)

	Derinlik	γ_{unsat}	γ_{sat}	c_u	ϕ	μ	**k**	E_{50}	E_{oed}	E_{ur}
SK - 2	1,50 m	17	18	24,65	1	0,35	0,00001	8.000	20.000	24.000
	3,00 m	17	18	29,58	1	0,35	0,00001	10.000	25.000	30.000
	4,50 m	17	18	32,56	1	0,35	0,00001	12.500	31.250	37.500
	6,00 m	17	18	49,3	1	0,35	0,00001	15.000	37.500	45.000
	7,50 m	17	18	64,91	1	0,33	0,00001	18.000	45.000	54.000
	9,00 m	17	18	83,81	1	0,33	0,00001	20.000	50.000	60.000
	10,50 m	17	18	98,6	1	0,33	0,00001	25.000	62.500	75.000
	12,00 m	17	18	113,39	1	0,33	0,00001	30.000	75.000	90.000
	14,50 m	17	18	211,99	1	0,3	0,00001	32.500	81.250	97.500
	17,00 m	17	18	157,76	1	0,3	0,00001	35.000	87.500	105.000
	19,50 m	17	18	256,36	1	0,3	0,00001	40.000	100.000	120.000

Çizelge 6.5. Plaxis'te kullanılan verilerin derinliğe bağlı olarak değişimleri (devam)

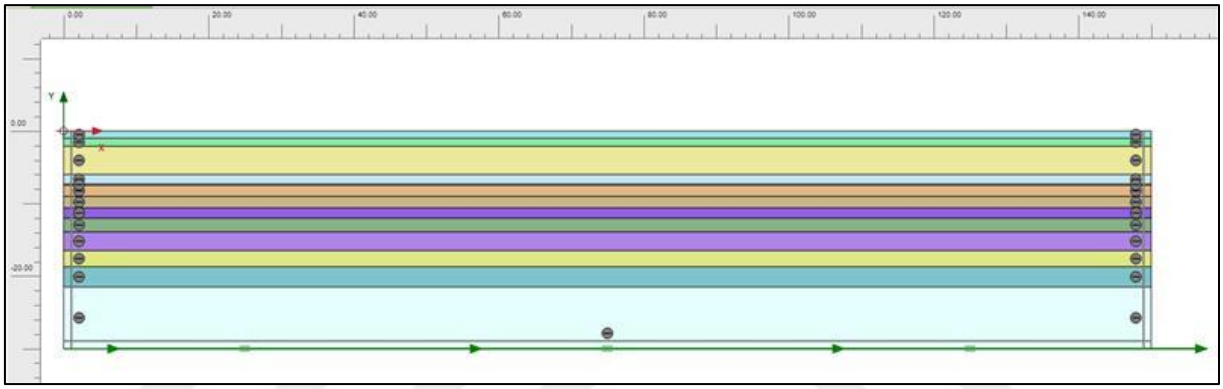
	Derinlik	γ_{unsat}	γ_{sat}	c_u	ϕ	μ	**k**	E_{50}	E_{oed}	E_{ur}
SK - 3	1,50 m	17	18	24,65	1	0,35	0,00001	5.000	12.500	15.000
	3,00 m	17	18	29,58	1	0,35	0,00001	8.000	20.000	24.000
	4,50 m	17	18	32,56	1	0,35	0,00001	12.500	31.250	37.500
	6,00 m	17	18	49,3	1	0,35	0,00001	15.000	37.500	45.000
	7,50 m	17	18	64,91	1	0,33	0,00001	18.000	45.000	54.000
	9,00 m	17	18	83,81	1	0,33	0,00001	22.500	56.250	67.500
	10,50 m	17	18	98,6	1	0,33	0,00001	25.000	62.500	75.000
	12,00 m	17	18	113,39	1	0,33	0,00001	32.000	80.000	96.000
	14,50 m	17	18	211,99	1	0,3	0,00001	40.000	100.000	120.000
	17,00 m	17	18	157,76	1	0,3	0,00001	42.500	106.250	127.500
	19,50 m	17	18	256,36	1	0,3	0,00001	45.000	112.500	135.000

Çizelge 6.6. Plaxis'te kullanılan verilerin derinliğe bağlı olarak değişimleri (devam)

	Derinlik	γ_{unsat}	γ_{sat}	c_u	ϕ	μ	**k**	E_{50}	E_{oed}	E_{ur}
SK - 4	1,50 m	17	18	24,65	1	0,35	0,00001	6.500	16.250	19.500
	3,00 m	17	18	29,58	1	0,35	0,00001	7.500	18.750	22.500
	4,50 m	17	18	32,56	1	0,35	0,00001	9.000	22.500	27.000
	6,00 m	17	18	49,3	1	0,35	0,00001	12.000	30.000	36.000
	7,50 m	17	18	64,91	1	0,33	0,00001	15.000	37.500	45.000
	9,00 m	17	18	83,81	1	0,33	0,00001	18.000	45.000	54.000
	10,50 m	17	18	98,6	1	0,33	0,00001	20.000	50.000	60.000
	12,00 m	17	18	113,39	1	0,33	0,00001	35.000	87.500	105.000
	14,50 m	17	18	211,99	1	0,3	0,00001	30.000	75.000	90.000
	17,00 m	17	18	157,76	1	0,3	0,00001	45.000	112.500	135.000
	19,50 m	17	18	256,36	1	0,3	0,00001	50.000	125.000	150.000

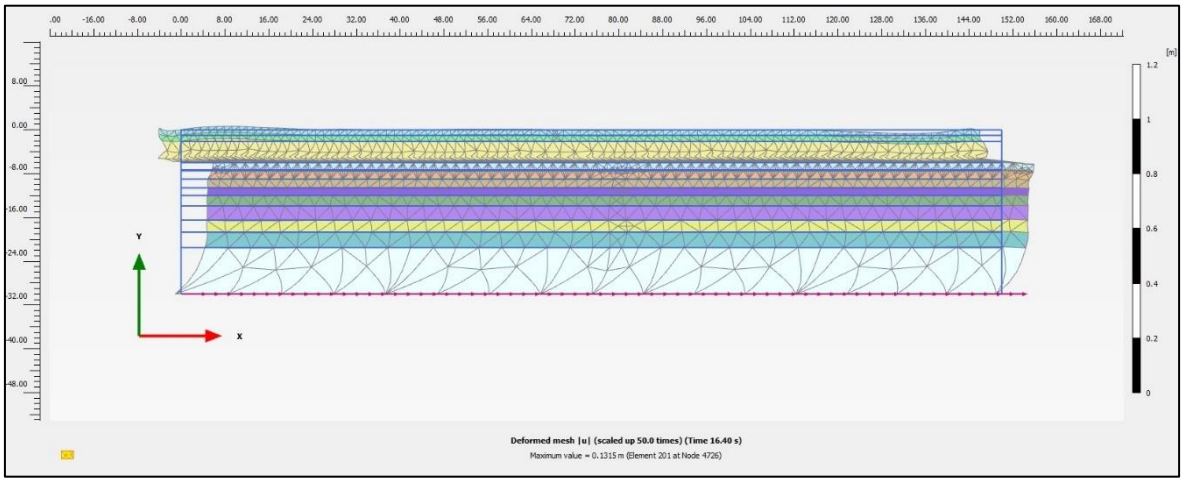
Ayrıca 19,50 m derinliğe sahip zemin profili deneyler sonucunda aşağıdaki gibi belirlenmiştir. Plaxis'e de zemin profili bu şekilde işlenmiştir.

- 1,50 m – 6,00 m arası: Killi Silt (ML)
- 6,00 m – 7,50 m arası: Siltli Kil (CL)
- 7,50 m – 9,00 m arası: Killi Silt (ML)
- 9,00 m – 12,00 m arası: Siltli Kil (CL)
- 12,00 m – 19,50 m arası: Killi Silt (ML)



Şekil 6.14. Plaxis programına tanımlanmış zemin profili

Çalışmada hem 2B hem de 3B etkisinin incelenmesi amacıyla toplamda 22 adet analiz yapılmıştır. Analizlerde kullanılan 11 adet ölçeklendirilmiş deprem ivme kaydı ile anakayadan yüzeye doğru ivmelerin değişimi, yüzeyde oluşan ivme değerleri, spektral ivmeler ve zemin büyütme faktörleri elde edilmiştir.



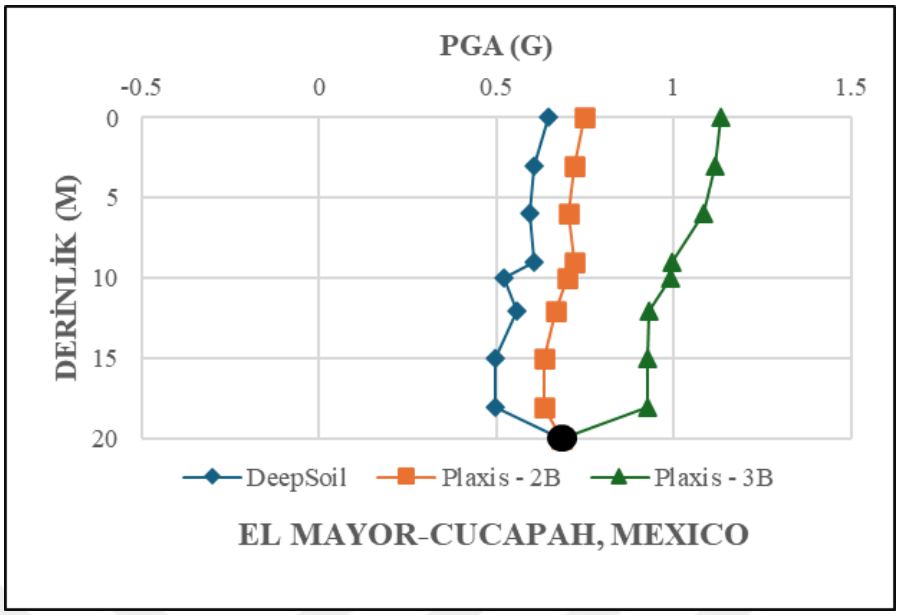
Şekil 6.15. Plaxis programında yapılmış bir analizin örnek çıktısı

Şekil 6.10'da gösterildiği gibi, zemin profilinin tam orta bölgesinde seçilmiş ayrı 7 noktada ivme değerleri ölçülmüştür. Ayrıca deformasyonun maksimum değeri 0,1315 m olarak hesaplanmıştır.

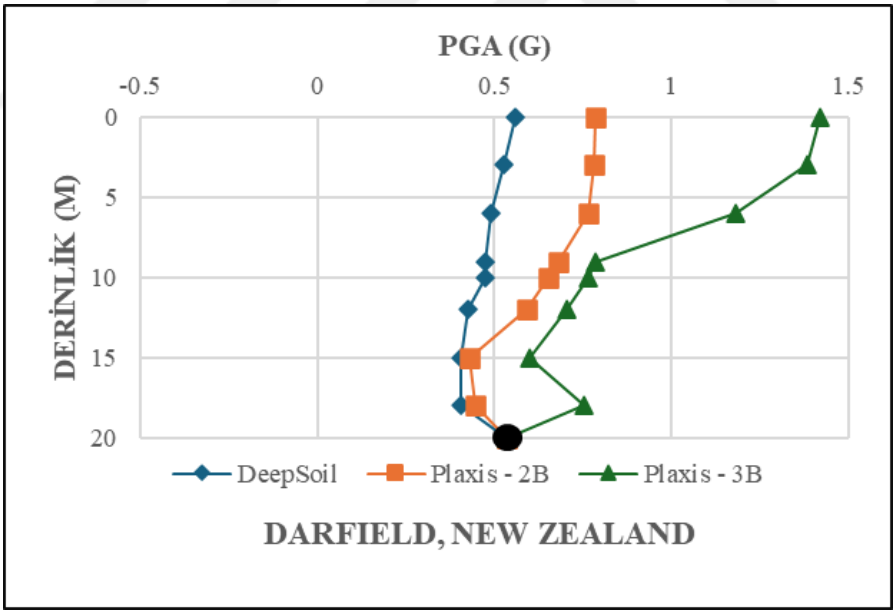
6.4. Farklı Boyut Analizlerinde Derinlik Boyunca İvme Değişimin Gösterimi

Boyut etkisinin incelenmesi ve daha net gösteriminin yapılması amacıyla hem DeepSoil programından hem de Plaxis programından depremlere göre yüzey boyunca değişimi elde edilmiştir. 11 adet depremin üç farklı analiz yönteminde anakayadan yüzeye doğru değişimi Şekil 6.16-Şekil 6.26'da gösterilmiştir.

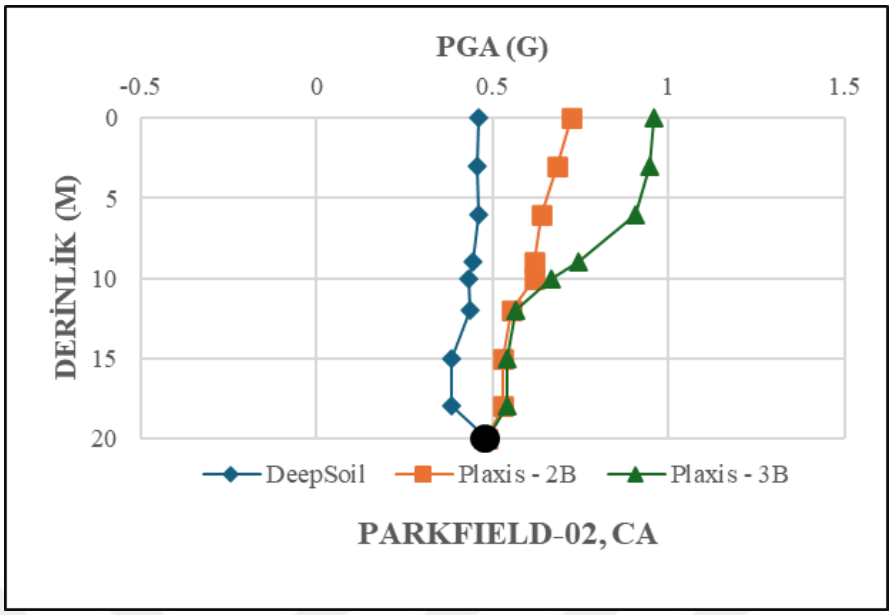
Elde edilen verilere göre farklı programlar kullanılarak ve farklı boyutlar etki ettirilerek elde edilen verilerde büyük farklılıklar görülmektedir. Bir deprem ivmesinin derinlik boyunca yüzeye doğru değişimi boyut etkisinden oldukça etkilenmektedir.



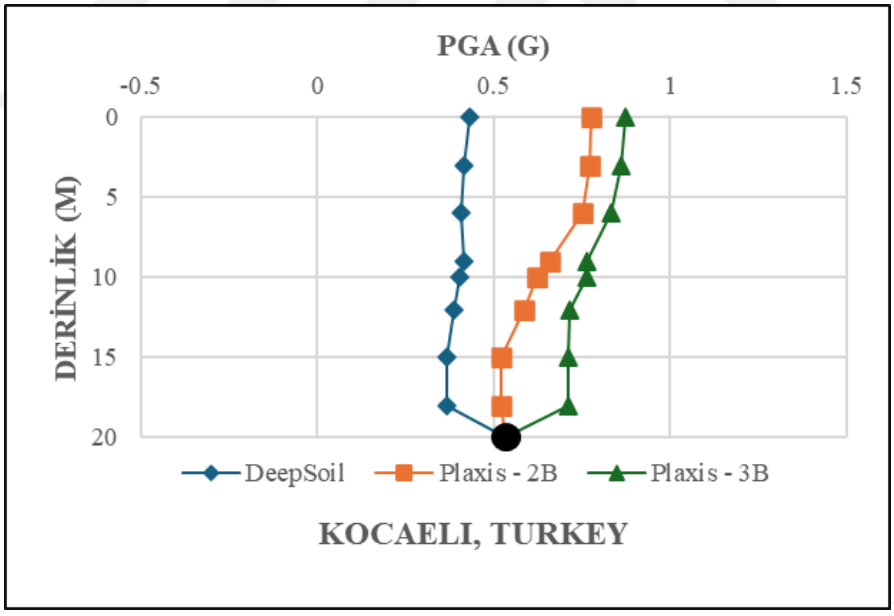
Şekil 6.16. İvmelerin anakayadan yüzeye doğru değişimleri (Cucapah, Mexico)



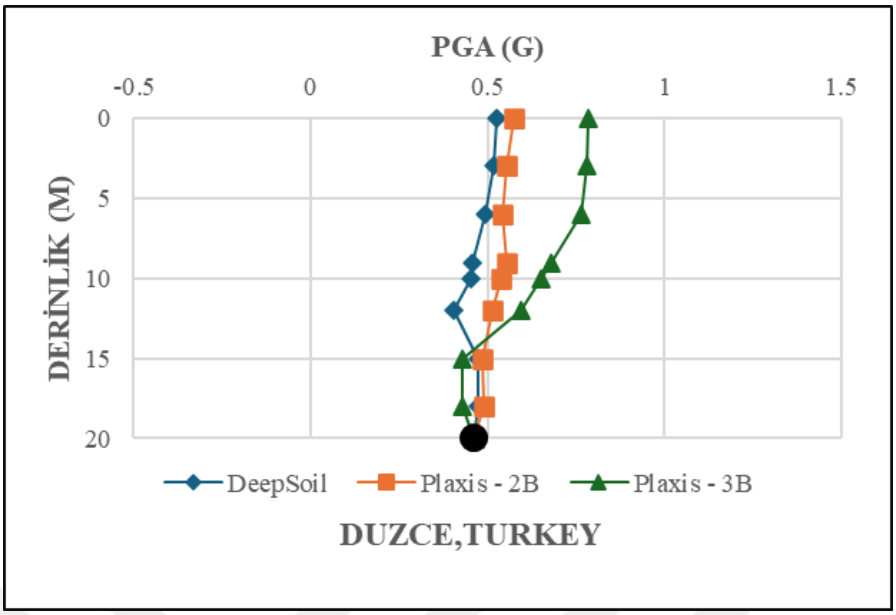
Şekil 6.17. İvmelerin anakayadan yüzeye doğru değişimleri (Darfield, New Zealand)



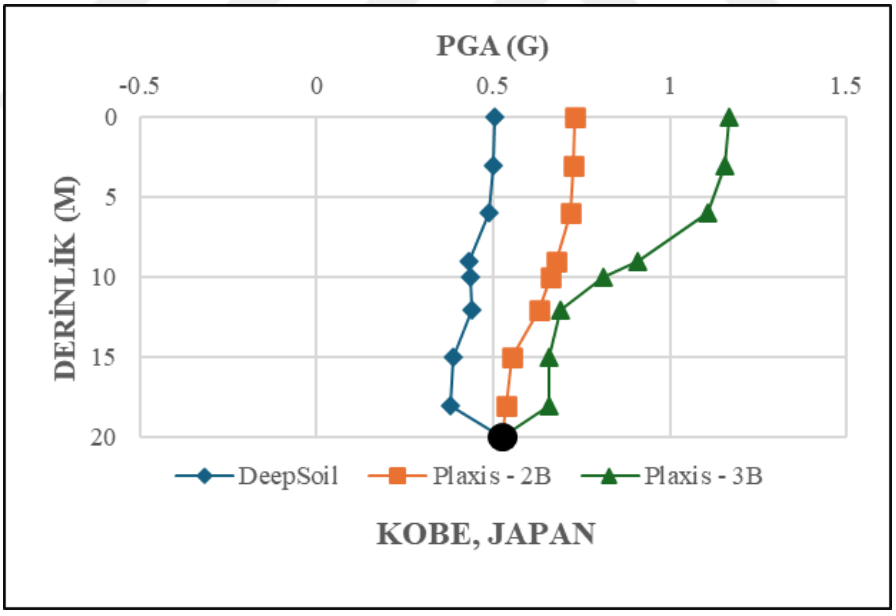
Şekil 6.18. İvmelerin anakayadan yüzeye doğru değişimleri (Parkfield-02, CA)



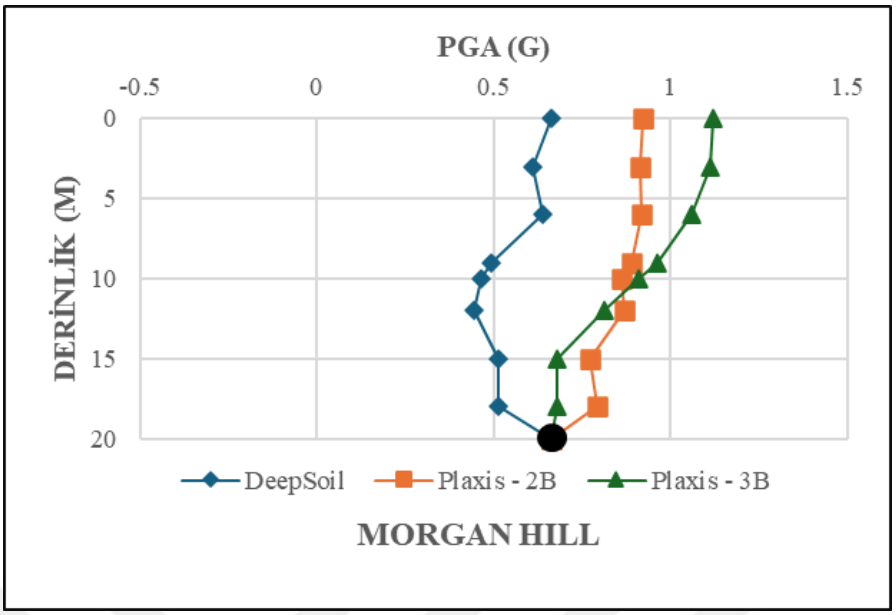
Şekil 6.19. İvmelerin anakayadan yüzeye doğru değişimleri (Kocaeli, Turkey)



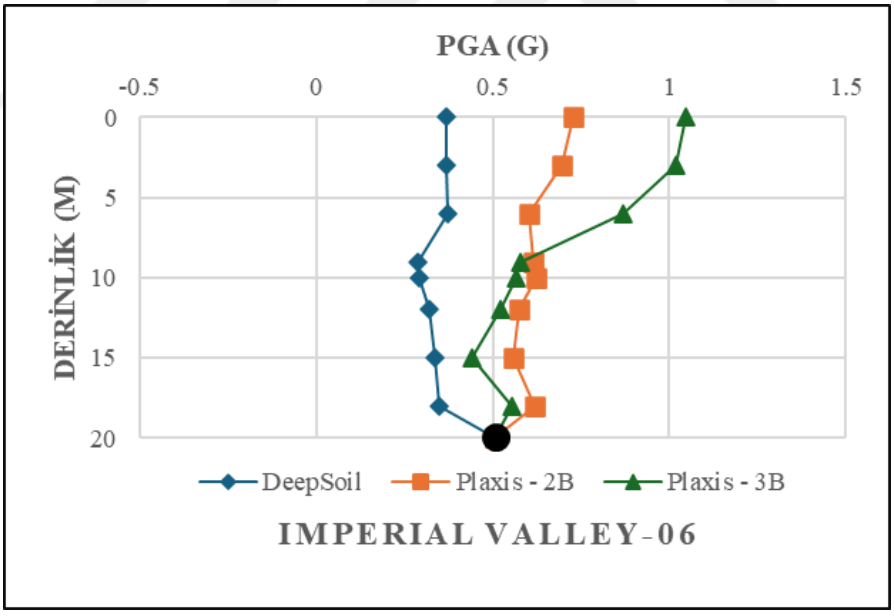
Şekil 6.20. İvmelerin anakayadan yüzeye doğru değişimleri (Duzce, Turkey)



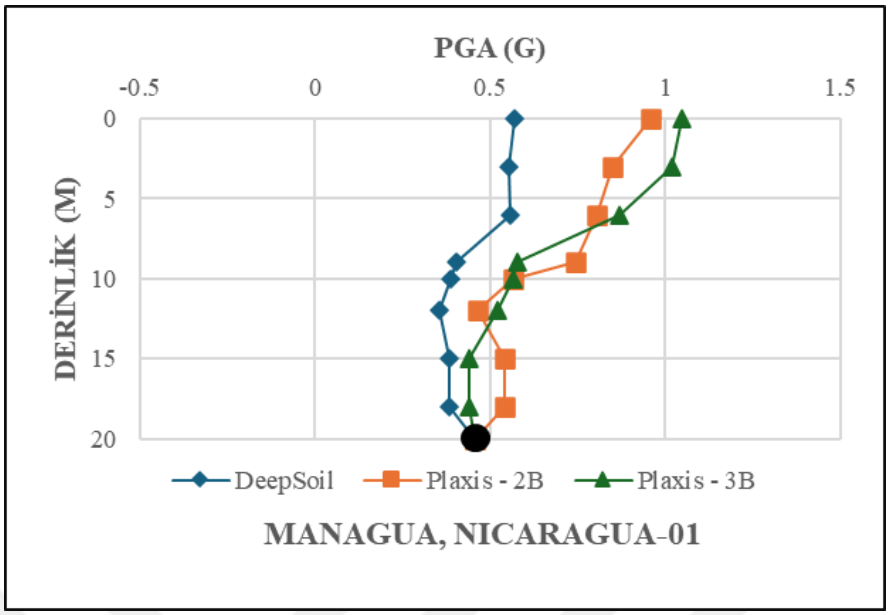
Şekil 6.21. İvmelerin anakayadan yüzeye doğru değişimleri (Kobe, Japan)



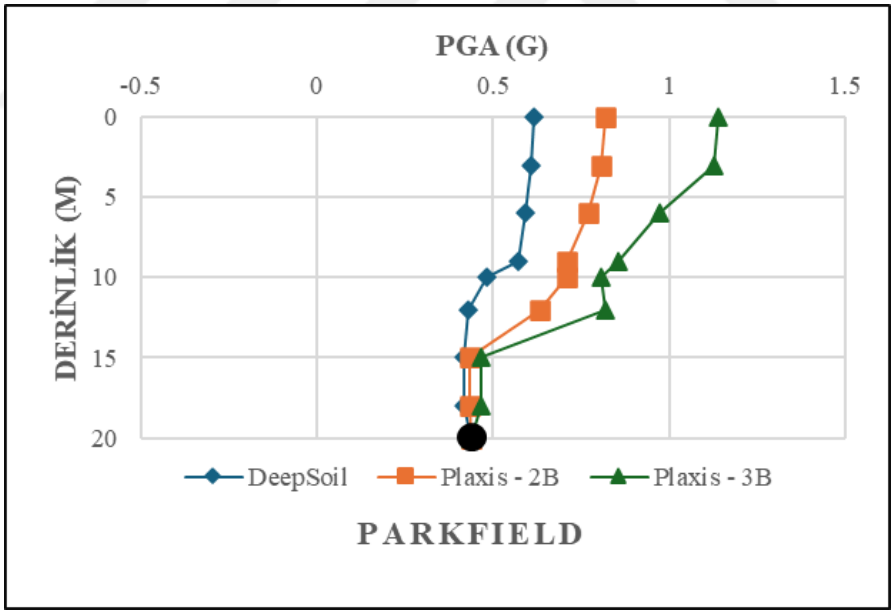
Şekil 6.22. İvmelerin anakayadan yüzeye doğru değişimleri (Morgan Hill)



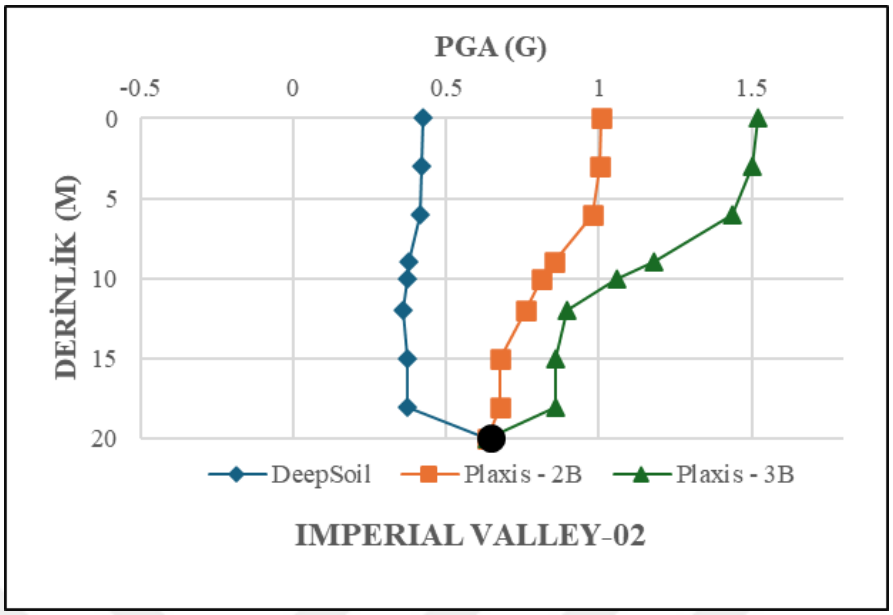
Şekil 6.23. İvmelerin anakayadan yüzeye doğru değişimleri (Imperial Valley-06)



Şekil 6.24. İvmelerin anakayadan yüzeye doğru değişimleri (Managua, Nicaragua-01)



Şekil 6.25. İvmelerin anakayadan yüzeye doğru değişimleri (Parkfield)



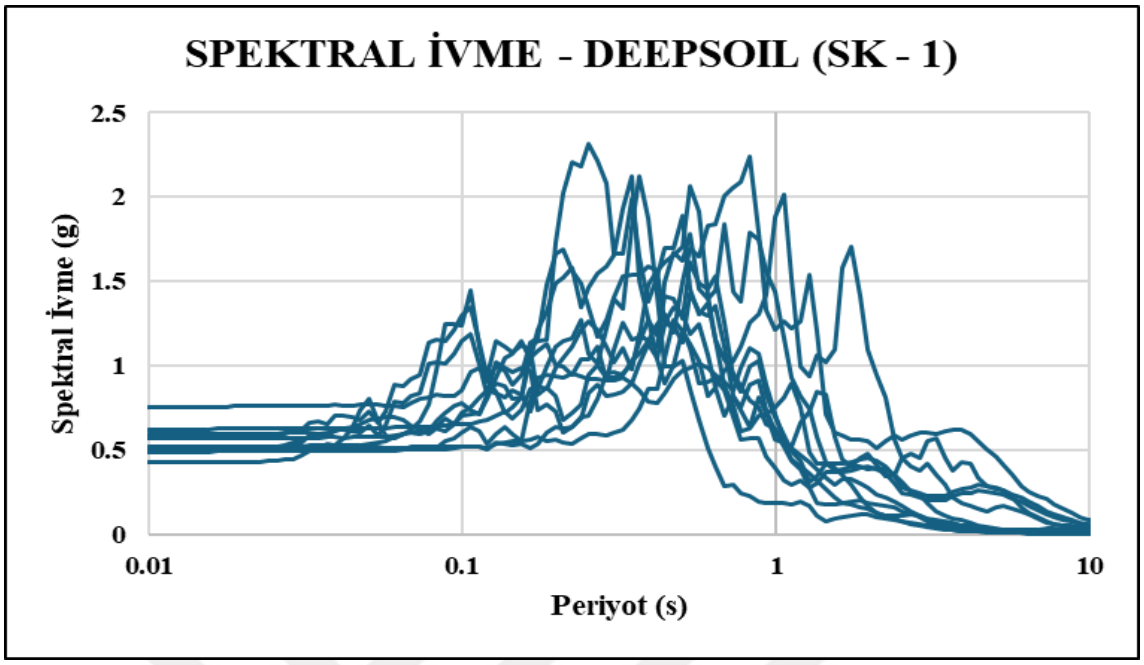
Şekil 6.26. İvmelerin anakayadan yüzeye doğru değişimleri (Imperial Valley-02)

6.5. Farklı Boyut Analizlerine Göre Tepki Spektrumları

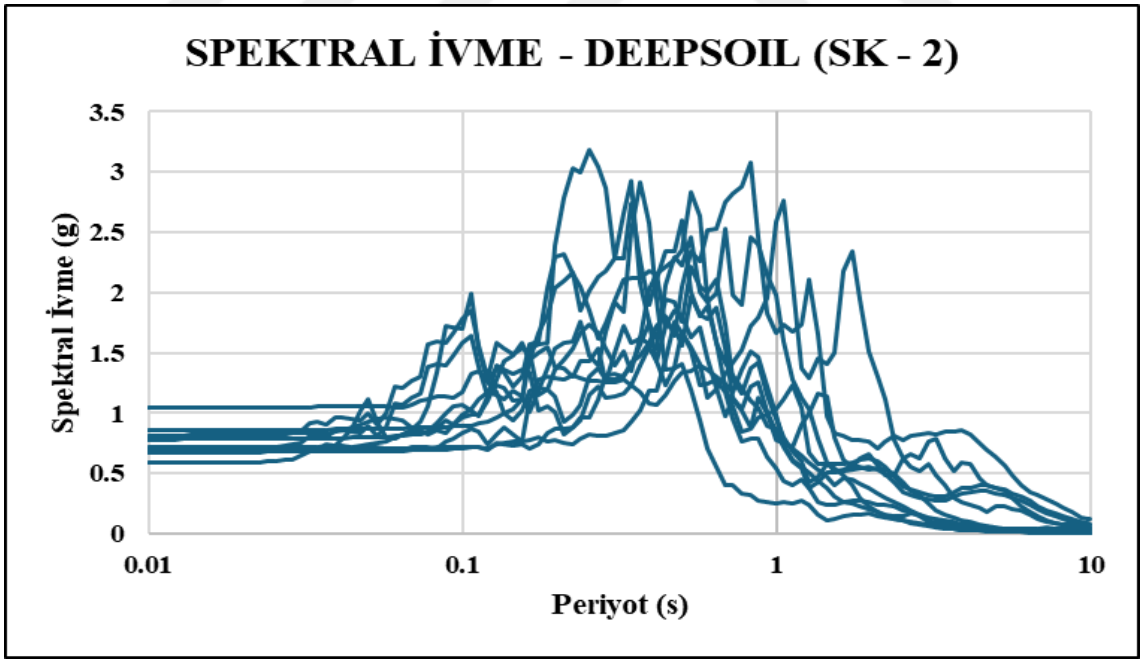
Yapılan bir boyutlu analizler sonucunda yüzeyde meydana gelen spektral ivme-periyot değerleri Şekil 6.27-6.30'da gösterilmiştir. Şekil 6.31'de DeepSoil programıyla yapılmış bir boyutlu analizlerin özet grafiği verilmiştir. Burada boyut etkisi özellikle T:1.0sn'ye yakın düzeyde yüksek ivme değerleri göstermektedir.

Yapılan iki boyutlu analizler sonucunda yüzeyde meydana gelen spektral ivme-periyot değerleri Şekil 6.32 ve 6.33'te gösterilmiştir. Şekil 6.34'te DeepSoil programıyla yapılmış iki boyutlu analizlerin tamamının gösterildiği grafik verilmiştir. Şekil 6.35'te ise yapılan üç boyutlu analizler sonucunda yüzeyde meydana gelen spektral ivme-periyot değerleri verilmiştir. Burada ise T:1.0sn'den sonra hem 2B hem 3B analizlerinde yüksek ivme değerlerine ulaşmaktadır.

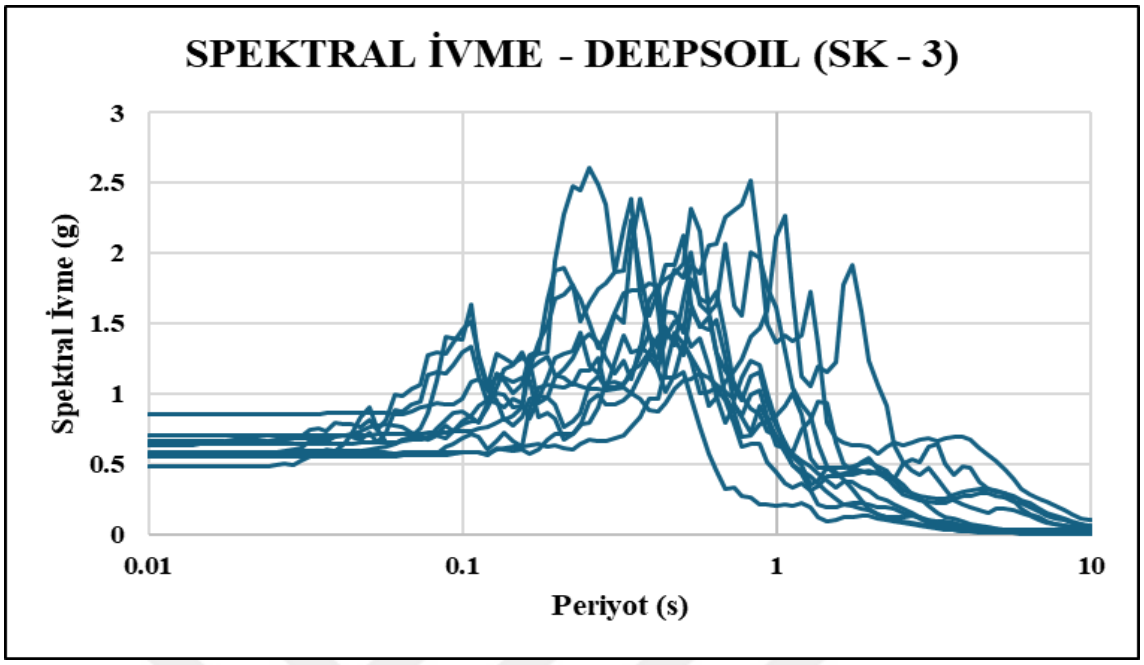
Dört ayrı sondaj kuyusu bir boyutlu analizde, dört ayrı zemin profili olarak incelenmiştir. İki boyutlu analizler yapılırken SK – 1, 2 ve SK – 3, 4 olacak şekilde iki zemin profiline indirgenmiştir. Üç boyutlu analizler ise SK – 1, 2, 3, 4 olacak şekilde tek bir zemin profiline indirgenerek yapılmıştır.



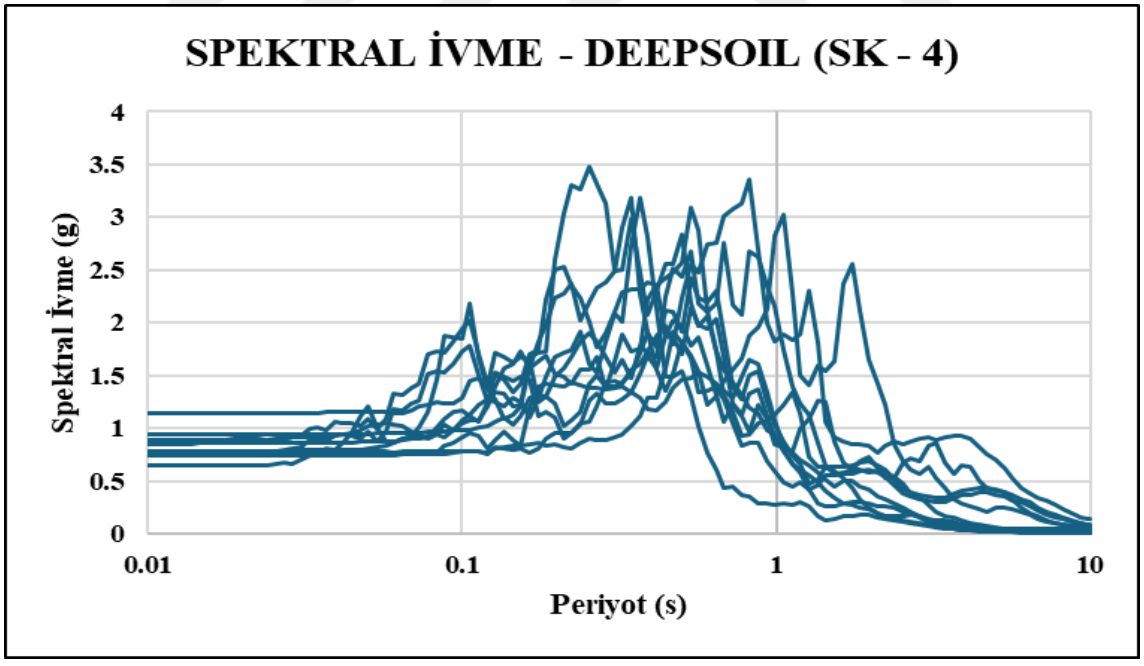
Şekil 6.27. Bir boyutlu analiz tepki spektrumu (SK – 1)



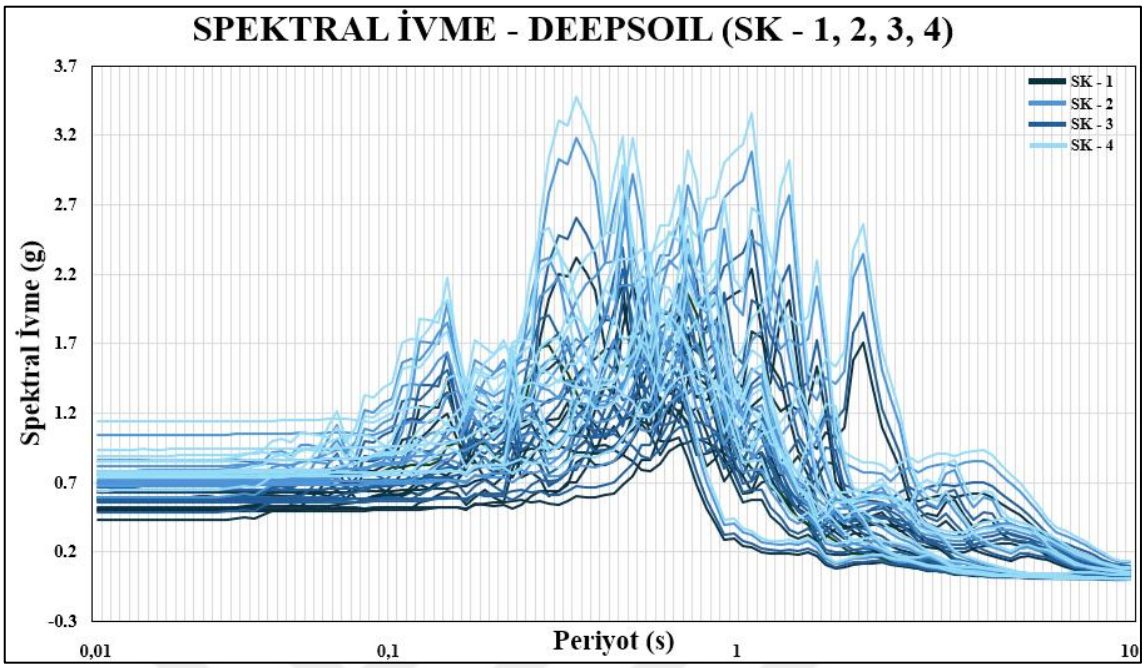
Şekil 6.28. Bir boyutlu analiz tepki spektrumu (SK – 2)



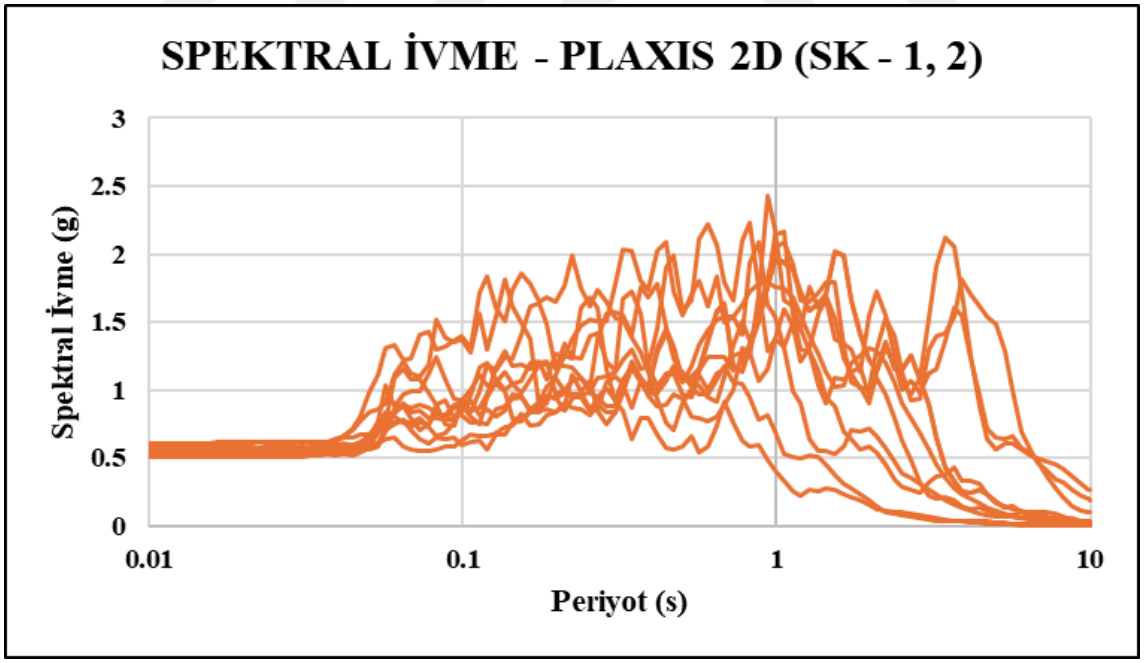
Şekil 6.29. Bir boyutlu analiz tepki spektrumu (SK – 3)



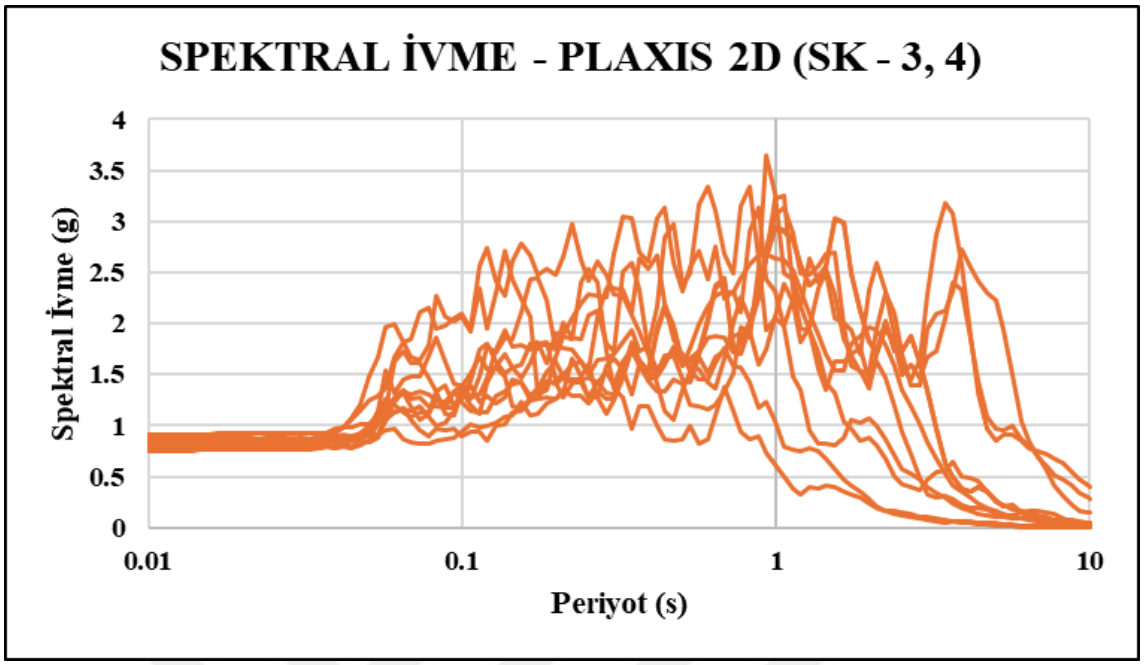
Şekil 6.30. Bir boyutlu analiz tepki spektrumu (SK – 4)



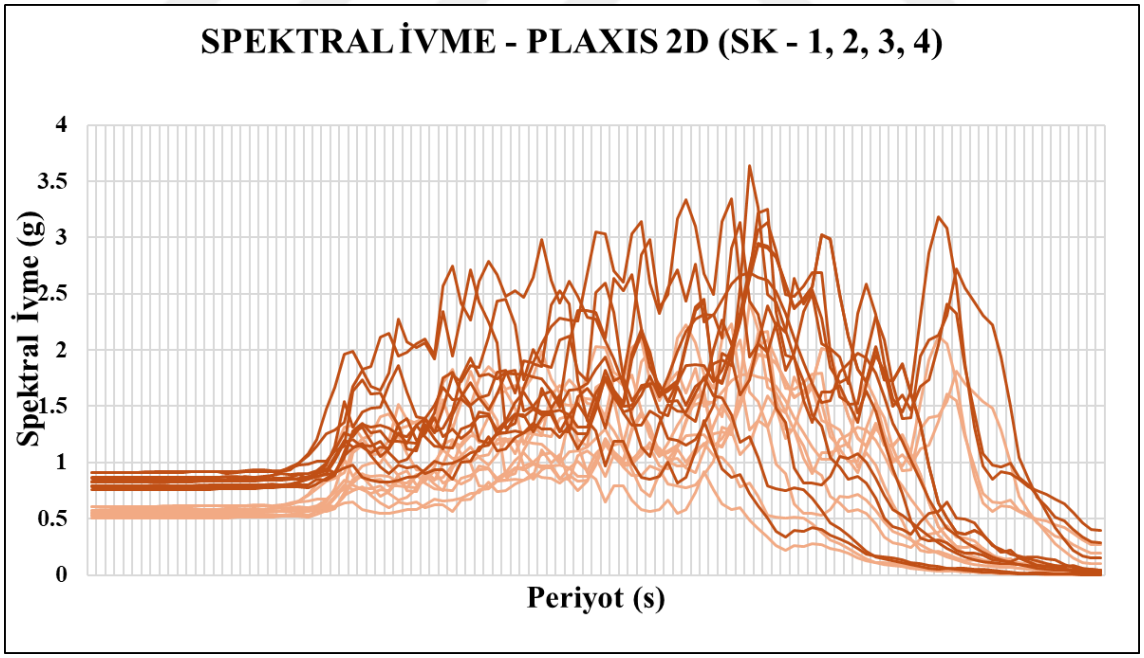
Şekil 6.31. Bir boyutlu analizlerin özet grafiği



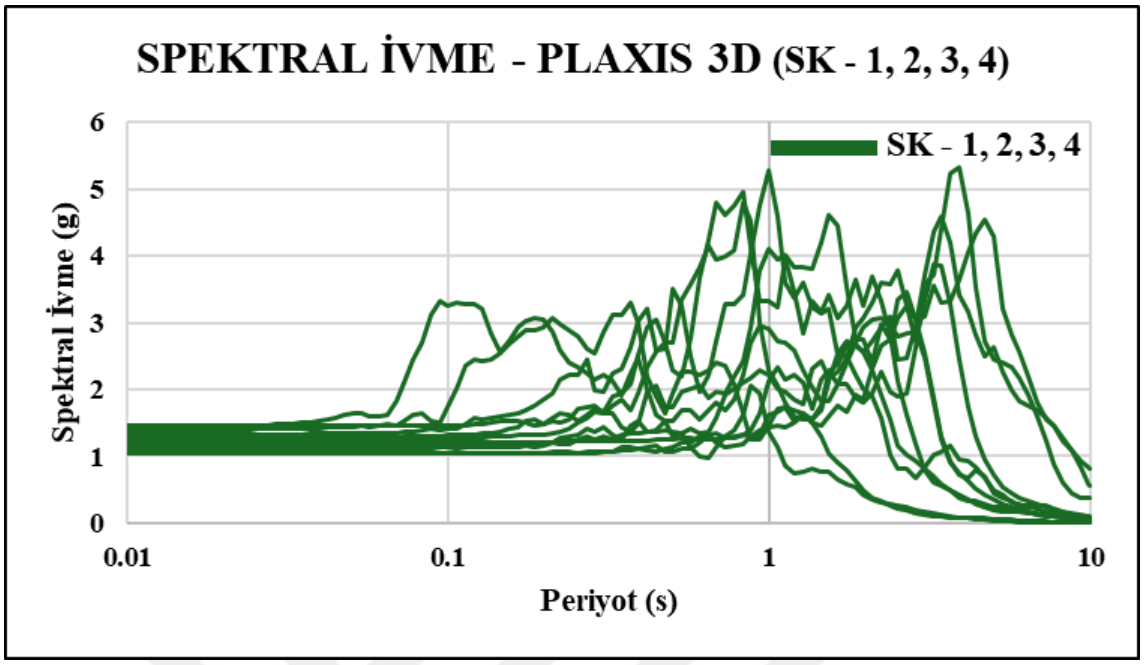
Şekil 6.32. İki boyutlu analiz tepki spektrumu (SK – 1, 2)



Şekil 6.33. İki boyutlu analiz tepki spektrumu (SK – 3, 4)



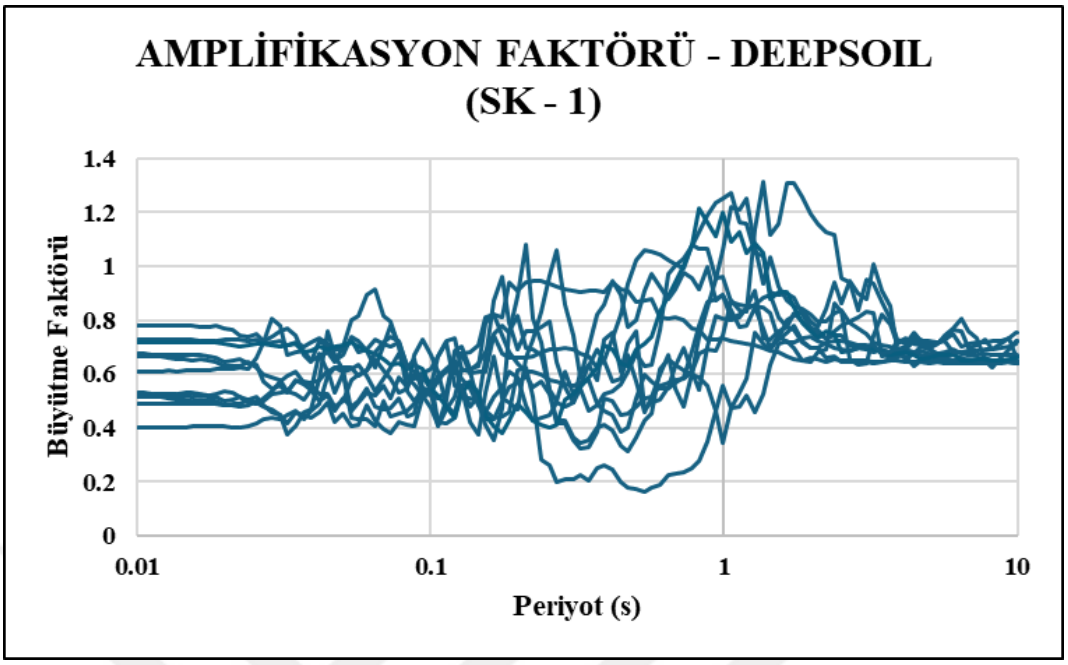
Şekil 6.34. İki boyutlu analizlerin özet grafiği



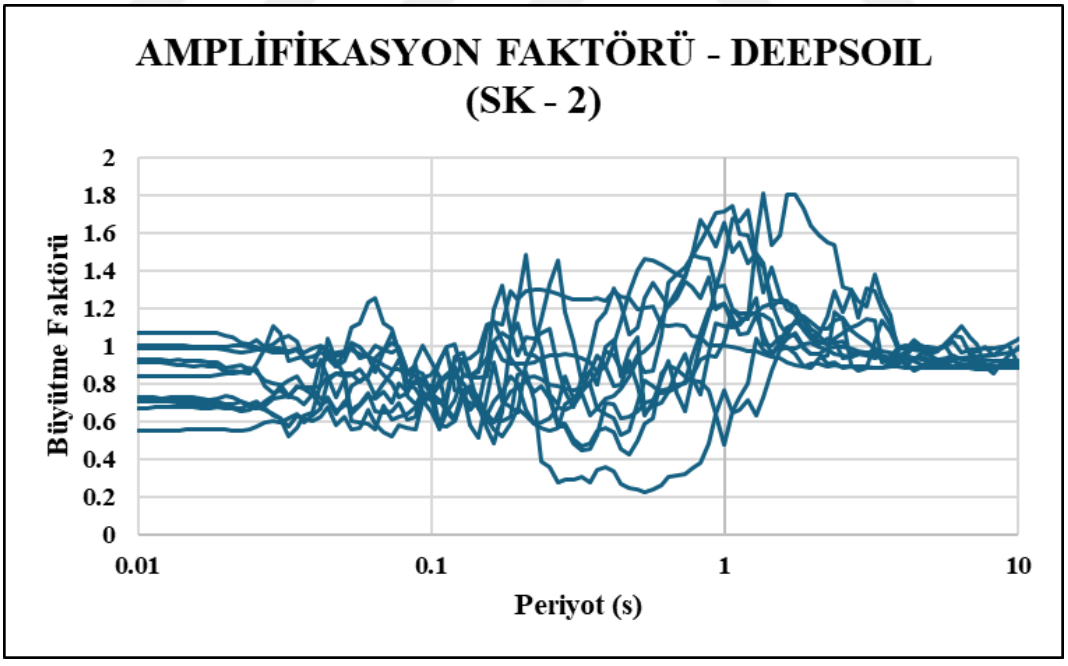
Şekil 6.35. Üç boyutlu analiz tepki spektrumu

6.6. Farklı Boyut Analizlerine Göre Zemin Büyütme Faktörleri

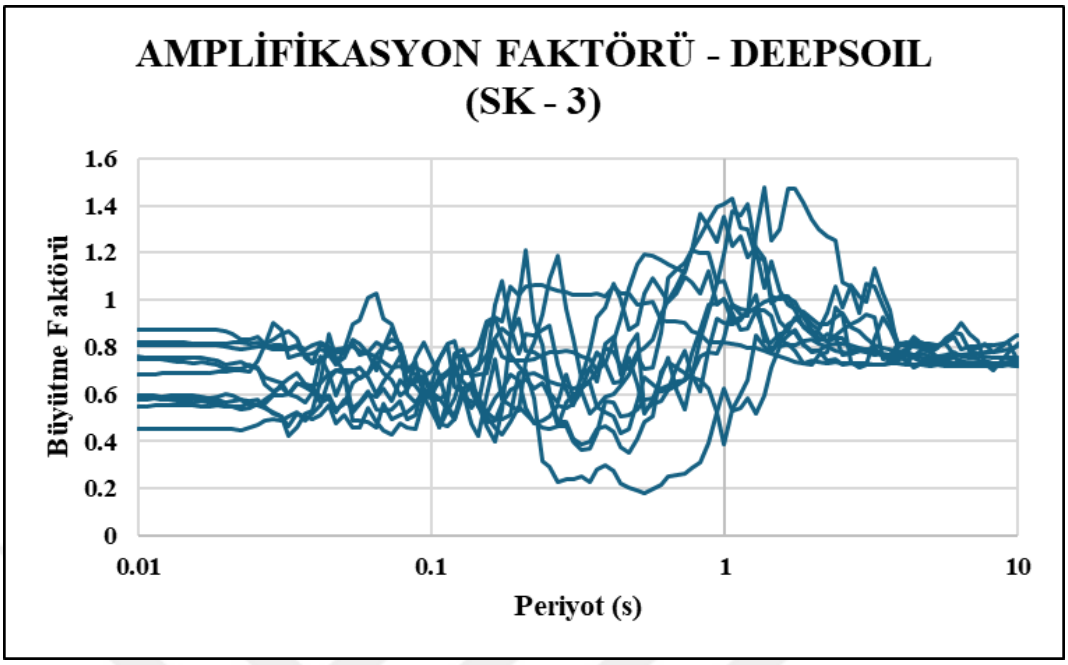
Deprem bölgelerinde anakayadan yüzeye doğru hareket eden deprem dalgalarının zemin tabakalarından geçerken genliklerinde meydana gelen değişim sonucunda zemin büyütmesi meydana gelmektedir. Deprem dalgalarının farklı frekanslarda olması nedeniyle aynı zemin tabakasında farklı tepkiler vermektedir. Bu nedenle zemin büyütmesi, deprem dalgalarının frekans içeriğine bağlıdır. Zemin büyütme faktörü depremin frekansına, zemin tabakasının özelliklerine ve deprem dalgasının hızına bağlı olarak değişmektedir. Maksimum büyütmenin görüldüğü periyot (T0) zeminin hakim periyodu olarak tanımlanmaktadır (Kramer, 1996).



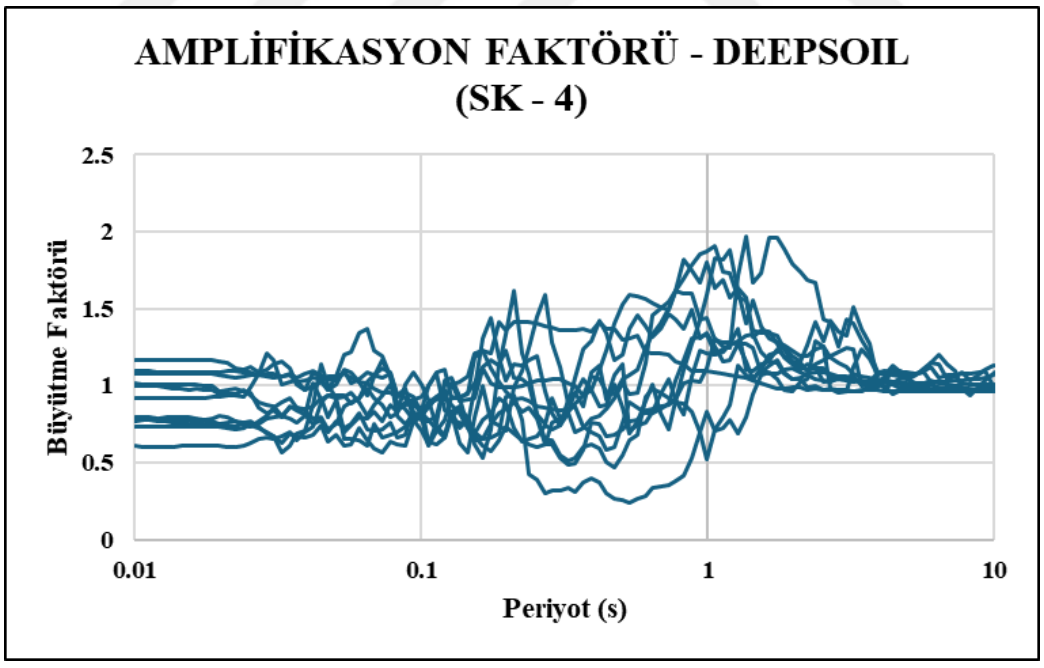
Şekil 6.36. Bir boyutlu analiz amplifikasyon faktörü (SK – 1)



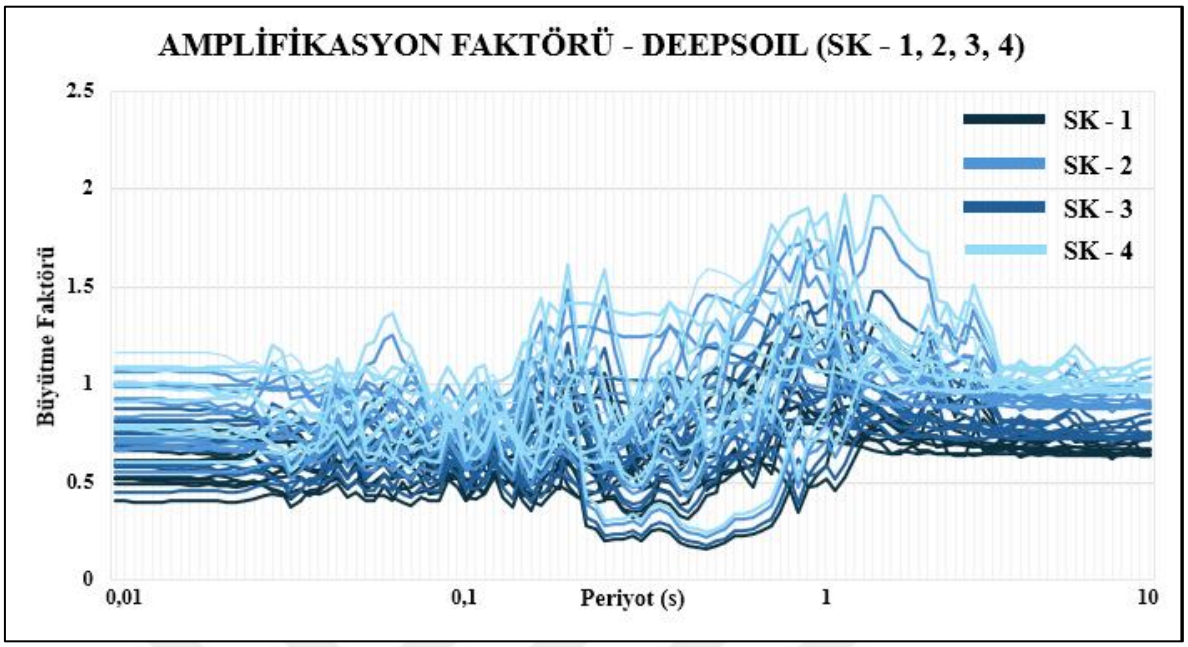
Şekil 6.37. Bir boyutlu analiz amplifikasyon faktörü (SK – 2)



Şekil 6.38. Bir boyutlu analiz amplifikasyon faktörü (SK – 3)



Şekil 6.39. Bir boyutlu analiz amplifikasyon faktörü (SK – 4)

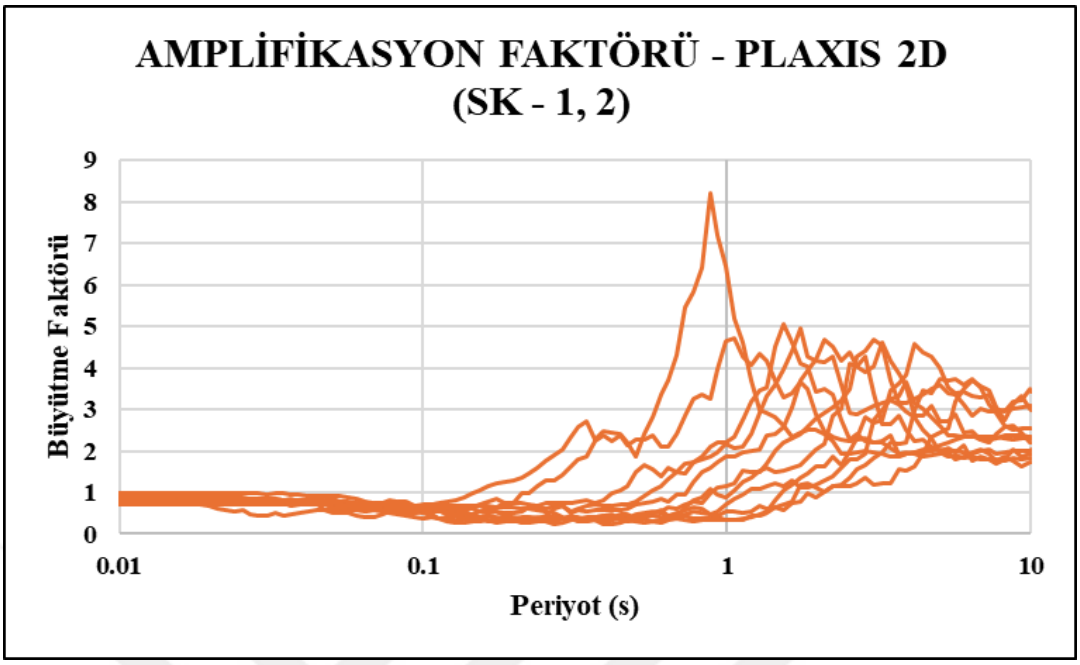


Şekil 6.40. Bir boyutlu analiz özet grafiği

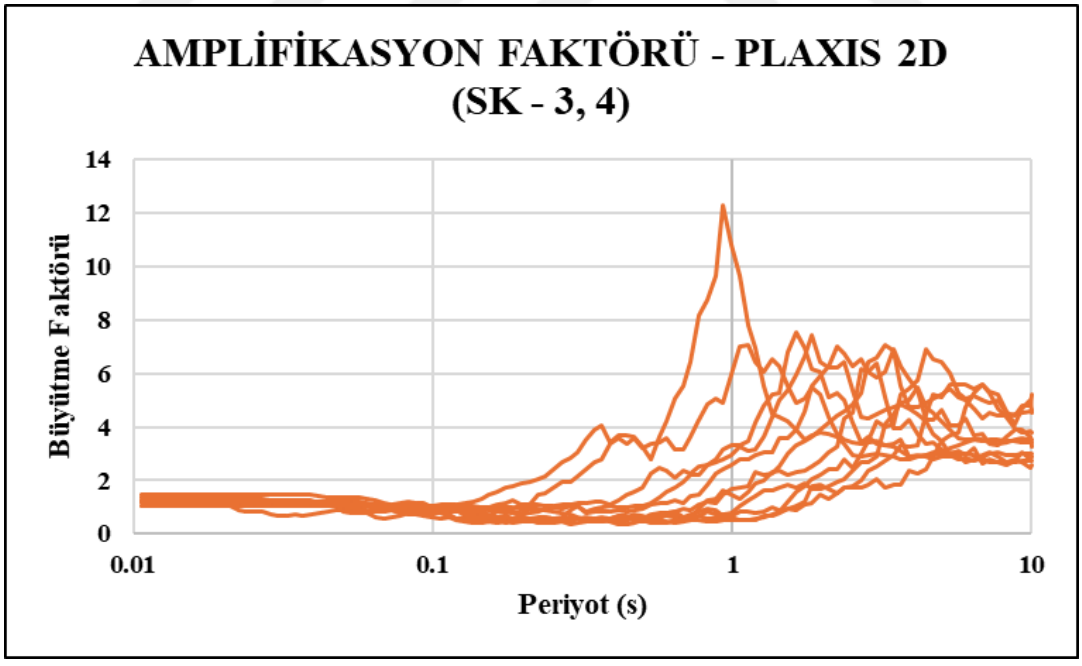
Yapılan analizlerde zemin büyütme (amplifikasyon) değerleri elde edilmiştir. Burada amplifikasyon faktörünün 1.0 üzeri olduğunda zemin büyütmesi görülmektedir. Burada Şekil 6.36-Şekil 6.39'da amplifikasyon faktörleri gösterilmektedir. Şekil 6.40'ta ise DeepSoil programı ile yapılmış olan bir boyutlu analizlerin özet grafiği gösterilmiştir.

Boyut etkisi nedeniyle zemin büyütme etkisi görülmektedir. Plaxis 2D programında yapılan 2B analizlerde (Şekil 6.41, Şekil 6.42) yüksek amplifikasyon değerleri görülmektedir. Şekil 6.43'te ise Plaxis programıyla yapılmış olan iki boyutlu analizlerin amplifikasyon faktörünün özet grafiği verilmiştir.

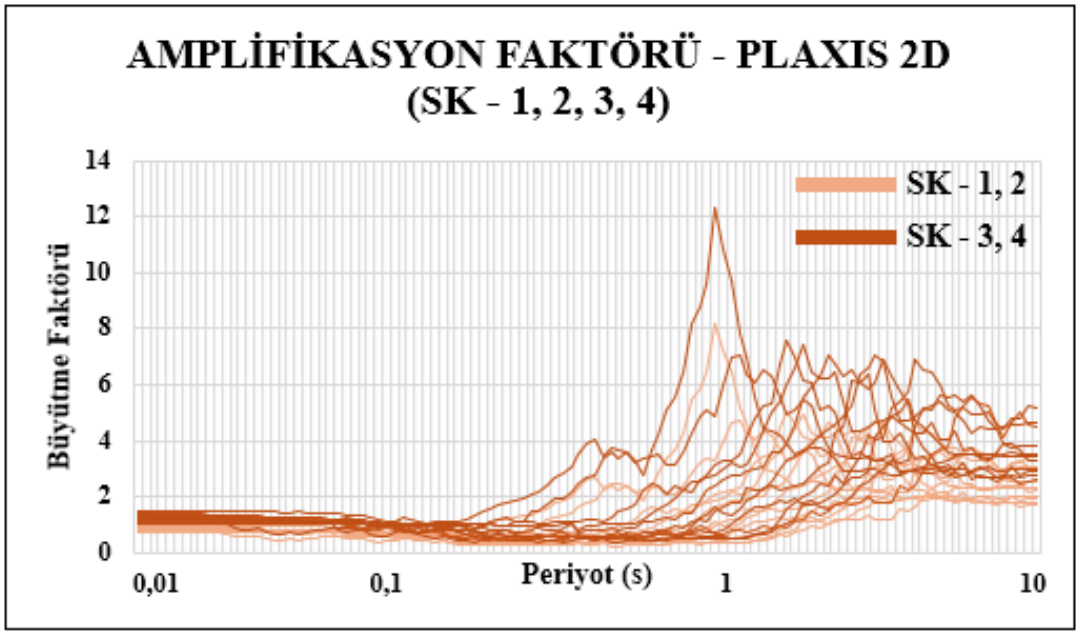
Plaxis 3D programında yapılan 3B analizlerde ise (Şekil 6.44) daha yüksek amplifikasyon değerleri görülmektedir.



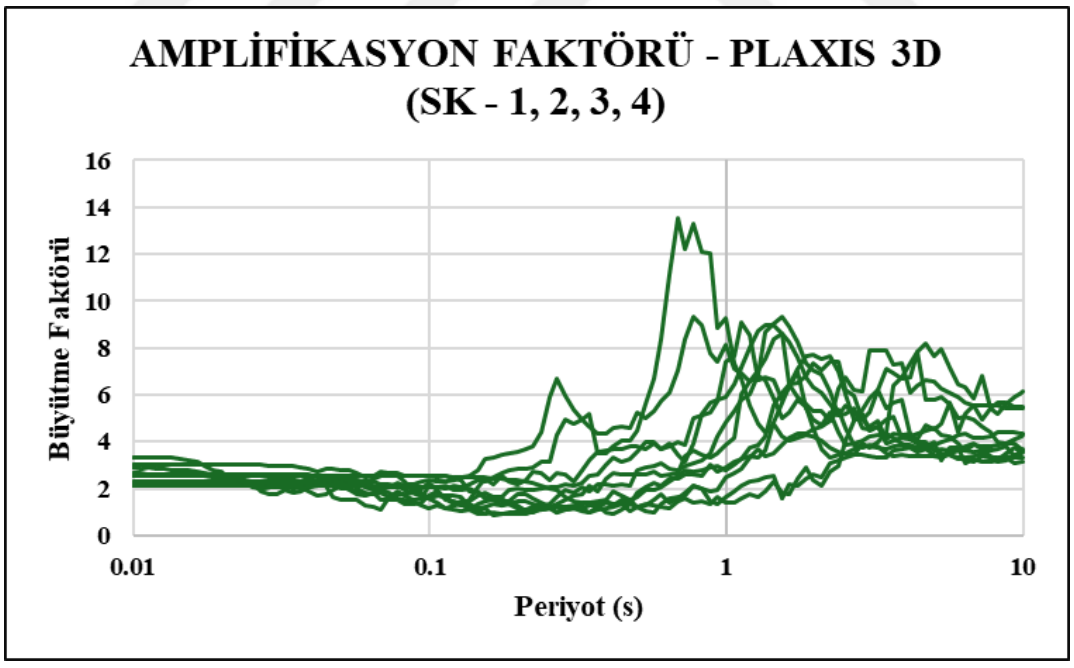
Şekil 6.41. İki boyutlu analiz amplifikasyon faktörü (SK – 1, 2)



Şekil 6.42. İki boyutlu analiz amplifikasyon faktörü (SK – 3, 4)



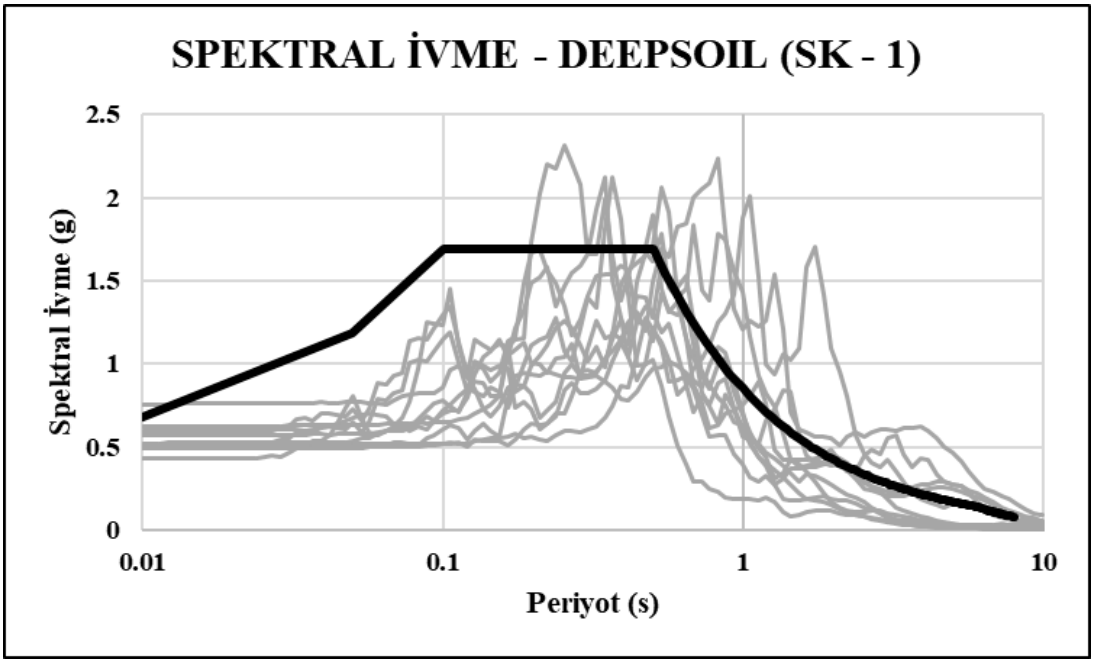
Şekil 6.43. İki boyutlu analiz amplifikasyon faktörü özet grafiği



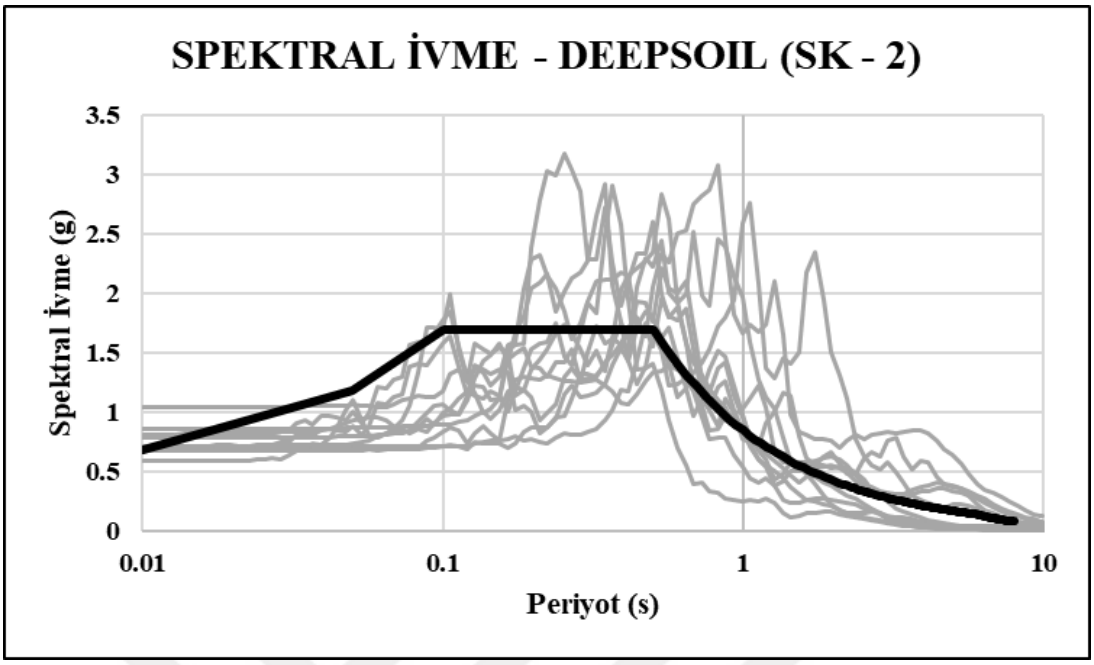
Şekil 6.44. Üç boyutlu analiz amplifikasyon faktörü

6.7. Zemin Büyütmesinde Boyut Etkisinin TBDY 2018'e Göre Değerlendirilmesi

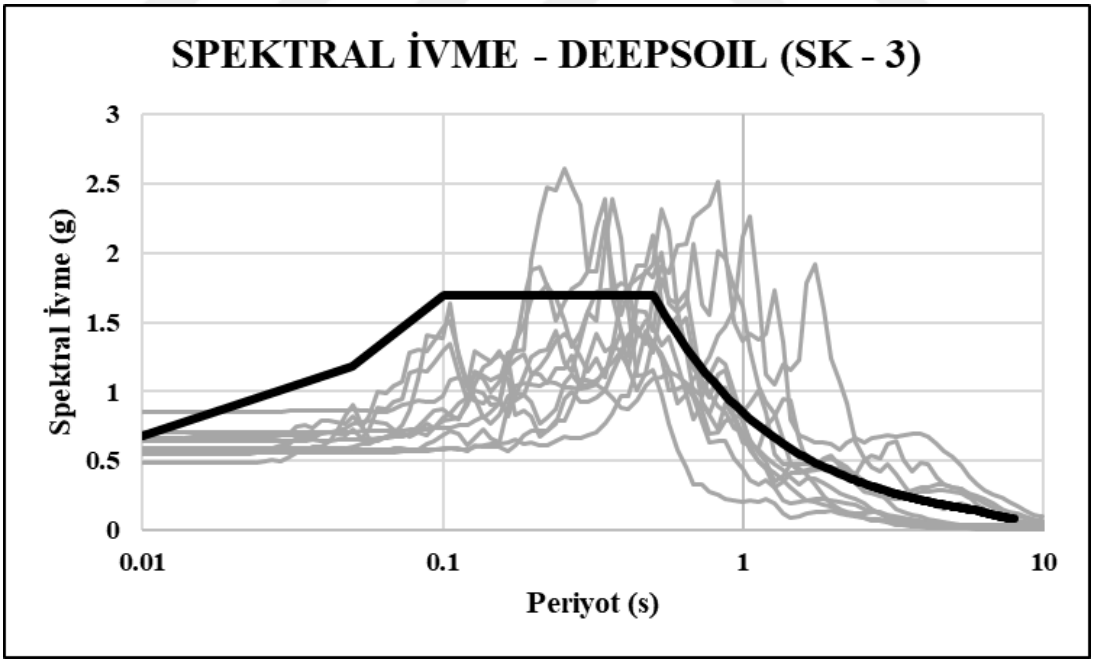
TBDY 2018'in bölgeye interaktif web uygulaması ile önermiş olduğu tepki spektrumu ile her bir sondaj kuyusundan elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. Burada elde edilen veriler incelendiğinde boyut etkisi nedeniyle spektral ivme değerlerinde farklılaşmalar olduğu Şekil 6.45-Şekil 6.53'te görülmektedir.



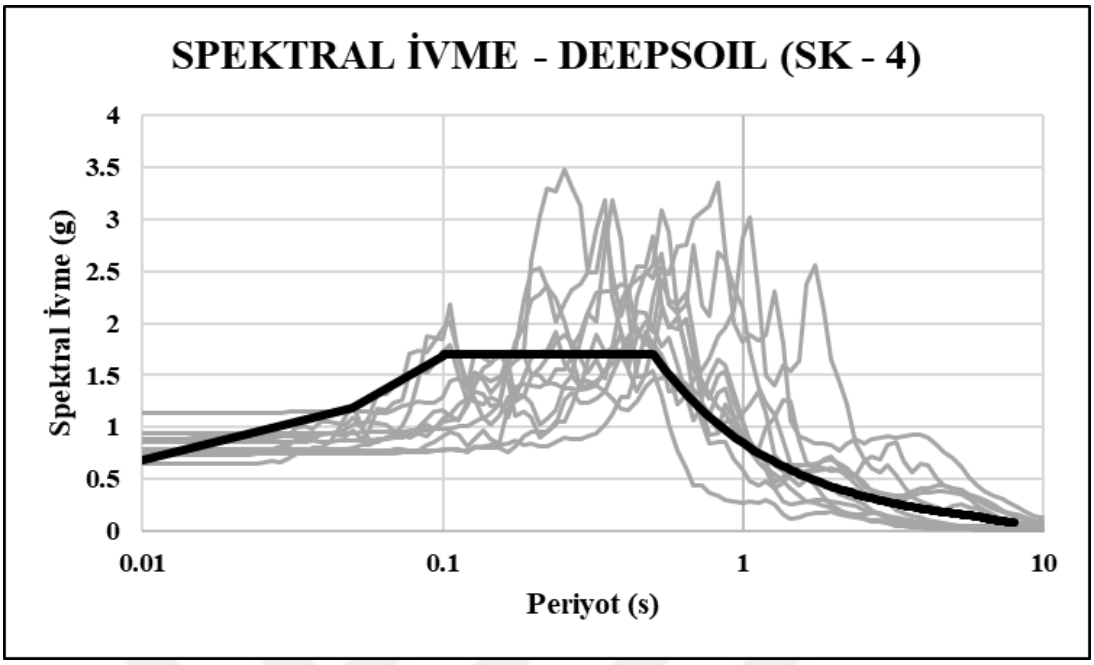
Şekil 6.45. Bir boyutlu analizin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi (SK – 1)



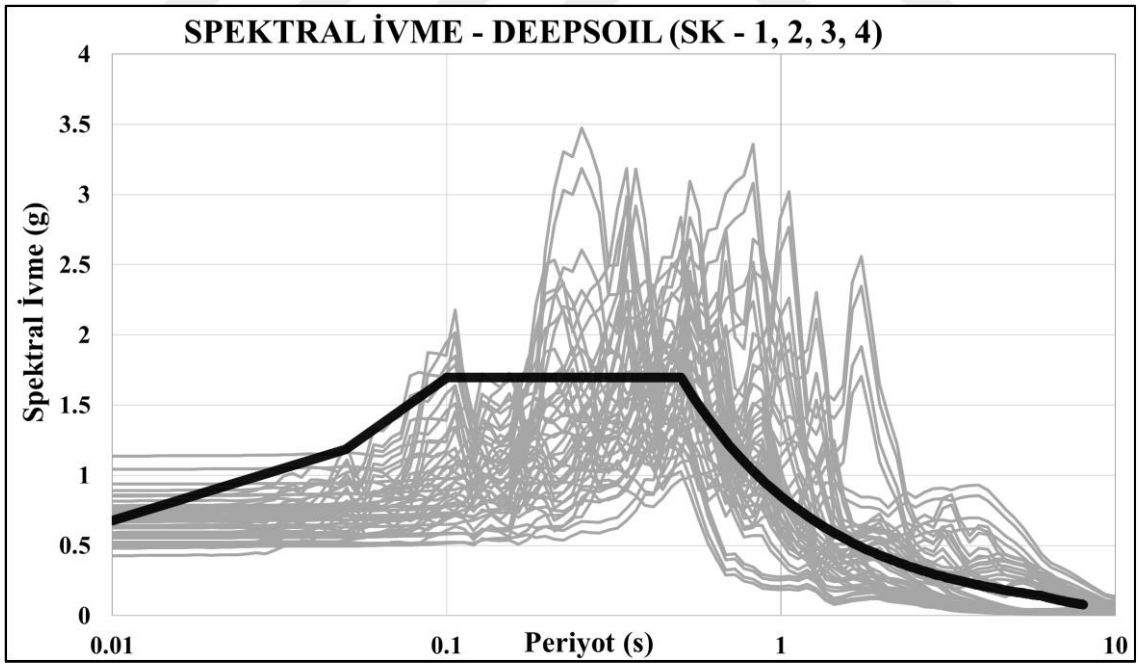
Şekil 6.46. Bir boyutlu analizin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi (SK – 2)



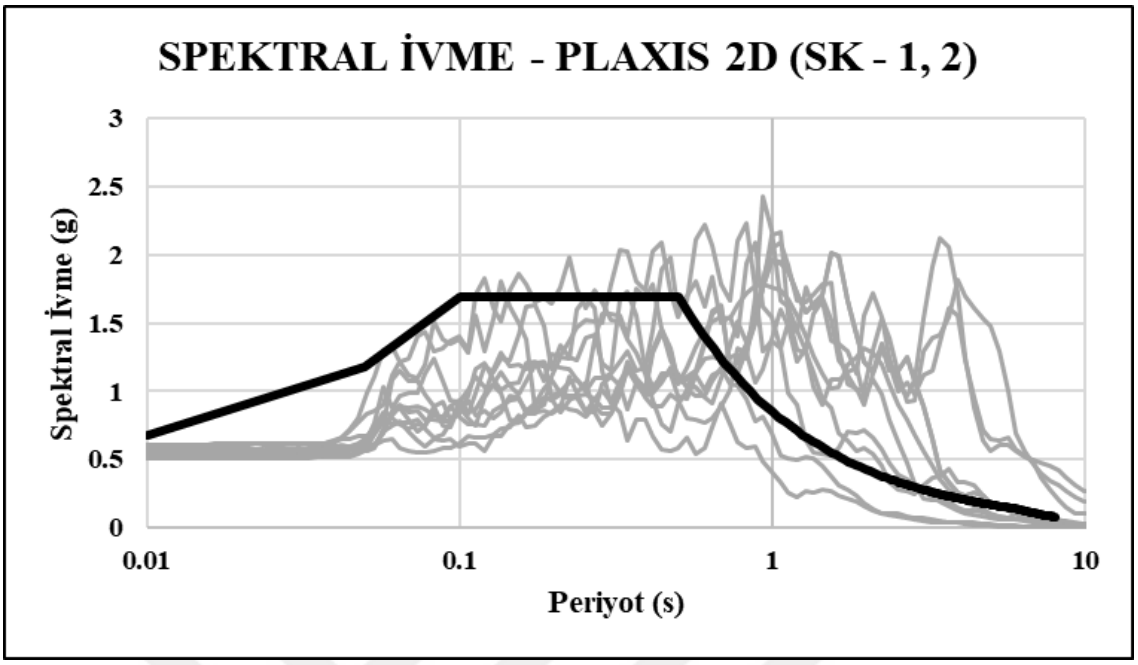
Şekil 6.47. Bir boyutlu analizin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi (SK – 3)



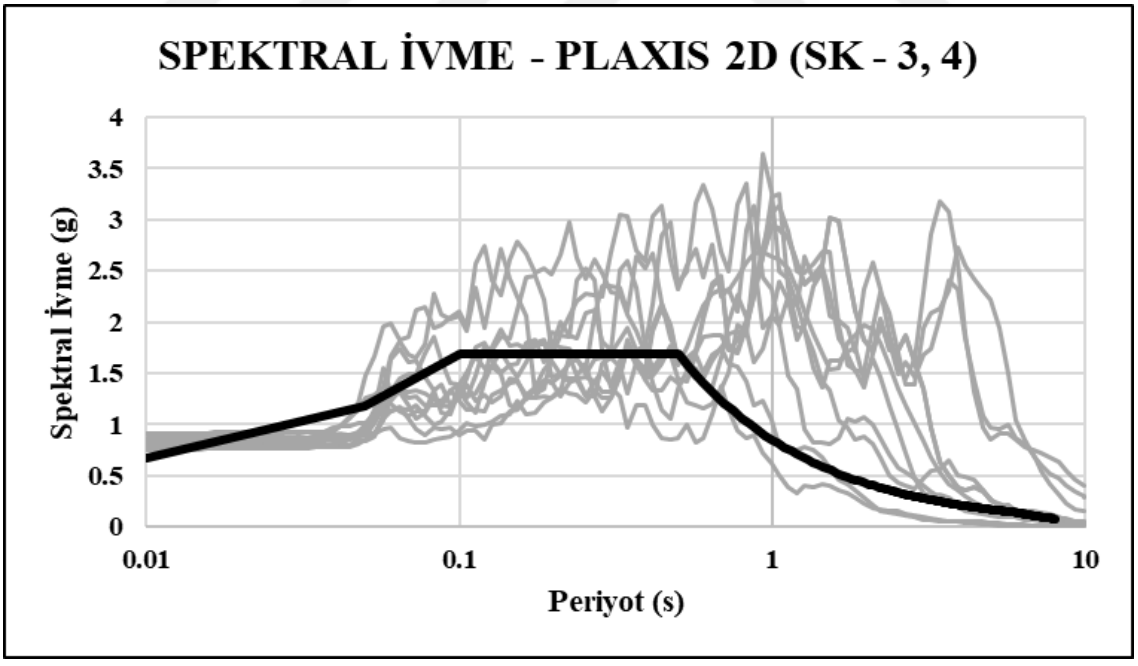
Şekil 6.48. Bir boyutlu analizin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi (SK – 4)



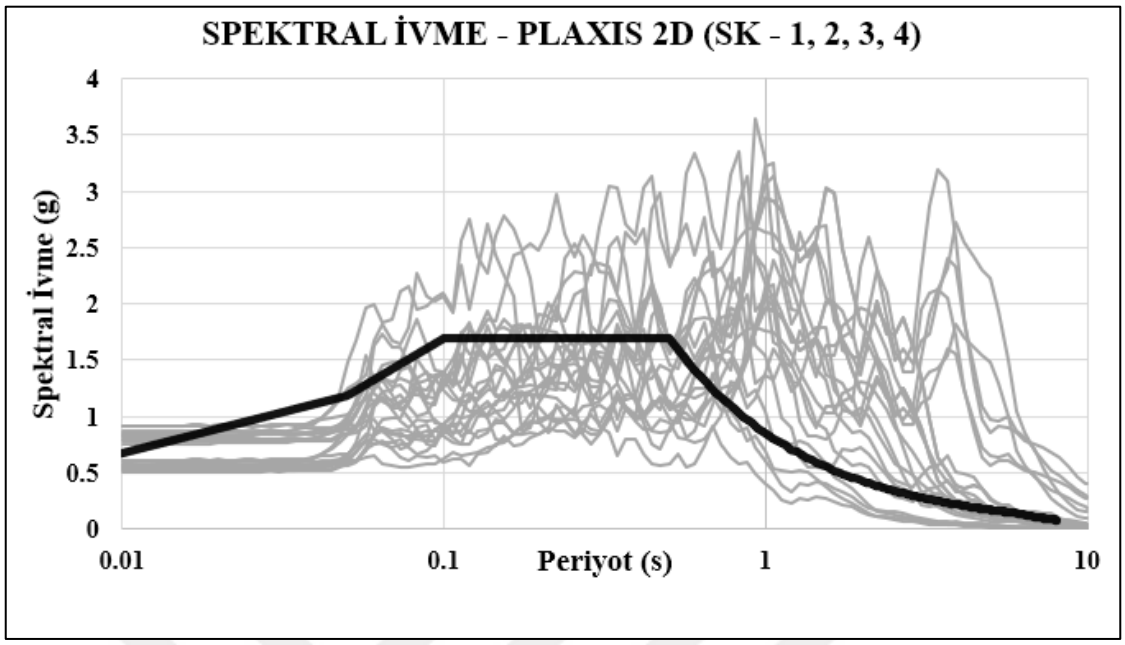
Şekil 6.49. Bir boyutlu analizlerin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi özet grafiği



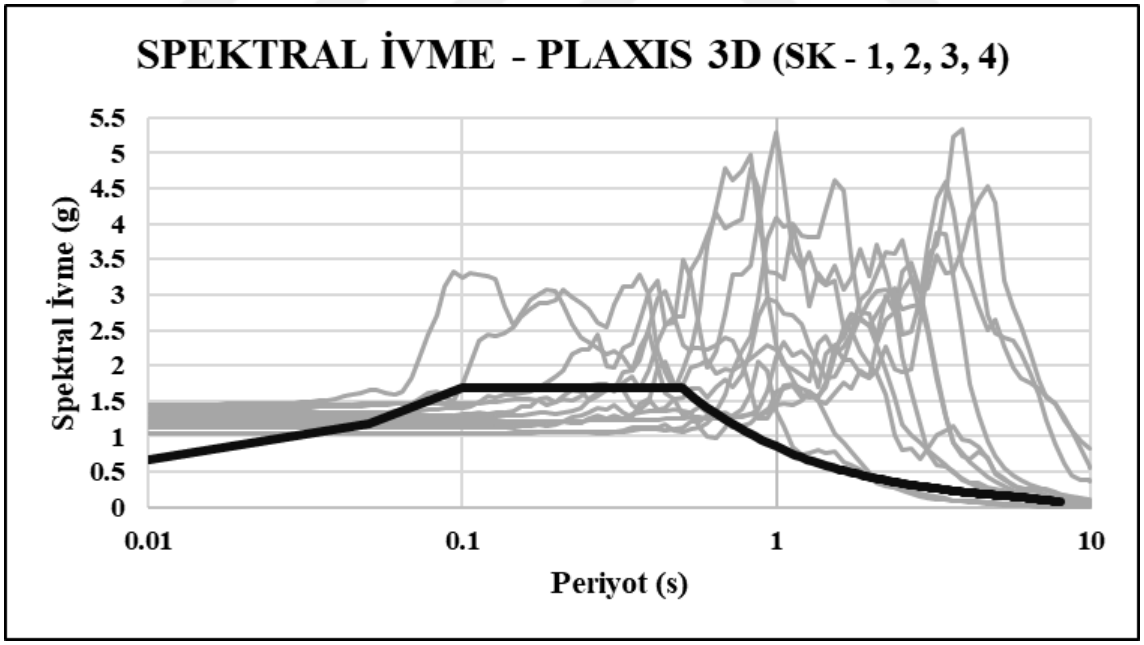
Şekil 6.50. İki boyutlu analizin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi (SK – 1,2)



Şekil 6.51. İki boyutlu analizin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi (SK – 3,4)



Şekil 6.52. İki boyutlu analizlerin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi özet grafiği



Şekil 6.53. Üç boyutlu analizin TBDY 2018'e göre değerlendirilmesi

Bölgenin spektral ivme zarfının boyut arttıkça yüksek periyot değerlerinde tam kapsamanın olmadığı görülmektedir. Özellikle 3B analizinde spektral ivmelerin çok daha farklı olduğu belirlenmiştir.

TBDY 2018'in önerdiği spektrum zarfının ise ivmelerin değeri olarak 1B ve 2B analizlerinde temsil ettiği ancak plato bölgesinin daha yüksek periyot değerlerine kayması gerekmektedir. Her üç analizde de yüksek periyot değerlerinde tam kapsamadığı görülmektedir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu yüksek lisans tez çalışması, Sakarya ilinin belirli bölgelerinde gerçekleştirilen arazi çalışmaları sonucunda elde edilen zemin profili üzerinde yapılmış analizleri içermektedir. Zemin profili, CL ve ML sınıflarından oluşmakta olup, bölgenin depremsellik özelliklerini yansıtan 11 adet deprem ivme kaydı ile desteklenmiş ve ölçeklendirilmiştir. DeepSoil yazılımı kullanılarak 1B boyutlu analiz ve Plaxis programı ile 2D ve 3D boyutlu analizler yapılarak zemin davranışı incelenmiştir. Analiz sonuçları, derinliğin azaldıkça ivme değerlerinin artan bir eğilim gösterdiğini ortaya koymaktadır, bu da zemin büyütmesi kavramını ifade etmektedir.

Yapılan çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir;

- Çalışma kapsamında deprem bölgesinden alınan örselenmemiş numuneler kullanılarak öncelikle zemin tanımlama deneyleri yapılmıştır.
- Bölgenin depremsellik özelliklerini yansıtan ve TBDY 2018'in önerdiği şekilde 11 adet deprem seçilmiş ve ölçeklendirilmiştir.
- Deepsoil programı ile sahaya özel eşdeğer doğrusal olmayan toplam zemin büyütme analizi yapılmıştır.

Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar ise;

- Zemin büyütmesinde boyut etkisinin incelenmesi sonucunda boyut arttıkça artan zemin katmanları nedeniyle farklı ivme ve spektral değerler elde edilmiştir.
- 1B analizlerin sadece düşeyde etki sonucu ivmenin yüzeye ulaştığı gözlemlenmiş olup ancak 2B ve 3B analizlerde farklı katmanların da etkisi ile ivme değerlerinde büyük farklılıklar oluştuğu gözlemlenmiştir.
- Zemin büyütme analizlerindeki farklılık daha çok zemin katmanının olması ve farklı parametrelerin etki etmesine bağlanabilir. Deprem ivme değerlerinin anakayadan yüzeye ulaşırken tabakaların etkisi ile farklılaşma ortaya çıkmaktadır. Bu da boyut etkisinde ivmenin ne kadar tabakadan geçerse o kadar etkileneceğini göstermektedir.

- 2B ve 3B zemin büyütme analizlerinde ise genel trendin oluştuğu ancak katman sayısının artması sebebiyle 3B analizlerde zemin büyütmesi daha yüksek değerlere ulaşmıştır.
- PGA değerlerinin derinlik boyunca değişiminde 1B analizlerde daha stabil hareket olduğu ancak 2B ve 3B analizlerde daha hareketli bir değişim olduğu gözlemlenmiştir.
- Çalışma bölgesi için TBDY 2018'in bölgeye önerdiği spektrum ile boyut etkisindeki spektral ivme değerleri arasında ilişki incelendiğinde genel olarak 1B analizlerinin daha uygun olduğu tespit edilmiştir.
- Spektral ivme zarfının, 2B ve 3B analizleri yeteri kadar temsil etmediği ve yüksek periyot değerlerinde çok farklılıklar olduğu belirlenmiştir.

Zemin büyütmesi analizlerinde boyut etkisinin önemli olduğu ve farklı sonuçlar elde edildiği belirlenmiştir. Yapılacak olan tasarımların önemi, konumu ve depremsellik özellikleri dikkate alınarak boyut etkisinin de incelenmesi gerektiği görülmektedir. Tasarıma uygun bir biçimde hangi boyut etkisinin analizlerde kullanılacağının belirlenmesi önem arz etmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Afacan, K. B., & Güler, E. (2019). *Yeni Deprem Yönetmeliği Performansının Zemin Büyütme Analizi ile Belirlenmesi*. In International Conference on Earthquake Engineering and Seismology (5ICEES), 8, 11.

Afacan, K. B., & Güler, E. (2019). *Effect of frequency content on thedynamic properties of the sand.* Anadolu University Journal of Science and Technology A: Applied Sciences and Engineering, 20, 70–79. https://doi.org/10.18038/aubtda.459191

Afad, (2024). T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. www.afad.gov.tr, Erişim tarihi: 29.06.2024.

Alielahi, H., Kamalian, M., & Adampira, M. (2015). *Seismic ground amplification by unlined tunnels subjected to vertically propagating SV and P waves using BEM*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 71, 63-79.

Ansal, A., Tönük, G., & Kurtuluş, A. (2011). *Zemin Büyütme Analizleri ve Sahaya Özel Tasarım Depremi Özelliklerinin Belirlenmesi*. 1.Turkey Earthquake Engineering and Seismology Conference, 1-8.

Arslan, E. (2019). *Zemin Büyütmesinin Eşdeğer Lineer Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi Bursa Osmangazi Örneği*, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 114 s.

Arjuna N., Adnan A., Bakar, N. A., & Aizon, N. H. (2024). *Seismic site-response analysis: A case study in Malaysia*. The 3rd International Conference on Science, Engineering and Technology 2023, 3114. https://doi.org/10.1063/5.0203037

Azimi, P., Gazi, H., & Alhan, C. (2019). *Zemin Büyütme Katsayılarının Betonarme Taşıyıcı Sistemlerin Sismik Performans Potansiyeline ve Maliyetine Etkileri*. Teknik Dergi, 30(1), 8803-8834. https://doi.org/10.18400/tekderg.308431

Bajaj, K., & Anbazhagan, P. (2019). *Comprehensive amplification estimation of the Indo Gangetic Basin deep soil sites in the seismically active area*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 127, 105855. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105855

Baise, L. G., Kaklamanos, J., Berry, B. M., & Thompson, E. M. (2016). *Soil amplification with a strong impedance contrast: Boston, Massachusetts*. Engineering geology, 202, 1-13. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.12.016

Bilotta, E., Maiorano, R. M. S., Viglione, A., & Aversa, S. (2015). *Three-Dmensional Numerical Modelling Of Circular Tunnels Under Seismic Actions*. In Compdyn 20155th Eccomas Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, 25-27.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Bilican, Ö., Bozdoğan, K. B., & Keskin, E. (2021). *Tek Boyutlu Zemin Büyütme Analizlerinde Transfer Fonksiyonunun Değiştirilmiş Sonlu Elemanlar Taşıma Matrisi Yöntemi ile Elde Edilmesi*. Türk Deprem Araştırma Dergisi, 3(1), 53-74. https://doi.org/10.46464/tdad.929449

Brandt, M. (2014). *Earthquake analyses of subsea structure on caisson foundation using 3D finite element solution*. Norwegian University of Science and Technology, Master's thesis, 193 p.

Brinkgreve, R. B. J., Engin, E., & Swolfs, W. M. (2016). *PLAXIS 2D 2016 User Manual*.

Calderon, D., Sekiguchi, T., Nakai, S., Aguilar, Z., & Lazares, F. (2012). *Study of soil amplification based on microtremor and seismic records in Lima Peru*. Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, 12(2). https://doi.org/10.5610/jaee.12.2_1

Carcione, J. M., Picotti, S., Francese, R., Giorgi, M., & Pettenati, F. (2016). *Effect of soil and bedrock anelasticity on the S-wave amplification function*. Geophysical Journal International, 208(1), 424-431. https://doi.org/10.1093/gji/ggw402

Casagrande, A. (1948). *Classification and identification of soils.* Trans. ASCE 113, 901–991.

Chen, G., Pan, H., Long, H., & Li, X. (2013). *Dynamic constitutive model for soils considering asymmetry of skeleton curve.* Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 5(5), 400–405. https://doi:10.1016/j.jrmge.2013.01.003

Delfebriyadi, D., Irsyam, M., Hutapea, B. M., Imran, I., & Asrurifak, M. (2019). *Determination of The Site Amplification on Deep Soil Layer Using 1-D Site Response Analysis (Case study: Jakarta City, Indonesia).* Journal of Engineering and Technological Sciences, 51(6), 824-838. https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2019.51.6.6

Dey, A. (2011). *Calibration of a PLAXIS Finite Element Dynamic Model: Effect of Domain Width and Meshing Schemes/AES.* In Third Indian Young Geotechnical Engineers Conference, 127-132.

Deng, Y., Yan, Z., He, N., Chang, J., & Xuan, Y. (2022). *Study on Seismic Amplification Effect and Active Earth Pressure of Retaining Wall Based on Pseudo-Dynamic Method and Numerical Simulation.* Journal of the Geological Society of India, 98(3), 431-439.

Diaz, V. S. (2012). *Soil Amplification Based on Regressions for Costa Rica Dataset.* 15th World Conference on Earthquake Engineering 2012, 38(1), 25472.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Dikmen, S. Ü., & Tanırcan, G. (2017). *Kuyuiçi Ağ Verileri Kullanılarak Zemin Büyütmesi Üzerine Bir Çalışma.* 4th Turkish Earthquake Engineering and Seismology Conference.

Drosos, V. A., Gerolymos, N., & Gazetas, G. (2012). *Constitutive model for soil amplification of ground shaking: Parameter calibration, comparisons, validation.* Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 42, 255-274.

de Silva, F., Ceroni, F., Sica, S., & Silvestri, F. (2018). *Non-linear analyses of the Carmine bell tower under seismic actions accounting for soil–foundation–structure interaction*. Bulletin of Earthquake Engineering, 16(7), 2775-2808. https://doi.org/10.1007/s10518-017-0298-0

di Lernia, A. (2014). *Dynamic Soil-Structure Interaction by Non-linear Finite Element Approach*. Technical University of Bari.

Erdik, M. (1984). *Assessment of Earthquake Hazards and Risk in Turkey*. Proceedings of the 8th World Conference on Earthquake Engineering, 97-104.

Erman, A. (2012). *Tekrarlı Yükler Altında Kohezyonlu Zeminlerin Davranışı,* Yüksek Lisans Tezi, İstsanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 105 s.

Ersoy, S. (2003*). Mikrotremor Yöntemi ve Kocaeli, Dinar ve Ceyhan Depremlerinde Kullanımı*. Jeofizik, 17, 37-48.

Farrugia, J. J., Atkinson, G. M., & Molnar, S. (2018). *Validation of 1D earthquake site characterization methods with observed earthquake site amplification in Alberta, Canada*. Bulletin of the Seismological Society of America, 108(1), 291-308. https://doi.org/10.1785/0120170148

Garini, E., Gazetas, G., & Ziotopoulou, K. (2018). *Inelastic soil amplification in three sites during the Tokachi-oki MJMA 8.0 earthquake*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 110, 300-317.

Gazetas, G., Mylonakis, G. (1998). *Seismic soil-structure interaction: New evidence and emerging issues.* Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III, 2, 1119-1174.

Gupta, A., Sawant, V. A. (2018). *Effect of Soil Amplification on Seismic Earth Pressure Using Pseudo-Dynamic Approach*. International Journal of Geotechnical Engineering, 1-12. https://doi:10.1080/19386362.2018.1476803

KAYNAKLAR DİZİNİ

Güler, E., & Afacan, K. B. (2020). *Düşük Deformasyon Seviyelerinde Kumların Dinamik Özelliklerinin Resonant Kolon Deneyi Yardımıyla Belirlenmesi*. El-Cezeri, 7(2), 572-580.

Güler, E. (2021). *Zeminlerin Dinamik Özelliklerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi ve Zemin Büyütme Analizlerinin Yapılması,* Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 149 s.

Gücek, S., Zorluer, İ. (2019). *Afyonkarahisar Uydukent Bölgesinin Zemin Mühendislik Özellikleri Haritalarının Üretilmesi ve Bölgenin Zemin Büyütmesinin Belirlenmesi*. International Symposium on Innovations in Civil Engineering and Technology (ICIVILTECH 2019), 614-622.

Hashash, Y. M. A. (2016). *User manual*. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign.

Haşal, M. E., İyisan R., Özaslan B. (2018). *Zemin Büyütmesine Anakaya Eğimi Etkisi: Bir ve İki Boyutlu Davranış.*

Jaber, H. S. (2021). *Ilgın (Konya) ilçesinde zemin büyütmesinin geoteknik değerlendirilmesi*. Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 187 s.

Hashash, Y. M. A., Musgrove, M. I., Harmon, J. A., Groholski, D. R., Phillips, C. A., & Park, D. (2008). DEEPSOIL V5.0, *User Manual and Tutorial*. University of Illinois at Urbana-Champaign.

Huang, D., Wang, G., Du, C., & Jin, F. (2021). *Seismic amplification of soil ground with spatially varying shear wave velocity using 2D spectral element method.* Journal of Earthquake Engineering, 25(14), 2834-2849. https://doi.org/10.1080/13632469.2019.1654946

Ildır, M. (2019). *Taş kolon ile yapılan zemin iyileştirmelerin zemin büyütme katsayısına etkisinin incelenmesi*. Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 145 s.

İnce, G. Ç., & Yılmazoğlu, L. (2014). *Investigating the influence of topographic irregularities and two-dimensional effects on surface ground motion intensity with one-and two-dimensional analyses.* Natural Hazards and Earth System Sciences, 14(7), 1773-1788. https://doi.org/10.5194/nhess-14-1773-2014

Irsyam, M., Hutapea, B. M., Imran, I., & Asrurifak, M. (2019). *Determination of Site Amplification Deep Soil Layers using 1-D Site Response Analyses (Case Study: Jakarta City, Indonesia).* Journal of Engineering & Technological Sciences, 51(6).

KAYNAKLAR DİZİNİ

Jayalakshmi, S., Dhanya, J., Raghukanth, S. T. G., & Mai, P. M. (2020). *3D seismic wavefield modeling in the Kachchh rift basin, western India.* Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 128, 105870.

Jing, L., & Luan, M. (2016). *Analysis of topography amplification effects on ground motion using a spectral element method.* Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 88, 1-11.

Kılıç, H. (2017). *Geoteknik Deprem Mühendisliği Notları*. Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Geoteknik Anabilim Dalı. 03 Aralık 2017, İstanbul.

Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering.* United States of America: Prentice Hall.

Lee, J., Baise, L. G., & Thompson, E. M. (2014). *Factors influencing empirical site response model predictions and implications for building design*. Engineering Geology, 168, 96-108.

Lee, V. W., Trifunac, M. D., & Brandenberg, S. J. (2014). *Effects of local soil conditions on amplitude, duration, and energy of strong motion.* Journal of Earthquake Engineering, 18(7), 1074-1100.

Liu, Z., Qiao, Y., Cheng, X., & El Naggar, M. H. (2022). *Nonlinear seismic response and amplification effect of 3D sedimentary basin based on bounding surface constitutive model.* Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 158, 107292.

Liu, J., & Wang, Z. (2020). *Numerical study on seismic wave propagation in fractured rock mass based on distinct element method.* Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 139, 106323.

Makra, K., & Chávez-García, F. J. (2016). *Site effects in 3D basins using 1D and 2D models: an evaluation of the differences based on simulations of the seismic response of Euroseistest.* Bulletin of Earthquake Engineering, 14(4), 1177-1194.

Maia, L. E., Assunção, R. S., Luz, A. M., & de Carvalho, J. P. (2022). *Seismic response analysis of two geotechnical scenarios through stochastic modeling and seismic scenario.* Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 158, 107174.

Marin, S., & Zhao, J. X. (2021). *Site response analysis in Eastern Canada using synthetic ground motions and measured site properties.* Bulletin of Earthquake Engineering, 19, 2811-2840.

Matsumoto, J., Saitoh, Y., & Tobita, J. (2020). *Evaluation of seismic amplification for each natural period of various soils using EEM.* Infrastructures, 5(10), 82.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Mei, C., & Chen, H. (2014). *Three-dimensional spatial variability in seismic ground motions.* International Journal of Geomechanics, 14(1), 126-138.

Merati, S., Amiri, G. G., & Rayhani, M. T. (2019). *Site response analysis of liquefiable soils using equivalent linear and nonlinear models.* Journal of Earthquake Engineering, 23(5), 797-818.

Meza-Fajardo, K. C., Semblat, J. F., Chaillat, S., & Lenti, L. (2016). *Seismic-wave amplification in 3D alluvial basins: 3D/1D amplification ratios from fast multipole BEM simulations.* Bulletin of the Seismological Society of America, 106(3), 1267-1281.

Midorikawa, S., & Watabe, M. (1988). *Site Amplification of Earthquake Ground Motion Estimated from Response Spectra of Recorded Motions*. Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering.

Moreno, G., Molina, F. J., & Carbonell, M. A. (2014). *Site Amplification and Dynamic Stiffness of Dry and Saturated Granular Media Using Seismic Centrifuge Testing.* Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 140(12), 04014080.

Mutlu, S., Tün, M., Pekkan, E., & Güney, Y. (2017). *Eskişehir Zemin Mühendislik Özellikleri Haritalarının Üretilmesi ve Kent Merkezinin Zemin Büyütmesinin Belirlenmesi.* 4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.

Okay, A. I., & Tüysüz, O. (1999). *Tethyan sutures of northern Turkey. Geological Society, London, Special Publications*, 156(1), 475-515.

Ozel, O., & Akgun, H. (2012). *Site response analysis of Ankara basin.* Engineering Geology, 135-136, 112-123.

Öner, L., Akgüner, C. & Berilgen, M. (2013). *Kuru Kumların Düşük Şekil Değiştirme Kayma Modülünün Piyezoelektrik Bender Elemanlar ile Belirlenmesi*, 5. Geoteknik Sempozymu, Çukurova Üniversitesi.

Özdağ, Ö. C., Gönenç, T., & Akgün, M. (2015). *Dynamic amplification factor concept of soil layers: a case study in İzmir (Western Anatolia).* Arabian Journal of Geosciences, 8(11), 10093-10104.

Özyazıcıoğlu, M., Dönmezçelik, K., Orhan, S. N., & Özkan, M. Y. (2019). *Erzincan İli Zemin Büyütme Etkilerine Dayalı Mikrobölgeleme Çalışması.* Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 5(2), 247-256.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Park, D., & Hashash, Y. M. (2004). *Soil damping formulation in nonlinear time domain site response analysis.* Journal of Earthquake Engineering, 8(2), 249-274.

Park, D., & Hashash, Y. M. (2005). *Evaluation of seismic site response including linear and nonlinear soil behavior.* Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 25(7-10), 663-671.

Pecker, A., & Azéma, J. (2018). *The Role of Soil-Structure Interaction in Seismic Design: A Historical Review.* International Journal of Geomechanics, 18(3), 04018001.

Peng, Z., & Chen, J. (2020). *Evaluation of Seismic Amplification Factors for Soil Sites in Korea Based on Nonlinear Site Response Analysis.* Geotechnical and Geological Engineering, 38(6), 6501-6517.

Phanikanth, V. S., Choudhury, D., & Rami Reddy, G. (2011). *Equivalent-Linear Seismic Ground Response Analysis of Some Typical Sites in Mumbai.* Geotechnical and Geological Engineering, 29(6), 1109–1126. doi:10.1007/s10706-011-9443-8

Pitilakis, K., Raptakis, D., & Anastasiadis, A. (1992). *Effects of nonlinear site response on the seismic ground motion.* In Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering, 3761-3766.

Pitilakis, K., Riga, E., & Anastasiadis, A. (2013). *New code site classification, amplification factors and normalized response spectra based on a worldwide ground-motion database.* Bulletin of Earthquake Engineering, 11(4), 925-966.

Rajput, M., & Ahmed, A. (2018). *Nonlinear soil behavior and site amplification effects on strong ground motion in Delhi, India.* Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 108, 150-162.

Rajput, M., & Ahmed, A. (2019). *Evaluation of site response characteristics in Delhi, India, using equivalent linear analysis.* Journal of Seismology, 23(1), 45-62.

Rathje, E. M., & Saygılı, G. (2008). *Probabilistic seismic hazard analysis for the state of Texas: ground motion model development*. Texas Department of Transportation.

Rathje, E. M., & Stokoe, K. H. (2004). *Field measurements of dynamic shear modulus at the National Geotechnical Experimentation Sites using surface wave methods.* In Geotechnical Engineering for Transportation Projects, 791-799.

Rathje, E. M., Wang, Y., & Kottke, A. R. (2007). *Use of ground motion attenuation relationships for seismic hazard analysis in Texas.* Journal of Earthquake Engineering, 11(3), 364-383.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Rathje, E. M., Wright, S. G., & Stokoe, K. H. (2001). *Evaluation of site-specific response in Texas using different site-response models.* In Proceedings of the Fourth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics.

Rigato, A. B., & Medina, R. A. (2007). *Influence of angle of incidence on seismic demands for inelastic single-storey structures subjected to bi-directional ground motions.* Engineering Structures, 29(10), 2593-2601.

Roesset, J.M., (1977) *Soil amplification in earthquakes, Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, New York, 19, 639-682

Rogers, A. M., Harmsen, S. C., & Perkins, D. M. (1984). *A study of site effects in the Los Angeles urban area.* Bulletin of the Seismological Society of America, 74(4), 1277-1296.

Sarıkaya, O. (2018). *Tünel-yapı-zemin etkileşiminin zemin büyütmesine etkilerinin nümerik olarak incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 92 s.

Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1970). *Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses.* Technical Report, EERRC-70-10, Berkeley, CA: University of California.

Semblat, J.F. (2011). *Modeling Seismic Wave Propagation and Amplification in 1D/2D/3D Linear and Nonlinear Unbounded Media. International Journal of Geomechanics*. 11, 440-448. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000023

Senapati, S., Banerjee, S., & T., T. (2019). *Effect of frequency on cyclic response of marine clay saturated with various pore fluids.* International Journal of Geotechnical Engineering, *1–10.* doi:10.1080/19386362.2019.1595302

T.C. Ulaştırma Bakanlığı. (2007). Demiryollar, Limanlar, Havameydanları İnşaatı Genel Müdürlüğü: *Geoteknik Tasarım Esasları*, Ankara.

Toyğar, F (2021). *Van İl Merkezi Zemin Büyütme Faktörünün İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 179 s.

Tuncel, A., Özdag, Ö. C., Pamuk, E., & Akgün, M. (2017). *Comparison of the soil dynamic amplification factor and soil amplification by using microtremor and MASW methods respectively.* In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 95(3), 032006.

Türköz, M. (2019). *The Effect of Soil Type and Different In-situ Test Results on Soil Amplification Analysis.* Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 10(3), 1187-1196.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Türköz, M., Afacan, K. B. (2019). *Effect Of Irregular Time-History On The Cyclic Resistance Of Sand.* Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A-Applied Sciences and Engineering, 20(4), 532-543.

Tripe, R., Kontoe, S., & Wong, T. K. C. (2013). *Slope topography effects on ground motion in the presence of deep soil layers.* Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 50, 72-84.

Truong, H. V. P. (2012). *Dynamic Site-Amplification Factors and Dynamic Attenuation Factors by Dynamic Soil Mass*. In Proc. 15th World Conference on Earthquake Engineering (15WCEE), 24-28.

Yalçınkaya, E., (2004). *Bir Boyutlu Modeller İçin Zemin Büyütmesine Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi.* İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yerbilimleri Dergisi, C.17(1) 47-56.

Yamanaka, H., Özmen, Ö. T., Chimoto, K., Alkan, M. A., Tün, M., Pekkan, E., & Nurlu, M. (2018). *Exploration of S-wave velocity profiles at strong motion stations in Eskisehir, Turkey, using microtremor phase velocity and S-wave amplification.* Journal of Seismology, 22(5), 1127-1137.

Yavuzoğlu, A. C., Ecevitoğlu, B., & Aksoy, G. G. U. (2021). *Yüzey Dalgaları/Temel Kaya Etkileşiminden Kaynaklanan Zemin Büyütmesinin 3-Boyutlu Modellenmesi.* MT Bilimsel, (20), 23-30.

Yogatama, B. A., & Tirta, B. A. (2018). *A comparison between VS30 based-and natural frequency based-site amplification factor for three different types of soil classification*. In Proceeding of the 20th South East Asian Geotechnical Conference and the 3rd AGSSEA Conference, 301-306.

Yoshida, N. and Suetomi, I. (1996). *"DYNEQ: A Computer Program for Dynamic Analysis of Level Ground Based on Equivalent Linear Method"*. Reports of Engineering Research Institute, Sato Kogyo Co. Ltd, 61-70.

Wang, G., Du, C., Huang, D., Jin, F., Koo, R. C., & Kwan, J. S. (2018). *Parametric models for ground motion amplification considering 3D topography and subsurface soils.* Soil Dynamics and Earthquake Engineering.

Wang, G., & Hwang, C. H. (2001). *A study of soil amplification effects for the Chi-Chi earthquake in Taiwan*. Journal of Earthquake Engineering, 5(1), 1-17.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Wang, L., Wu, Z., Xia, K., Liu, K., Wang, P., Pu, X., & Li, L. (2019*). Amplification of thickness and topography of loess deposit on seismic ground motion and its seismic design methods.* Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 126, 105090.

Zhu, C., Riga, E., Pitilakis, K., Zhang, J., & Thambiratnam, D. (2020). *Seismic aggravation in shallow basins in addition to one-dimensional site amplification.* Journal of Earthquake Engineering, 24(9), 1477-1499.

Zhu, C., Thambiratnam, D., & Gallage, C. (2018). *Statistical analysis of the additional amplification in deep basins relative to the 1D approach*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 104, 296-306.