KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KOHEZYONSUZ ZEMİNLERDE SAHAYA ÖZEL ZEMİN DAVRANIŞ ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ceren SELİM

KASIM 2025
TRABZON

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KOHEZYONSUZ ZEMİNLERDE SAHAYA ÖZEL ZEMİN DAVRANIŞ ANALİZİ

Ceren SELİM

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 14 / 10 / 2025
Tezin Savunma Tarihi : 21 / 11 / 2025

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Osman SİVRİKAYA

Trabzon 2025

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında

Ceren SELİM Tarafından Hazırlanan

KOHEZYONSUZ ZEMİNLERDE
SAHAYA ÖZEL ZEMİN DAVRANIŞ ANALİZİ

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 23 / 10 / 2025 gün ve 2125 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Osman SİVRİKAYA

Üye : Prof. Dr. Zülküf KAYA

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Emel TÜRKER

Prof. Dr. Asim KADIOĞLU
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Bu tez çalışması, kohezyonsuz zeminlerin tabakalaşma özelliklerine ve yeraltı suyu durumuna bağlı olarak zemin davranışındaki değişimin incelenmesi adına yapılmıştır. Şimdiye kadar yapılmış olan çalışmaları detaylandırmak ve geliştirmek amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında DeepSoil ve Plaxis 2D programı kullanılarak bir boyutlu ve iki boyutlu modelleme yapılmış ve sonuçlar kaydedilmiştir. Kaydedilen analiz sonuçları grafikler ile karşılaştırılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

Yüksek lisans tez çalışmamın yürütülmesi sırasında, tecrübe, bilgi ve yardımlarını eksik etmeyen, bütün çalışma sürecim boyunca her türlü desteği veren danışman hocam olan Prof. Dr. Osman SİVRİKAYA'ya sonsuz teşekkürlerimi iletiyorum.

Hayatım boyunca bana destek olan aileme, tez sürecim boyunca bilgilerini ve desteklerini veren meslektaşlarım Şeyma TEBRİK ve Burak AKÇAY'a teşekkürü bir borç bilirim.

Ceren SELİM

Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum ‘Kohezyonsuz Zeminlerde Sahaya Özel Zemin Davranış Analizi’ başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Osman SİVRİKAYA’nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 21.11.2025

Ceren SELİM

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ... III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ ... IV
İÇİNDEKİLER ... V
ÖZET ... VI
SUMMARY ... VII
ŞEKİLLER DİZİNİ ... VIII
TABLOLAR DİZİNİ ... XVIII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR ... XIX
1. GENEL BİLGİLER ... 1
1.1. Giriş ... 1
1.2. Sahaya Özel Zemin Davranış Analizi ... 3
1.2.1. Bir Boyutlu Zemin Tepki Analizi ... 4
1.3. Deprem Kayıtlarının Seçimi ve Ölçeklendirilmesi ... 8
1.4. Bir Boyutlu ve İki Boyutlu Sahaya Özel Zemin Davranış Analizi ... 19
1.4.1. DeepSoil ile Bir Boyutlu Analiz ... 19
1.4.2. Plaxis 2D ile Bir Boyutlu ve İki Boyutlu Analiz ... 28
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR ... 40
2.1. Saha ve Zemin Özellikleri ... 42
2.2. Deprem Verilerinin Seçilmesi ve Ölçeklendirilmesi ... 44
2.3. Analizlerin Yapılması ... 48
2.3.1. DeepSoil Programı ile Bir Boyutlu (1B) Analiz ... 48
2.3.2. Plaxis 2D Programı ile Bir Boyutlu (1B) ve İki Boyutlu (2B) Analiz ... 48
3. BULGULAR VE TARTIŞMA ... 53
3.1. Deepsoil Programı ile Yapılan Bir Boyutlu (1B) Analiz Sonuçları ... 53
3.2. Plaxis 2D Programı ile Bir Boyutlu (1B) ve İki Boyutlu (2B) Analiz Sonuçları ... 89
4. SONUÇLAR ... 102
5.ÖNERİLER ... 106
6. KAYNAKLAR ... 108
7. EKLER ... 111
ÖZGEÇMİŞ

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

KOHEZYONSUZ ZEMİNLERİN SAHAYA ÖZEL ZEMİN DAVRANIŞ ANALİZİ

Ceren SELİM

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Osman SİVRİKAYA
2025, 110 Sayfa, 30 Sayfa Ek

Bu tez çalışmasında, Kahramanmaraş iline ait kohezyonsuz zeminlerin deprem etkisi altındaki davranışı sahaya özgü olarak incelenmiştir. Araştırmada, zemin büyütmesi, yer tepki analizi ve sıvılaşma potansiyeli; tek tabakalı orta sıkı kum zemini, tabakalı kum profili ve yeraltı suyu etkili kumlu zemin olmak üzere üç farklı model kullanılarak değerlendirilmiştir. Zemin parametreleri, literatürde kabul gören ampirik korelasyonlar aracılığıyla belirlenmiş; AFAD tarafından sağlanan tasarım spektrumuna uygun deprem kayıtları PEER veri tabanından seçilmiştir. SeismoMatch ile işlenen veriler, DeepSoil programında 1B, Plaxis programında ise 1B ve 2B dinamik analizlere tabi tutulmuştur. Analiz sonuçları, Kahramanmaraş bölgesindeki kumlu zeminlerin belirgin zemin büyütmesi gösterdiğini ve yeraltı suyu seviyesinin artmasıyla sıvılaşma riskinin önemli ölçüde yükseldiğini ortaya koymuştur. Çalışma, bölgedeki mikro-bölgeleme ve zemin iyileştirme çalışmalarına bilimsel bir temel oluşturmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Zemin büyütmesi, Yer tepki analizi, Sıvılaşma potansiyeli, Kohezyonsuz zeminler, Kahramanmaraş, Yeraltı suyu etkisi, Dinamik analiz

Master Thesis

SUMMARY

SITE-SPECİFİC SOİL BEHAVİOR ANALYSİS OF COHESİONLESS SOİLS

Ceren SELİM

Karadeniz Technical University
Institute of Science and Technology
Department of Civil Engineering
Supervisor: Prof. Dr. Osman SİVRİKAYA
2025, 110 Pages, 30 Pages Appendix

In this thesis, the site-specific seismic behavior of cohesionless soils in the Kahramanmaraş region was comprehensively investigated. The study evaluated ground amplification, site response, and liquefaction potential through three different soil models: a single-layer medium-dense sand, a multilayered sandy profile, and a sand model incorporating the effect of groundwater. Soil parameters were determined using empirically established correlations from the literature. Earthquake records compatible with the site-specific design spectrum obtained from AFAD were selected from the PEER database. The processed records were analyzed using DeepSoil for one-dimensional (1D) site response and Plaxis for both 1D and two-dimensional (2D) dynamic simulations. The results revealed that sandy soils in the Kahramanmaraş region exhibit significant ground amplification and that the rise in groundwater level substantially increases the liquefaction potential. The findings provide a scientific basis for future microzonation, soil improvement, and seismic safety studies in earthquake-prone areas of the region.

Key Words: Ground amplification, Site response analysis, Liquefaction potential, Cohesionless soils, Kahramanmaraş, Groundwater effect, Dynamic analysis

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Deprem saha ilişkisi 5
Şekil 2. PEER yer hareketi veri tabanı 9
Şekil 3. Hedef spektrum oluşturmak için modellerin seçimi 9
Şekil 4. Örnek dosya indirimi 10
Şekil 5. Örnek hedef spektrum excel belgesi 10
Şekil 6. AFAD resmi sayfası 11
Şekil 7. Örnek raporlama bilgileri 11
Şekil 8. Özet rapor 11
Şekil 9. Yatay elastik spektrum değerlerinin indirilmesi 12
Şekil 10. Aktarılan verilerin sisteme yüklenmesi 12
Şekil 11. Logaritmik tasarım spektrumu 13
Şekil 12. Lineer tasarım spektrumu 13
Şekil 13. Deprem kaydı arama 14
Şekil 14. Seismomatch programı 14
Şekil 15. Deprem verilerinin indirilmesi 15
Şekil 16. Deprem verilerinin programa aktarılması 15
Şekil 17. Hedef spektrum eğrisi 16
Şekil 18. Eşleme (Match) işleminin sonucu 17
Şekil 19. Ham ve işlenmiş deprem verilerinin kıyaslanması 18
Şekil 20. Eşlenmiş deprem verilerinin indirilmesi 18
Şekil 21. Eşlenmiş deprem verilerinin indirilmesinde dosya seçimi 19
Şekil 22. Analiz bölümü 20
Şekil 23. Deprem kaydı bölümü 20
Şekil 24. Profiller bölümü 21
Şekil 25. Deprem kaydı ekleme bölümü 22
Şekil 26. Dosya seçme bölümü 22
Şekil 27. Zemin modeli oluşturulması 23
Şekil 28. Zemin modeli tabaka bölünme yöntemi 24
Şekil 29. Tabakalar arası geçiş 24
Şekil 30. Eğri uydurma aşaması 25

Şekil 31. Zemin modeli birim seçimi 26
Şekil 32. Verileri kontrol etme bölümü 26
Şekil 33. Deprem kayıtlarının seçimi 27
Şekil 34. Analizde 4. aşama 27
Şekil 35. Analiz için ilk bilgiler 28
Şekil 36. Zemin modelinin oluşturulması 28
Şekil 37. Zemin modelinde “Genel” bölümü 29
Şekil 38. Zemin modelinde “Mekanik” bölümü 30
Şekil 39. Oluşturulan modellerin zemin modeline aktarılması 31
Şekil 40. Oluşturulan zemin modeli sondaj deliği 31
Şekil 41. Yapılar bölümü 32
Şekil 42. Seçim penceresi bölümü 32
Şekil 43. Zemin modeli ağ (noktalara bölme) bölümü 33
Şekil 44. Ağ görünüm bölümü 33
Şekil 45. Aşama 1 34
Şekil 46. Dinamik yükler 34
Şekil 47. Çizgisel yer değiştirmeler 35
Şekil 48. Sınır arayüzleri oluşturma 35
Şekil 49. Aşama 2 düzenleme 36
Şekil 50. Dinamik çarpanları gösterme 36
Şekil 51. Deprem kaydının girilmesi 37
Şekil 52. RSN-180 37
Şekil 53. Aşama 2'de deprem süresinin girilmesi 38
Şekil 54. Hesaplama 38
Şekil 55. Analiz süreci 38
Şekil 56. Analiz sonucu 39
Şekil 57. Günümüz deprem faaliyetleri 41
Şekil 58. 1900-günümüz deprem faaliyetleri ($M_w \geq 5$) 41
Şekil 59. Zemin modeli-1 43
Şekil 60.Zemin modeli-2 43
Şekil 61. Zemin Modeli-3 44
Şekil 62. H1 yönlü eşlenen deprem kayıtlarının ivme-zaman grafiği 46
Şekil 63. H1 yönlü eşlenen deprem kayıtlarının spketral ivme-periyot grafiği 47
Şekil 64. H2 yönlü eşlenen deprem kayıtlarının ivme-zaman grafiği 47

Şekil 65. H2 yönlü eşlenen deprem kayıtlarının spketral ivme-periyod grafiği 48
Şekil 66. Drenajlı üç eksenli test sonuçları için E50ref ve Eurref'in tanımı 51
Şekil 67. Küçük gerinim sertliğine sahip hardening soil modeli için mobilize dilatasyon açısı ψ_m ve mobilize sürtünme açısı ϕ_m'nin çizimi 52
Şekil 68. Model-1 için H1 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan ivmenin derinlikle değişimi 53
Şekil 69. Model-1 için H1 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan yatay deplasmanın derinlikle değişimi 54
Şekil 70. Model-1 için H1 yönlü depremler idurumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan maksimum yanal deformasyonun derinlikle değişimi 54
Şekil 71. Model-1 için H1 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan kayma gerilmesi oranının derinlikle değişimi 55
Şekil 72. Model-1 için H1 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer analiz sonucu bulunan ivmenin derinlikle değişimi 55
Şekil 73. Model-1 için H1 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer analiz sonucu bulunan yatay deplasmanın derinlikle değişimi 56
Şekil 74. Model-1 için H1 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer analiz sonucu bulunan maksimum yanal deformasyonun derinlikle değişimi 56
Şekil 75. Model-1 için H1 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer analiz sonucu bulunan kayma gerilmesi oranının derinlikle değişimi 57
Şekil 76. Model-2 için H1 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan ivmenin derinlikle değişimi 57
Şekil 77. Model-2 için H1 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan yatay deplasmanın derinlikle değişimi 58
Şekil 78. Model-2 için H1 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan maksimum yanal deformasyonun derinlikle değişimi 58
Şekil 79. Model-2 için H1 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan kayma gerilmesi oranının derinlikle değişimi 59
Şekil 80. Model-2 için H1 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer analiz sonucu bulunan ivmenin derinlikle değişimi 59
Şekil 81. Model-2 için H1 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer analiz sonucu bulunan yatay deplasmanın derinlikle değişimi 60
Şekil 82. Model-2 için H1 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer analiz sonucu bulunan maksimum yanal deformasyonun derinlikle değişimi 60
Şekil 83. Model-2 için H1 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer analiz sonucu bulunan kayma gerilmesi oranının derinlikle değişimi 61
Şekil 84. Model-3 için H1 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan ivmenin derinlikle değişimi 61
Şekil 85. Model-3 için H1 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan yatay deplasmanın derinlikle değişimi 62

Şekil 86. Model-3 için H1 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan maksimum yanal deformasyonun derinlikle değişimi 62
Şekil 87. Model-3 için H1 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan kayma gerilmesi oranının derinlikle değişimi..... 63
Şekil 88. Model-1 ve Model-2 için H1-H2 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer analiz sonucu bulunan ivmenin derinlikle değişimi 63
Şekil 89. Model-1 ve Model-2 için H1-H2 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer analiz sonucu bulunan yatay deplasmanın derinlikle değişimi 64
Şekil 90. Model-1 ve Model-2 için H1-H2 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer sonucu bulunan maksimum yanal deformasyonun derinlikle değişimi..... 64
Şekil 91. Model-1 ve Model-2 için H1-H2 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer sonucu bulunan kayma gerilmesi oranının derinlikle değişimi..... 65
Şekil 92. Model-1, Model-2 ve Model-3 için H1-H2 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan ivmenin derinlikle değişimi..... 65
Şekil 93. Model-1, Model-2 ve Model-3 için H1-H2 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan yatay deplasmanın derinlikle değişimi..... 66
Şekil 94. Model-1, Model-2 ve Model-3 için H1-H2 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan maksimum yanal deformasyonun derinlikle değişimi 66
Şekil 95. Model-1, Model-2 ve Model-3 için H1-H2 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan kayma gerilmesi oranının derinlikle değişimi..... 67
Şekil 96. Model-2 Tabaka dizilimi 68
Şekil 97. Model-2 için H1 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme-zaman değişim grafiği RSN-179 68
Şekil 98. Model-2 için H1 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-180..... 69
Şekil 99. Model-2 için H1 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-725..... 69
Şekil 100. Model-2 için H1 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-768 69
Şekil 101. Model-2 için H1 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-959 70
Şekil 102. Model-2 için H1 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-1048 70
Şekil 103. Model-2 için H1 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-1082 70
Şekil 104. Model-2 için H1 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-1158 71

Şekil 105. Model-2 için H1 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-4866 71
Şekil 106. Model-2 için H1 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-5829 71
Şekil 107. Model-2 için H1 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-6893 72
Şekil 108. Model-3 Tabaka dizilimi 73
Şekil 109. Model-3 için H1 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-179 73
Şekil 110. Model-3 için H1 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-180 74
Şekil 111. Model-3 için H1 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-725 74
Şekil 112. Model-3 için H1 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-768 74
Şekil 113. Model-3 için H1 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-959 75
Şekil 114. Model-3 H1 için yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-1048 75
Şekil 115. Model-3 için H1 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-1082 75
Şekil 116. Model-3 için H1 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-1158 76
Şekil 117. Model-3 H1 için yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-4866 76
Şekil 118. Model-3 için H1 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-5829 76
Şekil 119. Model-3 için H1 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-6893 77
Şekil 120. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-179 77
Şekil 121. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-180 78
Şekil 122. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-725 78
Şekil 123. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-768 79
Şekil 124. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-959 79
Şekil 125. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-1048 80

Şekil 126. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-1082 80
Şekil 127. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-1158..... 81
Şekil 128. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-4866 81
Şekil 129. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-5829 82
Şekil 130. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-6893 82
Şekil 131. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-179 83
Şekil 132. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-180 83
Şekil 133. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-725 84
Şekil 134. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-768 84
Şekil 135. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-959 85
Şekil 136. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-1048 85
Şekil 137. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-1082 86
Şekil 138. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-1158..... 86
Şekil 139. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-4866 87
Şekil 140. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-5829 87
Şekil 141. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-6893 88
Şekil 142. Model-3 için H1 yönlü depremler durumunda derinlikle boşluksuyu basınç oranı değişimi 88
Şekil 143. Model-3 için H2 yönlü depremler durumunda derinlikle boşluksuyu basınç oranı değişimi 89
Şekil 144. Plaxis 2D ile Model-1 için yapılan bir boyutlu analiz sonucu bulunan İvme-Zaman grafiği 90
Şekil 145. Plaxis 2D ile Model-1 için yapılan bir boyutlu analiz sonucu bulunan Spektral ivme-Periyot grafiği..... 90

Şekil 146. Plaxis 2D ile Model-1 için yapılan iki boyutlu analiz sonucu bulunan İvme-Zaman grafiği 91
Şekil 147. Plaxis 2D ile Model-1 için yapılan iki boyutlu analiz sonucu bulunan Spektral ivme-Periyot grafiği 91
Şekil 148. Plaxis 2D ile Model-2 için yapılan bir boyutlu analiz sonucu bulunan İvme-Zaman grafiği 92
Şekil 149. Plaxis 2D ile Model-2 için yapılan bir boyutlu analiz sonucu bulunan Spektral ivme-Periyot grafiği 92
Şekil 150. Plaxis 2D ile Model-2 için yapılan iki boyutlu analiz sonucu bulunan İvme-Zaman grafiği 93
Şekil 151. Plaxis 2D ile Model-2 için yapılan iki boyutlu analiz soucu bulunan Spektral ivme-Periyot grafiği 93
Şekil 152. Plaxis 2D ile Model-3 için yapılan bir boyutlu analiz sonucu bulunan İvme-Zaman grafiği 94
Şekil 153. Plaxis 2D ile Model-3 için yapılan bir boyutlu analiz sonucu bulunan Spektral ivme-Periyot grafiği 94
Şekil 154. Plaxis 2D ile Model-3 için yapılan iki boyutlu analiz sonucu bulunan İvme-Zaman grafiği 95
Şekil 155. Plaxis 2D ile Model-3 için yapılan iki boyutlu analiz sonucu bulunan Spektral ivme-Periyot grafiği 95
Şekil 156. Model-1 için H2 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan ivmenin derinlikle değişimi 111
Şekil 157. Model-1 için H2 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan yatay deplasmanın derinlikle değişimi 111
Şekil 158. Model-1 için H2 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan maksimum yanal deformasyonun derinlikle değişimi 112
Şekil 159. Model-1 için H2 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan kayma gerilmesi oranının derinlikle değişimi 112
Şekil 160. Model-1 için H2 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer analiz sonucu bulunan ivmenin derinlikle değişimi 113
Şekil 161. Model-1 için H2 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer analiz sonucu bulunan yatay deplasmanın derinlikle değişimi 113
Şekil 162. Model-1 için H2 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer analiz sonucu bulunan maksimum yanal deformasyonun derinlikle değişimi 114
Şekil 163. Model-1 için H2 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer analiz sonucu bulunan kayma gerilmesi oranının derinlikle değişimi 114
Şekil 164. Model-2 için H2 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan ivmenin derinlikle değişimi 115
Şekil 165. Model-2 için H2 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan yatay deplasmanın derinlikle değişimi 115

Şekil 166. Model-2 için H2 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan maksimum yanal deformasyonun derinlikle değişimi 116
Şekil 167. Model-2 için H2 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan kayma gerilmesi oranının derinlikle değişimi 116
Şekil 168. Model-2 için H2 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer analiz sonucu bulunan ivmenin derinlikle değişimi 117
Şekil 169. Model-2 için H2 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer analiz sonucu bulunan yatay deplasmanın derinlikle değişimi..... 117
Şekil 170. Model-2 için H2 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer analiz sonucu bulunan maksimum yanal deformasyonun derinlikle değişimi 118
Şekil 171. Model-2 için H2 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer analiz sonucu bulunan kayma gerilmesi oranının derinlikle değişimi 118
Şekil 172. Model-3 için H2 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan ivmenin derinlikle değişimi 119
Şekil 173. Model-3 için H2 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan yatay deplasmanın derinlikle değişimi..... 119
Şekil 174. Model-3 için H2 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan maksimum yanal deformasyonun derinlikle değişimi 120
Şekil 175. Model-3 H2 yönlü depremler durumunda için Non-Lineer analiz sonucu bulunan kayma gerilmesi oranının derinlikle değişimi 120
Şekil 176. Model-2 için H2 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-180 121
Şekil 177. Model-2 için H2 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-184 121
Şekil 178. Model-2 için H2 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-723 122
Şekil 179. Model-2 için H2 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-766 122
Şekil 180. Model-2 için H2 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-821 122
Şekil 181. Model-2 için H2 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-1082 123
Şekil 182. Model-2 için H2 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-1101 123
Şekil 183. Model-2 için H2 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-4866 123
Şekil 184. Model-2 için H2 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-5825 124
Şekil 185. Model-2 için H2 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-5829 124

Şekil 186. Model-2 için H2 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-6897 124
Şekil 187. Model-3 H2 için yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-180 125
Şekil 188. Model-3 H2 için yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-184 125
Şekil 189. Model-3 için H2 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-723 126
Şekil 190. Model-3 H2 için yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-766 126
Şekil 191. Model-3 için H2 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-821 126
Şekil 192. Model-3 H2 için yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-1082 127
Şekil 193. Model-3 H2 için yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-1101 127
Şekil 194. Model-3 H2 için yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-4866 127
Şekil 195. Model-3 H2 için yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-5825 128
Şekil 196. Model-3 H2 için yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-5829 128
Şekil 197. Model-3 H2 için yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-6897 128
Şekil 198. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-180 129
Şekil 199. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-184 129
Şekil 200. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-723 130
Şekil 201. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-766 130
Şekil 202. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-821 131
Şekil 203. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-1082 131
Şekil 204. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-1101 132
Şekil 205. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-4866 132

Şekil 206. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-5825 133
Şekil 207. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-5829 133
Şekil 208. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-6897 134
Şekil 209. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-180 135
Şekil 210. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-184 135
Şekil 211.DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-723 136
Şekil 212. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-766 136
Şekil 213. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-821 137
Şekil 214. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-1082 137
Şekil 215. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-1101 138
Şekil 216. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-4866 138
Şekil 217. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-5825 139
Şekil 218. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-5829 139
Şekil 219. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-6897 140

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Deepsoil 7'de mevcut analiz seçeneği 23
Tablo 2. Zemin Modeli-1 Parametreleri.....43
Tablo 3. Zemin Modeli-2 Parametreleri.....43
Tablo 4. Zemin Modeli-3 Parametreleri.....44
Tablo 5. AFAD Saha Bilgileri.....44
Tablo 6. PEER Deprem Kayıtları Arama Özellikleri.....45
Tablo 7. H1 (Kuzey-Güney) Yönlü Depremler 45
Tablo 8. H2 (Doğu-Batı) Yönlü Depremler.....46
Tablo 9. DeepSoil Zemin Tipine Göre Analiz Seçenekleri 48
Tablo 10. Zemin Modeli-1 için seçilen deprem kayıtları 49
Tablo 11. Zemin Modeli-2 için seçilen deprem kayıtları 49
Tablo 12. Zemin Modeli-3 için seçilen deprem kayıtları 49
Tablo 13. Mohr-Coulomb modelindeki gibi kırılma parametreleri 50
Tablo 14. Zemin Rijitliği için Temel Parametreler 50
Tablo 15. Gelişmiş Parametreler (Varsayılan ayarların kullanılması önerilir) 50
Tablo 16. Alternatif parametreler.....50
Tablo 17. HSsmall Ekstra Parametreler 50

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

AFAD :İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü

c :Kohezyon (kN/m^2)

D_r :Rölatif sıkılık (%)

Ψ :Dilatasyon açısı (˚)

E_{50}^{ref} :Standart drenajlı üç eksenli testte kesme sertliği (kN/m^2)

E_{eod}^{ref} :Birincil ödometre yüklemesi için teğet sertliği (kN/m^2)

E_{ur}^{ref} :Boşaltılmış üç eksenli testten boşaltma/yeniden yükleme sertliği (kN/m^2)

F_{eq} :Deprem frekansı (Hz)

ϕ :İçsel sürtünme açısı (˚)

σ_t :Gerilim kesme ve çekme dayanımı (kN/m^2)

γ :Birim hacim ağırlık (kN/m^3)

γ_n :Doğal birim hacim ağırlık (kN/m^3)

M_w :Deprem Büyüklüğü (birimsiz)

μ :Sertliğin stres düzeyine bağlı gücü (-)

v_s :Kayma dalgası hızı (m/sn)

R_{JB} :Joyner-Boore mesafesi (km)

R_{rup} :Fay kırığına en yakın mesafe (km)

ν_{ur} :Boşaltma-yeniden yükleme için Poisson oranı (-)

p_{ref} :Sertlikler için referans gerilimi (kN/m^2)

K_0^{nc} :Normal konsolidasyon için K0 değeri (-)

R_f :Kırılma oranı q_f / q_a (-)

$\phi_{tension}$:Çekme dayanımı (kN/m^2)

c_{inc} :Mohr-Coulomb modelinde olduğu gibi (kN/m^3)

C_c :Sıkıştırma indeksi (-)

C_s :Şişme indeksi veya yeniden yükleme indeksi (-)

e_{init} :Başlangıç boşluk oranı (-)

$\nu_{0.7}$:Boşaltma-yeniden yükleme için Poisson oranı (-)

G_0^{ref} :Çok küçük gerilmelerde referans kayma modülü (kN/m^2)

$\gamma_{0.7}$:$G_s = 0.722G_0$ olan eşik kesme gerilimi (-)

PEER :Pacific Earthquake Engineering Research Center

r_u :Boşluksuyu basınç oranı (-)

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Geoteknik mühendisliği uygulamalarında zemin özelliklerinin doğru bir biçimde belirlenmesi, yapıların güvenli ve ekonomik olarak tasarlanabilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle kohezyonsuz zeminler (kum ve çakıl gibi), çok sayıda mühendislik yapısının temel zemini olarak yer almakta ve yük taşıma kapasitesi, oturma davranışı ile dinamik özellikleri bakımından detaylı analiz gerektirmektedir. Kohezyonsuz zeminler, drenaj koşullarında ani gerilme değişimlerine hızlı tepki verebilme özellikleri ile bilinmektedir. Bu nedenle özellikle yüksek geçirgenlikleri, kohezyonlu zeminlere göre düşük oturma eğilimleri ve yük altında göçme veya sıvılaşma riski gibi davranış özellikleri mühendislik uygulamalarında belirleyici olmaktadır (Das, 2010).

Ayrıca, dinamik yükler altındaki davranış, kohezyonsuz zeminler için oldukça önemlidir. Çünkü deprem etkisi altında kohezyonsuz zeminler, sıvılaşma riski ile karşı karşıyadır. Depremler sırasında sıvılaşma potansiyeline sahip zeminlerde artık boşluk suyu basıncının artması sonucu meydana gelen büyük şekil değiştirmeler ve akmalar yapılarda, alt yapı sistemlerinde ciddi hasarlara yol açmaktadır. Yakın zamanda meydana gelen 2011 Christchurch ve Tohoku depremleri ile ülkemizde meydana gelen 1999 Kocaeli ve 2023 Kahramanmaraş depremlerinde gözlemlenen sıvılaşma kaynaklı hasarlar, bina performansının temel sisteminin davranışı ile ilişkili olduğunu göstermiştir (Işkın & Özener, 2024).

1964 Niigata (Japonya) ve Alaska depremleri sonrasında, gevşek ve suya doygun kumlu zeminlerin sıvılaşmaya yatkın olduğu anlaşılmış ve bu konuya yönelik kapsamlı saha ve laboratuvar çalışmaları yapılmıştır (Seed & Idriss, 1971; Ishihara, 1996; Kramer, 1996). Daha sonraki çalışmalar göstermiştir ki, özellikle yeraltı suyu seviyesinin yüksek olduğu gevşek kumlu zeminlerde sıvılaşma riski artmakta, bu durum yapıların taşıma kapasitesini ciddi şekilde azaltmaktadır (Youd vd., 2001; Idriss & Boulanger, 2008). Bu nedenle, sahaya özel sıvılaşma analizleri ve dinamik davranış belirlemeleri, deprem mühendisliğinde kritik öneme sahiptir.

Kohezyonsuz zeminlerin mühendislik davranışı, yalnızca teorik bağıntılarla açıklanamayacak ölçüde karmaşıktır. Aynı litolojik özelliklere sahip görünen iki farklı saha, farklı yeraltı suyu koşulları, sıkılık dereceleri ve dane boyutu dağılımları nedeniyle oldukça

farklı davranış gösterebilir. Bu nedenle sahaya özgü analizler yapılması kaçınılmazdır. Arazi deneyleri (SPT, CPT, presiyometre, dilatometre, sismik deneyler) ile elde edilen veriler, laboratuvar deneyleri ve sayısal modellemelerle desteklenerek kullanılmaktadır (Stokoe vd., 1999; Andrus & Stokoe, 2000). Ayrıca Plaxis 2D, FLAC ve OpenSees gibi sonlu eleman ve ayrık eleman tabanlı yazılımlar, sahaya özgü verilerin sayısal modellere entegre edilmesiyle gerçekçi davranış analizleri yapılmasına olanak tanımaktadır (Benz, 2007; Brinkgreve vd., 2018).

Kohezyonsuz zeminlerin davranışına yönelik literatürde çok sayıda önemli çalışma bulunmaktadır. Casagrande (1936) ve Terzaghi (1943) klasik teorilerinde kayma mukavemeti üzerinde dururken, Bolton (1986) sıkılık derecesi ile mukavemet arasındaki bağıntıları detaylandırmıştır. Deprem mühendisliği açısından Seed ve Idriss (1971), sıvılaşma potansiyelinin tahminine yönelik saha deneyleri temelli ilk ampirik bağıntıları geliştirmiştir. Ishihara (1996) ve Kramer (1996), kumlu zeminlerin dinamik davranışını sistematik olarak incelemiştir. Daha güncel çalışmalarda ise Cetin vd. (2004) ve Idriss & Boulanger (2008), sıvılaşma analizlerinde gelişmiş yöntemler önermiş; sayısal modellemelerle laboratuvar ve saha verilerinin entegrasyonu üzerine odaklanılmıştır. Her ne kadar kohezyonsuz zeminlerin davranışını incelemeye yönelik literatürde çok sayıda deneysel ve teorik araştırma yapılmış olsa da konunun, oldukça geniş ve karmaşık olması sebebiyle mevcut çalışmaların kapsamı sınırlı kalmakta, hala açıklığa kavuşmamış birçok kısım bulunmaktadır. Özellikle sıvılaşma ve dinamik davranışa ilişkin yapılan çalışmalar ağırlıklı olarak belirli zemin tipleri, laboratuvar koşulları veya standart arazi deneyleri üzerinden yürütülmüş, farklı jeolojik ortamlarda ve geniş ölçekli saha verileriyle desteklenen araştırmaların sayısı yetersiz kalmıştır (Seed & Idriss, 1971; Ishihara, 1996; Youd vd., 2001). Ayrıca, küçük genlikli deformasyon özellikleri, uzun süreli oturma davranışları ve farklı sıkılık derecelerinin etkisi gibi konuların detaylı olarak ele alındığı çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir (Bolton, 1986; Idriss & Boulanger, 2008). Bu nedenle, kohezyonsuz zeminlerin farklı yükleme koşulları altındaki mühendislik davranışını güvenilir bir şekilde tahmin edebilmek için sahaya özgü verilerle desteklenen daha kapsamlı çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu tez kapsamında, kohezyonsuz zeminlerin sahaya özgü davranış analizinin gerçekleştirilmesi ve elde edilen sonuçların yorumlanması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda üç farklı zemin modeli oluşturulmuş ve bu modellerin parametreleri, literatürde birçok araştırmacı tarafından önerilen ampirik korelasyonlardan yararlanılarak belirlenmiştir.

Çalışmanın örnek alanı olarak, son yıllarda yoğun deprem aktivitesine maruz kalan Kahramanmaraş bölgesi seçilmiş ve bölgeye ait saha verileri dikkate alınarak AFAD tarafından yayımlanan tasarım spektrumu kullanılmıştır. Elde edilen bu spektruma uygun olarak, PEER veri tabanı üzerinden 11 adet Kuzey–Güney ve 11 adet Doğu–Batı yönlü deprem kaydı seçilmiş, söz konusu kayıtlar Seismomatch yazılımı aracılığıyla tasarım spektrumuna uyumlu hale getirilmiştir. Hazırlanan deprem kayıtları ile öncelikle Deepsoil yazılımı kullanılarak bir boyutlu eşdeğer lineer ve nonlineer analizler gerçekleştirilmiş; ardından, analiz sonuçları doğrultusunda en fazla ve en az etki yaratan deprem kayıtları belirlenmiştir. Bu kayıtlar seçilerek Plaxis 2D yazılımı ile hem bir boyutlu hem de iki boyutlu analizler yapılmış, farklı deprem senaryolarının ve zemin modellerinin mühendislik davranışı üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Böylelikle çalışma, hem literatürdeki yaklaşımları sahaya özgü koşullara uyarlamayı hem de deprem etkisi altındaki kohezyonsuz zemin davranışına ilişkin kapsamlı bir değerlendirme sunmayı hedeflemektedir.

1.2. Sahaya Özel Zemin Davranış Analizi

Depreme dayanıklı yapı tasarımında, kuvvetli yer hareketi sonucu yapıya etkiyecek sismik kuvvetlerin belirlenmesi için, deprem yönetmeliklerinde tanımlanan tasarım spektrumları kullanılmaktadır. Yönetmeliklerde verilen tasarım spektrumları ile yapıların doğal titreşim periyodunu dikkate alarak deprem etkisi altında yapıda oluşan yatay ve düşey yükler belirlenmektedir. Tasarım spektrumları, sahanın sismik özelliklerini ve zemin koşullarını dikkate alarak farklı deprem kuvvetlerine verdiği tepkinin maksimum değerlerinden oluşur. Tasarım spektrumları yeni inşa edilecek yapılarda deprem yükünü belirlemek amacıyla kullanılmakta, tepki spektrumlarına düzgünleştirilmiş bir zarf eğrisi uydurulmasıyla elde edilmektedir (Kale, 2017).

2019’dan itibaren güncel olarak kullanılmakta olan ve son olarak yayımlanan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)’de, daha önce yayımlanmış yönetmelikler ile kıyaslandığında dikkat çekmektedir ki sahaya özel yerel zemin sınıflarının belirlenmesi kısmı genişletilerek deprem yer hareketi spektrumlarının yapının bulunduğu konuma, faya uzaklığına ve zemin özelliklerine göre hesaplanması önerilmektedir.

Sahaya özel zemin davranış analizleri, yerel zemin sınıflandırmasında ZF sınıfı olarak tanımlanan zeminlerde *sahaya özel zemin davranış analizleri* yapılacaktır. Bu tür analizler,

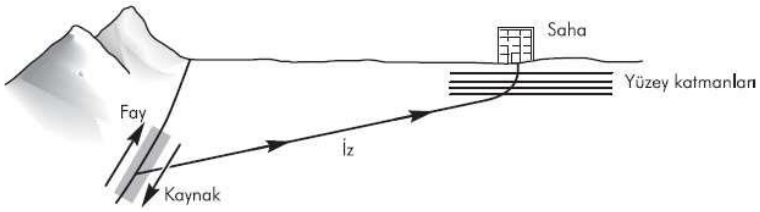
proje mühendisinin tercihine bağlı olarak diğer sınıflardaki zeminlerde de yapılabilir (TBDY, 2018).

Zemin davranış analizleri “eşdeğer doğrusal zemin davranışı analizleri” ve “doğrusal olmayan zemin davranışı analizleri” olarak farklı iki şekilde yapılmaktadır. Bazı araştırmalara göre zemin davranış analizinde “eşdeğer doğrusal” veya “doğrusal olmayan” yöntemin seçiminde, zemin özellikleri ve anakaya deprem hareketinin karakteristik özellikleri karar vericidir. Örneğin tekrarlı gerilmelerin göreceli olarak düşük olduğu durumlarda eşdeğer doğrusal analiz yöntemi önerilirken, tekrarlı gerilmelerin büyük olduğu durumlarda doğrusal olmayan analiz yöntemi ile daha gerçekçi sonuçlara ulaşılmıştır (Pruiksma, 2016; Carlton ve Tokimatsu, 2016; ve Selçuk vd., 2007). Bu durum ise zeminlerin düşük gerilme durumlarında elastik, büyük gerilme genliklerinde ise elasto-plastik ve plastik davranış göstermesi ile açıklanmaktadır (Akdoğan, 2019). TBDY 2018, en zayıf zemin sınıfı olarak tanımlanan ZF sınıfında sıvılaşma ihtimali olan zeminler için; davranışın elasto-plastik ve plastik olma ihtimali nedeniyle bir boyutlu doğrusal olmayan zemin davranış analiz çalışmalarını önermektedir (Civelekler, Afacan & Okur, 2021).

1.2.1. Bir Boyutlu Zemin Tepki Analizi

Yer kabuğu altında bir fay kırıldığında, kaynaktan çıkan cisim dalgaları her yöne doğru yayılır. Bu dalgalar, farklı jeolojik tabakaların sınırlarına ulaştıklarında yansıma ve kırılmalara uğrar. Genellikle yüzeye yakın tabakaların dalga yayılım hızları, daha derinlerde bulunan tabakalardan düşük olduğundan, yatay tabaka sınırına çarpan eğimli ışınlar çoğunlukla daha düşey doğrultuya yönelerek kırılır. Yüzeye ulaşana kadar gerçekleşen bu kırılmalar sonucunda dalgalar genellikle düşeye yakın bir açıyla ilerler.

Bir boyutlu zemin tepki analizleri, tüm tabaka sınırlarının yatay olduğu ve zeminin tepkisinin esas olarak anakayadan yukarıya doğru dikey olarak yayılan SH dalgalarıyla belirlendiği varsayımına dayanır (Şekil 1). Bu analizlerde zemin ve anakaya yüzeylerinin yatay doğrultuda sonsuza kadar uzandığı kabul edilir. Söz konusu varsayımlara dayanan yöntemler ile elde edilen zemin tepkilerinin, birçok depremde ölçülen gerçek tepkilerle oldukça uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür.



Şekil 1. Deprem saha ilişkisi

A. Doğrusal (Lineer) Yaklaşım

Zemin tepkisinin incelenmesinde kullanılan yöntemlerden biri de transfer fonksiyonuna dayalı analiz teknikleridir. Transfer fonksiyonları, anakaya ivmesi gibi girdi hareketlerinden yola çıkılarak yerdeğiştirme, hız, ivme, kayma gerilmesi ve kayma birim deformasyonu gibi farklı tepki parametrelerinin hesaplanmasına imkân tanımaktadır. Bu yaklaşım, izdüşüm ilkesine dayalı olduğundan esasen doğrusal sistemlerin analizi ile sınırlıdır. Bununla birlikte, doğrusal olmayan davranışın temsil edilebilmesi, eşdeğer doğrusal zemin özelliklerinin iteratif yöntemlerle güncellenmesi sayesinde mümkün olabilmektedir.

Transfer fonksiyonu yaklaşımında hesaplamalarda karmaşık sayıların kullanılması zorunlu olmakla birlikte, yöntemin temel mantığı görece basittir. Anakaya hareketinin zamana bağlı değişimi genellikle Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) aracılığıyla Fourier serisi formunda ifade edilmektedir. Fourier serisindeki her bir terim, transfer fonksiyonu ile çarpılarak zemin yüzey hareketinin Fourier serisi elde edilmektedir. Daha sonra, ters FFT uygulanarak bu sonuç zaman tanım alanına dönüştürülmektedir. Böylelikle transfer fonksiyonları, girdi hareketindeki her bir frekans bileşeninin zemin tarafından hangi ölçüde büyütüldüğünü veya sönümlendiğini nicel olarak tanımlamaktadır.

Doğrusal yaklaşımın temel özelliği, transfer fonksiyonlarının doğru bir biçimde değerlendirilmesine dayanmasıdır. Literatürde farklı jeolojik koşullara bağlı olarak geliştirilen çeşitli transfer fonksiyonu modelleri bulunmaktadır. Basit modeller, her ne kadar gerçek problemlere sınırlı ölçüde uygulanabilir olsa da, zemin çökellerinin yer hareketi üzerindeki etkilerini fazla matematiksel karmaşıklığa girmeden gösterebilme avantajına sahiptir. Daha karmaşık transfer fonksiyonu modelleri ise zemin tepkisinin kritik yönlerini daha ayrıntılı biçimde tanımlayabilmekte ve bu nedenle geoteknik deprem mühendisliği uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

B. Eş Değer Doğrusal Yaklaşım

Zeminlerin doğrusal olmayan davranışları iyi bilindiğinden, belirli mühendislik problemlerinde zemin tepkisinin daha gerçekçi bir şekilde hesaplanabilmesi için doğrusal yaklaşımlar tek başına yeterli olmamaktadır. Bu nedenle, tekrarlı yüklemeler altında doğrusal olmayan histerezis davranışı sergileyen zeminlerin gerilme–birim deformasyon ilişkisi, pratikte yaygın olarak kullanılan eşdeğer doğrusal yaklaşım ile yaklaşık biçimde temsil edilmektedir.

Bu yaklaşımda eşdeğer doğrusal kayma modülü (G_{eq}) genellikle sekant kayma modülü olarak tanımlanmakta, eşdeğer doğrusal sönüm oranı (ξ_{eq}) ise gerçek bir histerez döngüsünde meydana gelen enerji kaybını tek bir çevrimde üreten sönüm oranı ile eşdeğer kabul edilmektedir (Seed ve Idriss, 1970). Ancak doğrusal analiz yöntemleri, her bir zemin tabakası için G_{eq} ve ξ_{eq} değerlerinin sabit tutulmasını gerektirir. Bu nedenle çözülmesi gereken temel problem, her bir katmanda gelişen birim deformasyon düzeyi ile tutarlı değerlerin tanımlanmasıdır.

Bu sürecin temelinde, laboratuvar deneylerinden elde edilen modül azalım (G/G_{max}-γ) eğrileri ve sönüm oranı (ξ–γ) eğrileri bulunmaktadır. Söz konusu eğriler, basit harmonik yüklemeler altında gerçekleştirilen dinamik deneylerle elde edilmektedir. Bu deneylerde birim deformasyon düzeyi genellikle pik kayma birim deformasyon genliği (γ_{max}) ile tanımlanmaktadır (Vucetic ve Dobry, 1991). Ancak, tipik bir deprem hareketinde kayma birim deformasyonunun zamana bağlı değişimi oldukça düzensizdir ve pik genlikler, kayıt boyunca yalnızca birkaç ani tepe değeri ile temsil edilebilmektedir.

Eşdeğer doğrusal analiz genellikle iteratif bir çözüm süreciyle uygulanmaktadır. Bu yöntem, ilk olarak her bir tabaka için kayma modülü ve sönüm oranının küçük deformasyon koşullarına karşılık gelen başlangıç değerleri (G_{max}, ξ_{min}) ile başlatılır. Ardından, deprem kaydının uygulanması sonucu elde edilen deformasyon düzeyleri kullanılarak ilgili tabakaların modül azalım ve sönüm oranı eğrilerinden yeni G_{eq} ve ξ_{eq} değerleri seçilir. Bu güncellenmiş değerlerle analiz tekrarlanır ve sonuçlar bir önceki adımla karşılaştırılır. Hesaplanan deformasyon düzeyleri ardışık iterasyonlar boyunca birbirine yaklaşana kadar bu süreç devam ettirilir. Böylece, her bir zemin tabakası için dinamik davranışı en iyi temsil eden eşdeğer doğrusal parametreler elde edilmiş olur.

Eşdeğer doğrusal yaklaşım, gerçek doğrusal olmayan davranışın yalnızca yaklaşık bir temsili olmakla birlikte, basitliği ve mühendislik uygulamalarında sağladığı pratiklik

nedeniyle geoteknik deprem mühendisliğinde uzun yıllardır yaygın biçimde kullanılmaktadır.

C. Doğrusal Olmayan (Non-Lineer) Yaklaşım

Eşdeğer doğrusal yaklaşım, hesaplama açısından pratik olması ve pek çok mühendislik problemi için makul sonuçlar sağlamasına rağmen, sismik yer tepkisinin gerçek doğrusal olmayan davranışını yalnızca yaklaşık olarak temsil eden bir yöntemdir. Bu nedenle, zeminlerin doğrusal olmayan davranışını daha gerçekçi bir biçimde incelemek için zaman tanım alanında doğrudan sayısal entegrasyona dayalı yöntemler geliştirilmiştir.

Bu yöntemlerde hareket denklemi küçük zaman adımlarına ayrılarak entegre edilmekte, her adımda seçilen uygun bir gerilme–birim deformasyon modeli ya da daha gelişmiş bir ileri yapıcı model kullanılabilmektedir. Her zaman adımının başlangıcında, o adıma ait zemin özellikleri belirlenmekte ve böylece analiz süresince zemin davranışının doğrusal olmayan özellikleri adım adım takip edilmektedir. Bu yaklaşım sayesinde, elastik olmayan gerilme–birim deformasyon ilişkisi, küçük artışlı doğrusal adımların birleşiminden oluşan bir süreç ile temsil edilebilmektedir.

Doğrusal olmayan analizlerde özellikle tekrarlı doğrusal olmayan modeller, tekrarlı yükleme sırasında zeminlerin gerçek gerilme–birim deformasyon izlerini daha doğru bir şekilde takip edebilmektedir. Bu tür modeller, zeminin kayma dayanımını tanımlayabilmekte ve uygun bir boşluk suyu basıncı gelişim modeli ile birlikte drenajsız tekrarlı yükleme koşullarında efektif gerilme değişimlerini temsil edebilmektedir.

Tekrarlı doğrusal olmayan modellerin ortak özellikleri genellikle iki ana bileşenden oluşmaktadır:

- Omurga (backbone) eğrisi: Zeminin temel gerilme–birim deformasyon davranışını tanımlar.
- Yükleme–boşaltma kuralları: Rijitlik azalımı, histerezis davranışı ve diğer doğrusal olmayan etkileri kontrol eder.

Bu modellerin en basit versiyonları, nispeten daha sade bir omurga eğrisine ve sınırlı sayıda kurala sahiptir. Örneğin, klasik bir modelde omurga eğrisi kayma gerilmesi–birim deformasyon ilişkisini tanımlamak üzere hiperbolik fonksiyon ile ifade edilmektedir (Hardin ve Drnevich, 1972). Bu tür bir omurga eğrisinin şekli, iki temel parametreye bağlıdır:

- Başlangıç kayma rijitliği (G_{max}): Küçük deformasyon seviyelerindeki elastik davranışı tanımlar.
- Kayma dayanımı (τ_{max}): Büyük deformasyon seviyelerindeki dayanım sınırını belirler.

Bu tür hiperbolik omurga fonksiyonları, zemin davranışının doğrusal olmayan özelliklerini nispeten basit bir matematiksel formülasyonla temsil edebilmekte, ancak aynı zamanda tekrarlı yükleme altında gözlenen histerezis etkilerini de yakalayabilmektedir.

1.3. Deprem Kayıtlarının Seçimi ve Ölçeklendirilmesi

Bina taşıyıcı sistemlerinin zaman tanım alanında bir veya iki boyutlu ve üç boyutlu deprem hesabında gerekli deprem yer hareketlerinin tanımlanması için kullanılacak *deprem kayıtlarının seçimi* ve *basit ölçeklendirme* yöntemi ile ölçeklendirilmesi veya *spektral uyuşum* sağlanacak şekilde dönüştürülmesi için uygulanması gerekli kurallar tanımlanmıştır (TBDY, 2018). Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda spektral uyuşum sağlanacak şekilde dönüşümü kullanılmıştır.

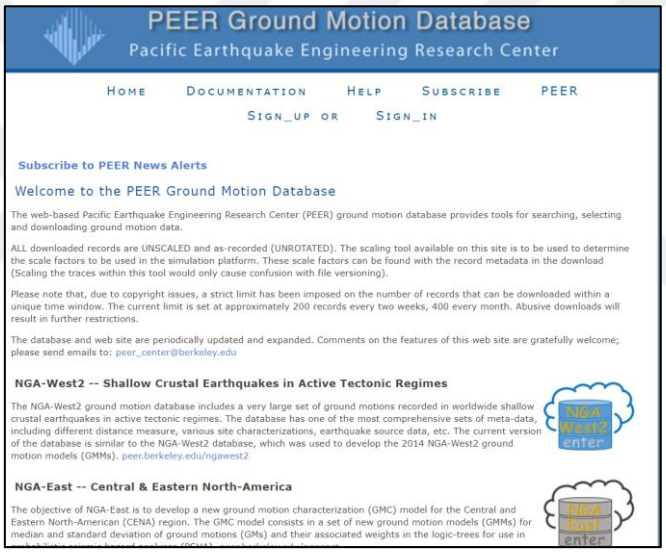
Bina taşıyıcı sistemlerinin zaman tanım alanında deprem hesabında kullanılacak deprem kayıtlarının seçimi, *tasarıma esas deprem yer hareketi düzeyi ile uyumlu deprem büyüklükleri, fay uzaklıkları, kaynak mekanizmaları ve yerel zemin koşulları* dikkate alınarak yapılacaktır. Binanın bulunduğu bölgede tasarıma esas deprem yer hareketi düzeyi ile uyumlu geçmiş deprem kayıtlarının mevcut olması durumunda öncelikle bu kayıtlar kullanılacaktır. 11 Sahaya özel deprem tehlikesine en fazla katkıda bulunan depremlere ait büyüklük ve fay uzaklığı bilgilerinin belirlenmesi için deprem tehlikesi ayrıştırma işleminden yararlanılabilir (TBDY, 2018).

Yeterli sayı veya nitelikte deprem kaydı seçiminin yapılamadığı durumlarda, zaman tanım alanında *benzeştirilmiş yer hareketi kayıtları* kullanılabilir. Bu tür kayıtların kullanılması durumunda, binanın bulunduğu sahanın sismik kaynak, dalga yayılım ve yerel zemin özellikleri göz önüne alınacaktır. Benzeştirme için kullanılacak model parametrelerinin, söz konusu bölgede meydana gelmiş depremlerde kaydedilmiş gerçek deprem kayıtları ile uyumlu olduğu gösterilecektir (TBDY, 2018).

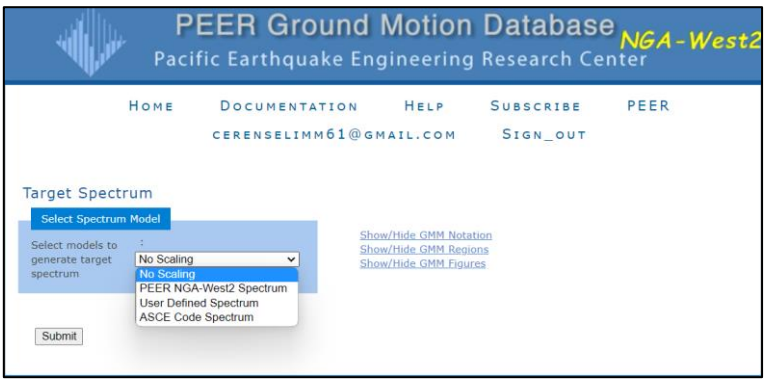
Bir veya iki boyutlu hesap için seçilecek deprem kayıtlarının ve üç boyutlu hesap için seçilecek deprem kaydı takımlarının sayısı en az on bir olacaktır. Aynı depremden seçilecek kayıt veya kayıt takımı sayısı üçü geçmeyecektir (TBDY, 2018).

Zemin davranış analizlerinde veya zaman tanım alanında yapılacak diğer hesaplarda kullanılmak üzere deprem yer hareketleri, *seçilen deprem kayıtlarının tasarım spektrumuna spektral uyuşum sağlanacak şekilde dönüştürülmesi* ile de elde edilebilir. Dönüştürülen deprem yer hareketlerinin spektrumlarının ortalamaları, tüm periyotlar için tasarım spektrumu ordinatlarından daha küçük olmayacaktır (TBDY, 2018).

TBDY (2018)'de verilen kurallara göre deprem kayıtlarının seçimi için PEER (https://ngawest2.berkeley.edu) adresi kullanılabilmektedir (Şekil 2). "PEER Ground Motion Database" sayfasına girdikten sonra "NGA West2" bölümü seçilmiştir. NGA West2 bölümüne gidildiğinde hedef spektrum belirlenmelidir. Spektrum modelini belirlemek için "Select models to generate target spectrum" bölümüne tıklanılmaktadır (Şekil 3).

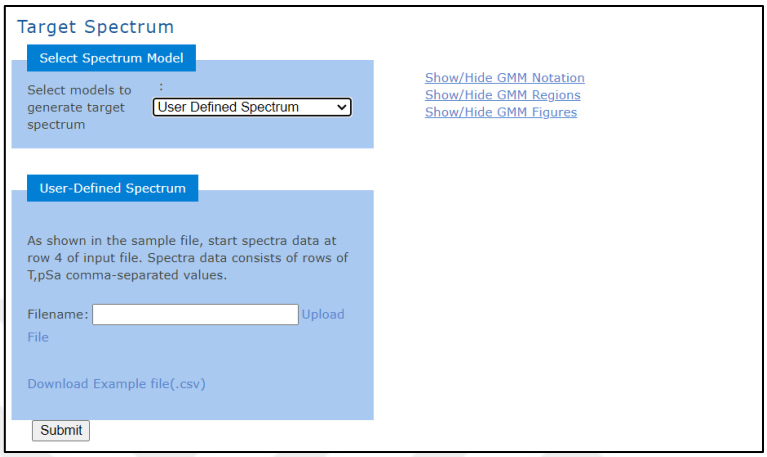


Şekil 2. PEER yer hareketi veri tabanı



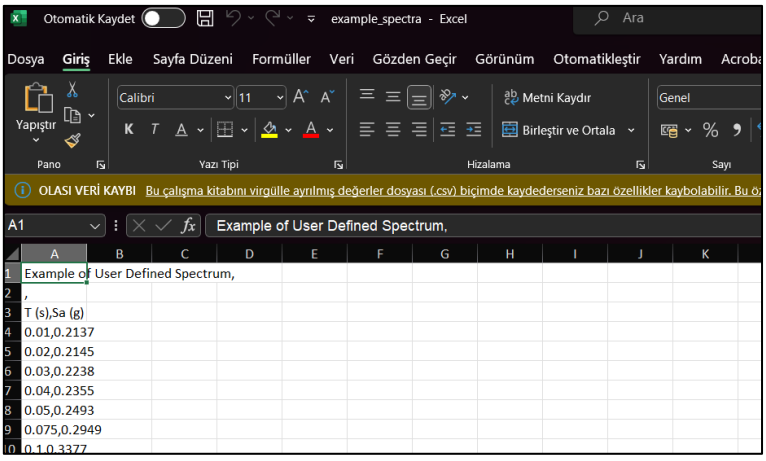
Şekil 3. Hedef spektrum oluşturmak için modellerin seçimi

Çalışılacak saha için hedef spectrumun belirlenmesi gerekmektedir. Bu sebepten dolayı öncelikle örnek dosya indirilmek için "User Defined Spectrum" seçilmektedir. Bu seçimden sonra dosya yüklemek için açılan bölümden örnek dosya indirilebilmektedir (Şekil 4).



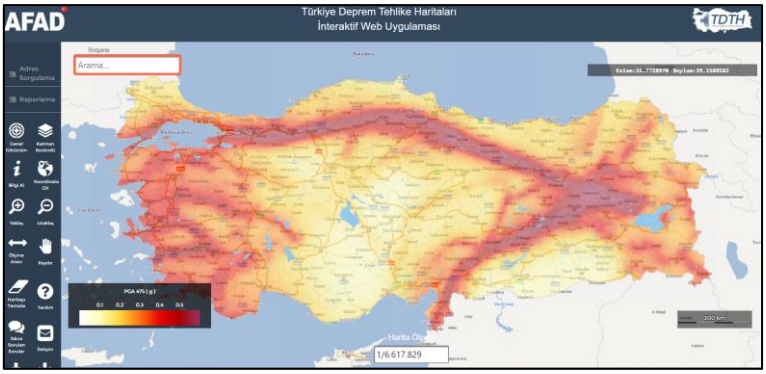
Şekil 4. Örnek dosya indirimi

"PEER Ground Motion Database" sayfasından indirilen örnek dosya Excel formatındadır ve çalışılacak *bölgenin hedef spektrum değerlerinin* AFAD'ın sayfasından indirildikten sonra örnek dosyaya aktarılması gerekmektedir. (Şekil 5).

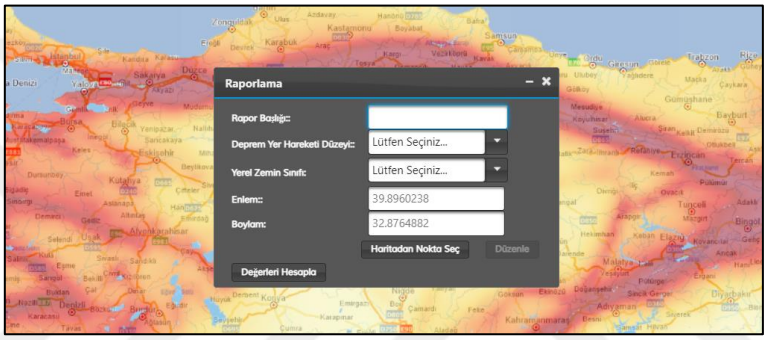


Şekil 5. Örnek hedef spektrum excel belgesi

AFAD'ın sayfasına https://tdth.afad.gov.tr bağlantısı üzerinden E-Devlet ile giriş yapılabilmektedir (Şekil 6). Açılan sayfada çalışılacak bölgenin hedef spektrum değerlerinin indirilmesi için ilgili bilgiler girilerek rapor oluşturulmakatdır. (Şekil 7-8).



Şekil 6. AFAD resmi sayfası

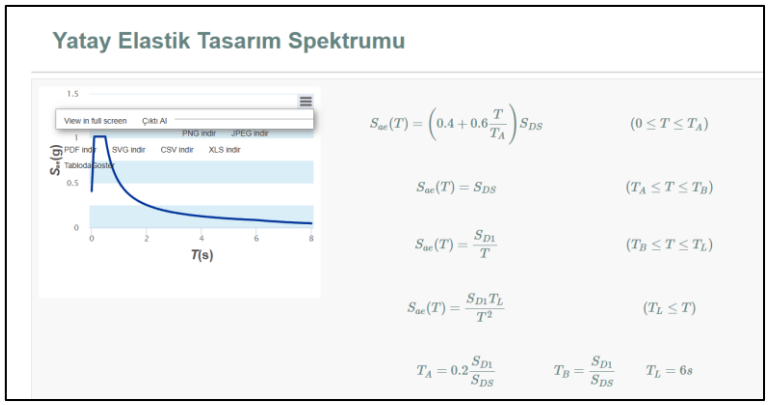


Şekil 7. Örnek raporlama bilgileri



Şekil 8. Özet rapor

"Detaylı Raporu Göster" seçeneği ile Yatay Elastik Tasarım Spektrumu ve Düşey Elastik Tasarım Spektrumu daha detaylı şekilde görülmektedir. PEER'da kullanmak için *Yatay Elastik Tasarım Spektrumu* verileri indirilmelidir. Bu çalışma kapmasında Excel kullanılacağından XLS indir bölümü kullanılmaktadır (Şekil 9).



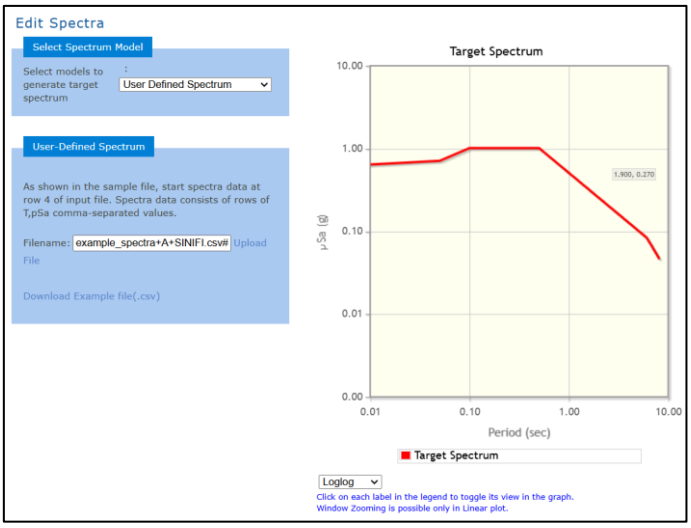
Şekil 9. Yatay elastik spektrum değerlerinin indirilmesi

AFAD üzerinden indirilen dosya ile PEER üzerinden indirilen dosyanın formatı farklıdır. Çalışılacak sahanın verileri PEER formatına göre düzenlendikten sonra kullanılabilmektedir. Düzenlenerek dosya içine kaydedilen veriler daha sonra PEER sayfasından "Dosya Seç" bölümü ile seçilerek "Upload" yapılmaktadır (Şekil 10).

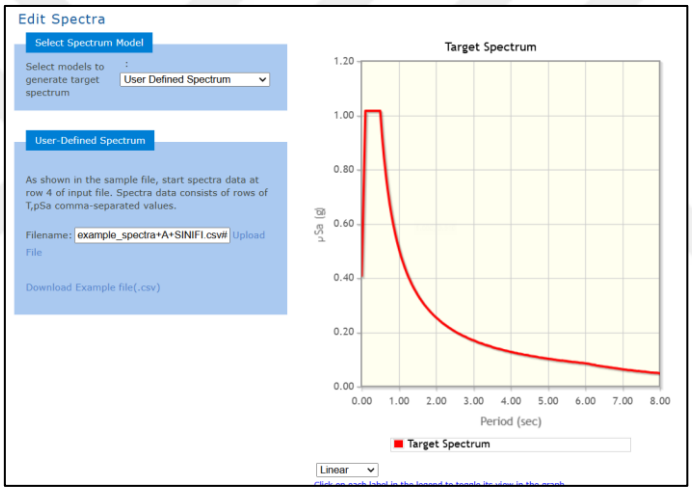


Şekil 10. Aktarılan verilerin sisteme yüklenmesi

Yükleme işleminden sonra alt kısımda bulunan "Submit" bölümüne tıklanarak oluşturulan tasarım spektrumu logaritmik olarak çizilmektedir (Şekil 11). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde tasarım spektrumu logaritmik olarak çizilmediğinden çizim Lineer olarak yeniden çizdirilmektedir (Şekil 12).

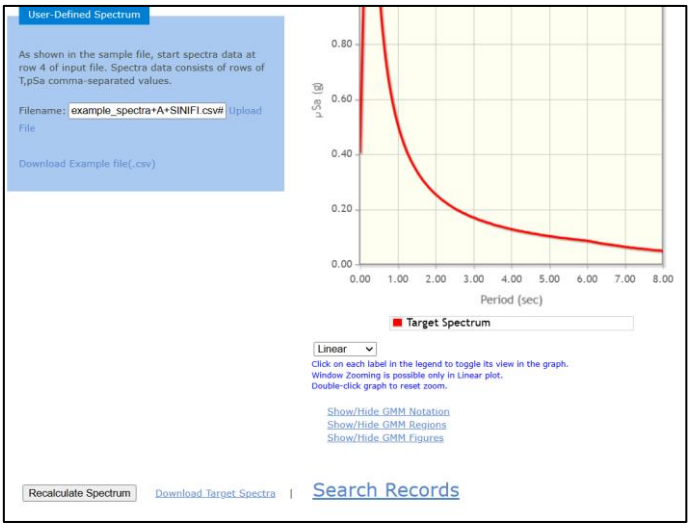


Şekil 11. Logaritmik tasarım spektrumu



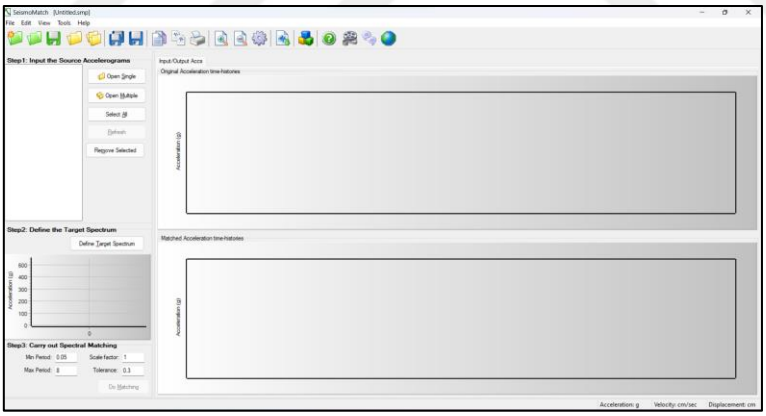
Şekil 12. Lineer tasarım spektrumu

Tasarım spektrumu Lineer olarak yeniden çizdirildikten sonra “Search Records” bölümünden deprem kaydı aramasına başlanılabilmektedir (Şekil 13). Deprem kaydı araması için ilgili bilgiler girildikten sonra listelenen deprem kayıtları arasından 11 adet H1 ve 11 adet H2 yönlü olmak üzere toplam 22 adet uygun deprem kaydı seçilmektedir.



Şekil 13. Deprem kaydı arama

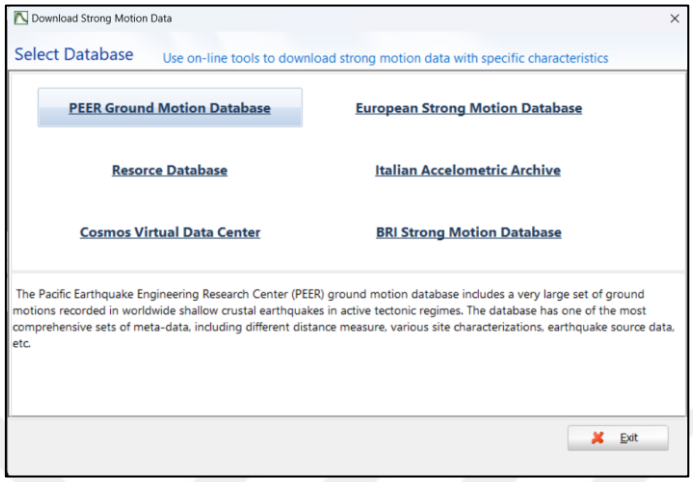
Seismomatch programı indirilen ham deprem verilerini belirli hedef tepki spektrumuna uyacak şekilde ayarlamaktadır. PEER Ground Data Motion sayfasından indirilip seçilen ham deprem kayıtları gruplar halinde yüklenip hedef spektruma göre düzenlenmelidir (Şekil 14).



Şekil 14. Seismomatch programı

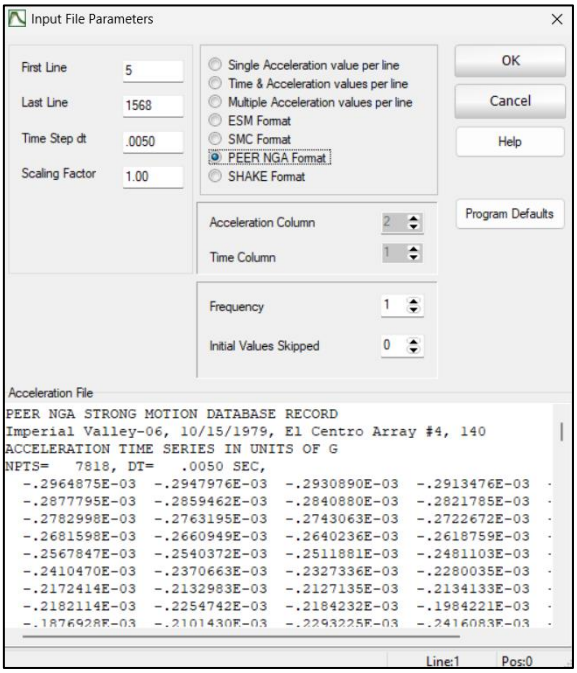
SeismoMatch programı açıldığında karşımıza üç aşamalı bir analiz süreci çıkmaktadır. İlk aşamada indirilen deprem kayıtlarının programa çekilmesi, ikinci aşamada hedef spektrumun belirlenmesi, son aşamada ise match ayarları ve match yapma adımı bulunmaktadır. İndirilmiş deprem kaydı olmaması durumunda Download Strong Motion Data bölümüne gidilerek tercih edilen seçenekten deprem kaydı indirilebilmektedir. Ham

deprem verilerinin daha önce PEER Ground Motion Database sayfasından indirilmesi durumunda ise bu bölümde bir çalışma yapılması gerekmemektedir (Şekil 15).



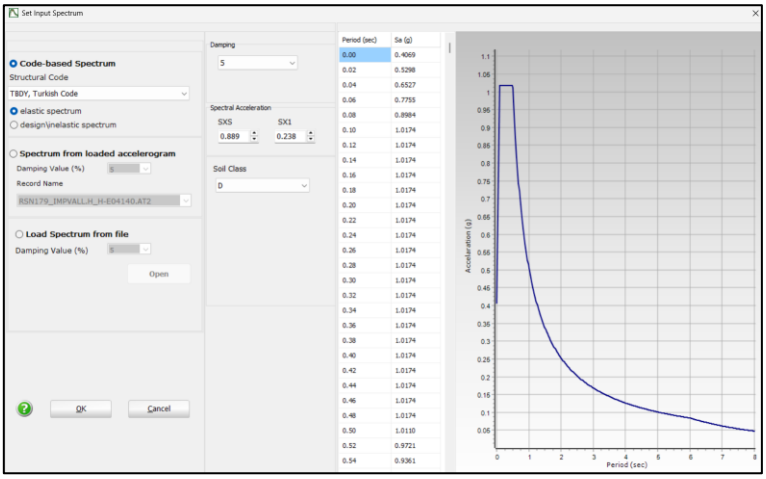
Şekil 15. Deprem verilerinin indirilmesi

İndirilen ham deprem verileri tek tek seçilerek formatına uygun şekilde programa aktarılmalıdır. Aktarılan verilerin format bilgilerinin doğruluğu kontrol edilmelidir (Şekil 16).



Şekil 16. Deprem verilerinin programa aktarılması

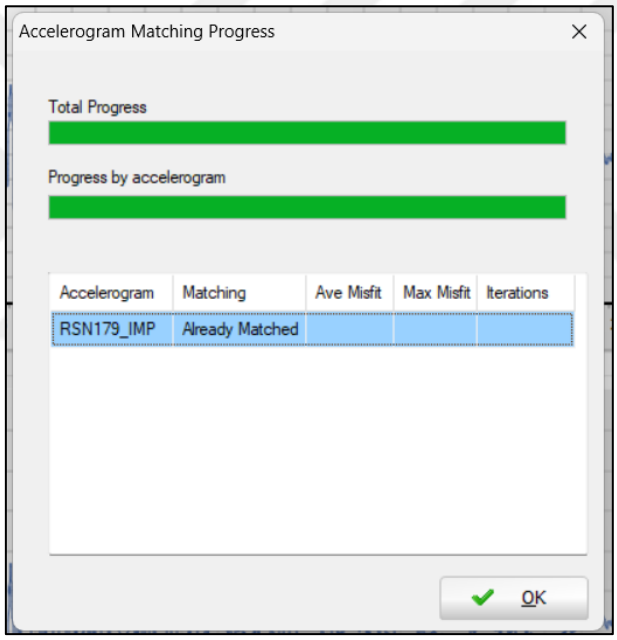
TBDY‘e (2018) göre indirilen deprem kayıtlarının ölçeklendirilmesi gerekmektedir. İndirilen deprem kayıtlarının sürelerinin tamamen eşit ya da yakın olması durumunda bir sorun bulunmamaktadır ancak seçilmiş olunan deprem kayıtlarının süreleri arasında büyük bir fark olması halinde süre farkından dolayı program çözümleme yapamamakta ve hata vermektedir. Hatayı düzeltmek için deprem kayıtları incelenip uygun bir zaman aralığı belirlenmelidir. Zaman aralığı belirlenirken depremlerin yıkıcılığının hangi süre zarfında daha etkili olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Deprem kayıtlarına göre çözüm değişebilmektedir. Bazı deprem verilerinin First Line (ilk satır) bazı depremlerin de Last Line (son satır) üzerinde değişiklik yapılması gerekmektedir. Unutulmamalıdır ki deprem kayıtları ayrı ayrı da analiz edilebilmektedir ancak bu şekilde aradaki süre farkını görüp müdahale etmek daha doğru bir çözümdür. Deprem kayıtlarının programa indirilmesi işlemi bittikten sonraki aşama hedef spektrumun belirlenmesidir. Structural Code bölümünden çalışması planlanan hesap yöntemi seçilmelidir. TBDY, Turkish Code seçildikten sonra SXS, SX1 ve zemin sınıfı girilmelidir. Daha önce AFAD sayfası üzerinden çalışma yapılacak bölgenin bilgileri girilerek elde edilen özet rapor ya da detaylı rapor üzerinden S_{DS} değerini SXS ve S_{D1} değerini SX1 yerine değerleri alınarak girilmektedir. Alınan deprem kayıtlarının taban kayası üzerinden alındığı kabul edildiğinden taban kayası olarak belirlenen zemin sınıfı girilmelidir. Değerler girildikten sonra hedef spektrum otomatik olarak program tarafından çizilmektedir (Şekil 17).



Şekil 17. Hedef spektrum eğrisi

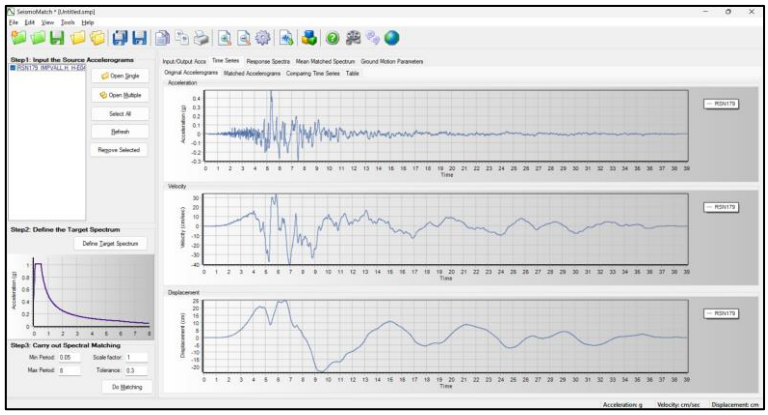
Hedef spektrum çizdirildikten sonra son aşama olan match aşaması kalmaktadır. Burada unutulmaması gereken durum 3.aşamada yapılan herhangi bir değişiklik durumunda

hedef spektrum için girilen değerlerin sıfırlanacağıdır. Analizden yapmadan önce yapılan herhangi bir değişiklikten sonra değerler yeniden kontrol edilmeli ve düzeltilmelidir. Do Matching bölümüne tıklandığında program işlemeye başlamaktadır. Match işlemi bittikten sonra Matching bölümünün altında Converged yazısı görülmektedir. Converged eşleme işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştiği anlamında gelmektedir (Şekil 18). Bu yazının gelmemesi durumunda başarısız olduğu unutulmamalıdır. Bu durum ile karşılaşılması halinde Iterations (İterasyon) kontrol edilmelidir. Program ayarlarında belirlediğimiz iterasyon sayısından fazla iterasyona ihtiyaç olduğu ve bu durumda da eşleme işleminin yarım kalmasından dolayı hata olabilmektedir. İzin verilen iterasyon sayısının arttırılması ile bu hata ortadan kaldırılabilmektedir.



Şekil 18. Eşleme (Match) işleminin sonucu

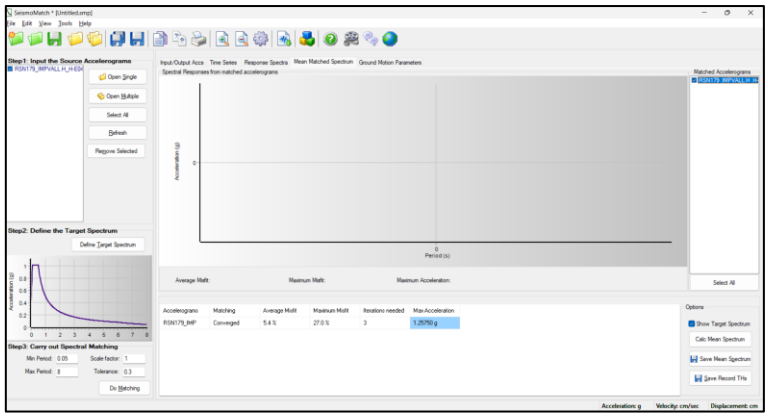
Match işleminin bitmesinin ardından program bize işlenmiş ve işlenmemiş verileri aynı anda göstermektedir. “Time Series” bölümüne gidildiğinde girilen deprem verilerinin ivme, zaman ve yer değiştirmeye göre zaman tanım alanında çizilmiş grafikler olduğu görülmektedir (Şekil 21). Aynı şekilde eşlenmiş veriler de incelenebilmektedir. İstenilmesi durumunda “Table” bölümünden veriler kopyalanıp istenilen yerde kullanılabilmektedir.



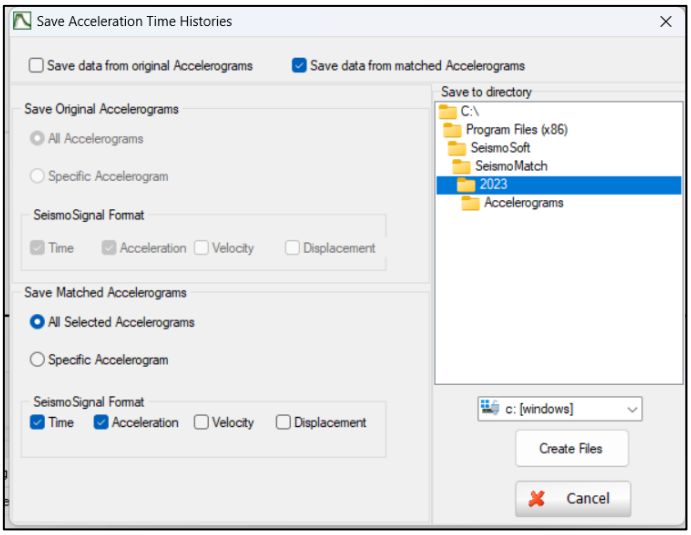
Şekil 19. Ham ve işlenmiş deprem verilerinin kıyaslanması

"Mean Matched Spectrum" bölümüne gidilerek tüm deprem kayıtları seçildikten sonra "Save Record THs" bölümüne tıklanılmalıdır. Bunu yapmaktaki amacımız daha önce "Time Series" bölümünde tablodan tek tek indirilen değerlerin burada toplu olarak indirilebilmesidir (Şekil 20). Match olmuş deprem verileri indirilmek istendiğinden "Save data from matched Accelerograms" bölümü seçilmelidir. İndirilmek istenen formatta zaman ve ivme seçilerek işlenmiş deprem verileri indirilmektedir (Şekil 21).

İndirilen text dosyası kontrol edilip herhangi bir eksiklik olması durumunda analiz ve indirme işlemi tekrarlanmalıdır. Tüm bu işlemlerden sonra işlenmiş deprem verileri kullanıma hazır olmaktadır.



Şekil 20. Eşlenmiş deprem verilerinin indirilmesi



Şekil 21. Eşlenmiş deprem verilerinin indirilmesinde dosya seçimi

1.4. Bir Boyutlu ve İki Boyutlu Sahaya Özel Zemin Davranış Analizi

Sahaya özel zemin davranış analizleri, taban kayasında tanımlanan deprem yer hareketinin zemin tabakaları boyunca değişimini ve zemin yüzeyindeki deprem yer hareketini belirlemek üzere yapılır. Bina temeli ve yakın çevresinde zemin ortamının yaklaşık olarak yatay tabakalardan oluştuğu durumlarda, sahaya özel zemin davranış analizleri için esas alınan tek boyutlu yatay tabakalı serbest zemin modeli kullanılabilir. Aksi durumlarda iki veya üç boyutlu zemin modelleri kullanılacaktır (TBDY, 2018).

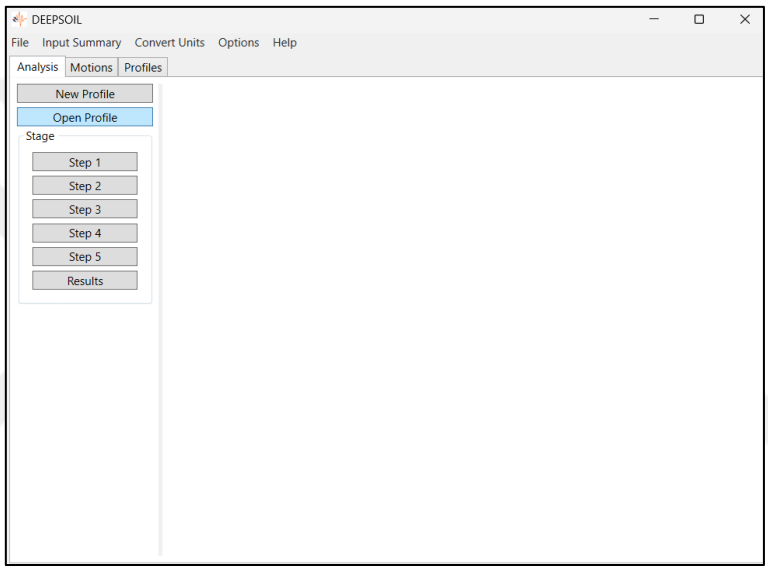
1.4.1. DeepSoil ile Bir Boyutlu Analiz

DEEPSOIL, aşağıdaki seçenekleri gerçekleştirebilen tek boyutlu bir saha tepkisi analiz programıdır:

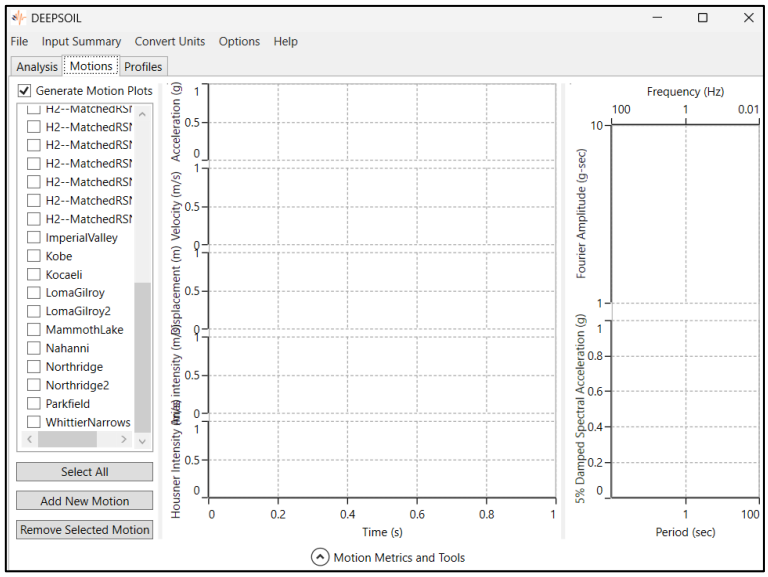
- Gözenek suyu basıncının olduğu ve olmadığı 1 boyutlu doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri
- Konvolüsyon ve dekonvolüsyon dahil 1-D eşdeğer doğrusal frekans tanım alanı analizleri,
- 1-D doğrusal zaman ve frekans alanı analizleri (Hashash vd., 2020).

Deepsoil programı açıldığında kullanıcı arayüzünde “Analysis”, “Motions” ve “Profiles” olan 3 ana bölümden oluştuğu görülmektedir. Bu bölümler analiz süresi boyunca kullanıcıyı yönlendirmektedir.

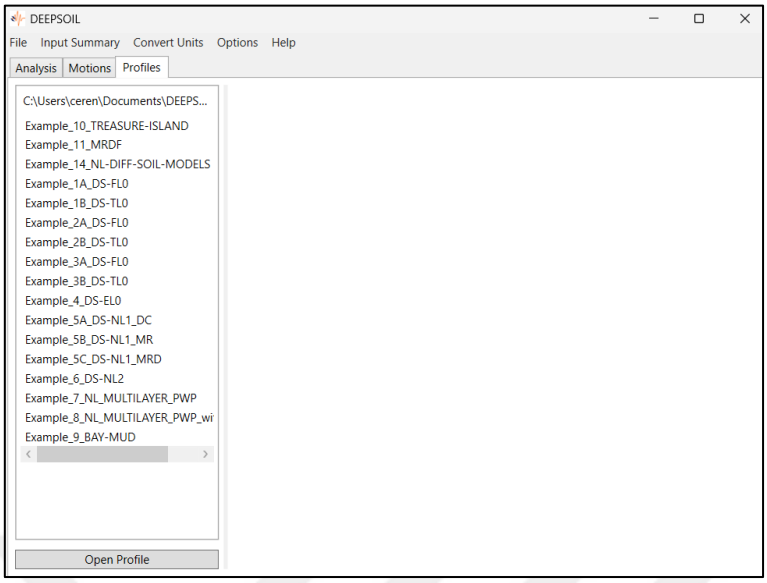
“Analysis” bölümünde daha önceden kaydedilmiş bir zemin modeli açılabilmekte ya da yeni bir zemin modeli oluşturulabilmektedir (Şekil 22). “Motion” bölümünde ise program arayüzünde kayıtlı deprem verileri bulunmakta ve yeni kayıtlar programa kaydedilebilmektedir (Şekil 23). “Profiles” bölümünde programda kayıtlı halde bulunan zemin modelleri bulunmaktadır (Şekil 24).



Şekil 22. Analiz bölümü



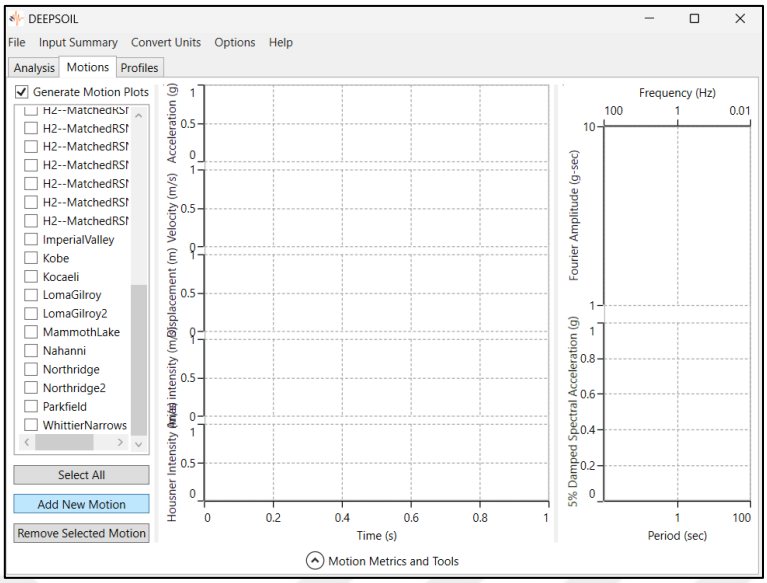
Şekil 23. Deprem kaydı bölümü



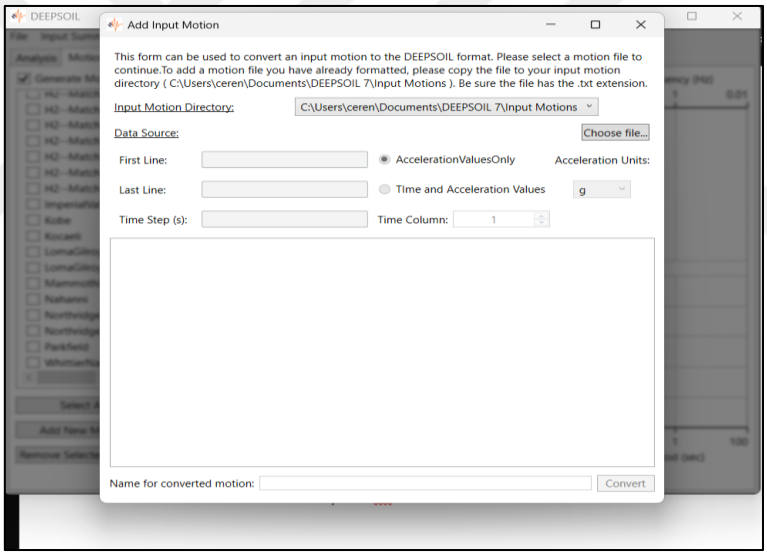
Şekil 24. Profiller bölümü

Bu 3 ana bölüm dışında programın en üst kısmında “File, Input Summary, Convert Units, Options ve Help” seçenekleri bulunmaktadır. “File” bölümünden kaydedilmiş dosyalar ya da yeni dosyalar açılabilmektedir. “Input Summary” bölümü bir zemin modeli girilmediği takdirde çalışmayacaktır. Zemin modeli olması durumunda bu seçenekten tabakalar, zemin kayası, deprem kayıtları, sönümleme ve analizler incelenebilmektedir. “Convert Units” bölümünden çalışılacak sistemin Metric mi English mi olacağı seçilmektedir. “Options” bölümünden grafik renkleri, çizgi kalınlıkları, program dili vb. özellikler değiştirilebilmektedir. “Help” bölümünden ise program hakkında öğrenilmek istenen ve güncelleme gibi bilgilere ulaşabilmektedir.

Seismomatch programında eşlenen deprem verileri Deepsoil programında “Add New Motion” bölümünden programa eklenmektedir (Şekil 25). Seismomatch programında eşlenen deprem verileri programa tek tek “Choose file” bölümünden seçilmektedir (Şekil 26). Deprem verileri ilgili bölümler doldurularak tek tek programa kaydedilmelidir.



Şekil 25. Deprem kaydı ekleme bölümü



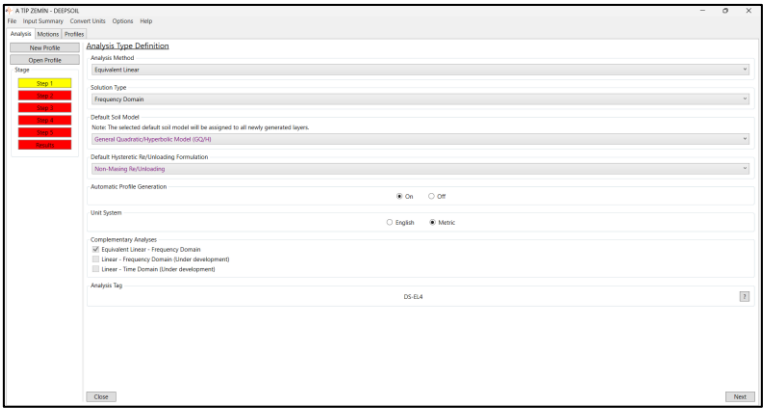
Şekil 26. Dosya seçme bölümü

Yapılacak analiz metoduna göre zemin modeli, histerik yeniden doldurma boşaltma formülasyonu ve boşluk suyu basıncı girdileri değişmektedir. Yapılacak seçimlerin uygunluk durumu Tablo 1'de verilmiştir (Hashash vd., 2020).

Tablo 1. Deepsoil 7'de mevcut analiz seçeneği

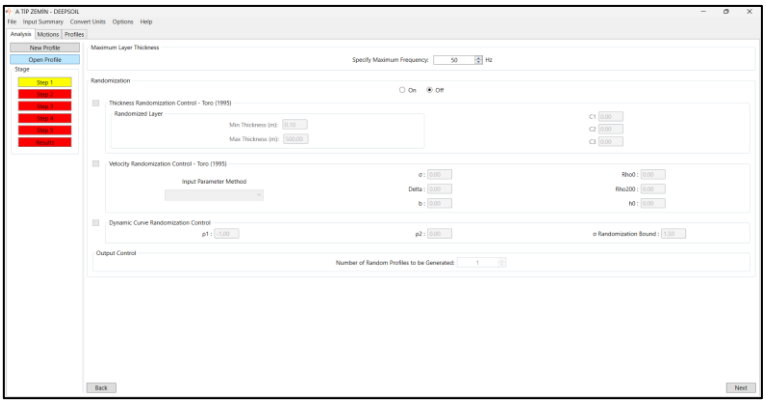
<table>
<tr><th colspan="2">Analiz Metodu</th><th>Zemin Modeli</th><th>Histerik Yeniden/Boşaltma Formülasyonu</th><th>Boşluk Basıncı Seçenekleri</th></tr>
<tr><td>Lineer</td><td>Frekans ve Zaman Alanı</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td>Eşdeğer Lineer</td><td>Frekans Alanı</td><td rowspan="2">• Genel İkinci Dereceden/Hiperbolik Model (GQ/H)
• Basınca Bağlı Modifiye Kondner Zelesko (MKZ)
• Yee vd. (2013)
• Ayrık Noktalar (Eşdeğer Lineer)
• Kullanıcı Tanımlı (UMAT)</td><td rowspan="2">• Masing Olmayan
• Masing</td><td>-</td></tr>
<tr><td>Nonlineer</td><td>Zaman Alanı</td><td>• Aşırı Gözenek Suyu Basıncı
• Dağılmayı Etkinleştirme
• Profilin Üst Kısmını Geçirgen Hale Getirme
• Profilin Alt Kısmını Geçirgen Hale Getirme</td></tr>
</table>

Bu çalışma kapsamında Eşdeğer Lineer Analiz için yeni bir zemin modeli oluşturulmalıdır. Açılan sayfada Eşdeğer Lineer analiz seçildikten sonra çözüm şekli otomatik olarak frekans tanım alanında olmaktadır. Zemin modeli "General Quadratic/Hyperbolic Model (GQ/H)" ve hiperbolik fonksiyon "Non-Masing Re/Unloading" seçilmektedir. Oluşturulacak zemin profilinin tabaklara otomatik olarak bölünmesi için "Automatic Profile Generation" seçeneği on yapılmalıdır. Bu aşama geçilmeden önce "Unit System" bölümünde metrik seçimi atlanmamalıdır (Şekil 27).



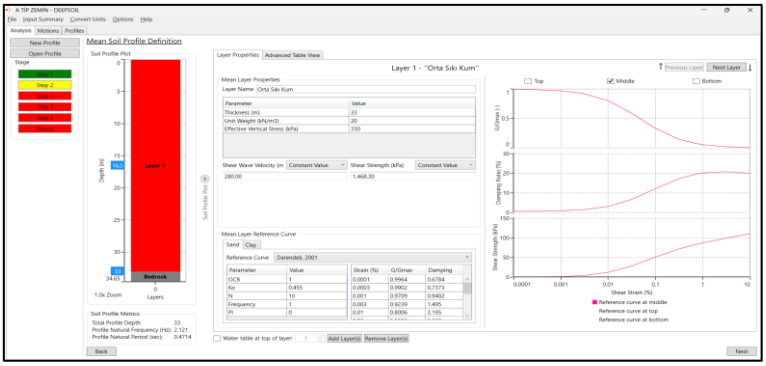
Şekil 27. Zemin modeli oluşturulması

Analizin sonraki aşamasında oluşturulacak zemin modeli tabakalarının bölünme yöntemi seçilmektedir (Şekil 28). Sonrasında zemin modeli ilgili parametreler girilerek oluşturulmaktadır.



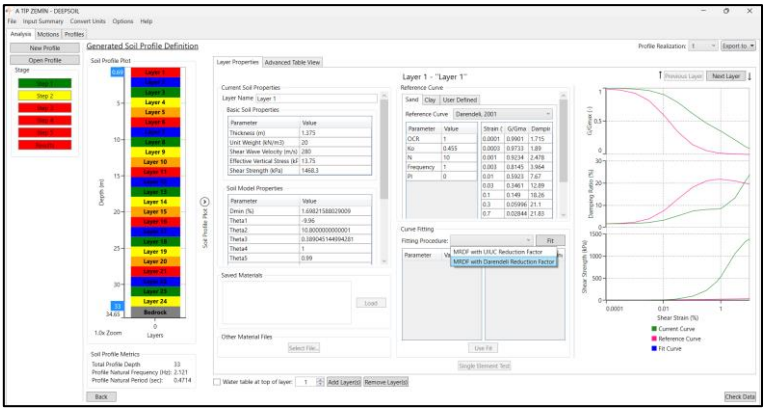
Şekil 28. Zemin modeli tabaka bölünme yöntemi

Referans eğrisini çizdirmek için öncelikle tabaka özelliğinin seçilmesi gerekmektedir. Çalışılan zemin modeli kohezyonlu ise Clay kohezyonsuz ise Sand seçilmektedir. Referans eğrisi Darendeli (2001) seçildikten sonra bizden istenen aşırı konsolidasyon oranı ve K_0 değeri girildikten sonra eğer varsa diğer tabakalara da aynı işlem uygulanmalıdır. Başka tabaka olmaması ya da olan tabakaların özelliklerinin girilmesi halinde sonraki aşamada anakayanın özellikleri girilmektedir. İstenildiği zaman "Previous Layer" ve "Next Layer" seçenekleriyle ya da tabakaların üzerine tıklayarak tabakalar arasında geçiş sağlanabilmektedir (Şekil 29).



Şekil 29. Tabakalar arası geçiş

Anakaya özellikleri girildikten sonra daha önceki aşamada belirlenen frekans değerine göre tabaka ya da tabakalar program tarafından otomatik olarak bölünmektedir. Tabaka ya da tabakaların özelliklerinin girildiği önceki bölümde referans eğrisi Darandeli (2001) seçildiğinden Reference Curve Darandeli, 2001 seçilerek oluşturulan tabaka ya da tabakalar için "MRDF with Darendeli Reduction Factor" ile "Curve Fitting" yapılması gerekmektedir (Şekil 30).



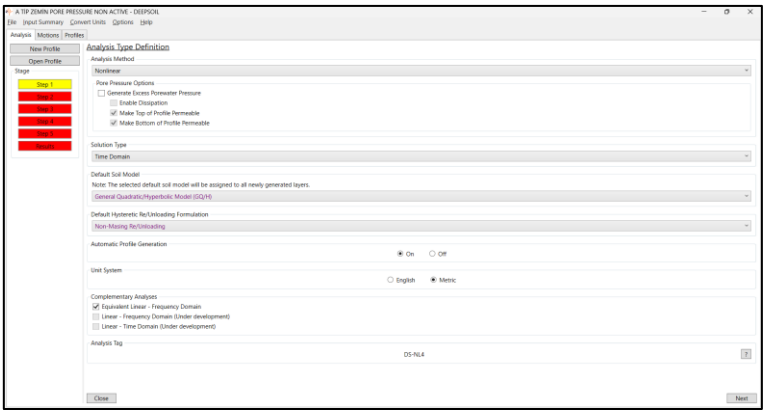
Şekil 30. Eğri uydurma aşaması

"Check Data" seçeneğine tıklanarak yapılan tüm işlemler bu aşamada kontrol edilmektedir. Bir yanlışlık göze çarpmaması halinde sonraki aşama olan deprem kayıtlarının seçilmesi adımına atlanılmaktadır.

TBDY (2018)'e göre 11 adet Kuzey-Güney ve 11 adet Doğu-Batı yönlü işlenmiş olan toplamda 22 adet deprem kaydı analiz için seçilmelidir. Kaydedilmiş deprem kayıtlarına tıklayarak analiz yapmak istediğimiz zemin modeli için deprem kaydı seçebilmekteyiz. Seçilen deprem kaydının ivme, hız, yer değiştirme, Arias yoğunluğu ve Housner yoğunluğu görülmektedir.

Eşdeğer Lineer analizde 4.aşama bulunmadığından program tarafından direkt olarak 5.aşamaya geçilmektedir. Burada analiz sonuçları hangi tabaka ya da tabakalar için öğrenilmek isteniyorsa seçmek mümkündür. Yapılacak seçimden sonra Analyze seçeneği ile analiz başlatılmaktadır. Analizin tamamlanmasının ardından "Export to Excel" seçeneği ile analiz sonuçları indirilebilmektedir.

Bu tez çalışmasında Non-Lineer Analiz için yeni bir zemin modeli oluşturulmalıdır. Nonlineer analiz seçildikten sonra çözüm şekli otomatik olarak zaman tanım alanında olmaktadır. "Zemin modeli General Quadratic/Hyperbolic Model (GQ/H)" ve hiperbolik fonksiyon "Non-Masing Re/Unloading" seçilmektedir. Oluşturulacak zemin profilinin tabakalara otomatik olarak bölünmesi için "Automatic Profile Generation" seçeneği on yapılmalıdır. Bu aşama geçilmeden önce "Unit System" bölümünde metrik seçimi atlanmamalıdır (Şekil 31).

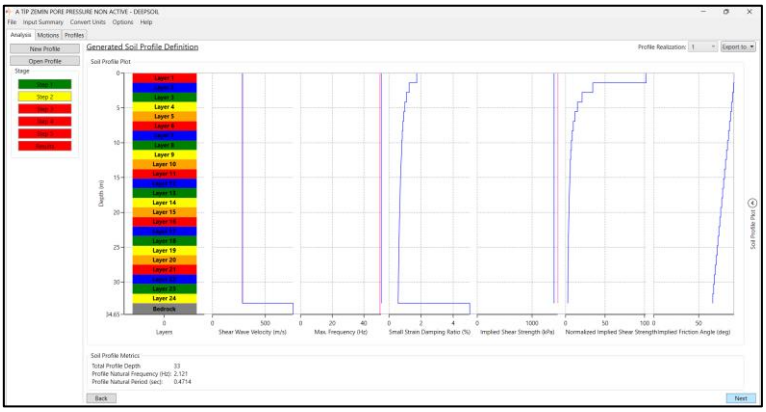


Şekil 31. Zemin modeli birim seçimi

Eşdeğer Lineer Analiz gibi burada da zemin modelinin tabakalara bölünmesi için yöntem seçildikten sonra zemin modeli ile ilgili parametreler girilmelidir. Girilen değerlerden sonra referans eğrisi çizdirmek için aynı şekilde model seçilmekte ve fit işlemi yapılmaktadır.

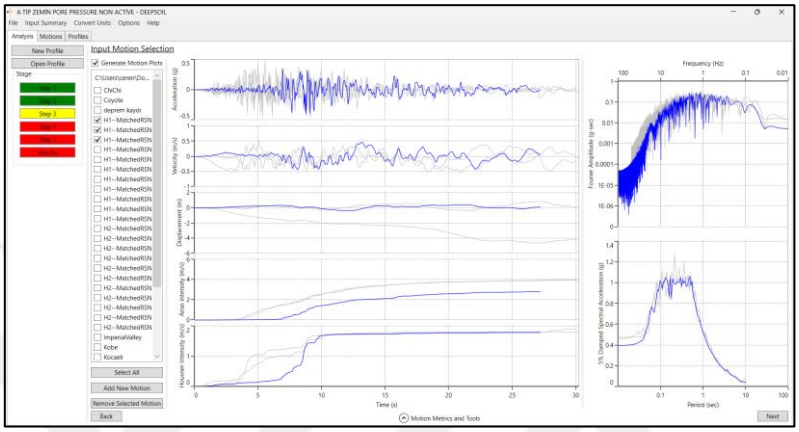
Fit bölümüne tıkladığımızda yeni değerler görülecekti ancak henüz bu değerler kullanılmamış olacaktı. “Curve Fitting” bölümünün sonuna gidildiğinde “Use Fit” seçeneği görülmektedir. Use Fit seçeneğine tıklandığında yeni değerler işlenmiş olacaktı. Darendeli,2001 modelini kullanıldığından eğriyi düzenlemek istenilsede herhangi bir değişiklik olmadığı görülürdü.

“Check Data” seçeneğine tıklanarak yapılan tüm işlemler bu aşamada kontrol edilmektedir. Bir yanlışlık göze çarpmaması halinde sonraki aşama olan deprem kayıtlarının seçilmesi adımına atlanılmaktadır (Şekil 32).



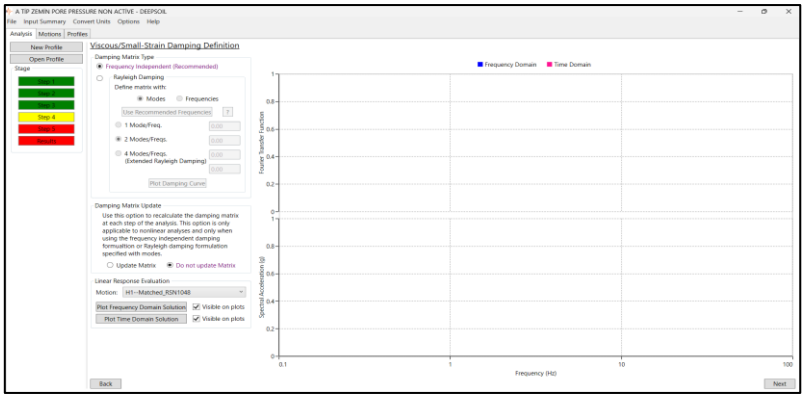
Şekil 32. Verileri kontrol etme bölümü

TBDY (2018)'e göre 11 adet Kuzey-Güney ve 11 adet Doğu-Batı yönlü işlenmiş olan toplamda 22 adet deprem kaydı analiz için seçilmelidir. Kaydedilmiş deprem kayıtlarına tıklayarak analiz yapmak istenilen zemin modeli için deprem kaydı seçebilebilmektedir. Seçilen deprem kaydının ivme, hız, yer değiştirme, Arias yoğunluğu ve Housner yoğunluğu görülmektedir (Şekil 33).



Şekil 33. Deprem kayıtlarının seçimi

Next bölümüne tıklanıldığında 4. aşamaya gelinmektedir. Eşdeğer Lineer analiz yapılıyor olsaydı bu aşama direkt olarak program tarafından atlanılacaktı. Bu aşamada herhangi bir değişiklik yapılmadan sonraki aşamaya geçilmektedir.



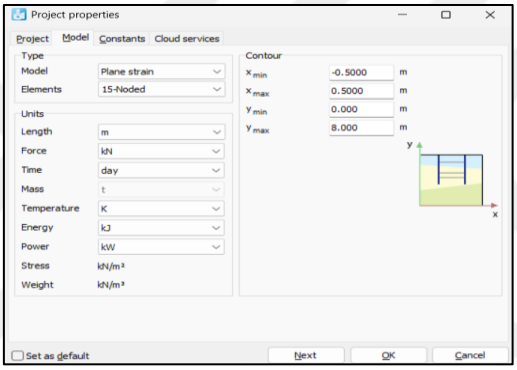
Şekil 34. Analizde 4. aşama

Analizin 5.aşamasına gelindiğinde iterasyon sayısı, analizin yapılacağı formül, hangi tabakalar için analiz sonucunun istendiği tabaka ya da tabakalar gibi seçenekler bulunmaktadır. Burada analiz sonuçları hangi tabaka ya da tabakalar için öğrenilmek

isteniyorsa seçmek mümkündür. Yapılacak seçimden sonra Analyze seçeneği ile analiz başlatılmaktadır. Analizin tamamlanmasının ardından "Export to Excel" seçeneği ile analiz sonuçları indirilebilmektedir.

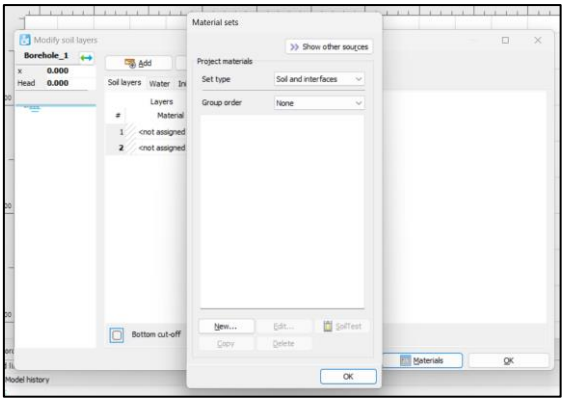
1.4.2. Plaxis 2D ile Bir Boyutlu ve İki Boyutlu Analiz

Plaxis 2D programının açılış sayfasında "Project" bölümünde çalışma dosyasının adı girildikten sonra "Model" bölümünde x_{min}=-0.5 m ve x_{max}=0.5 m değerleri yazıldığında programda yapılacak çalışma bir boyutlu analiz olarak hesaplanmaktadır (Şekil 35).



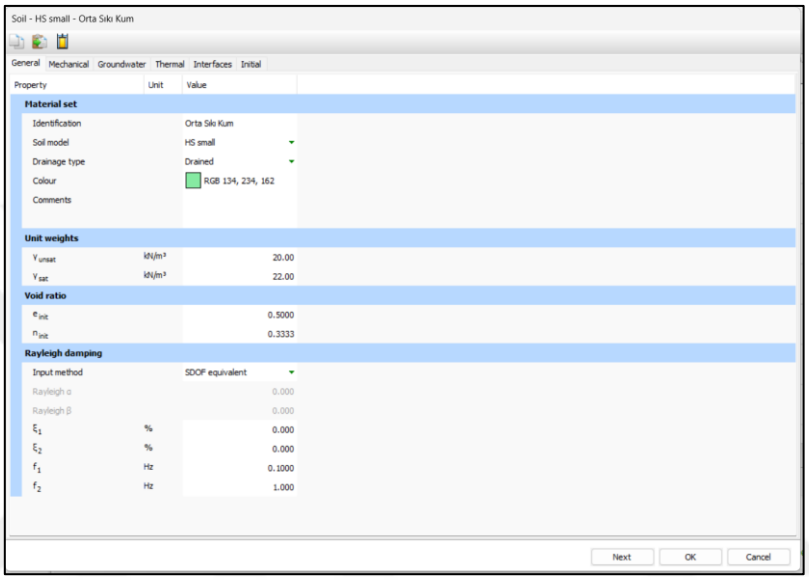
Şekil 35. Analiz için ilk bilgiler

"Borehole" seçeneği seçildikten sonra çalışılması planlanan zemin modelinin tabaka sayısı kadar tabaka eklenmelidir. Eklenen her bir tabaka için zemin özellikleri tanımlanmalıdır. "Materials" bölümünden new seçeneği ile tabakalar için zemin özelliklerine göre ilgili değerler girildiğinde modeller oluşturulmaktadır (Şekil 36).



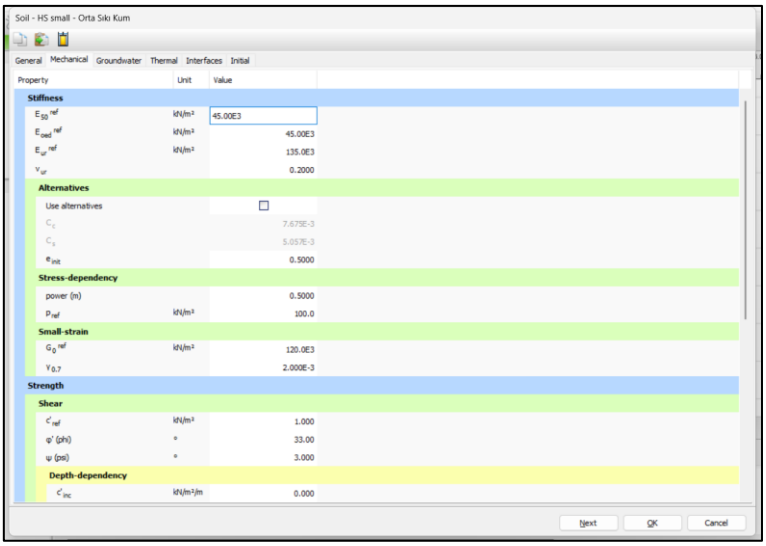
Şekil 36. Zemin modelinin oluşturulması

Açılan sayfada ilk olarak “General” bölümünde zemin modeli için oluşturulacak tabakanın adı girilmektedir. Oluşturulacak tabaka tipi için uygun zemin modeli tipi seçilmelidir. Drenaj tipi kaba daneli zeminle çalışılması halinde drenajlı aksi halde drenajsız seçilmelidir. Zeminin birim hacim ağırlığı ve doygun birim hacim ağırlığı girildikten sonra “General” bölümü tamamlanmaktadır (Şekil 37).



Şekil 37. Zemin modelinde “Genel” bölümü

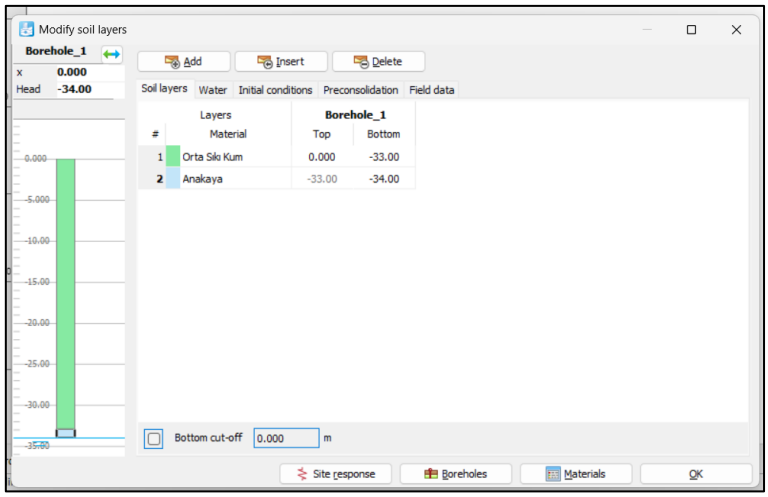
Sonraki aşamada “Mechanical” bölümünde “Stiffness” bölümündeki değerler istenildiği takdirde hesaplanabilir ya da *Plaxis 2D Material Models* kitapçığındaki referans değerler çalışılacak zemin modeli tipi ve birim hacim ağırlık değerlerinin uyması halinde örnek alınarak girilebilmektedir. “Stress-dependecny” bölümünde bulunan power (m) ve p_{ref} değerleri girildikten sonra “Strength” bölümünde c'_{ref} değeri çalışılan zemin modelinin kaba daneli zemin olması dolayısıyla da kohezyonsuz zemin olması sebebiyle 1 olarak girilmelidir. Çalışılan zemin modeli için korelasyonlar ile belirlenen φ’ (phi) değeri ve buna bağlı olarak da Ψ değeri girilmelidir. (Şekil 38).



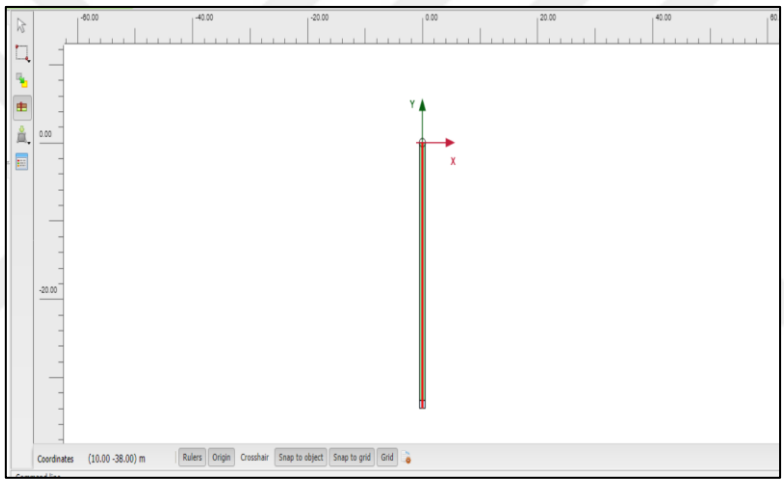
Şekil 38. Zemin modelinde "Mekanik" bölümü

Zemin modelindeki anakayayı tanımlamak adına yeni bir zemin modeli oluşturmak için aynı işlemler sırasıyla tekrarlanmaktadır. "New" seçeneği ile açılan sayfada modelin ismi anakaya girildikten sonra zemin modeli Linear Elastic, drenaj tipi için ise drenajlı seçeneği seçilmektedir. Zemin modelinin tipi seçildikten sonra anakaya birim hacim ağırlığı ve doygun birim hacim ağırlığının değerleri girilmektedir. "Mechanical" bölümünde Stiffnes değerleri girildikten sonra OK seçeneğine tıklanıldığında anakaya için model oluşturmuş olmaktadır.

Zemin modelleri için oluşturulan tabakalar ilgili zemin katmanları için seçilmelidir. Çalışılan zemin modelinde su olmadığı durumda "Head" bölümüne anakayanın derinlik değeri, su olması durumunda da olduğu derinlik değeri girilmelidir (Şekil 39). OK seçeneğine tıklanıldığında oluşturulan zemin model karşımıza çıkmaktadır (Şekil 40).

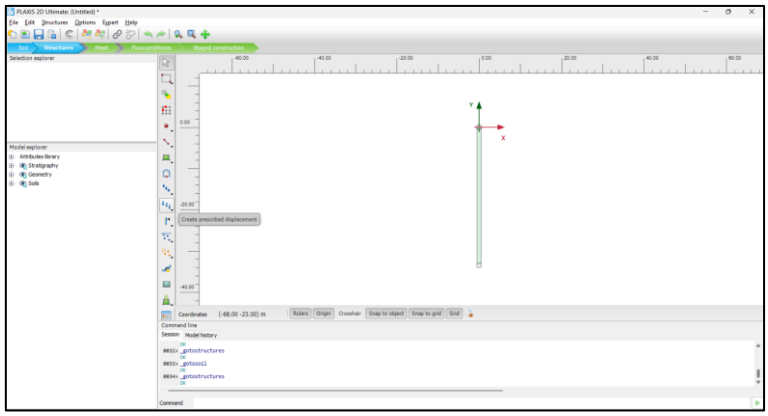


Şekil 39. Oluşturulan modellerin zemin modeline aktarılması



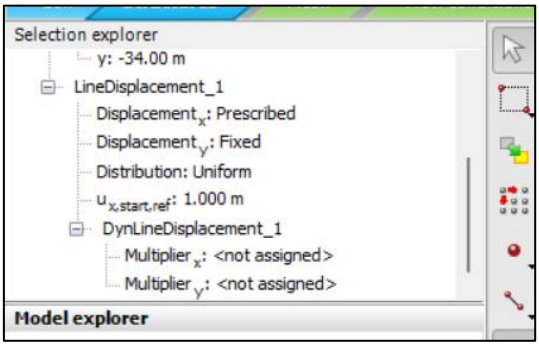
Şekil 40. Oluşturulan zemin modeli sondaj deliği

"Borehole" oluşturulduktan sonra analizdeki "Soil" bölümü tamamlanmış olmaktadır. Sonraki aşama olan Structures bölümüne geçilmektedir. Bu bölümde öncelikle "Create prescribed displacement" seçeneği ile "create line displacement" seçildikten sonra ana kayanın tabanı çizilmektedir. Bu şekilde sınır şartları belirlenebilmektedir (Şekil 41).



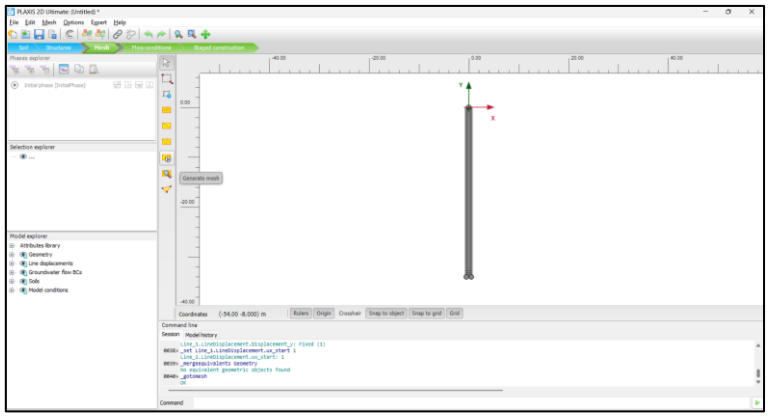
Şekil 41. Yapılar bölümü

"Create line displacement" çizildikten sonra programın sağ üstünde bulunan "Selection explorer" bölümünden seçilen geometri nesnelerinin özelliklerini ve atanan özelliklerini görüntülenebilmektedir. Geometri nesnelerini buradan gizleyebilir, görüntüleyebilir, etkinleştirebilir ve devre dışı bırakabilir. Oluşturulan zemin modelinde deprem etkisi altında ye değiştirme sonuçlarını x doğrultusunda incelemek istenildiğinden çizilen "Line displacement" çizgisine tıklanılarak y yönü için fixed ve x yönü için prescribed seçilmektedir (Şekil 42).

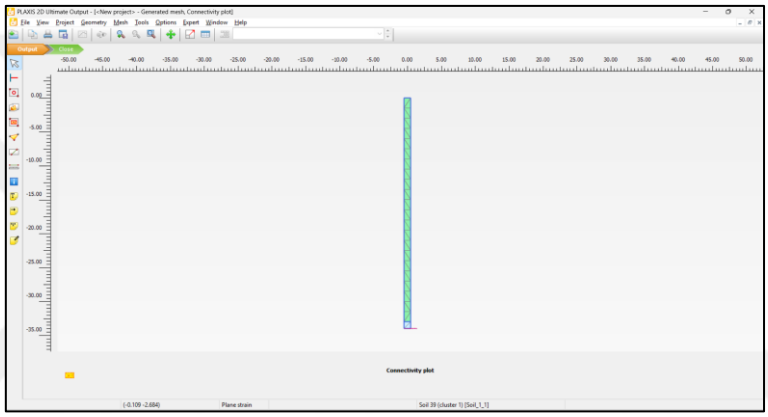


Şekil 42. Seçim penceresi bölümü

Yapılan bu işlemlerden sonra "Structures" bölümü tamamlandığından ve "Mesh" bölümüne geçilmektedir (Şekil 43). "Generate Mesh" ile zemin modeli ile "very coarse, coarse, medium, fine ve very fine" olmak üzere 5 farklı şekilde mesh yapılabilmektedir. Mesh işlemi bittikten sonra "View mesh" mesh seçeneği ile kontrol yapılabilmektedir (Şekil 44). Kontrol yapıldıktan sonra "Mesh" bölümü tamamlanmış olmaktadır.

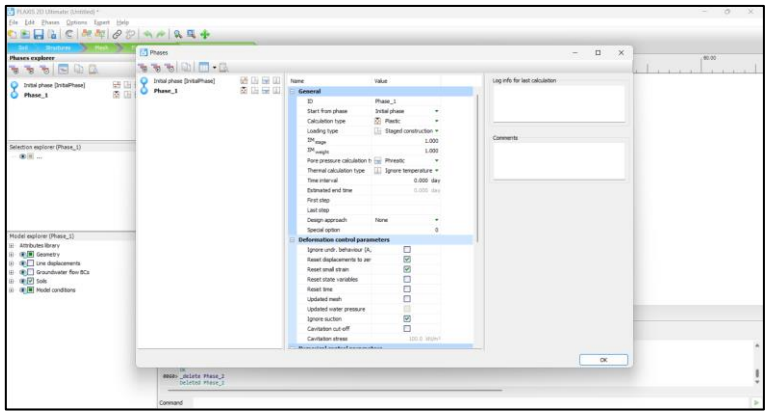


Şekil 43. Zemin modeli ağ (noktalara bölme) bölümü



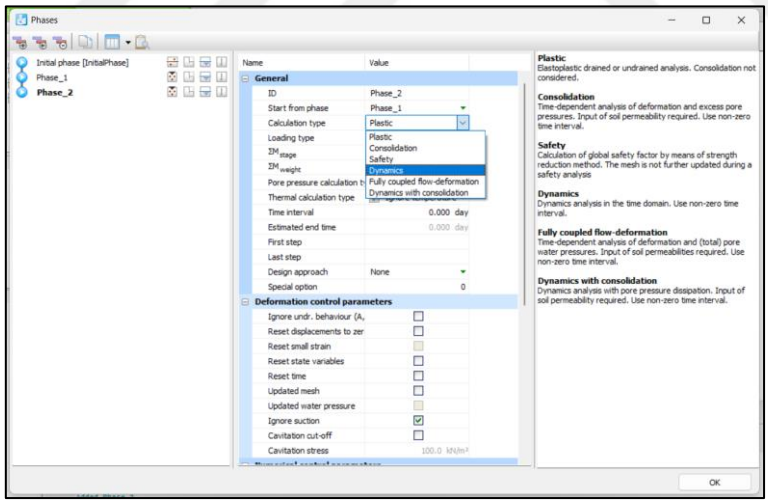
Şekil 44. Ağ görünüm bölümü

“Flow conditions” bölümüne geçildiğinde “Soil” aşamasında tanımlanan su koşullarından üretilen su seviyelerinin yanı sıra kullanıcı su seviyeleri de tanımlanarak değiştirilebilmektedir. Yapılacak çalışmada böyle bir hedef olmaması halinde herhangi bir işlem yapılması gerekmemektedir ve direkt olarak “Staged construction” bölümüne geçilebilmektedir. Staged construction bölümüne geçildiğinde “Phases explorer” penceresi görülmektedir. Phases explorer penceresinde hesaplama adımlarının listesi görülmektedir ve hesaplama aşamalarının birbirleri ile olan bağlılıkları burada görülmektedir. Öncelikle “Add phase” ile analizin ilk adımı olan zeminin kendi doğal hali olan Phase 1 eklenmelidir (Şekil 45). Phase 1 için herhangi bir düzenleme yapılmasına gerek yoktur.



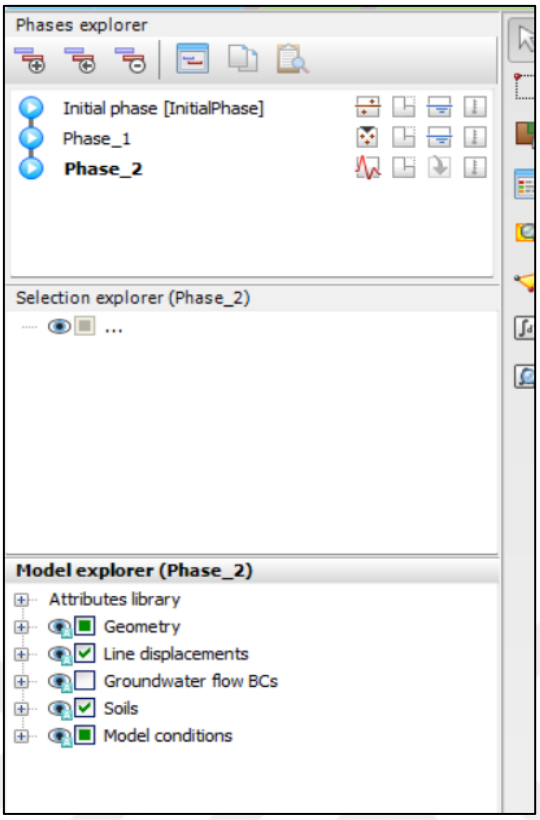
Şekil 45. Aşama 1

Phase 1 eklendikten sonra Phase 2 eklenmelidir. Phase 2 adımında zemin modeline etkiyecek olan deprem kaydı ve ilgili değerler girilmelidir bu sebeple eklenen Phase 2 hesap adımının üzerine tıklanılarak açılan pencereden "Calculation type" seçeneği ile "Dynamics" seçilmektedir (Şekil 46). Burada Phase 2' nin Phase 1'den başlayacağı görülmektedir. Bu da demek oluyor ki zemin modeli stabil haldeyken deprem etkisi altında kalması halinde zeminde oluşacak deformasyon gibi değerler hesaplanmaktadır.



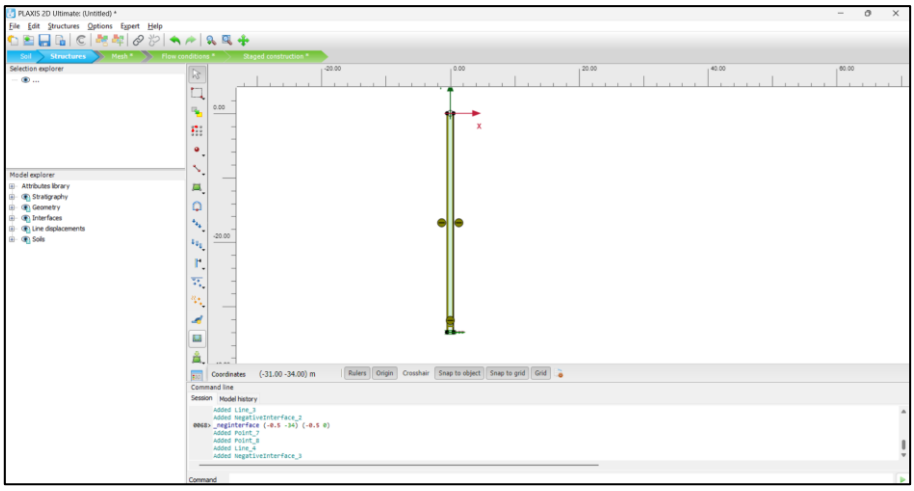
Şekil 46. Dinamik yükler

Phase 2 eklendikten sonra deprem etkisi altında zeminde harekete izin verilmesi için "Model explorer" bölümünde "Line displacements" seçeneği açılmalıdır (Şekil 47).



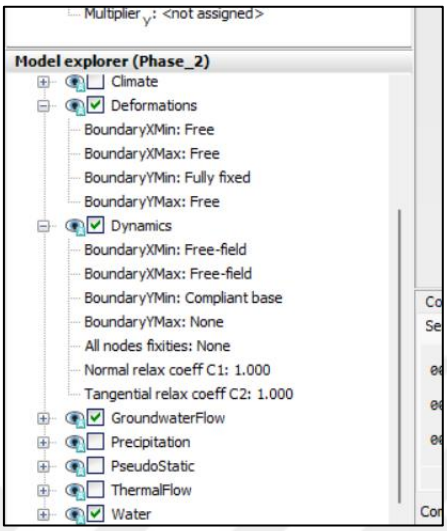
Şekil 47. Çizgisel yer değiştirmeler

Structeres bölümüne dönülerek “Create interfaces on the boundary” seçeneği ile sınır arayüzleri oluşturulmalıdır (Şekil 48). Yapılan değişiklikten ötürü yeniden mesh yapılması gerektiği için mesh bölümüne gidilerek generate mesh ile mesh işlemi yeniden yapılmaktadır.



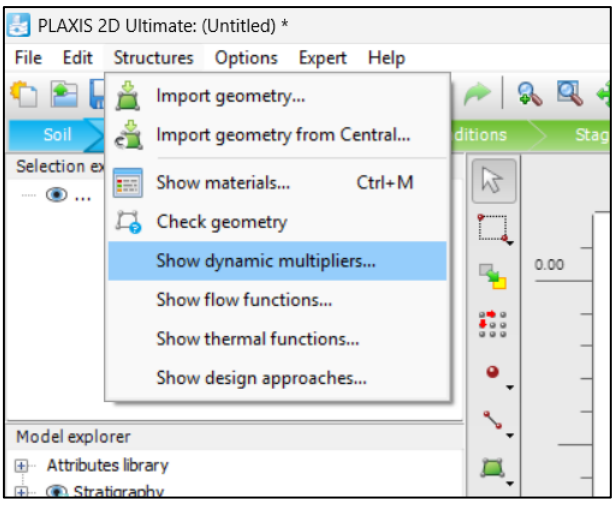
Şekil 48. Sınır arayüzleri oluşturma

Mesh işleminin yeniden yapılıp tamamlanmasının ardından staged construction aşamasına geri dönülerek Phase 2 yeniden seçilerek model explorer bölümünde ilgili düzenlemeler yapılmalıdır. (Şekil 49).



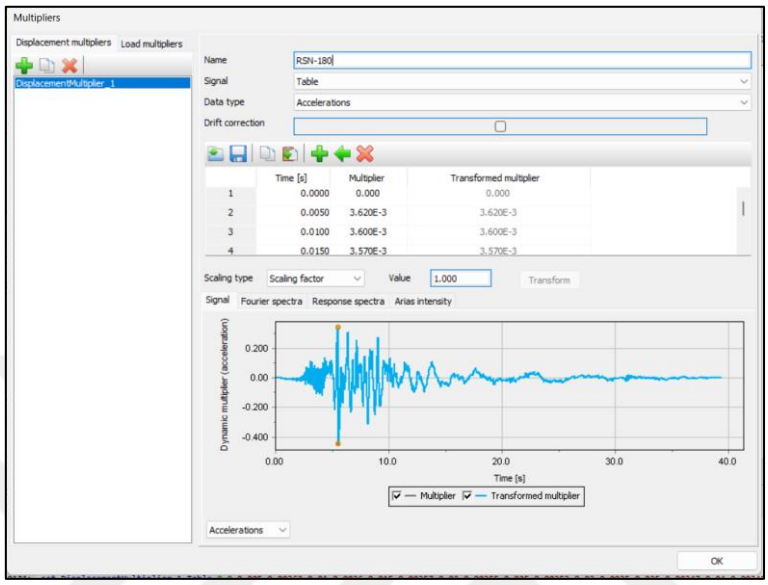
Şekil 49. Aşama 2 düzenleme

Tüm bu aşamalardan sonra deprem kayıtlarının programa işlenerek oluşturulan zemin modeli ile analizi kalmaktadır. Deprem kayıtlarını eklemek için öncelikle structures bölümüne geri dönülmelidir. "Structeres" bölümüne tıklanıldığında karşımıza "Show dynamic multipliers" seçeneği çıkmaktadır (Şekil 50). Bu seçenek seçildiğinde henüz herhangi bir deprem kaydının olmadığı görülmektedir.



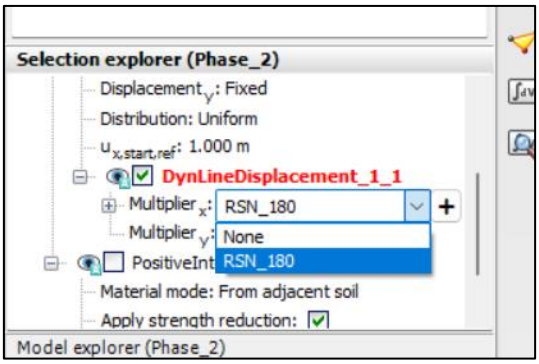
Şekil 50. Dinamik çarpanları gösterme

Açılan sayfada deprem ismi eklenecek deprem kaydının harmonik ya da tablo olacağı eklenmektedir. Veri tipi ivme seçildikten sonra “Open” seçeneği ile daha önce indirilen deprem kaydı seçilmektedir (Şekil 51).



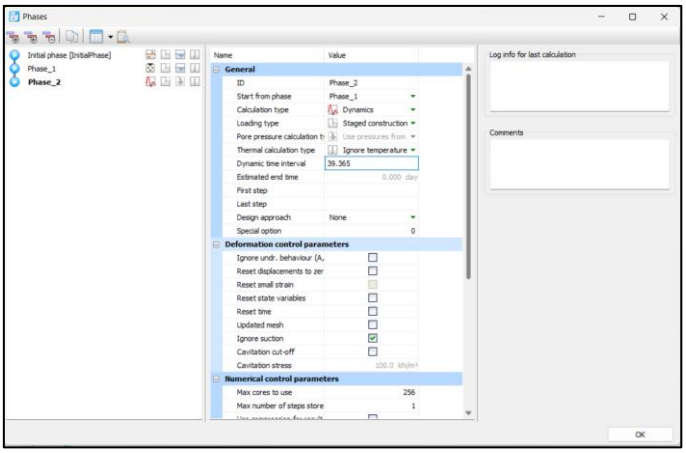
Şekil 51. Deprem kaydının girilmesi

Deprem verisi eklendikten sonra staged construction bölümüne geri dönülüp daha önce eklenilen displacement line seçilerek açılan “Selection explorer” bölümünden “DynLineDisplacement” aktifleştirildikten sonra Multipler$_x$ için eklenilen deprem kaydı seçilmelidir (Şekil 52).



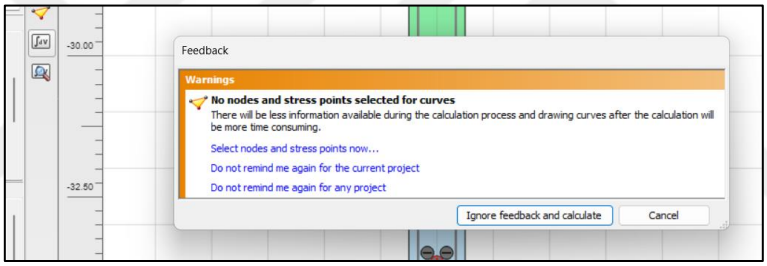
Şekil 52. RSN-180

Phase 2 içerisine girerek eklenen deprem kaydının süresi “Dynamic time interval” bölümüne yazılmalıdır (Şekil 53).

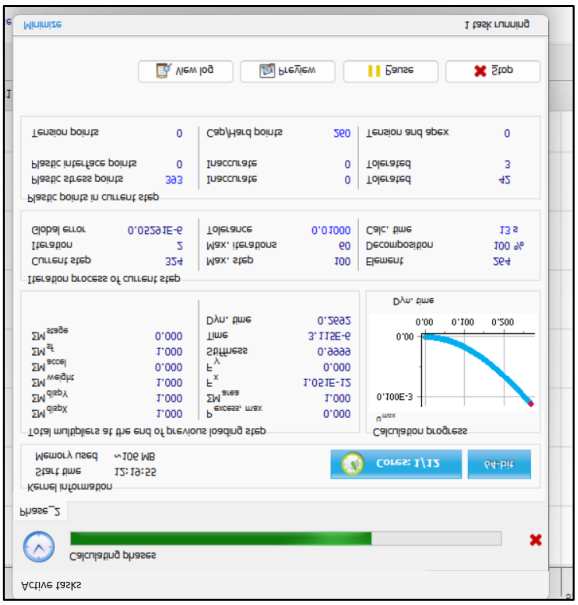


Şekil 53. Aşama 2'de deprem süresinin girilmesi

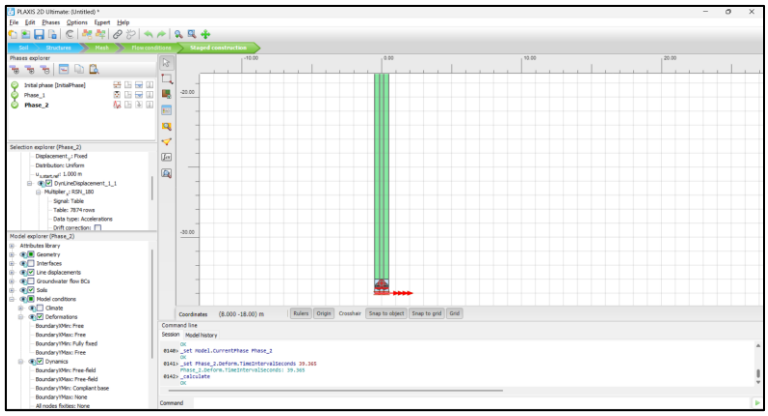
Tüm yapılan işlemlerden sonra “Calculate” seçeneğine tıklanıldığında analiz başlamaktadır (Şekil 54, Şekil 55 ve Şekil 56).



Şekil 54. Hesaplama



Şekil 55. Analiz süreci



Şekil 56. Analiz sonucu

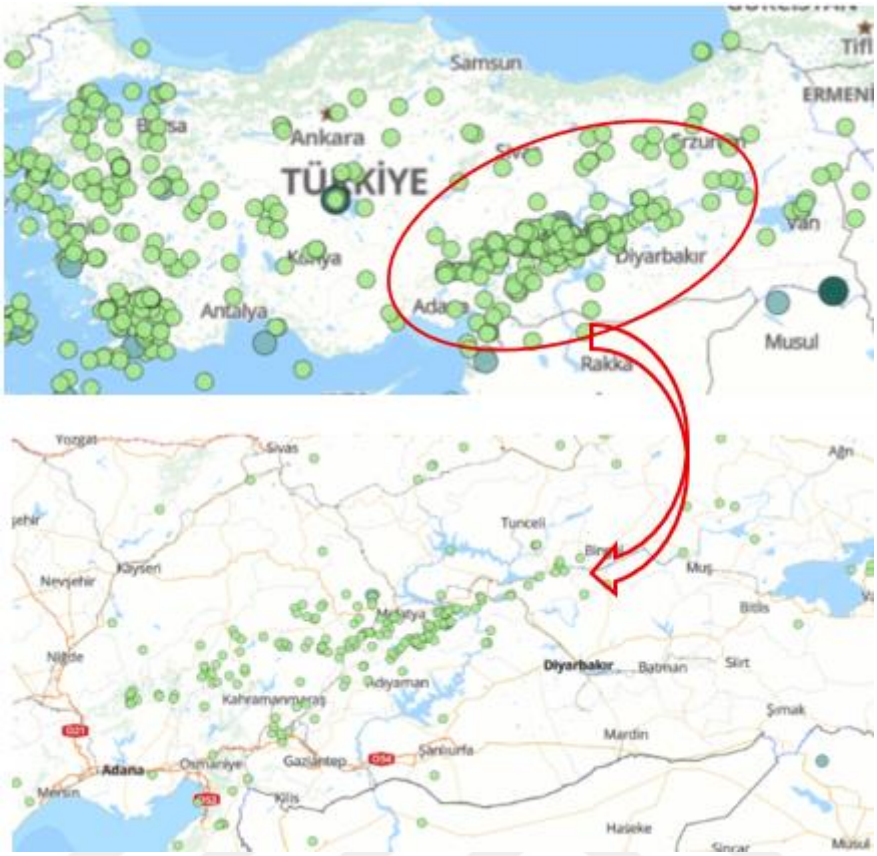
Plaxis 2D programında iki boyutlu analiz yapmak için x_{min} ve x_{max} değerlerinin büyütülmesi yeterlidir. Kalan tüm adımlar aynı şekilde yapılmaktadır. Tek boyutlu bir analiz yaptığımızı ve iki boyutlu analize çevirmek istediğimizi düşünelim. Soil bölümüne dönülerek "Project properties" bölümünde x değerlerini değiştirdikten sonra "Structures" bölümüne geçilerek yeniden "Create interfaces on the boundary" ve "Line displacements" yapılmalıdır. Zemin modelinde değişiklik yapıldığı için mesh işlemi de yeniden yapılmalıdır. Tüm bu işlemlerden sonra "Staged construction" bölümüne geçilerek analiz başlatılabilmektedir. Böylece aynı zemin modeli ve aynı deprem için hem bir boyutlu hem iki boyutlu analiz kolaylıkla yapılabilmektedir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

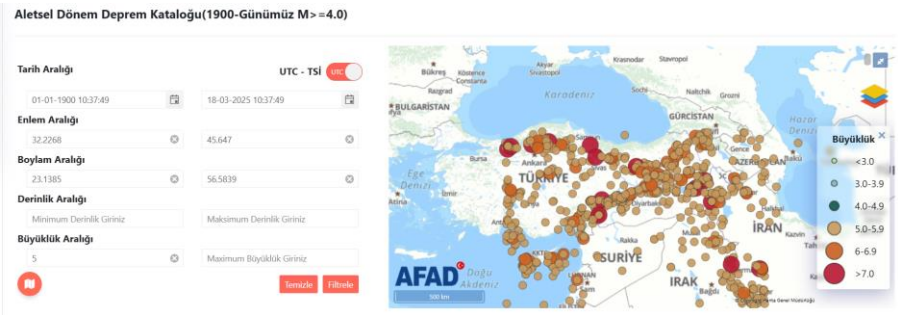
Ülkemiz, depremlerin yoğun yaşandığı bir coğrafyada bulunmaktadır. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık (M_w=7.7) ve Elbistan (M_w=7.6) Depremleri 11 ilimizi etkilemiş olup bu depremler, Türkiye'nin doğusunda ve güney doğusunda yer alan Hatay, Adıyaman, Kahramanmaraş, Gaziantep, Osmaniye, Elâzığ, Malatya, Kilis, Diyarbakır, Şanlıurfa ve Adana illerinde binlerce insanımızın hayatını kaybetmesine, on binlerce insanımızın da yaralanmasına, altyapı ve ulaşım sistemlerinde ve binalarda ciddi hasarlara sebep olmuştur. Meydana gelen depremlerin oluşumunu ve ivmesini dikkate aldığımızda, yapılarımızın betonarme tasarımları yeterli olsa bile zeminde gerçekleşecek sıvılaşma ve zemin büyütme olaylarının depremin şiddetini artırdığını bir kez daha net bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu sebeple sadece üst yapılarda değil, zemin araştırmalarına da ciddi anlamda önem verilmesi gerekliliğini net bir şekilde ortaya koymuştur. (Gücek, Afacan & Zorluer, 2023).

Kahramanmaraş merkezli depremler 6 Şubat 2023 tarihinde, Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) üzerinde yerel saat ile sabaha karşı 04:17'de (GMT 01:17), Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığının yayımlamış olduğu verilere göre moment büyüklüğü M_w=7.7 olan büyük bir deprem meydana gelmiştir. AFAD verilerine göre merkez üssü Kahramanmaraş Pazarcık olan deprem, Kahramanmaraş ilinin yaklaşık 33 km güney doğusunda, Osmaniye ilinin yaklaşık 55 km kuzey doğusunda, Gaziantep ilinin ise yaklaşık 40 km kuzey batısında merkezi bir yerde bulunmaktadır. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından depremin merkez derinliği ise 8.6 km olarak belirlenmiştir. Kahramanmaraş Pazarcık depreminin hemen ardından yaklaşık 9 saat sonra, Ekinözü-Elbistan Kahramanmaraş bölgesinde yerel saat ile öğleden sonra saat 13:24'te (GMT 10:24) moment büyüklüğü M_w=7.6 olan ikinci büyük bir deprem meydana gelmiştir (Gücek, Afacan & Zorluer, 2023).

Günümüzde yaşanan deprem felaketleri ve geçmişten günümüze $M_w \geq 5$ üzeri depremler incelendiğinde Doğu Anadolu Fay Zonu dikkat çekmektedir (Şekil 57 ve Şekil 58). Bu bölgede yer hareket faaliyetlerinin ağırlıkta olması nedeniyle bu çalışma kapsamında Kahramanmaraş bölgesinde bulunan 3 ayrı zemin modelinin deprem etkisi altında gösterdiği davranış bir boyutlu ve iki boyutlu analizler yardımı ile incelenmiştir.



Şekil 57. Günümüz deprem faaliyetleri



Şekil 58. 1900-günümüz deprem faaliyetleri ($M_w \geq 5$)

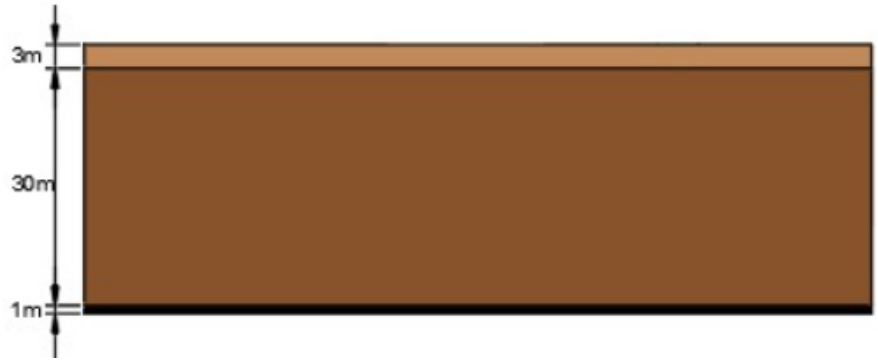
Bu tez kapsamında kohezyonsuz zeminlerin sahaya özel zemin davranış analizinin yapılması ve yorumlanması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda 3 adet zemin modeli oluşturulmuş ve oluşturulurken daha önce birçok bilim insanın yaptığı çalışmalar doğrultusunda geliştirilen korelasyonlar ile zemin parametreleri belirlenmiştir. Günümüzde meydana gelen deprem hareketliliği düşünülerek örnek çalışma sahası Kahramanmaraş olarak düşünülmüş ve o bölgedeki saha bilgilerine göre AFAD sayfası üzerinden tasarım spektrumu elde edilmiştir. Elde edilen tasarım spektrumuna göre PEER sayfası üzerinden deprem verileri

incelenmiş ve 11 adet Kuzey-Güney ile 11 adet Doğu-Batı deprem kaydı seçilmiştir. Seçilen deprem kayıtları Seismomatch programı ile eşlendikten sonra yapılacak 1B ve 2B analizler için uygun hale gelmiştir. Deepsoil programı ile bir boyutlu Non-Lineer ve Eşdeğer Lineer analizler yapılmıştır. Yapılan analiz sonuçları doğrultusunda zemin modelleri üzerinde en çok ve en az etkisi olan deprem kayıtları seçilerek Plaxis 2D paket programı ile bir boyutlu ve iki boyutlu analizler yapılmıştır. Yapılan tüm bu analizler doğrultusunda deprem kayıtları ve zemin modelleri yönünden kıyaslamalar ve yorumlar yapılmıştır.

2.1. Saha ve Zemin Özellikleri

Rölatif sıkılık (D_r), kumlu çakıllı zeminlerin arazideki sıkılığını ifade eder. Bu tür zeminlerin kayma mukavemeti açısı ve zeminin sıvılaşma potansiyeli hakkında fikir verir. Ayrıca bu tür zemin üzerinde yapılacak temelin oturma ve taşıma gücü hakkında bilgi verir. Zemin sıkılığının yüksek olması; kayma mukavemeti açısının yüksek, sıvılaşma potansiyelinin düşük, taşıma gücünün yüksek ve oturmaların az olacağı söylenebilir. Kayma mukavemeti açısı (ϕ), kaba daneli zeminlerde yapılacak yapıların stabilite analizleri ile suya doygun ince daneli zeminlerde uzun periyotlu (drenajlı) stabilite analizlerinde kullanılan bir parametredir. Birim hacim ağırlıklar (γ) düşey gerilmelerin, özgül ağırlıklar ise zeminin hacim-ağırlık ilişkilerinin belirlenmesinde kullanılır. Yüzeye yakın tabakaların kayma dalgası hızı (v_s), inşaat ve deprem mühendisliğinde önemli zemin özelliklerinden biri olarak kabul edilmektedir. Zeminlerin dinamik özelliklerinden olan v_s, sıvılaşma potansiyelinin tahmininde, zeminin dinamik özelliklerinin belirlenmesinde ve mikro bölgelemede kullanılmaktadır (Sivrikaya, 2021).

Bu çalışma kapsamında 3 adet farklı kumlu zemine ait modeller (Model-1, Model-2, Model-3) oluşturulmuştur. Zemin modelleri oluşturulurken farklı senaryolar altında, zeminin deprem karşısında nasıl davranacağı ve üzerindeki yapıların ne şekilde etkileneceğinin gözlemi hedeflenmiştir. Ana kaya özellikleri tüm zemin profilleri için aynı düşünülmüştür.



Şekil 59. Zemin modeli-1

Tablo 2. Zemin Modeli-1 Parametreleri

Zemin Özellikleri/Tabaka	**1.Tabaka**
γ_n (kN/m^3)	20
D_r (%)	60
ϕ (˚)	33
v_s (m/sn)	280



Şekil 60.Zemin modeli-2

Tablo 3. Zemin Modeli-2 Parametreleri

Zemin Özellikleri/Tabaka	**1.Tabaka**	**2.Tabaka**	**3.Tabaka**
γ_n (kN/m^3)	15	16.5	20
D_r (%)	30	60	85
ϕ (˚)	30	33	37
v_s (m/sn)	150	280	380



Şekil 61. Zemin Modeli-3

Tablo 4. Zemin Modeli-3 Parametreleri

Zemin Özellikleri/Tabaka	1.Tabaka	2.Tabaka	3.Tabaka
γ_n (kN/m^3)	15	16.5	20
D_r (%)	30	60	85
ϕ (˚)	30	34	38
v_s (m/sn)	150	300	661

2.2. Deprem Verilerinin Seçilmesi ve Ölçeklendirilmesi

Çalışılması planlanan bölge (Kahramanmaraş) için oluşturulan 3 tip (1,2 ve 3) zemin profili bulunmaktadır. TBDY (2018)'e göre 11 adet Kuzey-Güney ve 11 adet Doğu-Batı yönlü deprem ile çalışılması gerekmektedir. Toplamda seçilecek olan 22 deprem kaydı ile her bir zemin modeli için ayrı ayrı analiz yapılacaktır. Öncelikle AFAD'ın sayfasına giderek yatay elastik tasarım spektrum değerleri Excel formatında alınmıştır. Tablo 4'te çalışılan saha için girilen bilgiler bulunmaktadır.

Tablo 5. AFAD Saha Bilgileri

Deprem Yer Hareketi Düzeyi	DD-2
Yerel Zemin Sınıfı	ZD
Enlem	37.580393˚
Boylam	36.922326˚

İndirilen yatay elastik spektrum Excel değerleri metin dosyasında PEER Ground Data Motion formatında düzenlenmiş ve daha önceden indirilen örnek tasarım spektrum Excel dosyasına aktarılmıştır. Yeniden düzenlenen yatay elastik spektrum dosyası PEER Ground

Data Motion sayfasına yüklenmiştir. Yüklenen dosyanın ardından Tablo 5'te verilen bilgiler ile deprem araması yapılmıştır.

Tablo 6. PEER Deprem Kayıtları Arama Özellikleri

Fault Type	**All Types**
Magnitude min, max	6.5,7.7
R_{JB} (km) min, max	0,20
R_{rup} (km) min, max	0,20
Vs_{30} (m/s) min, max	180,360
D_{5-95} (sec) min, max	-
Pulse	Any record
Max No. Records (<=100)	-
Initial ScaleFactor min, max	-

Tablo 7. H1 (Kuzey-Güney) Yönlü Depremler

No	**PEER Kodu**	**Deprem Adı**	**Deprem İstasyonu**	**Yıl**	**Deprem Büyüklüğü (M_w)**	**Deprem Frekansı, f_{eq}**	**Kayma Dalgası Hızı, $(V_s)_{30}$**	**Faya Uzaklık, km**
1	RSN179	Imperial Valley-1	El Centro Array-4	1979	6.53	0.0625	208.91	7.05
2	RSN180	Imperial Valley-2	El Centro Array-5	1979	6.53	0.05	205.63	3.95
3	RSN725	Supersitition Hills	Poe Road (temp)	1987	6.54	0.1625	316.64	11.16
4	RSN768	Loma Prieta	G.lroy Array-4	1989	6.93	0.1125	221.78	14.34
5	RSN959	Northridge-1	Canoga Park-Topanga Can	1994	6.69	0.125	267.49	14.7
6	RSN1048	Northridge-2	Northridge-17645 Saticoy St.	1994	6.69	0.1625	280.86	12.09
7	RSN1082	Northridge-3	Sun Valley-Roscoe Blvd	1994	6.69	0.125	320.93	10.05
8	RSN1158	Kocaeli	Düzce	1999	7.51	0.1	281.86	15.37
9	RSN4866	Chuetsu-oki	Kawanishi Izumozaki	2007	6.8	0.1125	338.32	11.75
10	RSN5829	El Mayor-Cucapah	RIITO	2010	7.2	0.05	242.05	13.71
11	RSN6893	Darfield	DFHS	2010	7	0.1625	344.02	11.86

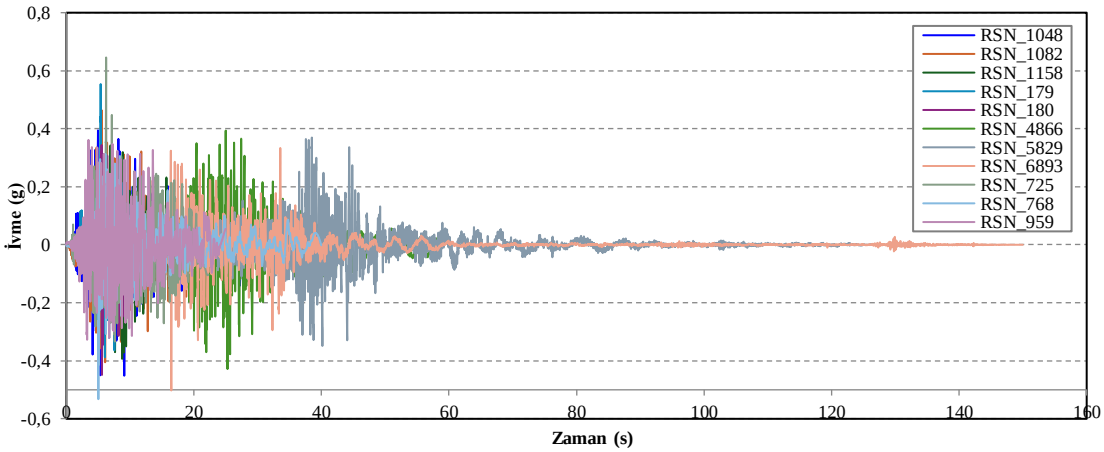
Tablo 6'da gösterildiği gibi girilen değerler doğrultusunda listelenen deprem kayıtları arasında hedef tasarım spektrumuna en yakın değerleri veren H1 (Kuzey-Güney) yönlü seçilen deprem kayıtları Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 6'da gösterildiği gibi girilen değerler doğrultusunda listelenen deprem kayıtları arasında hedef tasarım spektrumuna en yakın değerleri veren H2 (Doğu-Batı) yönlü seçilen deprem kayıtları Tablo 8'de verilmiştir.

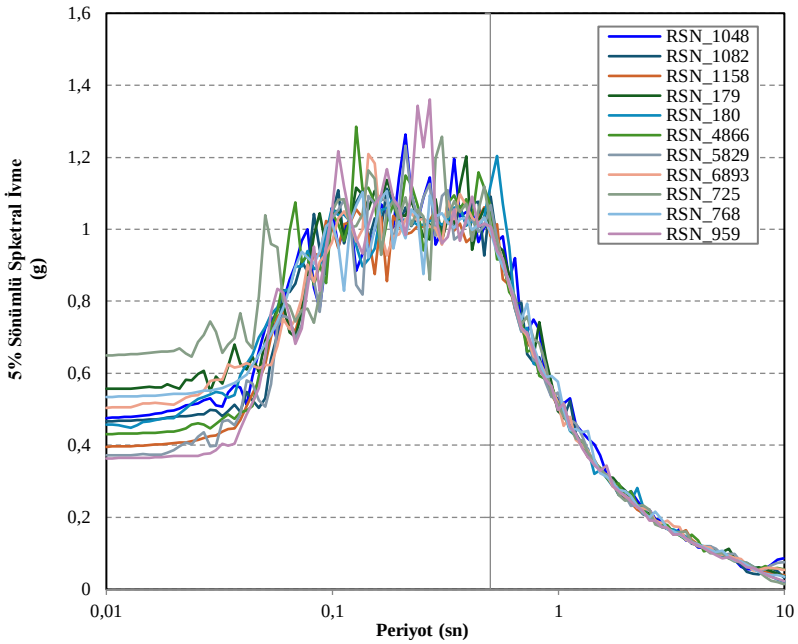
Tablo 8. H2 (Doğu-Batı) Yönlü Depremler

No	PEER Kodu	Deprem Adı	Deprem İstasyonu	Yıl	Deprem Büyüklüğü (M_w)	Deprem Frekansı, f_{eq}	Kayma Dalgası Hızı, $(V_s)_{30}$	Faya Uzaklık, km
1	RSN180	Imperial Valley-1	El Centro Array-5	1979	6.53	0.05	205.63	3.95
2	RSN184	Imperial Valley-2	El Centro Differential Array	1979	6.53	0.02875	202.26	5.09
3	RSN723	Supersititi on Hills	Parachute Test Site	1987	6.54	0.15	348.69	0.95
4	RSN766	Loma Prieta	Gilroy Array	1989	6.93	0.075	270.84	11.07
5	RSN821	Erzincan	Erzincan	1992	6.69	0.125	352.05	4.38
6	RSN1082	Northridge -3	Sun Valley-Roscoe Blvd	1994	6.69	0.125	320.93	10.05
7	RSN1101	Kobe	Amagasaki	1995	6.9	0.125	256.00	11.34
8	RSN4866	Chuetsu-oki	Kawanishi Izumozaki	2007	6.8	0.1125	338.32	11.75
9	RSN5825	El Mayor-Cucapah-1	Cerro Prıeto Geothermal	2010	7.2	0.05	242.05	10.92
10	RSN5829	El Mayor-Cucapah-2	RIITO	2010	7.2	0.05	242.05	13.71
11	RSN6897	Darfield	DSLC	2010	7.0	0.075	295.74	8.46

Seçilen H1 (Kuzey-Güney) yönlü ham deprem verileri SeismoMatch programı ile işlenmiştir. İşlenen deprem kayıtlarının ivme-zaman ve spektral ivme-periyot grafikleri aşağıda verilmiştir.

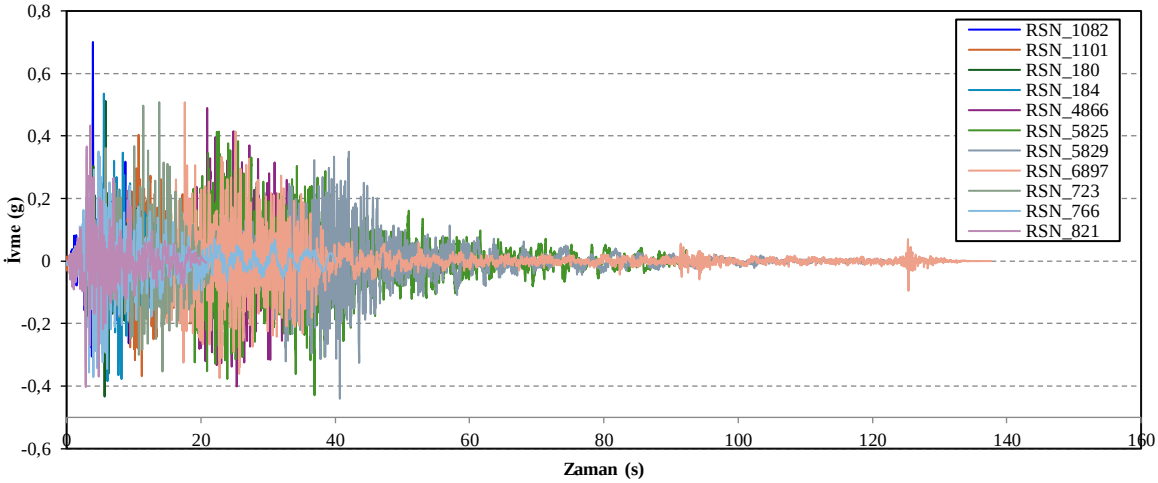


Şekil 62. H1 yönlü eşlenen deprem kayıtlarının ivme-zaman grafiği

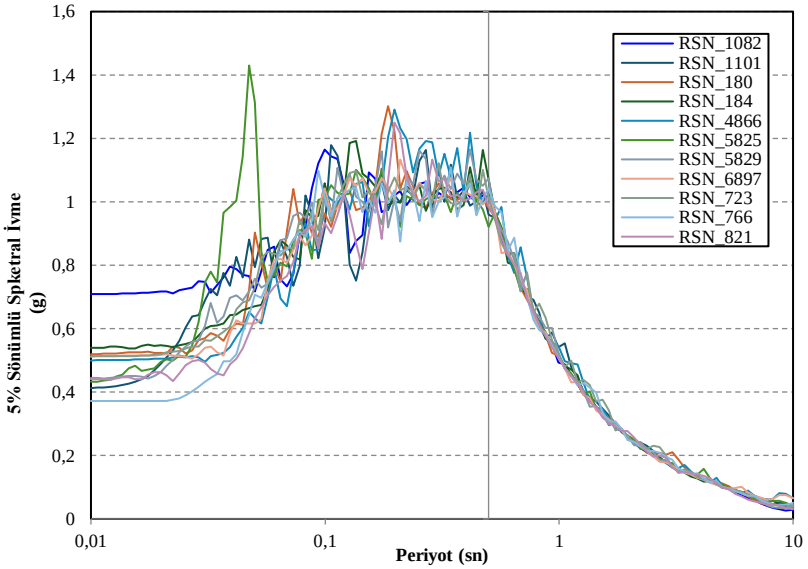


Şekil 63. H1 yönlü eşlenen deprem kayıtlarının spketral ivme-periyot grafiği

Seçilen H2 (Doğu-Batı) yönlü ham deprem verileri SeismoMatch programı ile işlenmiştir. İşlenen deprem kayıtlarının ivme-zaman ve spektral ivme-periyot grafikleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 64. H2 yönlü eşlenen deprem kayıtlarının ivme-zaman grafiği



Şekil 65. H2 yönlü eşlenen deprem kayıtlarının spketral ivme-periyod grafiği

2.3. Analizlerin Yapılması

2.3.1. DeepSoil Programı ile Bir Boyutlu (1B) Analiz

İşlenen deprem kayıtları öncelikle Deepsoil programına kaydedilmiştir. Tasarlanan 3 zemin modeli için H1 ve H2 yönlü (Kuzey-Güney ve Doğu-Batı) olmak üzere toplamda 10 adet analiz yapılmıştır. Zemin modelleri için yapılan analiz tipleri Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 9. DeepSoil Zemin Tipine Göre Analiz Seçenekleri

Zemin Modeli	Yapılan Analizler
Model-1	Eşdeğer-Lineer ve Non-Lineer Analiz
Model-2	Eşdeğer-Lineer ve Non-Lineer Analiz
Model-3	Non-Lineer Analiz

2.3.2. Plaxis 2D Programı ile Bir Boyutlu (1B) ve İki Boyutlu (2B) Analiz

Plaxis 2D programında daha önce DeepSoil programında yaptığımız deprem analiz sonuçlarından yola çıkarak her bir zemin modeli için H1 ve H2 yönlü olmak üzere en düşük etkiye sahip ve en etkili deprem kayıtları seçilerek analiz yapılmasına karar verilmiştir (Tablo 10, Tablo 11 ve Tablo 12).

Tablo 10. Zemin Modeli-1 için seçilen deprem kayıtları

DEPREM YÖNÜ	ZEMİN MODELİ-1 ANALİZ TİPİ			
	NONLİNER ANALİZ		EŞDEĞER LİNEER ANALİZ	
	DÜŞÜK DEĞER DEPREM KAYDI (PGA)	YÜKSEK DEĞER DEPREM KAYDI (PGA)	DÜŞÜK DEĞER DEPREM KAYDI (PGA)	YÜKSEK DEĞER DEPREM KAYDI (PGA)
H1 YÖNÜ	RSN-180	RSN-179	RSN-180	RSN-725
H2 YÖNÜ	RSN-5829	RSN-1082	RSN-5829	RSN-1082

Tablo 11. Zemin Modeli-2 için seçilen deprem kayıtları

DEPREM YÖNÜ	ZEMİN MODELİ-2 ANALİZ TİPİ			
	NONLİNER ANALİZ		EŞDEĞER LİNEER ANALİZ	
	DÜŞÜK DEĞER DEPREM KAYDI (PGA)	YÜKSEK DEĞER DEPREM KAYDI (PGA)	DÜŞÜK DEĞER DEPREM KAYDI (PGA)	YÜKSEK DEĞER DEPREM KAYDI (PGA)
H1 YÖNÜ	RSN-5829	RSN-725	RSN-5829	RSN-725
H2 YÖNÜ	RSN-5829	RSN-1082	RSN-5829	RSN-1082

Tablo 12. Zemin Modeli-3 için seçilen deprem kayıtları

DEPREM YÖNÜ	ZEMİN MODEL-3 ANALİZ TİPİ			
	NONLİNER ANALİZ		EŞDEĞER LİNEER ANALİZ	
	DÜŞÜK DEĞER DEPREM KAYDI (PGA)	YÜKSEK DEĞER DEPREM KAYDI (PGA)	DÜŞÜK DEĞER DEPREM KAYDI (PGA)	YÜKSEK DEĞER DEPREM KAYDI (PGA)
H1 YÖNÜ	RSN-6893	RSN-179	-	-
H2 YÖNÜ	RSN-5829	RSN-1082	-	-

Bu çalışma kapsamında zemin modelleri için tabakalar ve özellikleri oluşturulurken kullanılan *Hardening soil model with small-strain stiffness (HSsmall)* zeminlerin küçük şekil değiştirmelerdeki artan sertliğini hesaba katan Hardening soil modelinin bir modifikasyonudur. Bu iki model için girilen zemin parametreleri hemen hemen aynıdır ancak HSsmall modelinde birkaç parametre daha eklenmektedir (Tablo 15). Seçilen bu modelde karşımıza 3 çeşit drenaj tipi çıkmaktadır. Bu çalışma kapsamında oluşturulan 3 zemin modeli de kaba daneli zemindir. Kaba daneli zemin için drenaj durumu geçerli olduğundan drenaj tipi olarak “Drained” seçilmektedir. Zemin Modeli-3’te diğer zemin modellerinden farklı olarak YASS olduğundan UBC3D-PLM zemin modeli konulmaktadır.

Tablo 13. Mohr-Coulomb modelindeki gibi kırılma parametreleri

c	Kohezyon	$[kN/m^2]$
ϕ	İçsel sürtünme açısı	[°]
ψ	Dilatasyon açısı	[°]
σ_t	Gerilim kesme ve çekme dayanımı	$[kN/m^2]$

Tablo 14. Zemin Rijitliği için Temel Parametreler

m	Sertliğin stres düzeyine bağlı gücü	$[-]$
E_{50}^{ref}	Standart drenajlı üç eksenli testte kesme sertliği	$[kN/m^2]$
E_{eod}^{ref}	Birincil ödometre yüklemesi için teğet sertliği	$[kN/m^2]$
E_{ur}^{ref}	Boşaltılmış üç eksenli testten boşaltma/yeniden yükleme sertliği	$[kN/m^2]$

Tablo 15. Gelişmiş Parametreler (Varsayılan ayarların kullanılması önerilir)

ν_{ur}	Boşaltma-yeniden yükleme için Poisson oranı (varsayılan ν_{ur} = 0.2)	$[-]$
p_{ref}	Sertlikler için referans gerilimi (varsayılan tercih p_{ref}= 100 kN/m^2)	$[kN/m^2]$
K_0^{nc}	Normal konsolidasyon için K_0 değeri (varsayılan K_0^{nc} =1-sinϕ)	$[-]$
R_f	Kırılma oranı q_f / q_a (varsayılan R_f = 0.9)	$[-]$
$\phi_{tension}$	Çekme dayanımı (varsayılan $\sigma_{tension}$ = 0 gerilim birimi)	$[kN/m^2]$
c_{inc}	Mohr-Coulomb modelinde olduğu gibi (varsayılan c_{inc} = 0)	$[kN/m^3]$

Zemin modeli için tabaka özellikleri girilirken zemin rijitliği için girilen temel parametreler (Tablo 14) yerine alternatif parametreler (Tablo 16) girilebilmektedir.

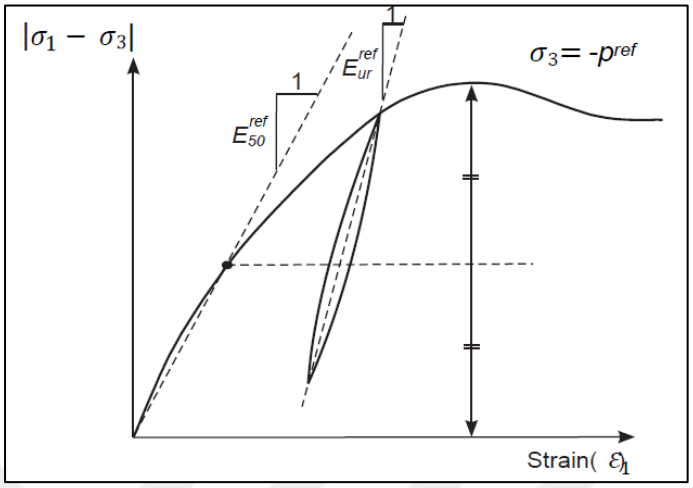
Tablo 16. Alternatif parametreler

C_c	Sıkıştırma indeksi	$[-]$
C_s	Şişme indeksi veya yeniden yükleme indeksi	$[-]$
e_{init}	Başlangıç boşluk oranı	$[-]$

Tablo 17. HSsmall Ekstra Parametreler

$\nu_{0.7}$	Boşaltma-yeniden yükleme için Poisson oranı	$[-]$
G_0^{ref}	Çok küçük gerilmelerde (γ <10^{-6}) referans kayma modülü	$[kN/m^2]$
$\gamma_{0.7}$	G_s = 0.722G_0 olan eşik kesme gerilimi	$[-]$

Tablo 14'te verilen zemin rijitliği parametrelerinin grafik üzerindeki eşitliği Şekil 66'da verilmiştir.



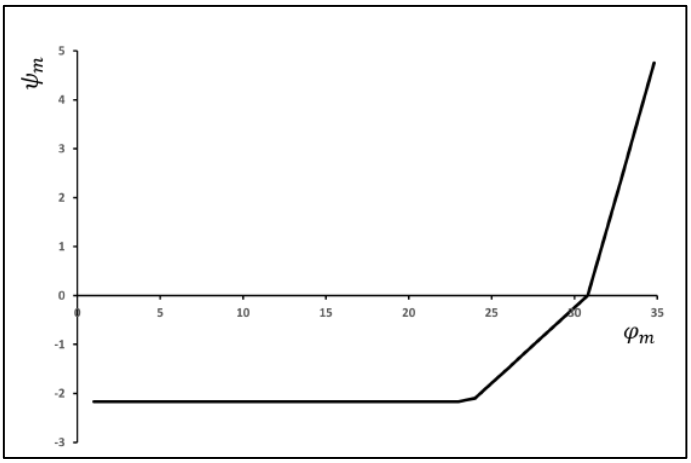
Şekil 66. Drenajlı üç eksenli test sonuçları için E_{50}^{ref} ve E_{ur}^{ref}'in tanımı

Birçok pratik durumda, E_{ur}^{ref} değerini $3E_{50}^{ref}$ değerine eşitlemek uygundur; bu PLAXIS 2D'de kullanılan varsayılan ayardır (Plaxis 2D, 2017). Zemin modelleri Bağıntı (1)'de gösterilen denklik göz önünde bulundurularak oluşturulmuştur.

$$\mathbf{E_{ur}^{ref} = 3E_{50}^{ref}} \quad (1)$$

Küçük deformasyon sertliğine sahip Hardening Soil modeli için mobilize dilatasyon, φ_m'nin bir fonksiyonu olarak Şekil 67'de ϕ=35° ve ψ=5° özel durumları için görselleştirilmiştir (Plaxis 2D, 2017). Bağıntı (2)'de de görüldüğü üzere içsel sürtünme açısına bağlı olarak değişmektedir.

$$\mathbf{\Psi^{\circ} = \phi - 30} \quad (2)$$



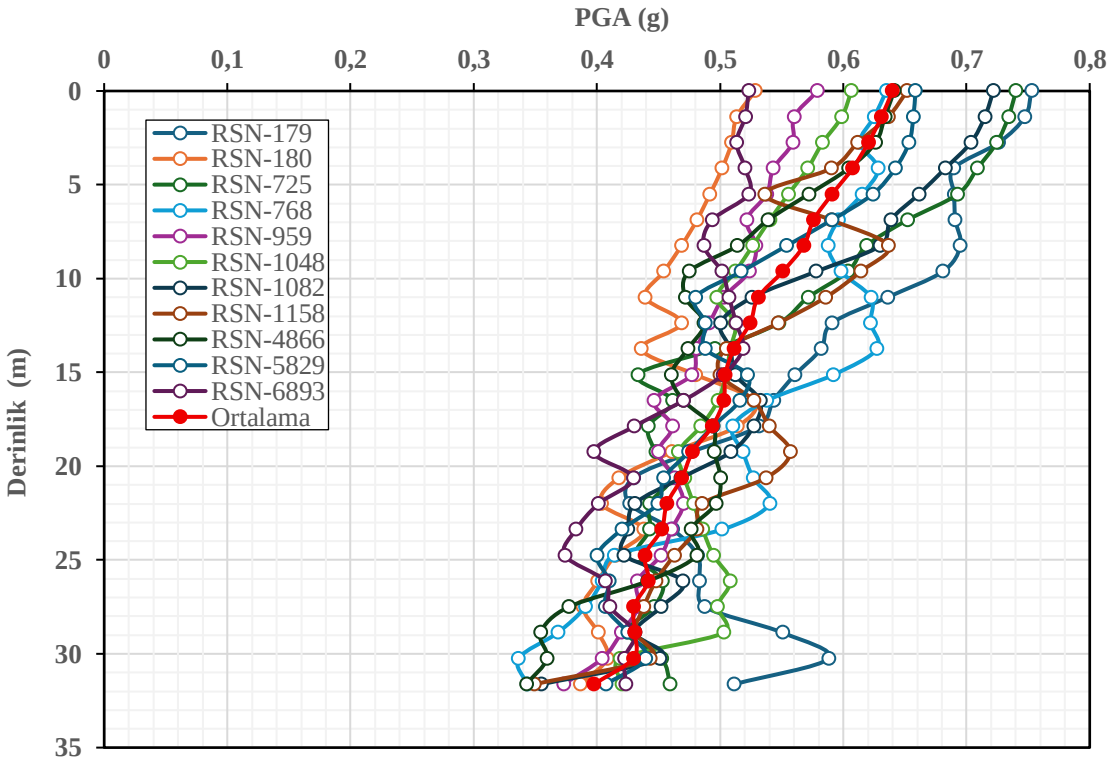
Şekil 67. Küçük gerinim sertliğine sahip hardening soil modeli için mobilize dilatasyon açısı ψ_m ve mobilize sürtünme açısı ϕ_m'nin çizimi

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

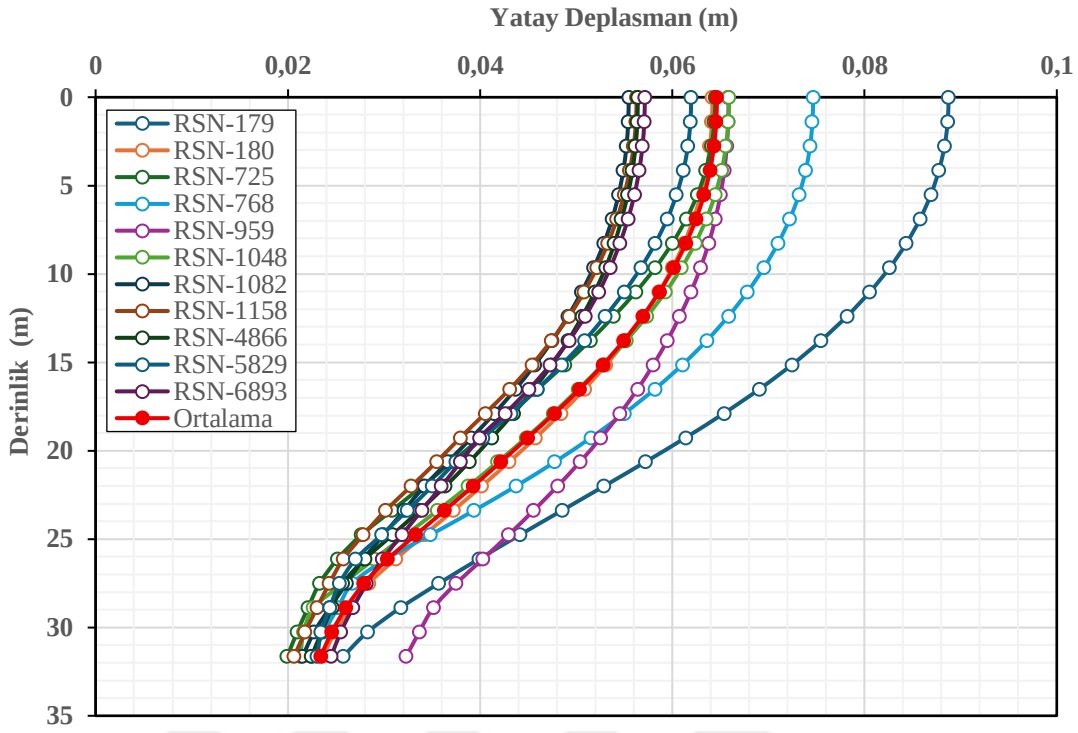
Bu tez kapsamında yapılan çalışmada deprem olması durumunda zeminin tabakalaşma özelliklerine ve yeraltı suyu durumuna bağlı olarak zemin davranışındaki değişim Deepsoil paket programı yardımıyla bir boyutlu, Plaxis 2D paket programı yardımıyla bir boyutlu ve iki boyutlu analizler yapılarak irdelenmiştir. Yapılan analizler deprem yönü, analiz yöntemi ve model açısından farklı durumlar altında incelenmiş bulunan veriler doğrultusunda zemin tabakalaşması, yeraltı suyu olması durumu ve analiz yöntemine bağlı olarak elde edilen bulgular aşağıda sunulmuştur.

3.1. Deepsoil Programı ile Yapılan Bir Boyutlu (1B) Analiz Sonuçları

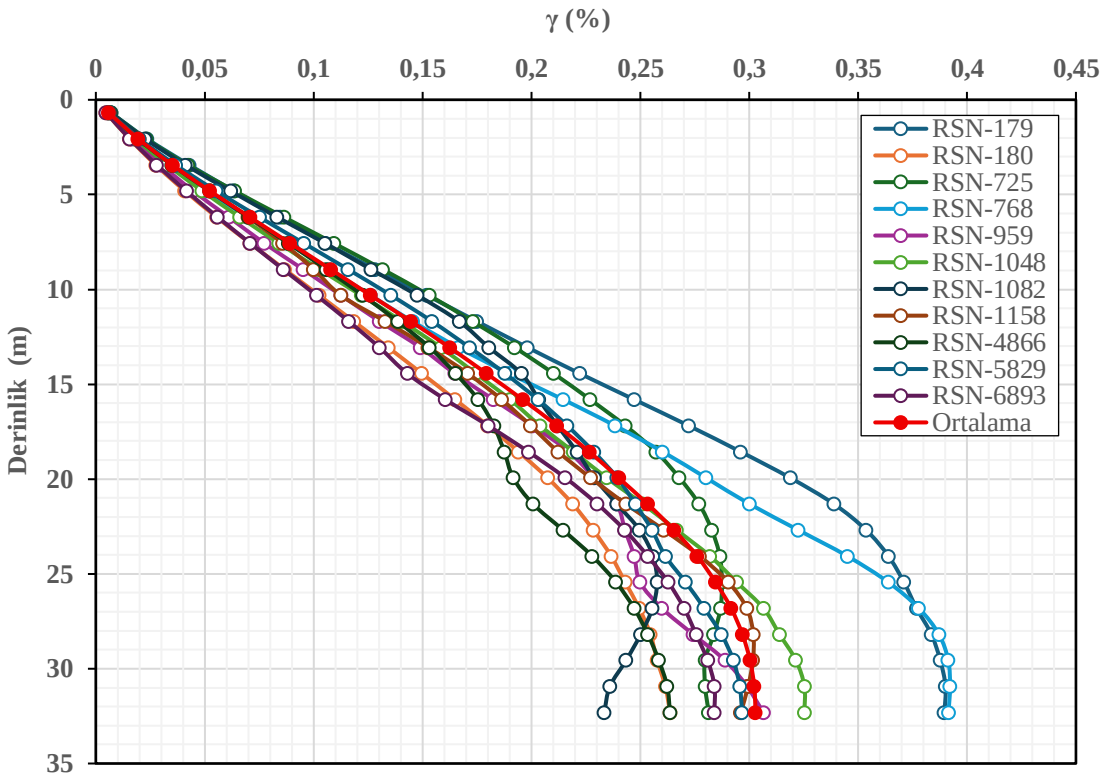
Model-1 için H1 yönlü 11 adet deprem kaydı ile yapılan Non-Lineer analiz sonuçları aşağıdaki grafiklerde görülmektedir. H2 yönlü 11 adet deprem kaydı ile yapılan Non-Lineer analiz sonuçları Ekler kısmında Şekil 156-159'da verilmiştir.



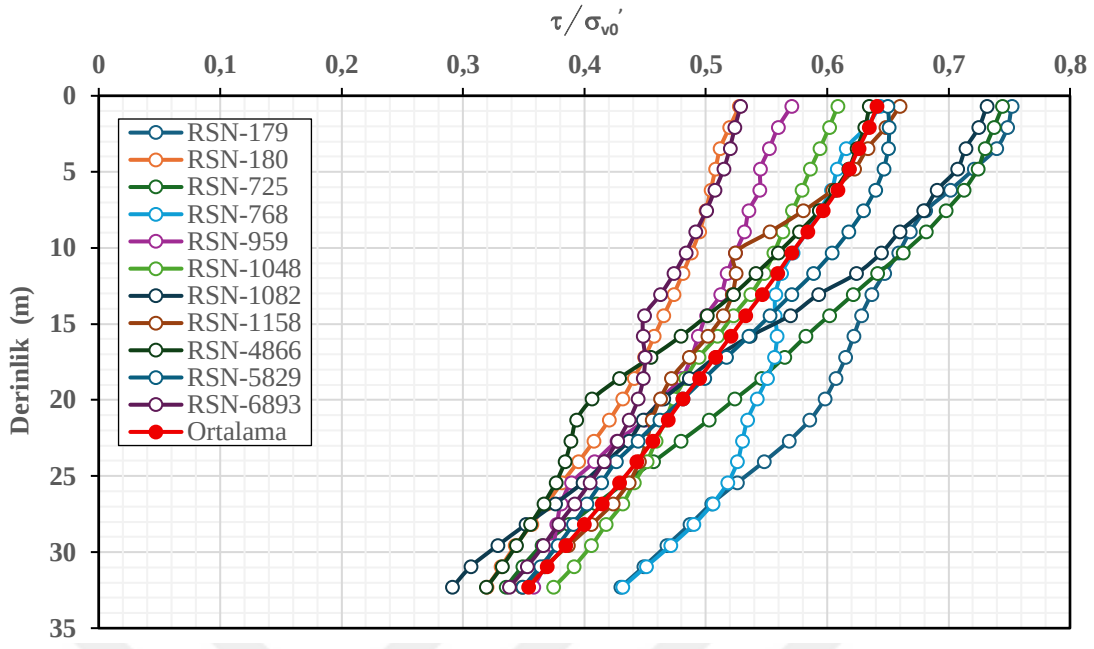
Şekil 68. Model-1 için H1 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan ivmenin derinlikle değişimi



Şekil 69. Model-1 için H1 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan yatay deplasmanın derinlikle değişimi

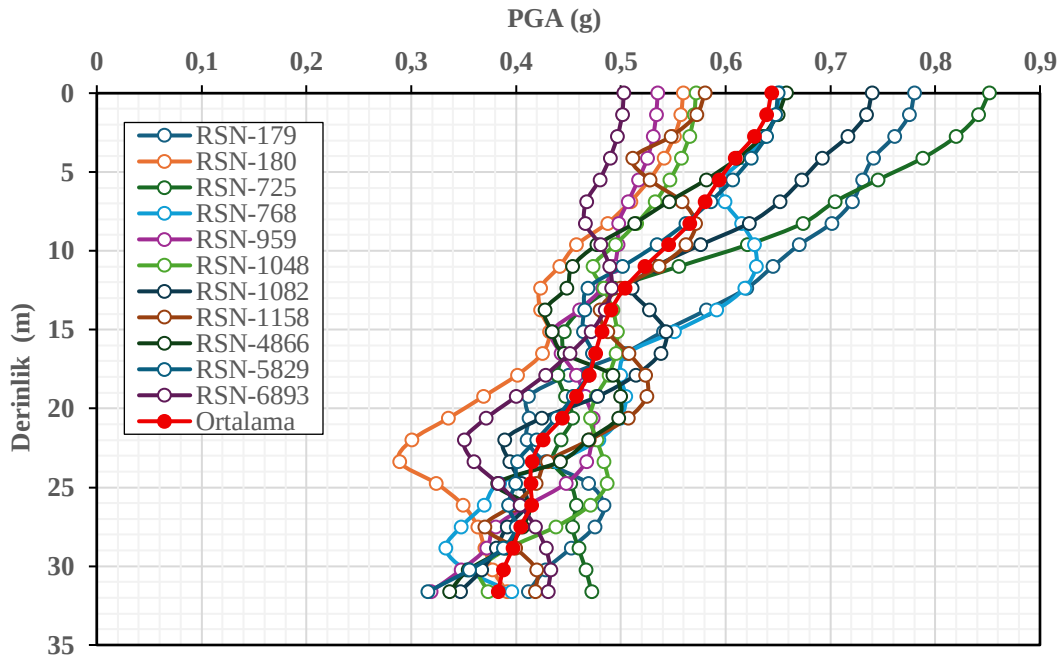


Şekil 70. Model-1 için H1 yönlü depremler idurumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan maksimum yanal deformasyonun derinlikle değişimi

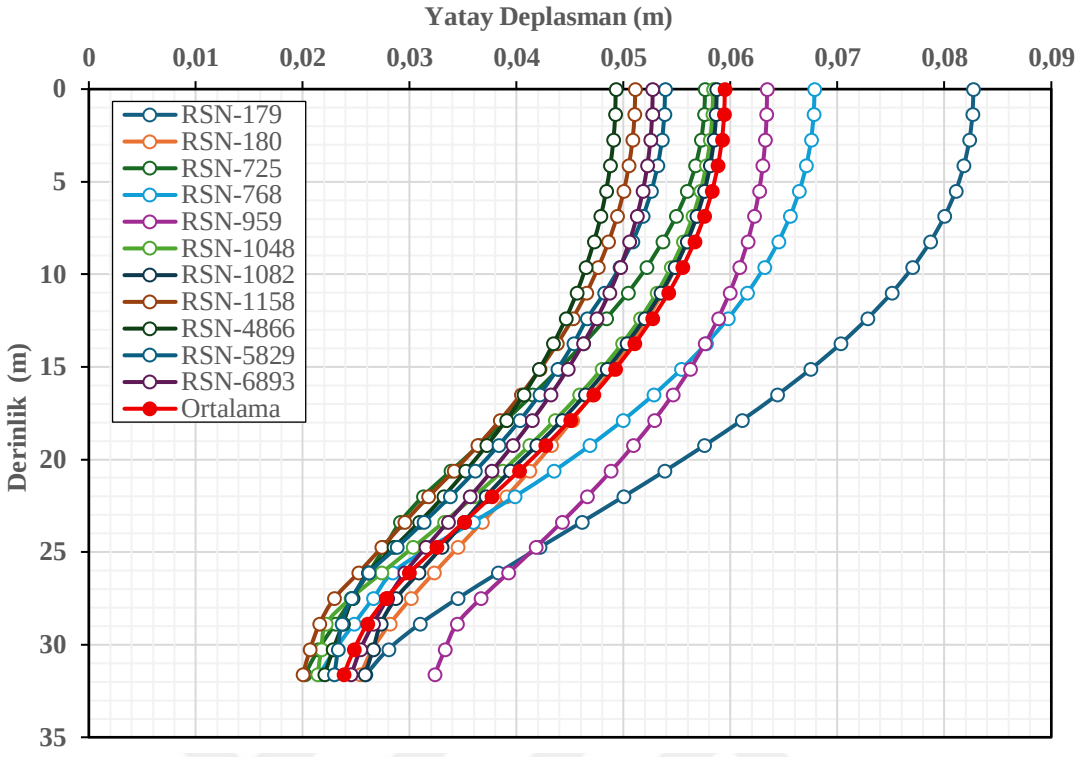


Şekil 71. Model-1 için H1 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan kayma gerilmesi oranının derinlikle değişimi

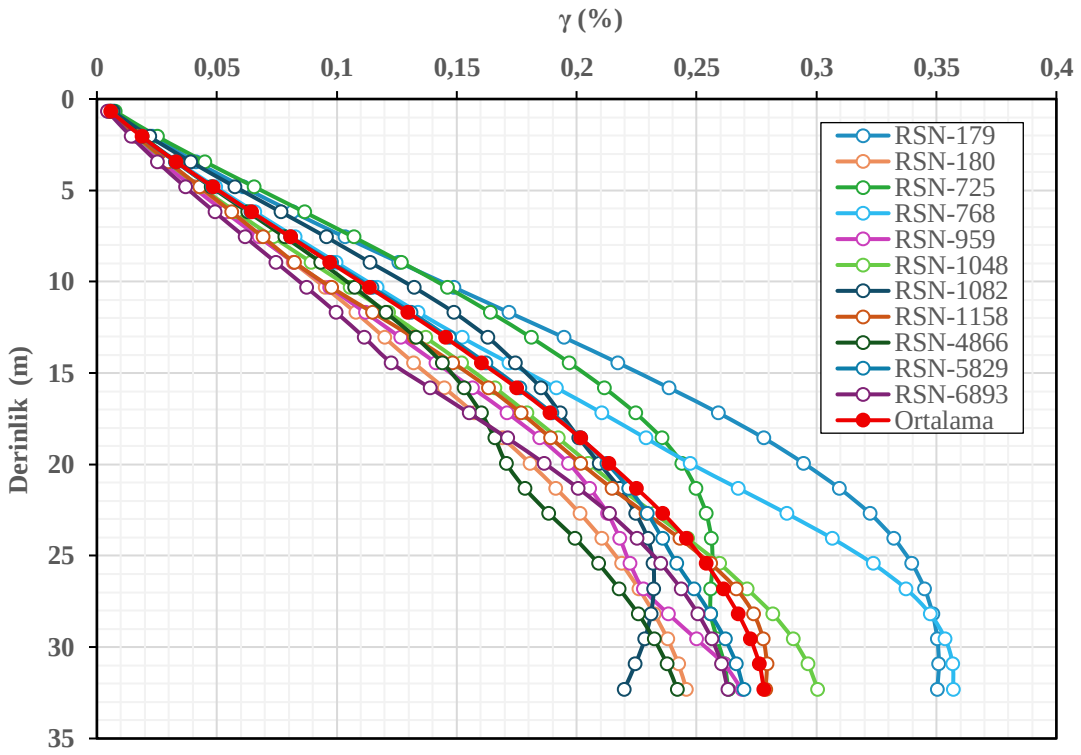
Model-1 için H1 yönlü 11 adet deprem kaydı ile yapılan Eşdeğer-Lineer analiz sonuçları aşağıdaki grafiklerde görülmektedir. H2 yönlü 11 adet deprem kaydı ile yapılan Eşdeğer-Lineer analiz sonuçları Ekler kısmında Şekil 160-163'te verilmiştir.



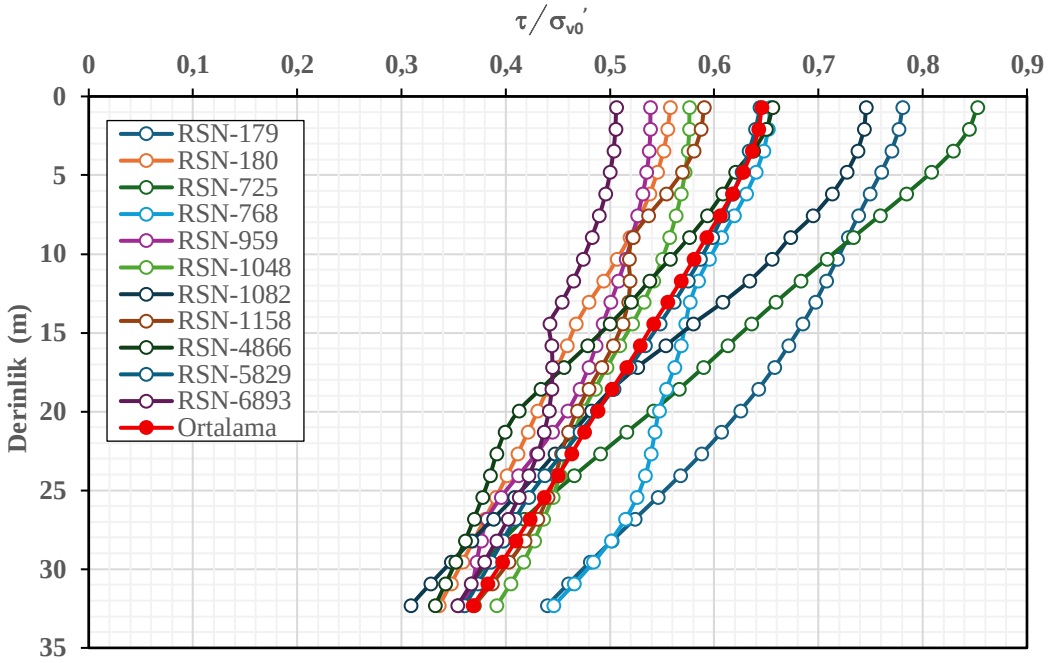
Şekil 72. Model-1 için H1 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer analiz sonucu bulunan ivmenin derinlikle değişimi



Şekil 73. Model-1 için H1 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer analiz sonucu bulunan yatay deplasmanın derinlikle değişimi

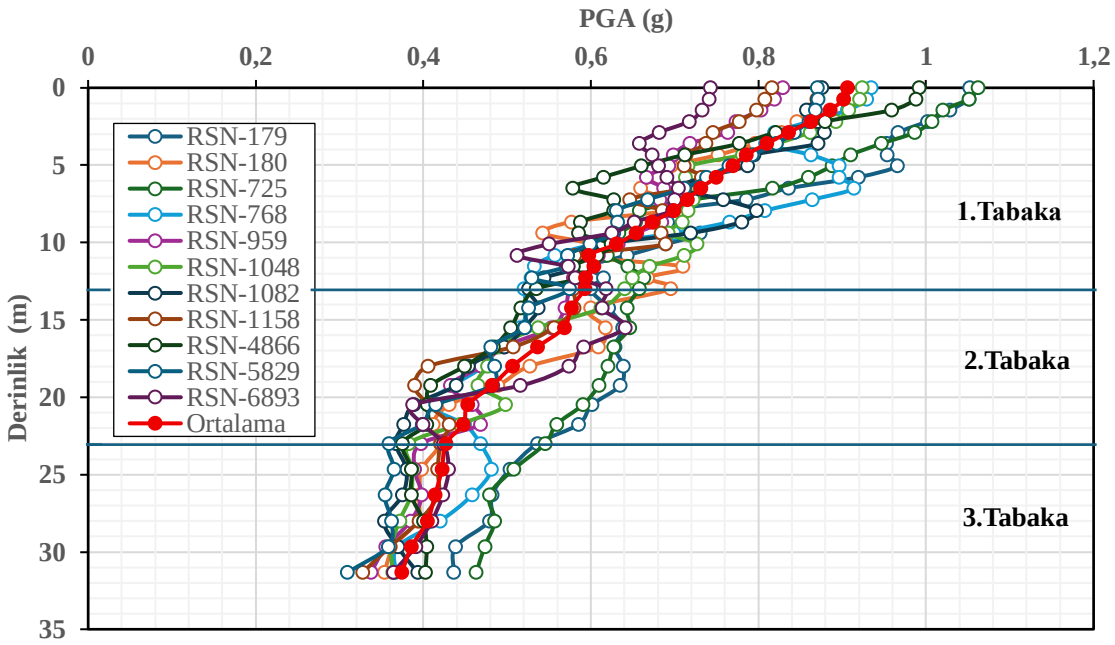


Şekil 74. Model-1 için H1 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer analiz sonucu bulunan maksimum yanal deformasyonun derinlikle değişimi

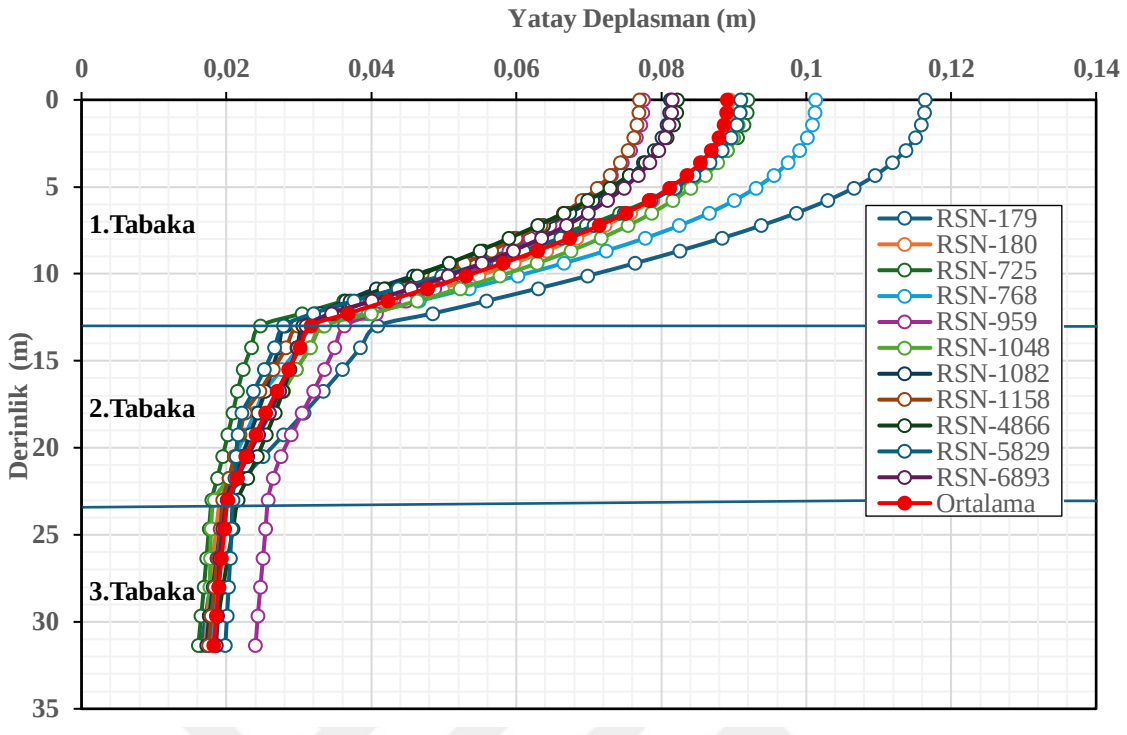


Şekil 75. Model-1 için H1 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer analiz sonucu bulunan kayma gerilmesi oranının derinlikle değişimi

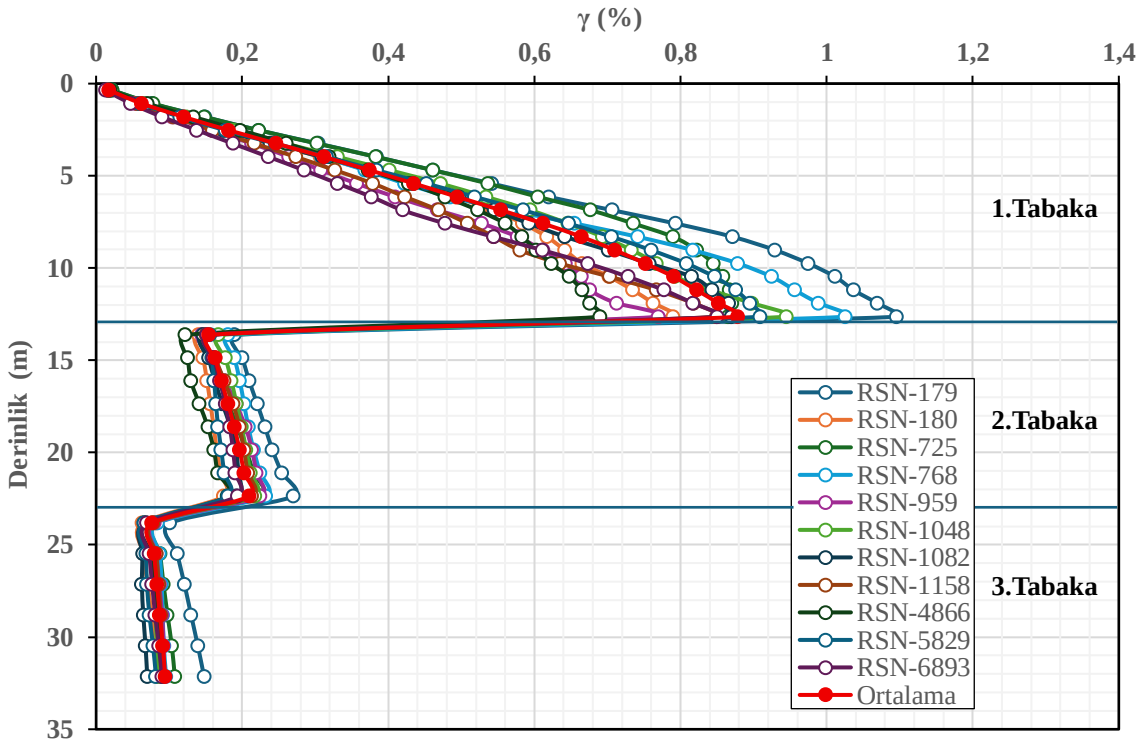
Model-2 için H1 yönlü 11 adet deprem kaydı ile yapılan Non-Lineer analiz sonuçları aşağıdaki grafiklerde görülmektedir. H2 yönlü 11 adet deprem kaydı ile yapılan Non-Lineer analiz sonuçları Ekler kısmında Şekil 164-167'de verilmiştir.



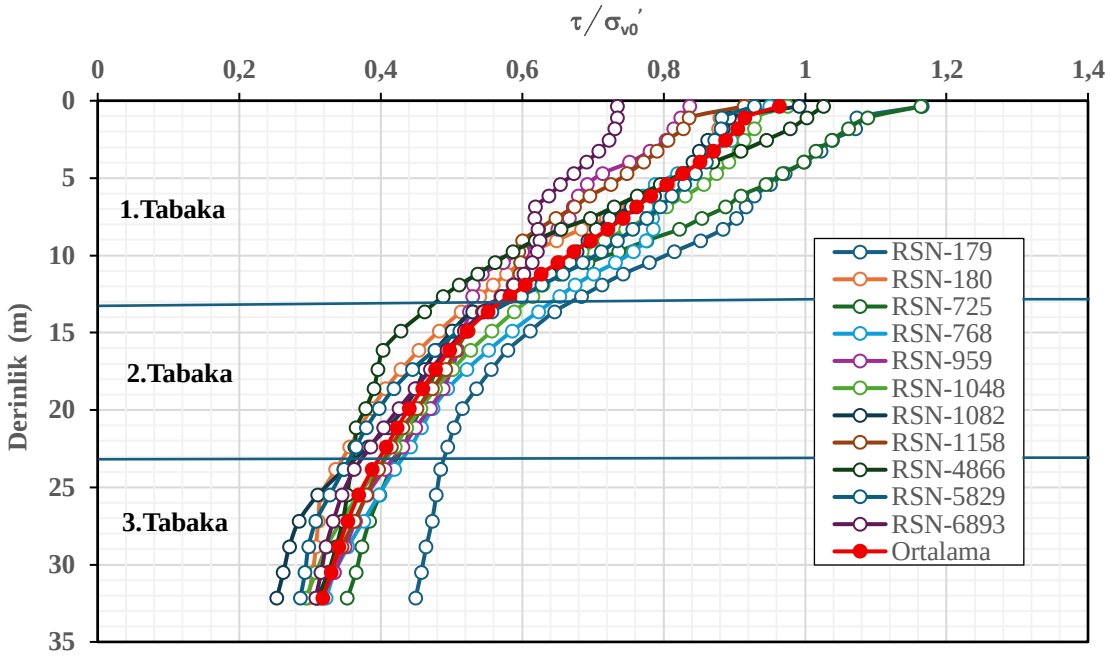
Şekil 76. Model-2 için H1 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan ivmenin derinlikle değişimi



Şekil 77. Model-2 için H1 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan yatay deplasmanın derinlikle değişimi

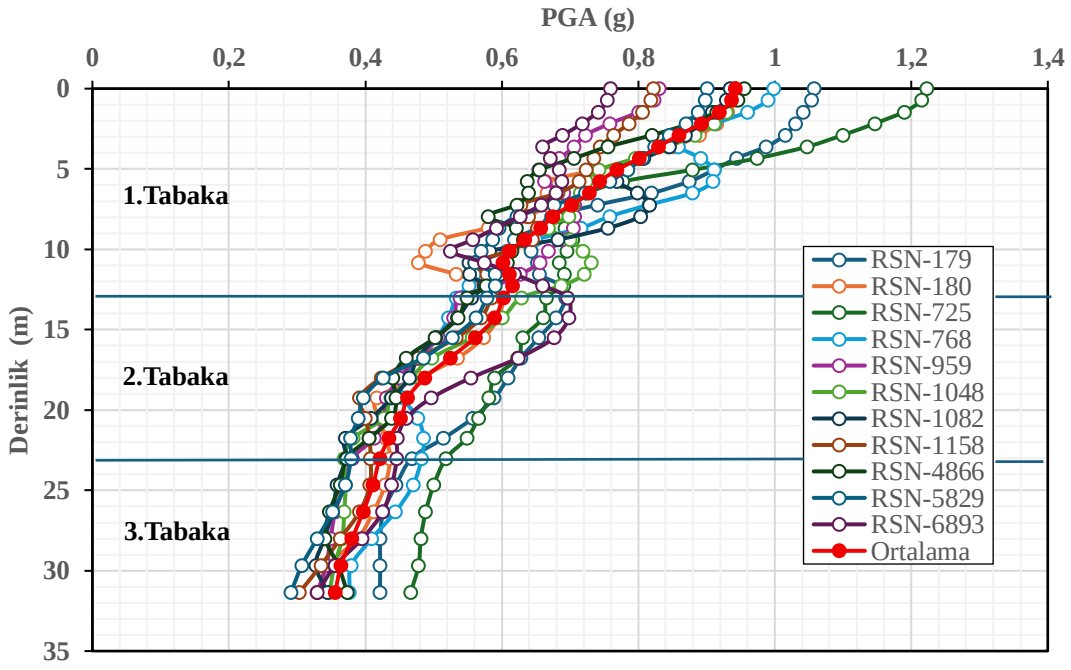


Şekil 78. Model-2 için H1 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan maksimum yanal deformasyonun derinlikle değişimi

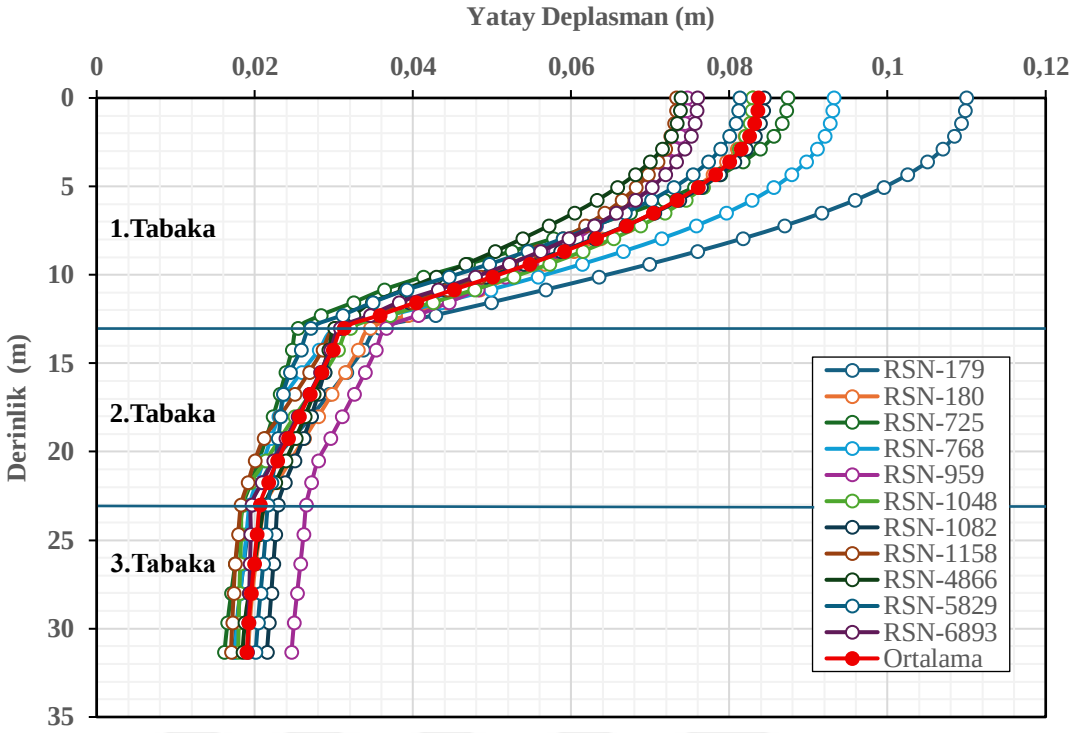


Şekil 79. Model-2 için H1 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan kayma gerilmesi oranının derinlikle değişimi

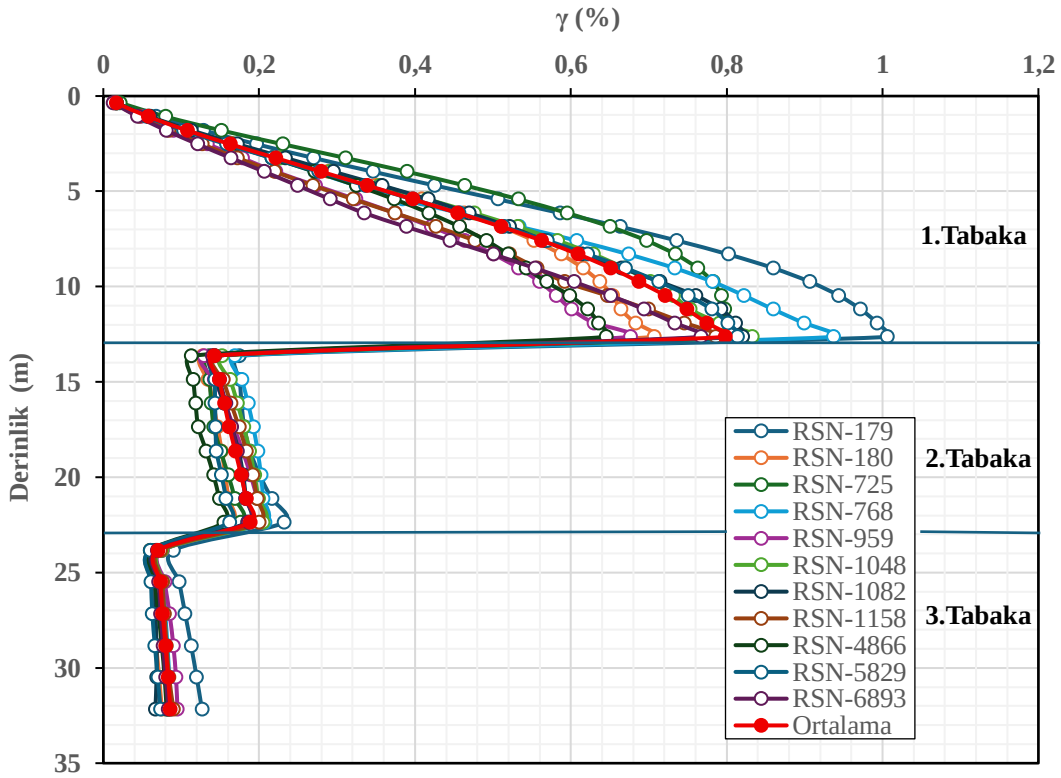
Model-2 için H1 yönlü 11 adet deprem kaydı ile yapılan Eşdeğer-Lineer analiz sonuçları aşağıdaki grafiklerde görülmektedir. H2 yönlü 11 adet deprem kaydı ile yapılan Eşdeğer-Lineer analiz sonuçları Ekler kısmında Şekil 168-171'de verilmiştir.



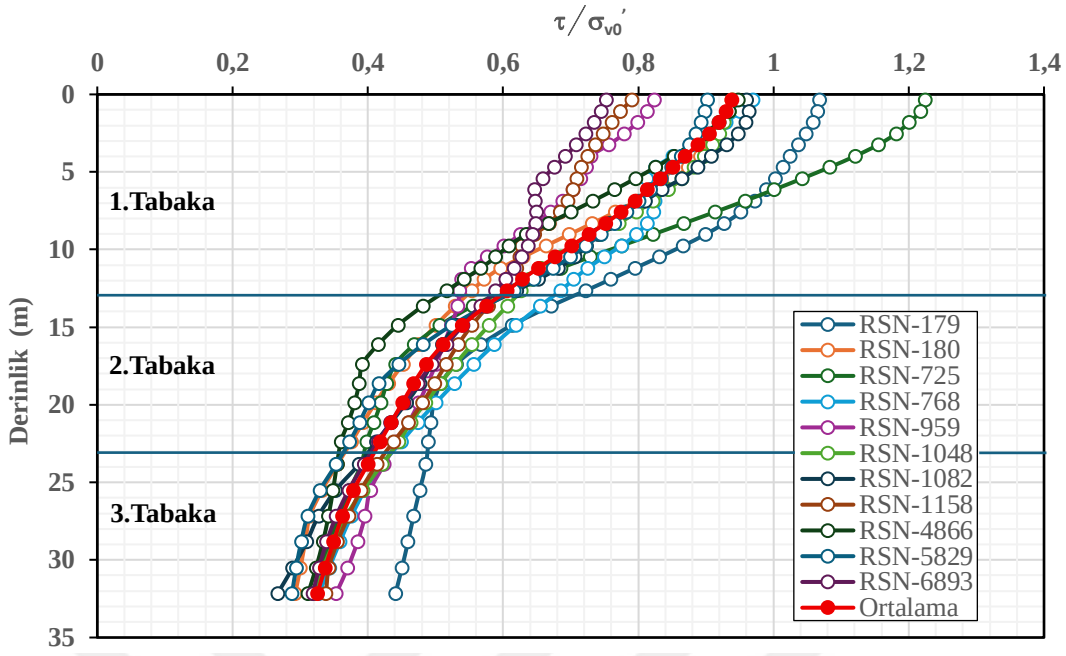
Şekil 80. Model-2 için H1 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer analiz sonucu bulunan ivmenin derinlikle değişimi



Şekil 81. Model-2 için H1 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer analiz sonucu bulunan yatay deplasmanın derinlikle değişimi

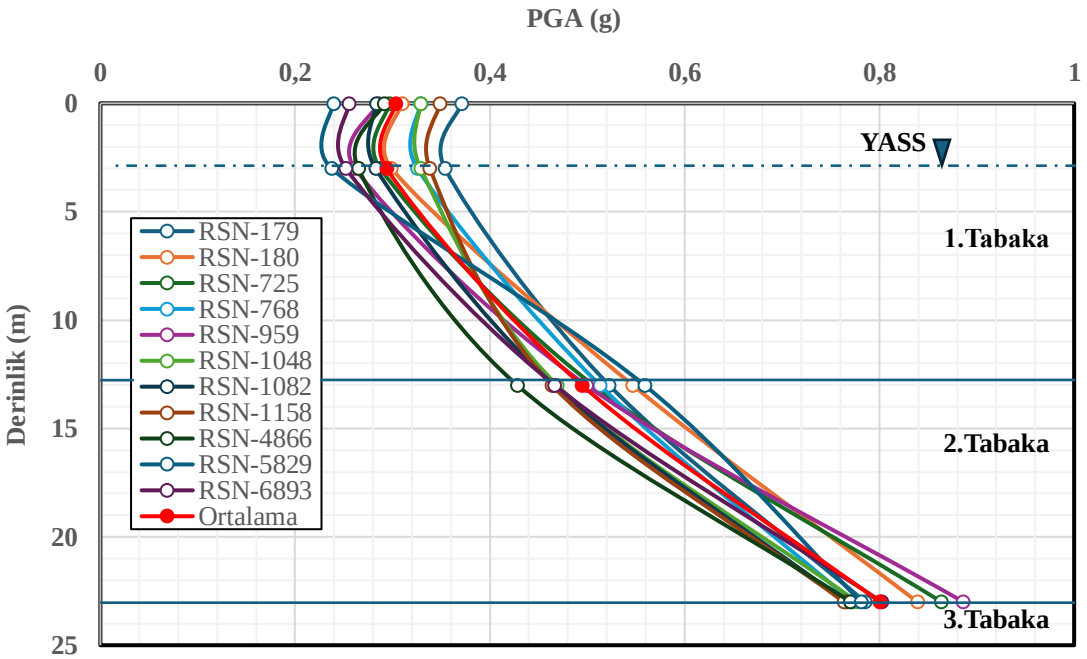


Şekil 82. Model-2 için H1 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer analiz sonucu bulunan maksimum yanal deformasyonun derinlikle değişimi

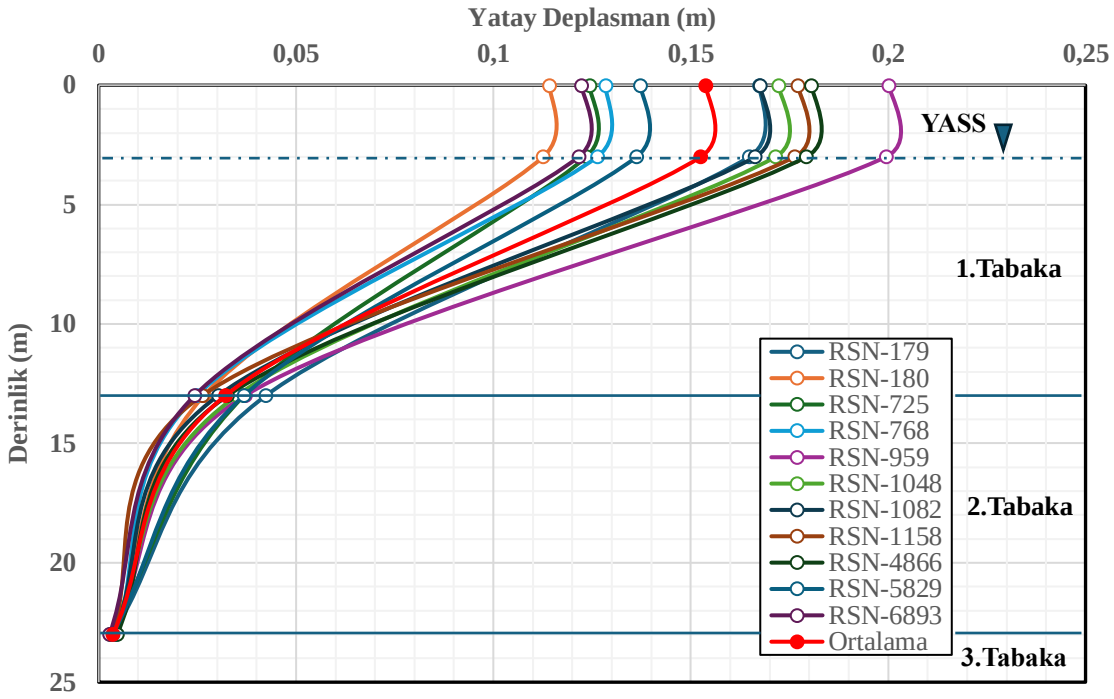


Şekil 83. Model-2 için H1 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer analiz sonucu bulunan kayma gerilmesi oranının derinlikle değişimi

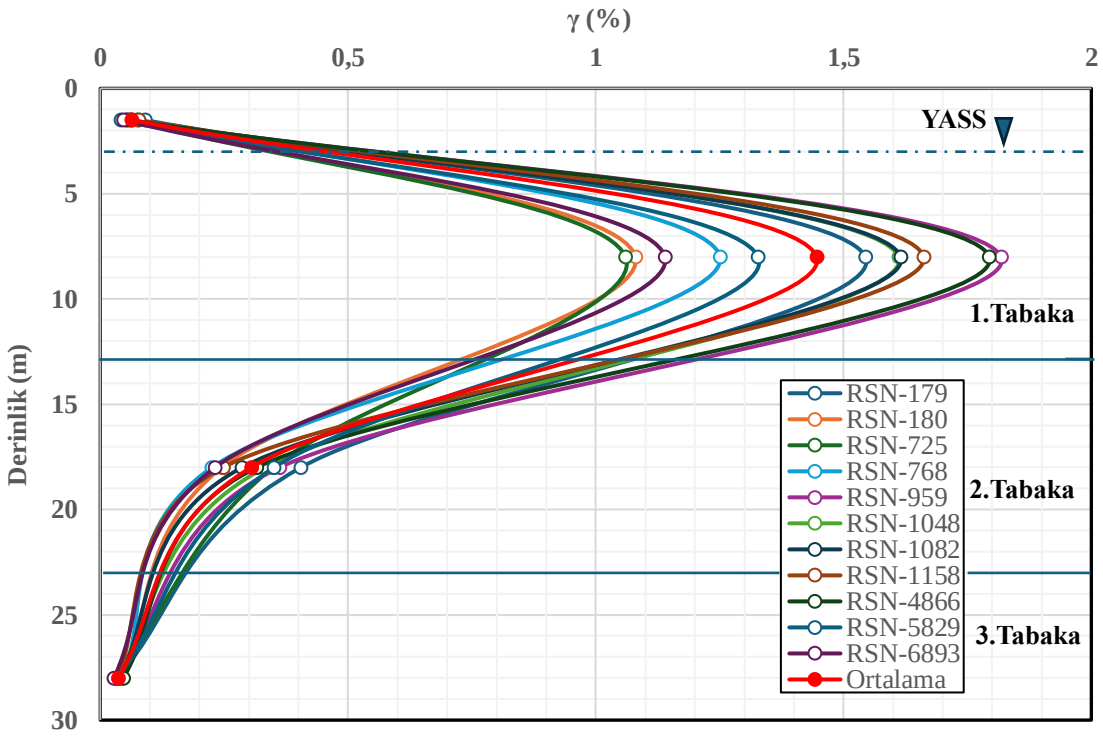
Model-3 için H1 yönlü 11 adet deprem kaydı ile yapılan Non-Lineer analiz sonuçları aşağıdaki grafiklerde görülmektedir. H2 yönlü 11 adet deprem kaydı ile yapılan Non-Lineer analiz sonuçları Ekler kısmında Şekil 172-175'te verilmiştir.



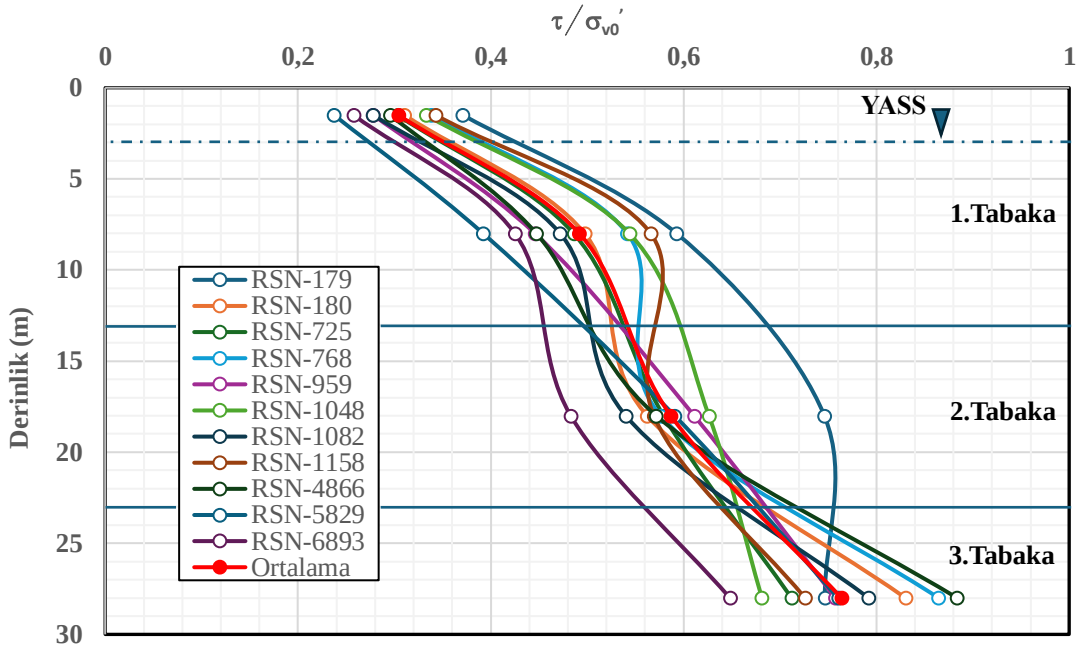
Şekil 84. Model-3 için H1 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan ivmenin derinlikle değişimi



Şekil 85. Model-3 için H1 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan yatay deplasmanın derinlikle değişimi

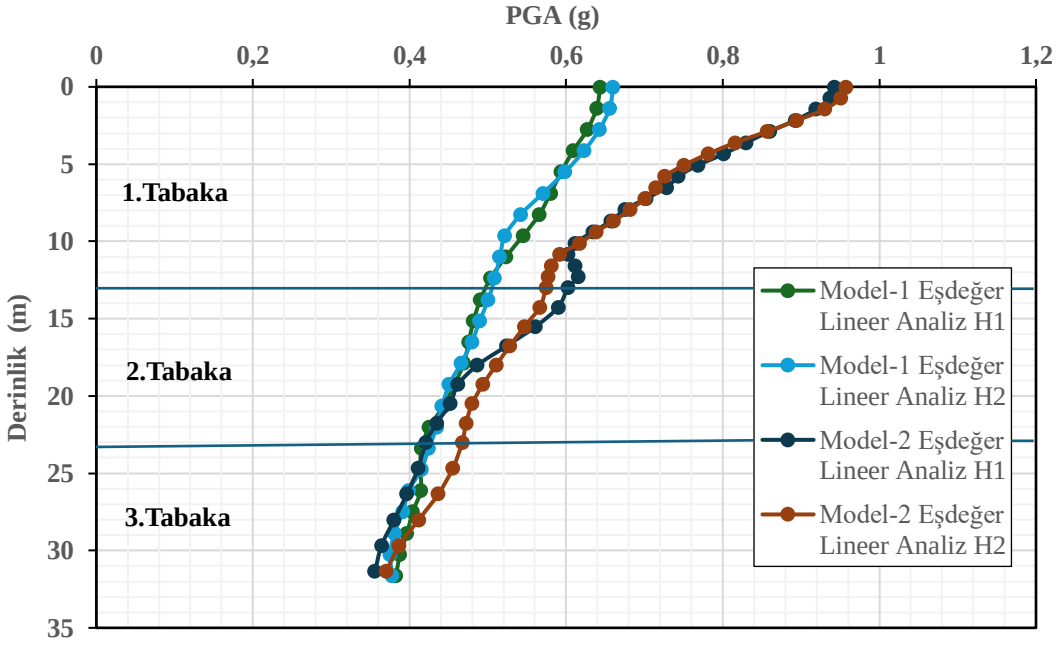


Şekil 86. Model-3 için H1 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan maksimum yanal deformasyonun derinlikle değişimi

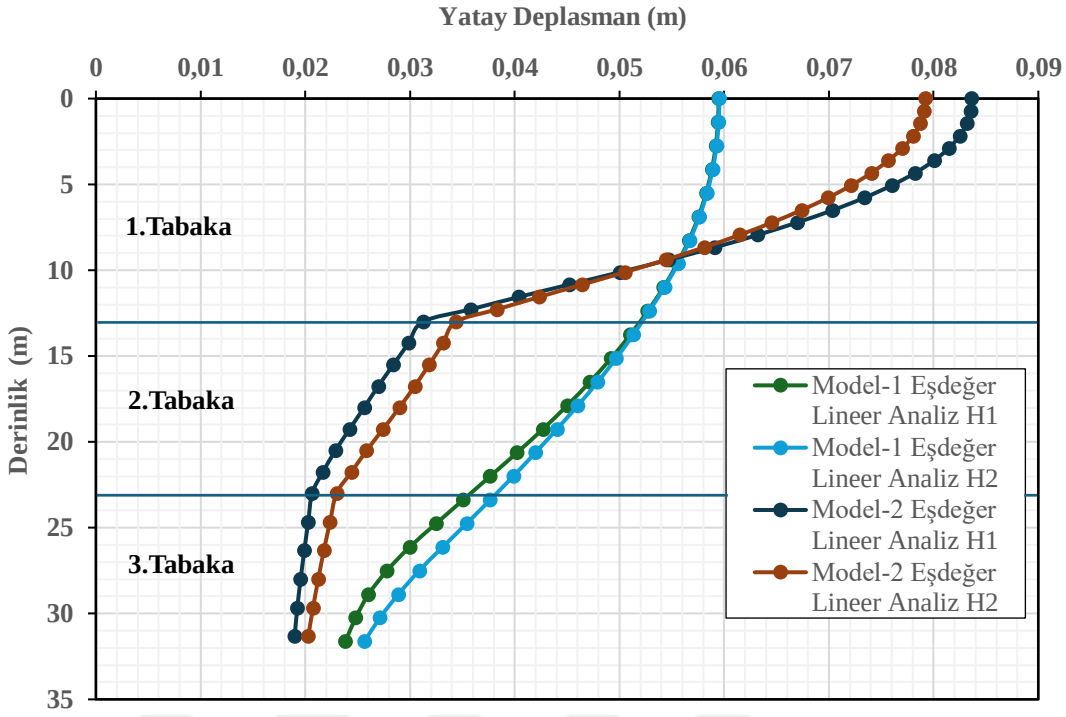


Şekil 87. Model-3 için H1 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan kayma gerilmesi oranının derinlikle değişimi

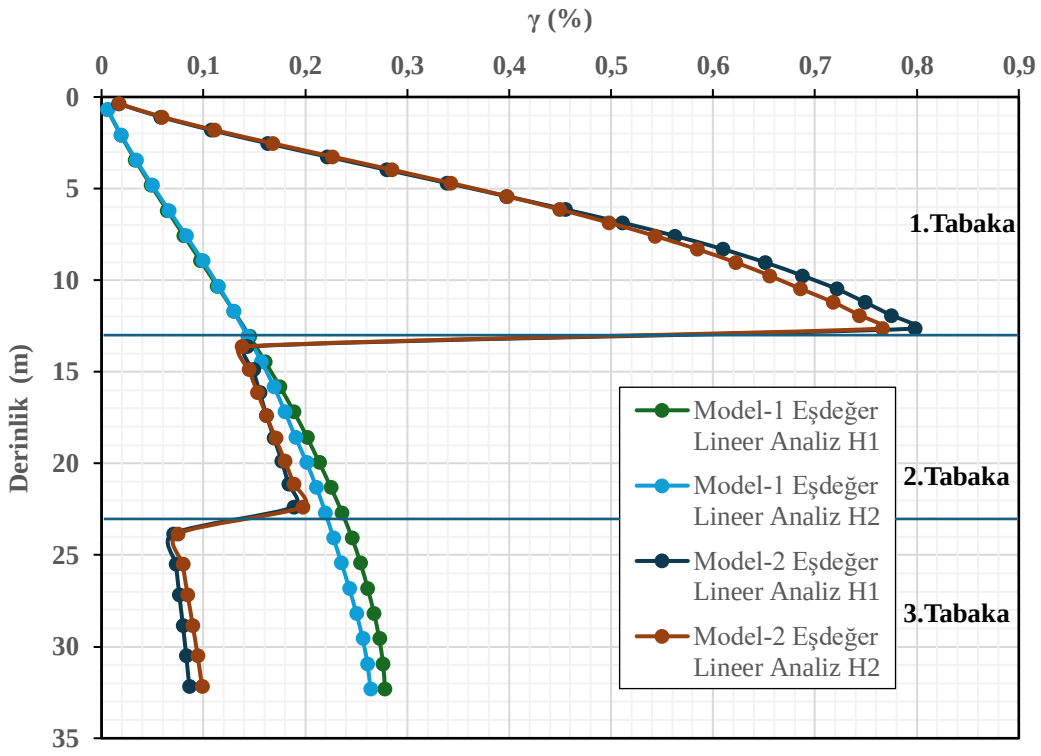
Model-1 ve Model-2 için H1 (Doğu-Batı) yönlü ve H2 (Kuzey-Güney) yönlü olmak üzere yapılan Eşdeğer-Lineer Analiz sonuçlarının ortalaması aşağıdaki grafiklerde kıyaslanmıştır.



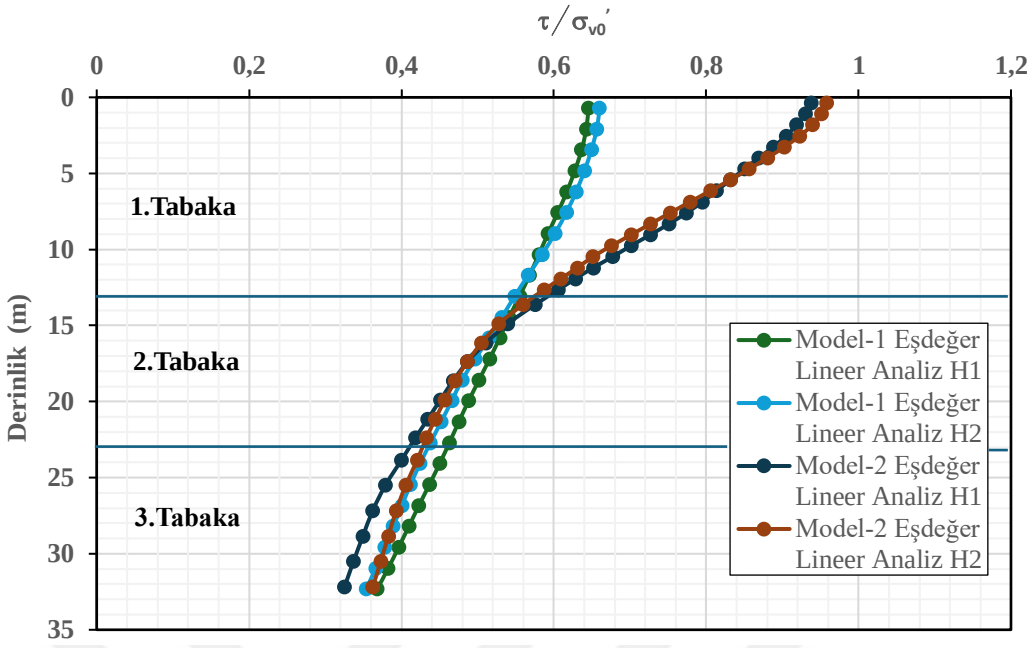
Şekil 88. Model-1 ve Model-2 için H1-H2 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer analiz sonucu bulunan ivmenin derinlikle değişimi



Şekil 89. Model-1 ve Model-2 için H1-H2 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer analiz sonucu bulunan yatay deplasmanın derinlikle değişimi

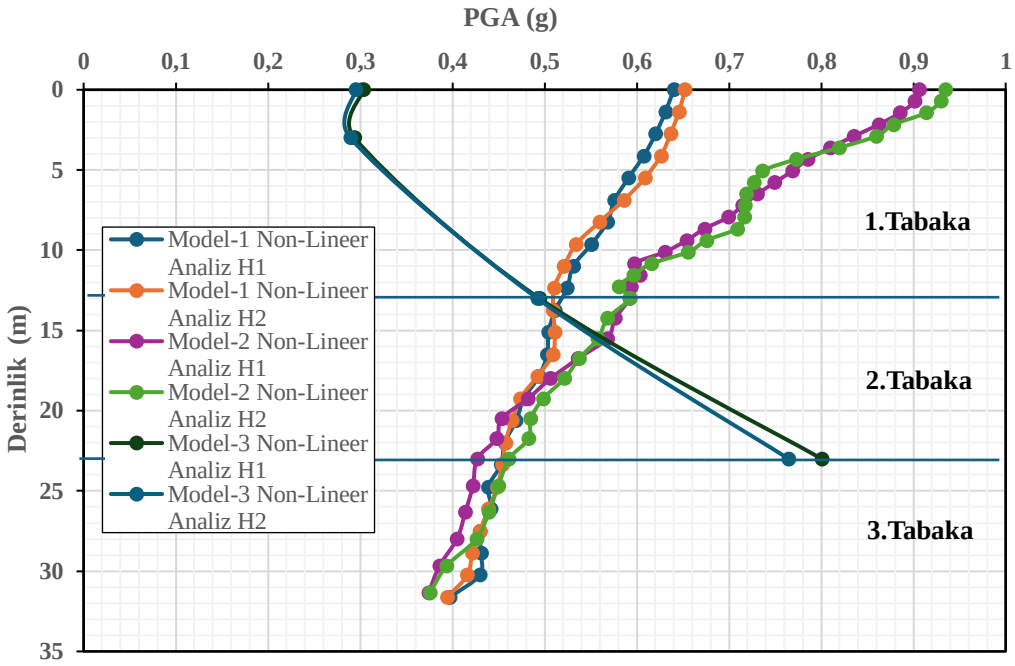


Şekil 90. Model-1 ve Model-2 için H1-H2 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer sonucu bulunan maksimum yanal deformasyonun derinlikle değişimi

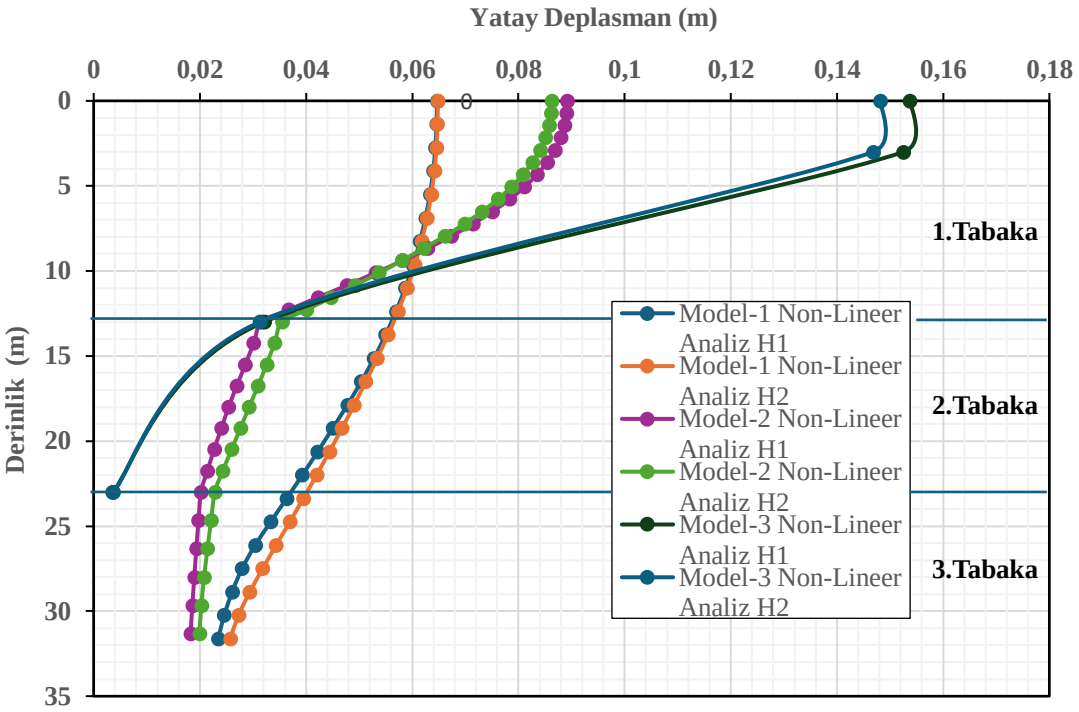


Şekil 91. Model-1 ve Model-2 için H1-H2 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer sonucu bulunan kayma gerilmesi oranının derinlikle değişimi

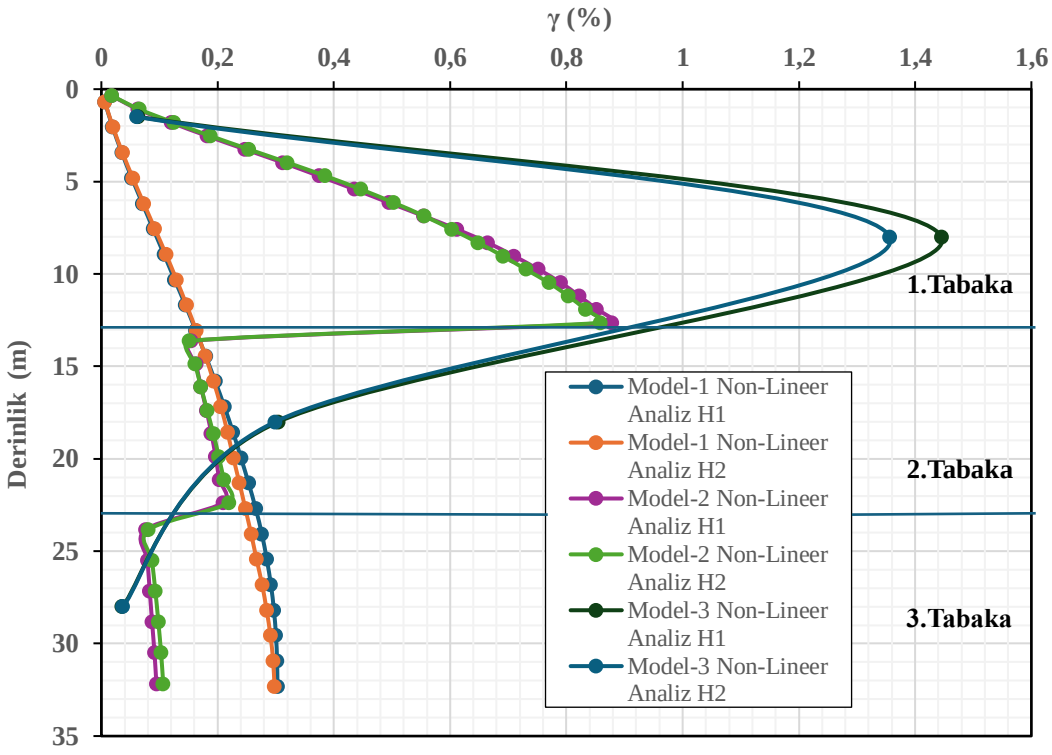
Model-1, Model-2 ve Model-3 için H1 (Doğu-Batı) yönlü ve H2 (Kuzey-Güney) yönlü olmak üzere yapılan Non-Lineer Analiz sonuçlarının ortalaması aşağıdaki grafiklerde kıyaslanmıştır.



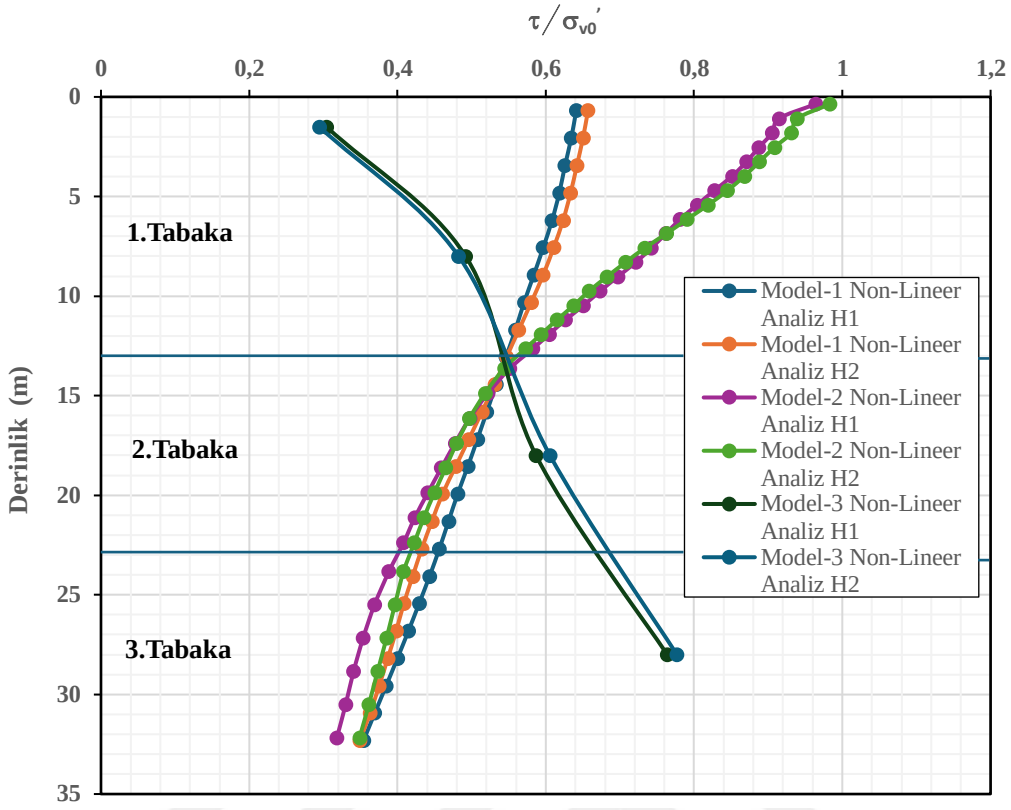
Şekil 92. Model-1, Model-2 ve Model-3 için H1-H2 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan ivmenin derinlikle değişimi



Şekil 93. Model-1, Model-2 ve Model-3 için H1-H2 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan yatay deplasmanın derinlikle değişimi



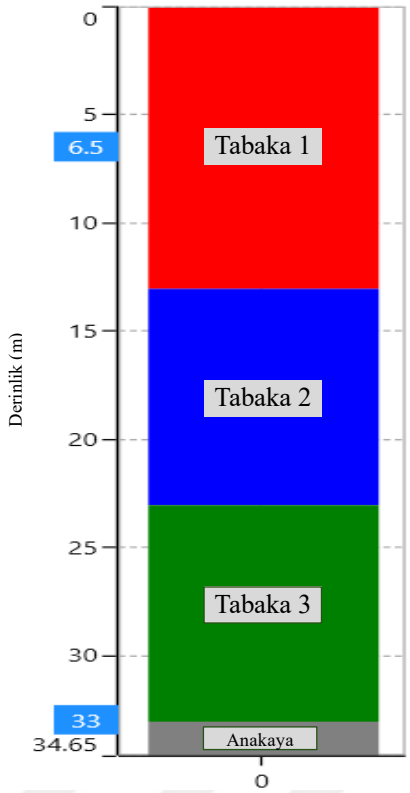
Şekil 94. Model-1, Model-2 ve Model-3 için H1-H2 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan maksimum yanal deformasyonun derinlikle değişimi



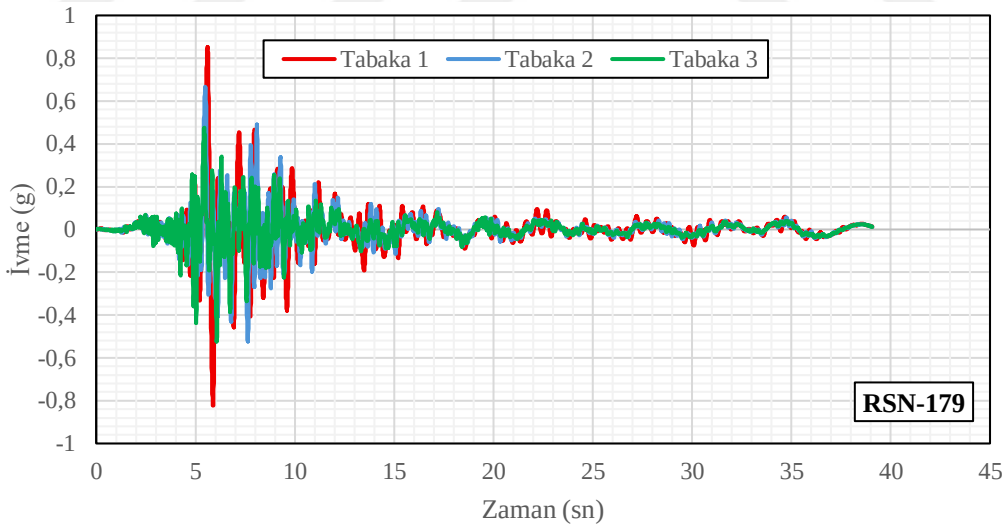
Şekil 95. Model-1, Model-2 ve Model-3 için H1-H2 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan kayma gerilmesi oranının derinlikle değişimi

Literatürde (Seed & Idriss, 1971; Kramer, 1996) de belirtildiği üzere, tabakalı zeminlerde deprem dalgalarının yukarı doğru yayılımı sırasında yansıma-kırılma olayları özellikle üst yumuşak tabakalarda ivme büyütmelerine neden olmakta ve yerel zemin etkilerinin büyüklüğünü artırmaktadır. Bu bağlamda tabakalaşmanın olduğu zemin modellerinde homojen profillere göre daha karmaşık ve uzun süreli salınımlar üretilmesi beklenmektedir.

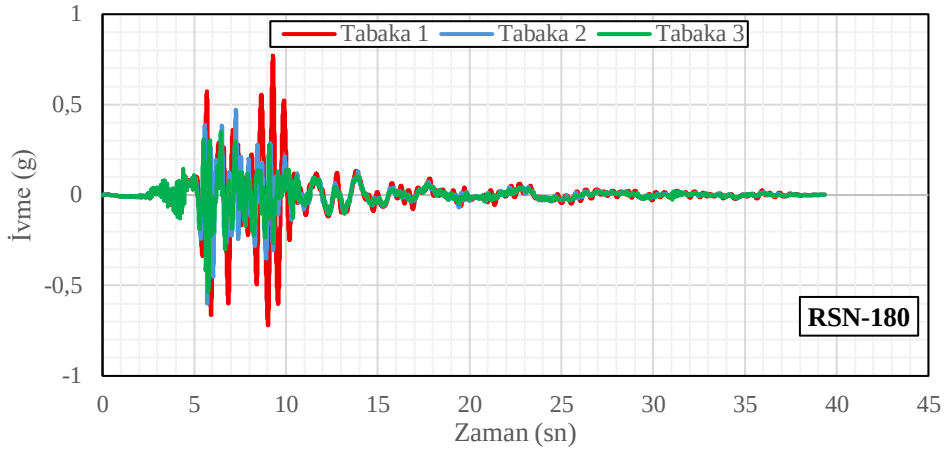
Şekil 96'da gösterilen Model-2 için H1 yönlü deprem kayıtları ile yapılan Non-Lineer analiz sonuçlarının tabakalara göre ivme zaman değişim grafikleri aşağıda verilmiştir. Model-2 için H2 yönlü deprem kayıtları ile yapılan Non-Lineer analiz sonuçlarının tabakalara göre ivme-zaman değişim grafikleri Ekler kısmında Şekil 176-186'da verilmiştir.



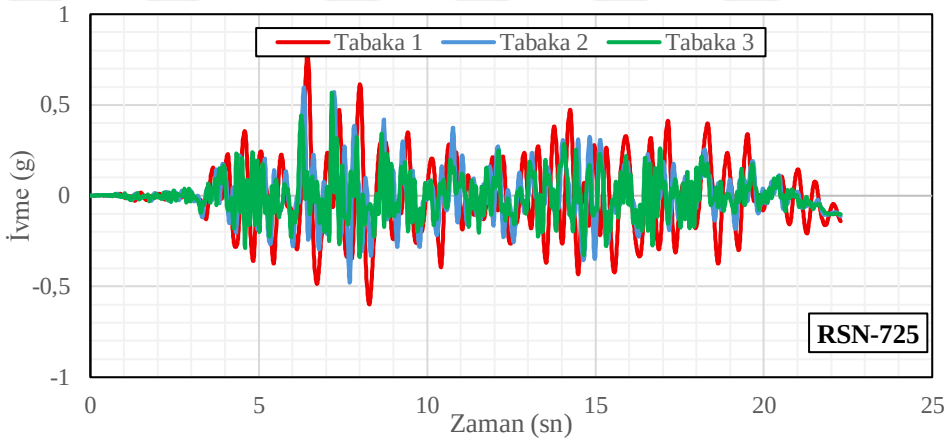
Şekil 96. Model-2 Tabaka dizilimi



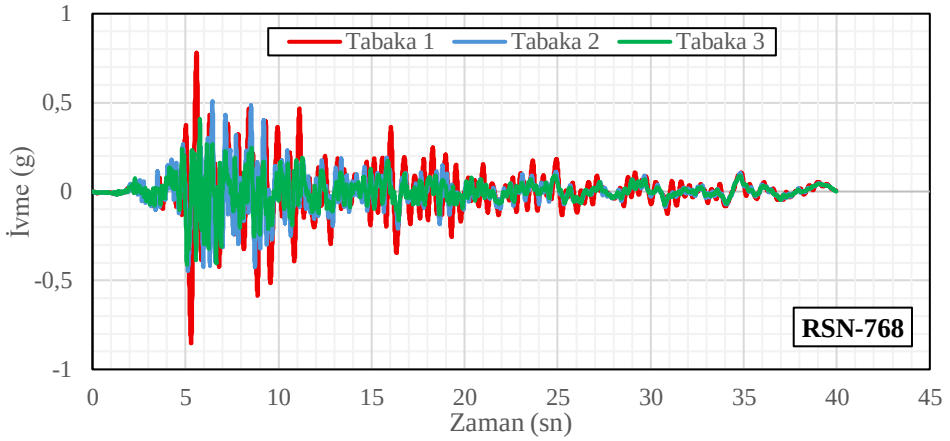
Şekil 97. Model-2 için H1 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme-zaman değişim grafiği RSN-179



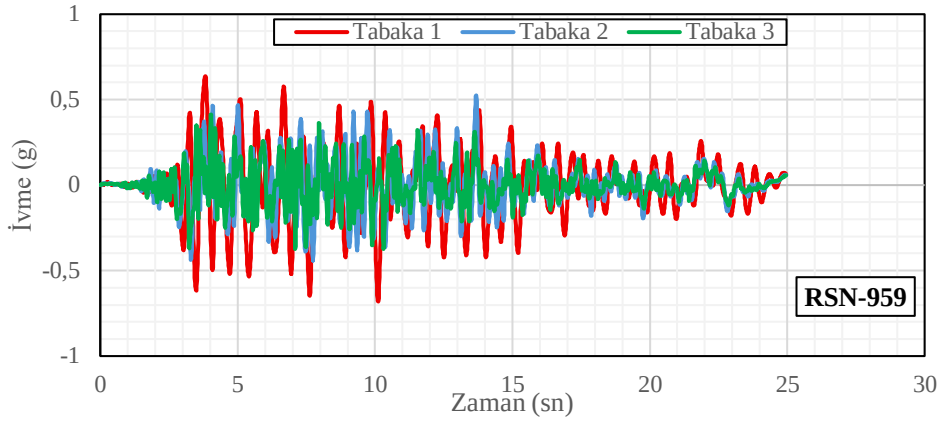
Şekil 98. Model-2 için H1 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-180



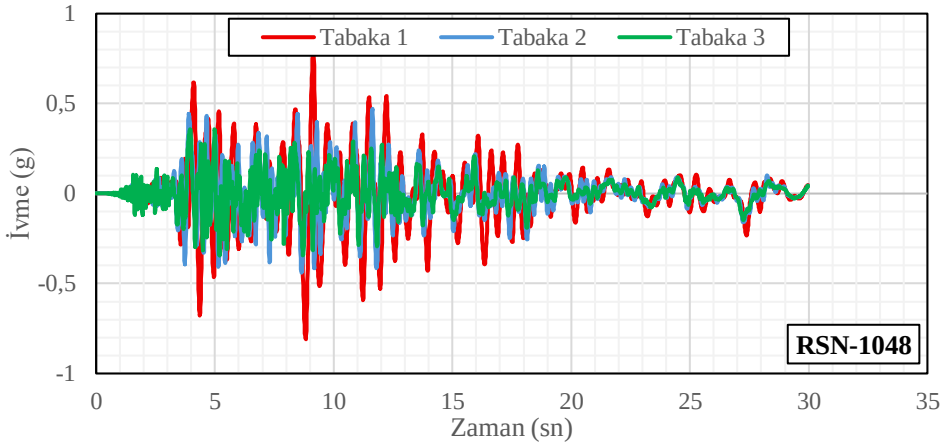
Şekil 99. Model-2 için H1 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-725



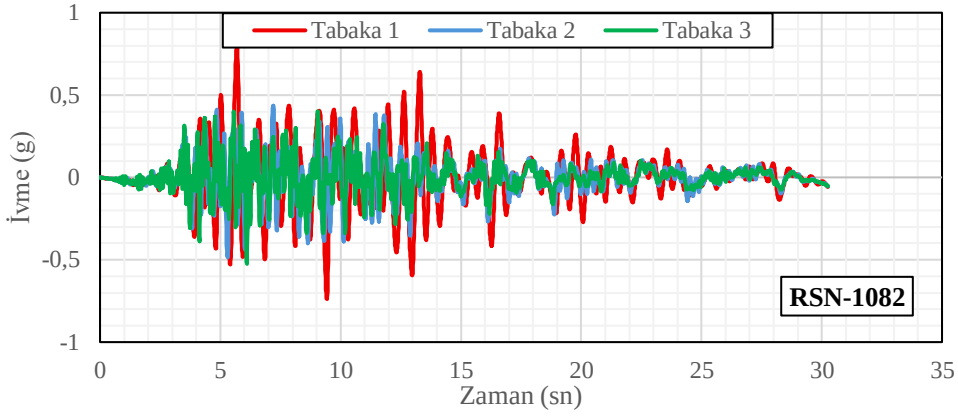
Şekil 100. Model-2 için H1 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-768



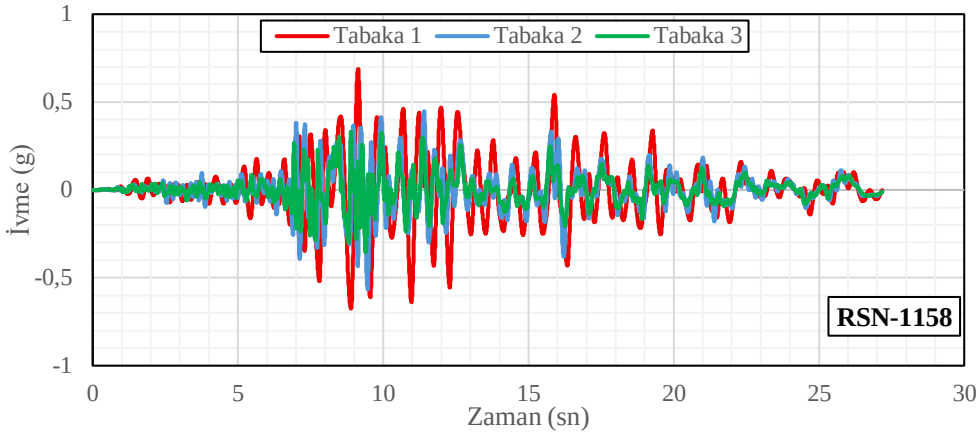
Şekil 101. Model-2 için H1 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-959



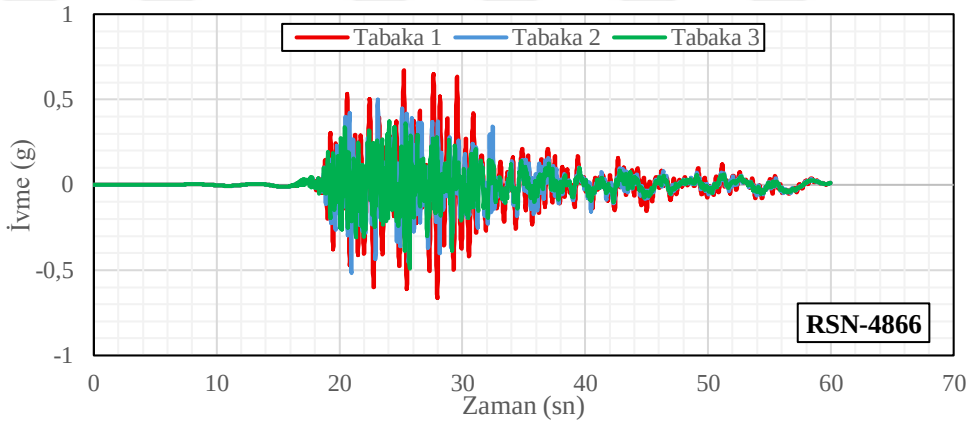
Şekil 102. Model-2 için H1 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-1048



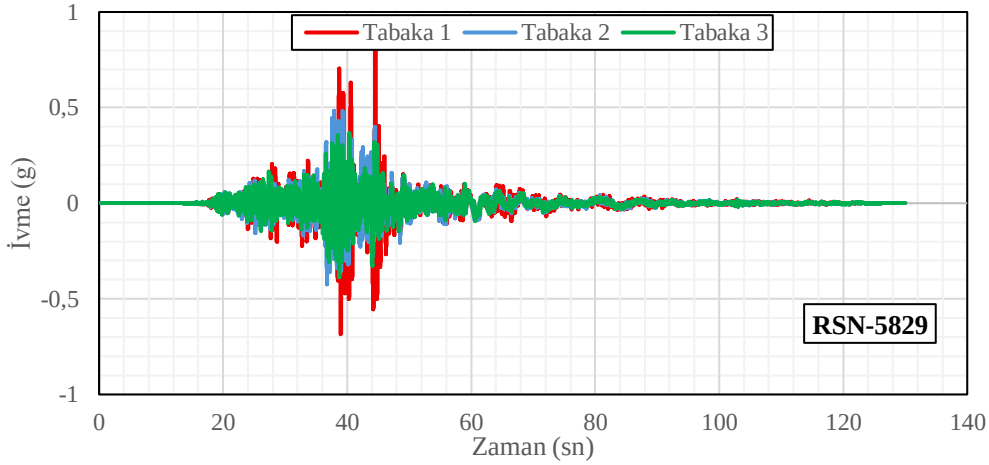
Şekil 103. Model-2 için H1 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-1082



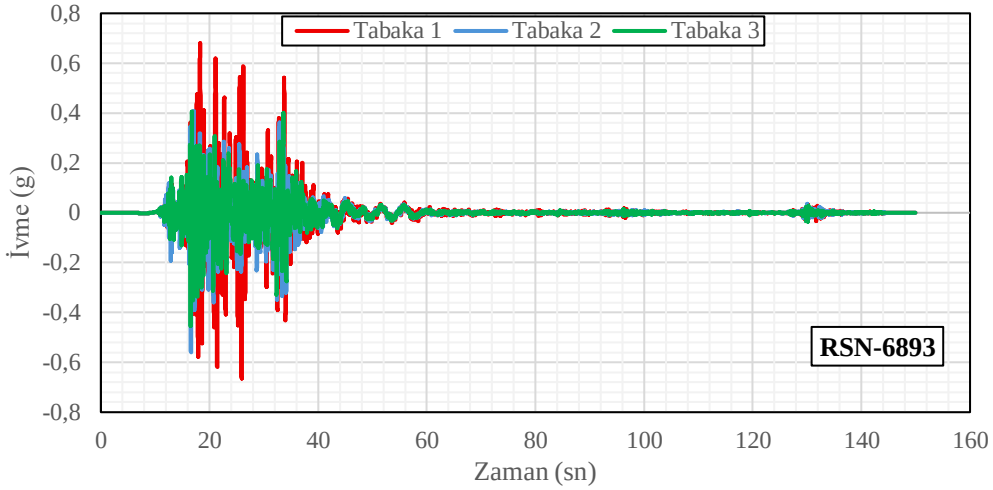
Şekil 104. Model-2 için H1 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-1158



Şekil 105. Model-2 için H1 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-4866



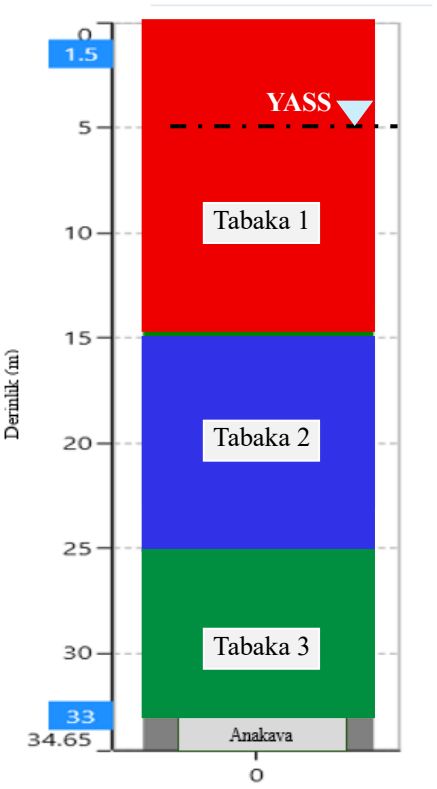
Şekil 106. Model-2 için H1 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-5829



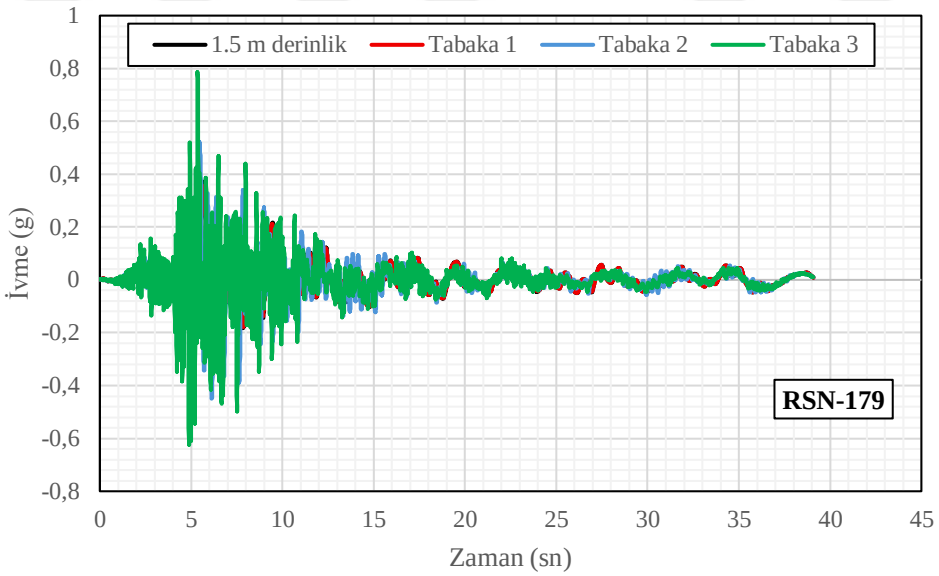
Şekil 107. Model-2 için H1 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-6893

Yeraltı suyu seviyesinin varlığı, zeminlerin dinamik davranışını doğrudan etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Literatürde (Seed & Idriss, 1971; Ishihara, 1996; Kramer, 1996; Youd & Idriss, 2001) belirtildiği üzere, yeraltı suyu etkisi zeminin efektif gerilmesini azaltarak kayma modülünde düşüşe ve dolayısıyla zemin rijitliğinde azalmaya neden olmaktadır. Bu durum, deprem dalgalarının zemin içerisinde yayılımını değiştirerek hem genlik hem de frekans içeriğinde farklılıklar oluşturur. Dolayısıyla, yeraltı suyu bulunan zeminlerde ivme-zaman kayıtları genellikle daha düşük ivme büyütmeleri sergilemekle birlikte, daha uzun süreli ve düşük frekanslı salınımlar gözlenir. Bu karakteristik davranış, zeminin enerjiyi daha sönümlü bir biçimde yaydığını ancak uzun periyotlu titreşimlerin baskın hâle geldiğini göstermektedir.

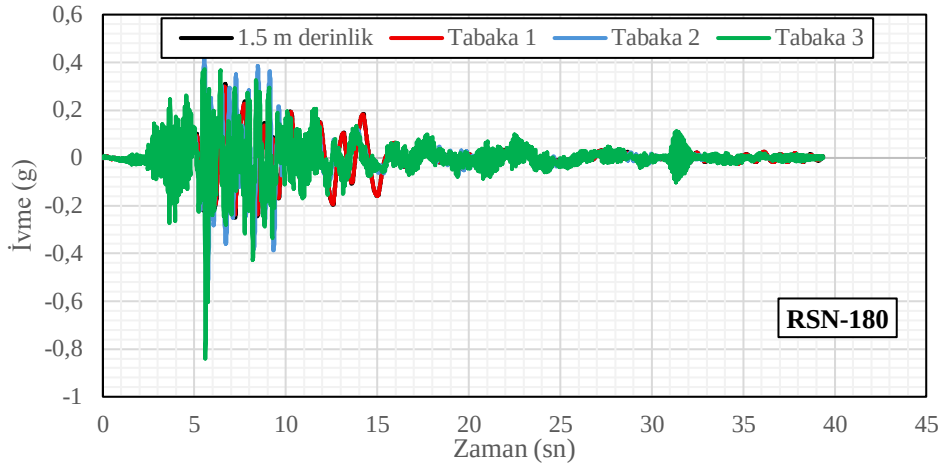
Şekil 108'de gösterilen Model-3 için H1 yönlü deprem kayıtları ile yapılan Non-Lineer analiz sonuçlarının tabakalara göre ivme zaman değişim grafikleri aşağıda verilmiştir. Model-3 için H2 yönlü deprem kayıtları ile yapılan Non-Lineer analiz sonuçlarının tabakalara göre ivme-zaman değişim grafikleri Ekler kısmında Şekil 187-197'de verilmiştir.



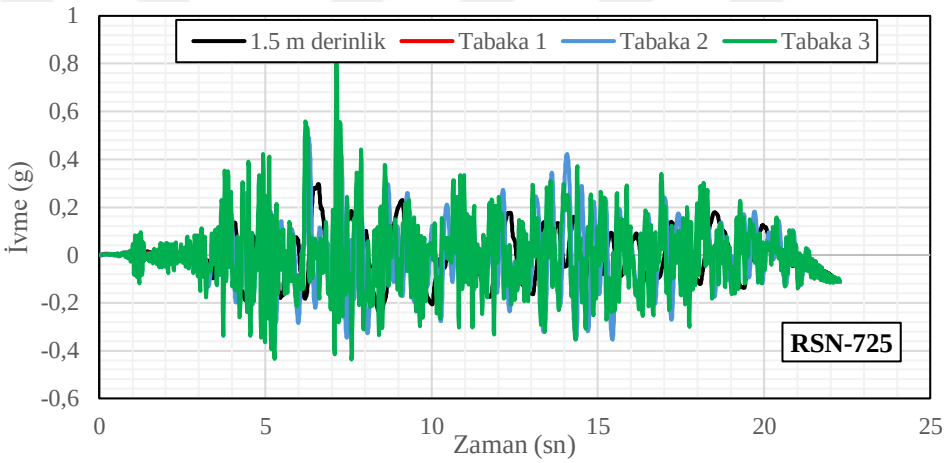
Şekil 108. Model-3 Tabaka dizilimi



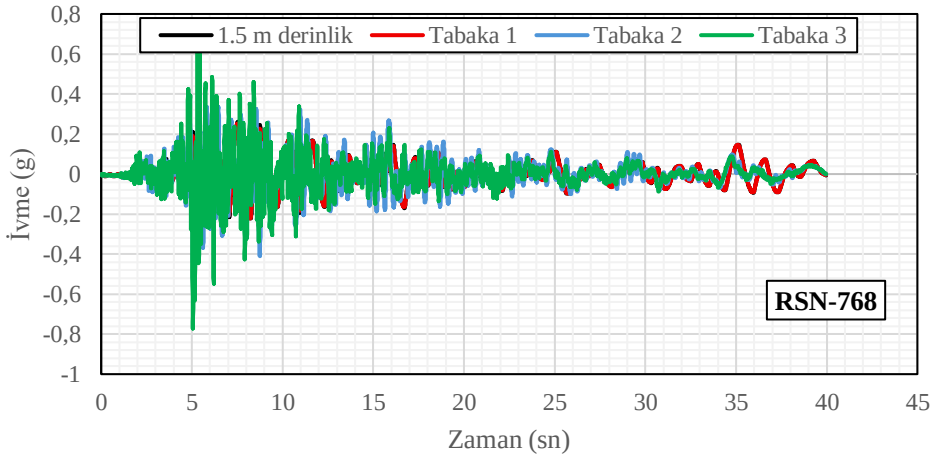
Şekil 109. Model-3 için H1 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-179



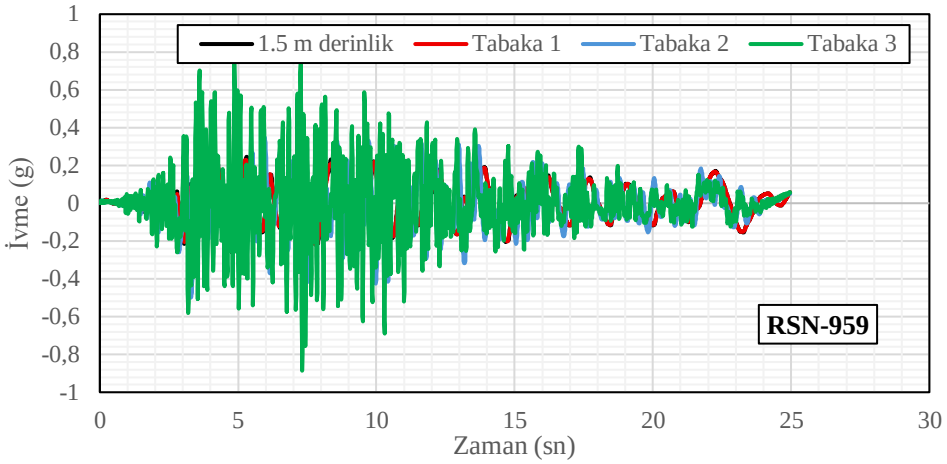
Şekil 110. Model-3 için H1 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-180



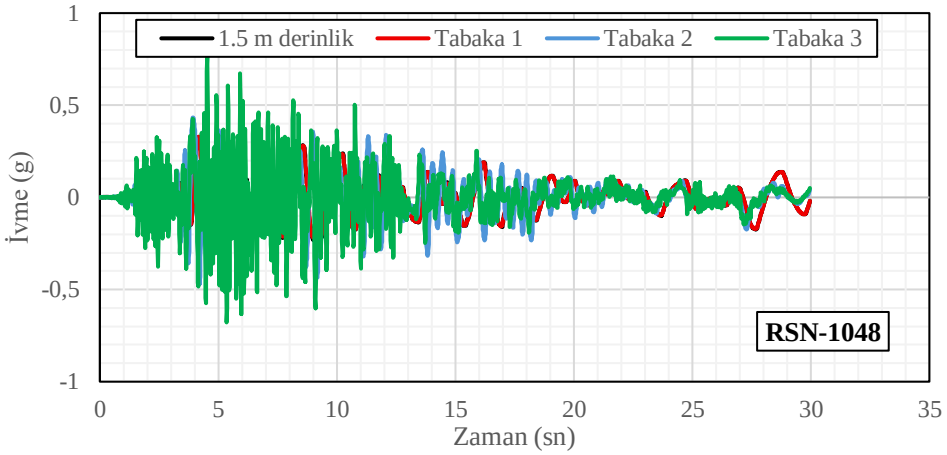
Şekil 111. Model-3 için H1 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-725



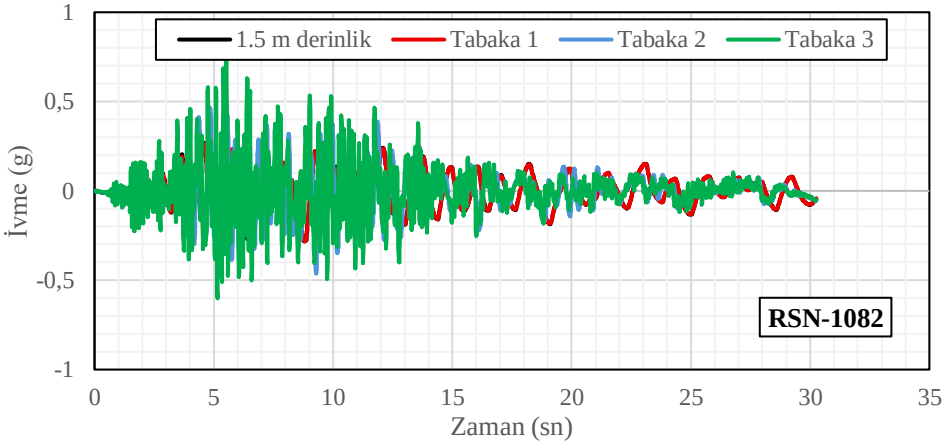
Şekil 112. Model-3 için H1 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-768



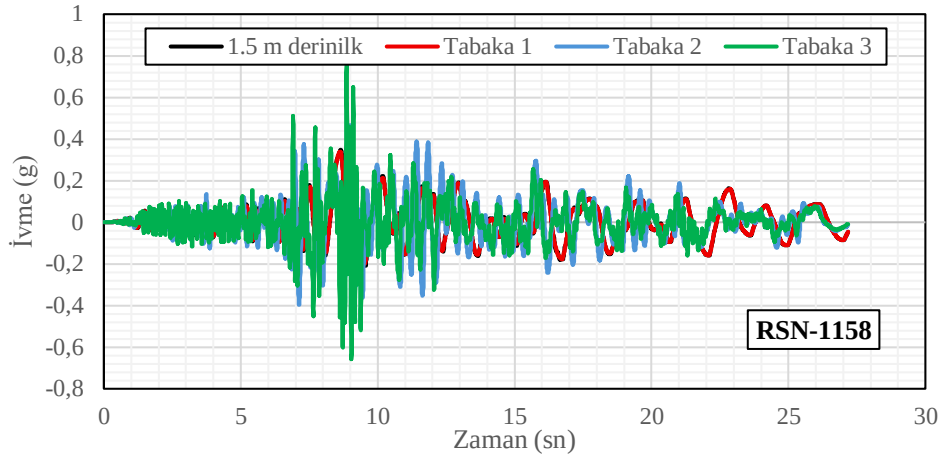
Şekil 113. Model-3 için H1 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-959



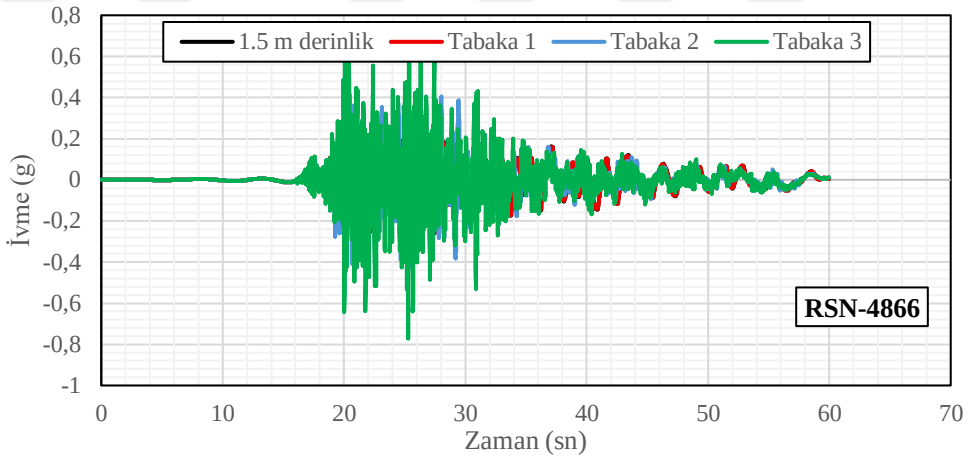
Şekil 114. Model-3 H1 için yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-1048



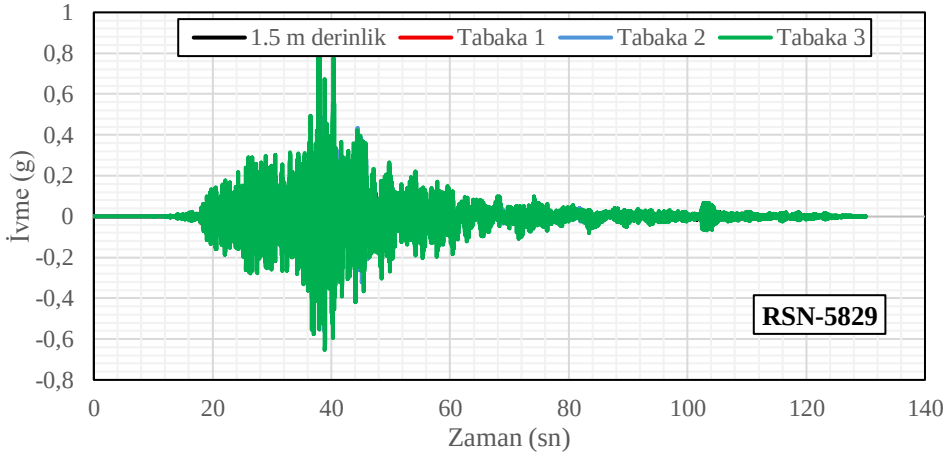
Şekil 115. Model-3 için H1 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-1082



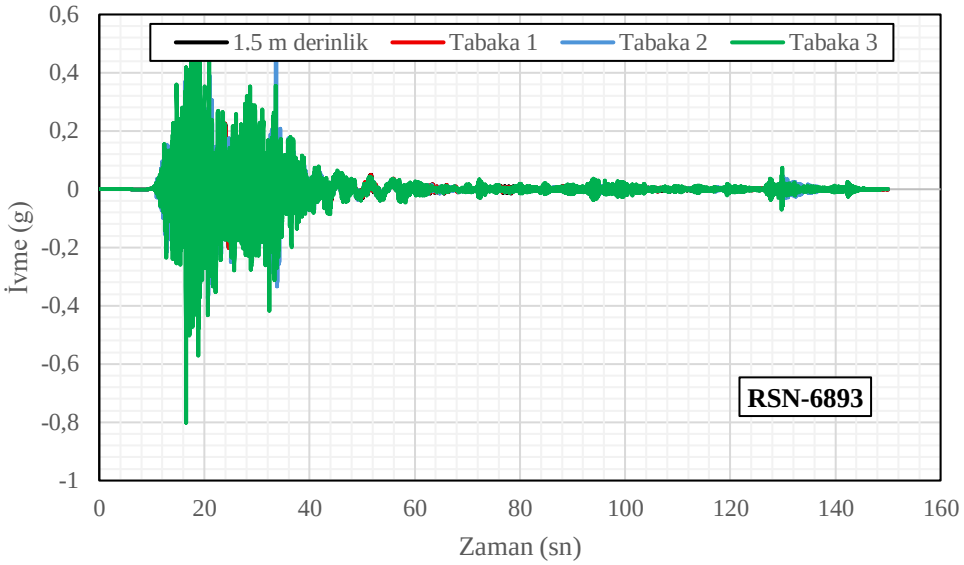
Şekil 116. Model-3 için H1 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-1158



Şekil 117. Model-3 H1 için yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-4866

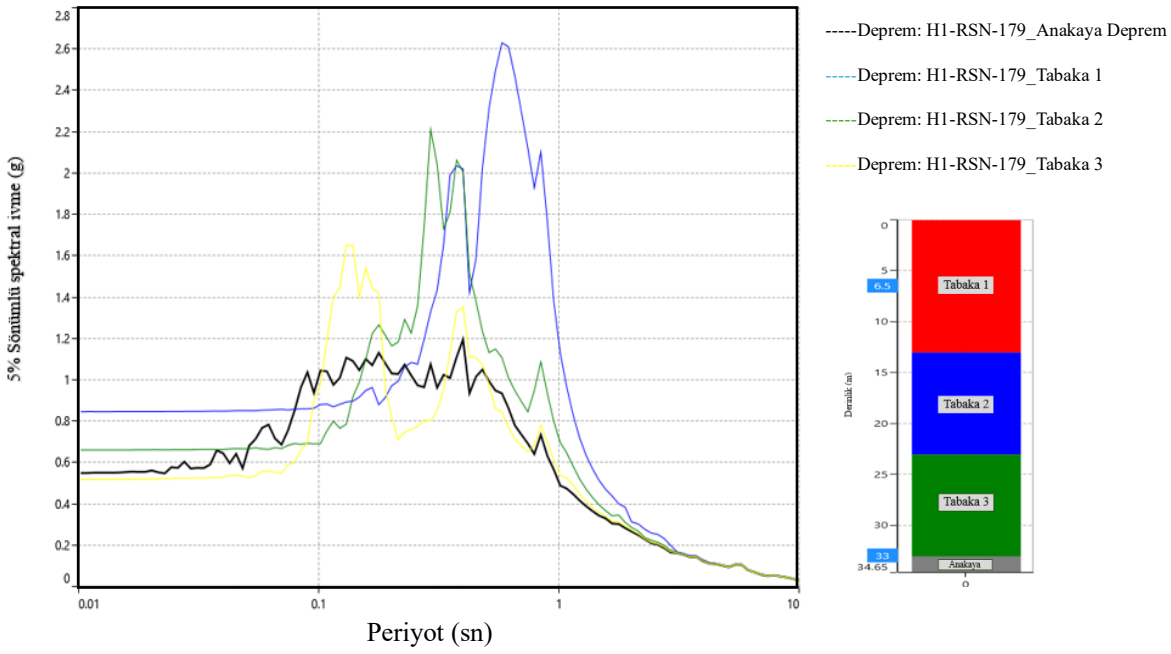


Şekil 118. Model-3 için H1 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-5829

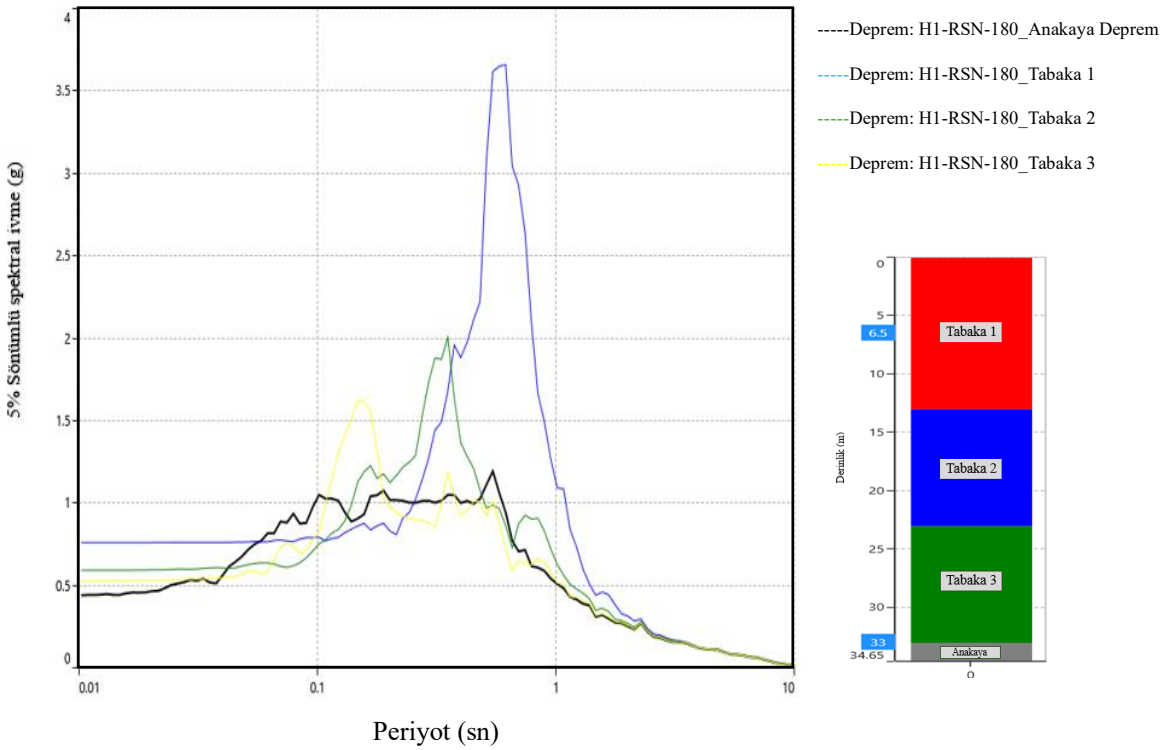


Şekil 119. Model-3 için H1 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-6893

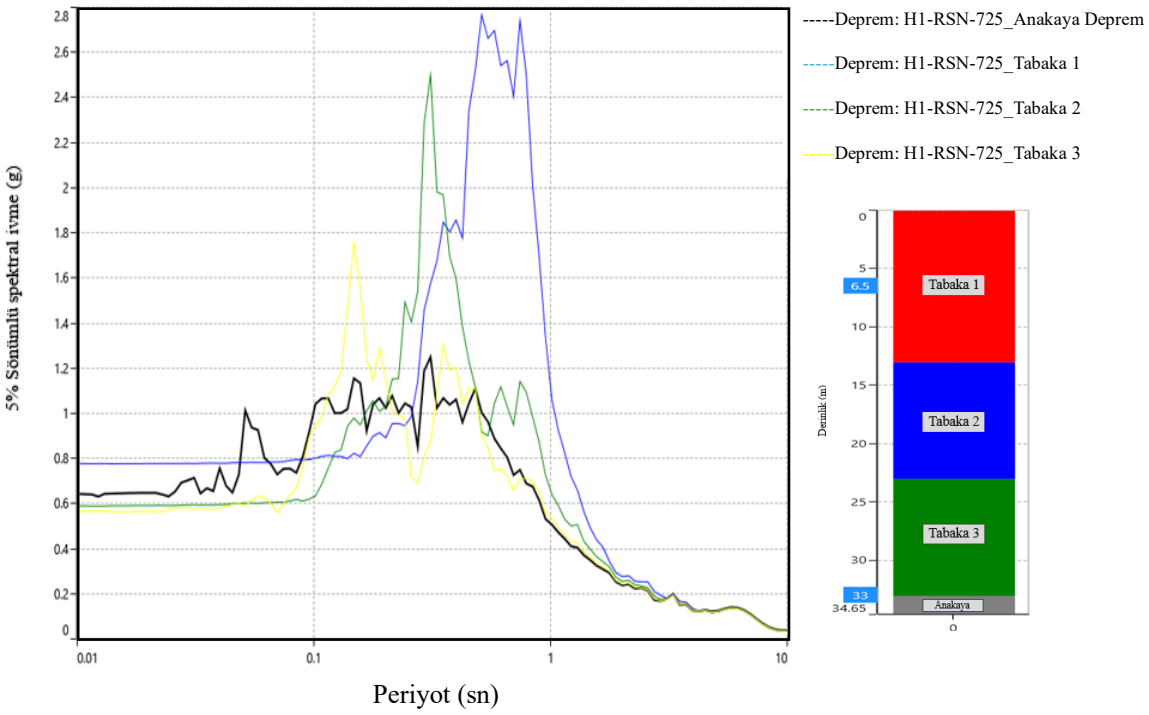
Model-2 için H1 yönlü deprem kayıtlarıyla yapılan Non-Lineer analiz sonuçlarının tabakalara göre spektral değişim grafiği aşağıda verilmiştir. Model-2 için H2 yönlü diğer deprem kayıtlarıyla yapılan Non-Lineer analiz sonuçlarının tabakalara göre spektral değişim grafikleri Ekler kısmında Şekil'198-208'de verilmiştir.



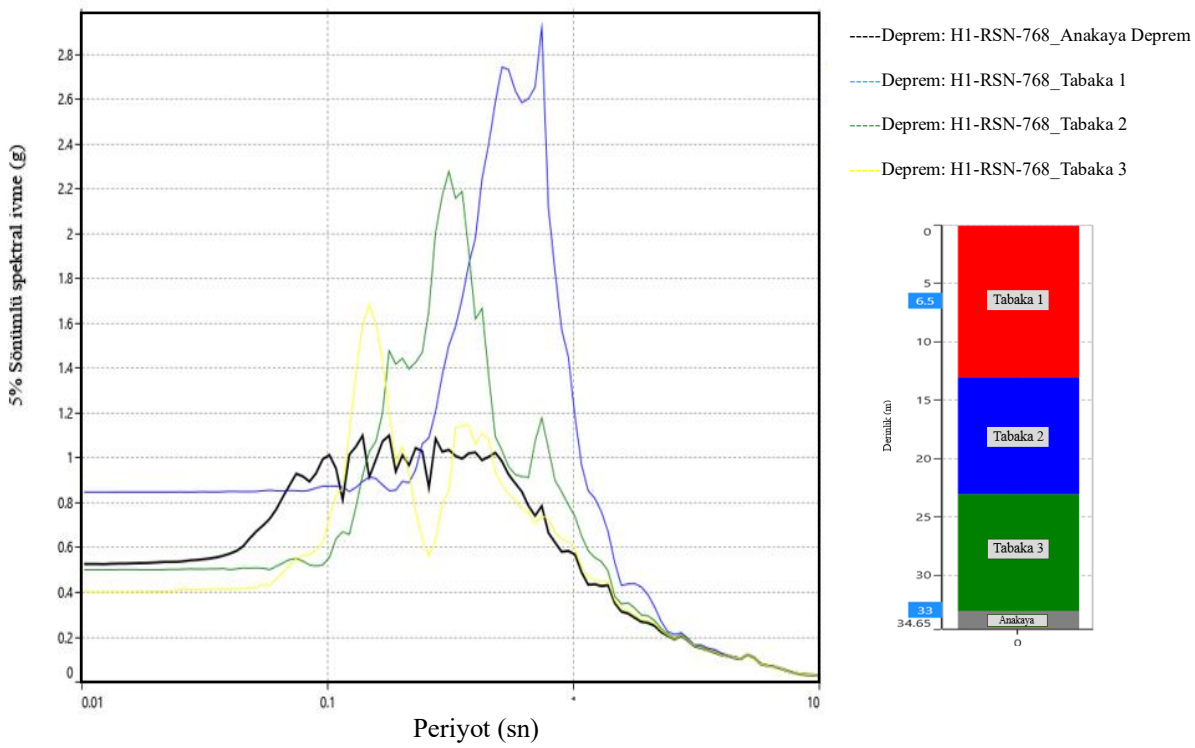
Şekil 120. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-179



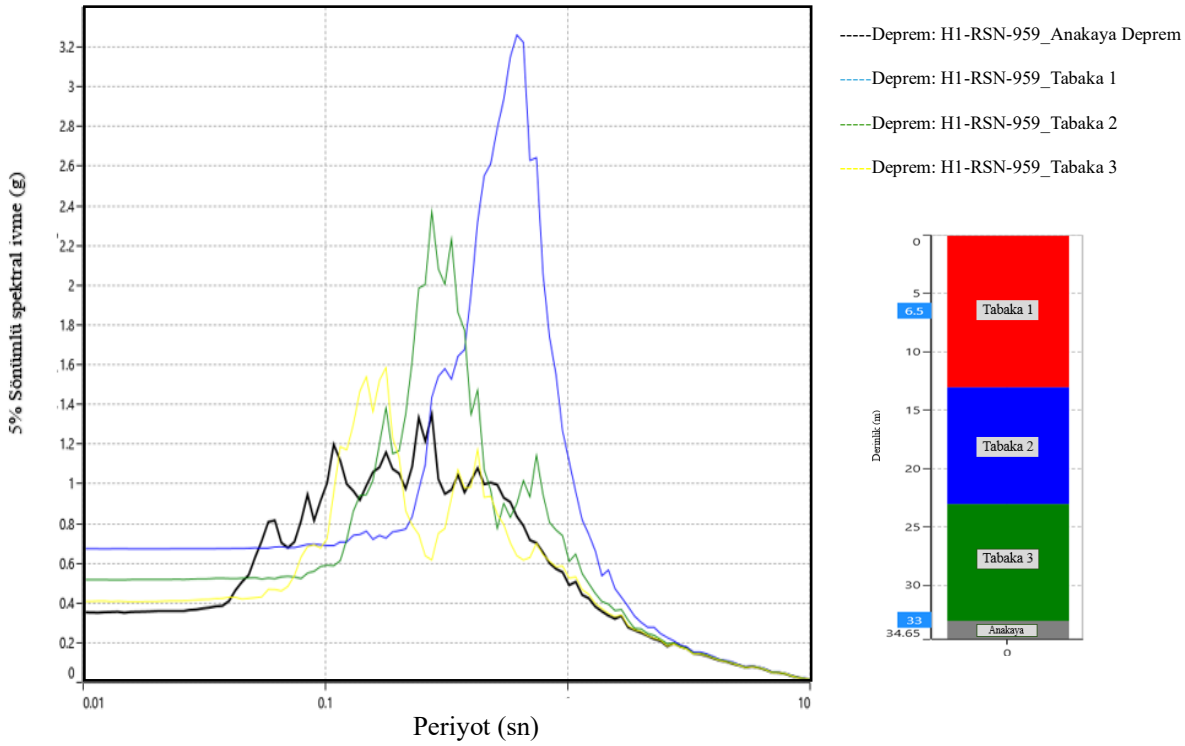
Şekil 121. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-180



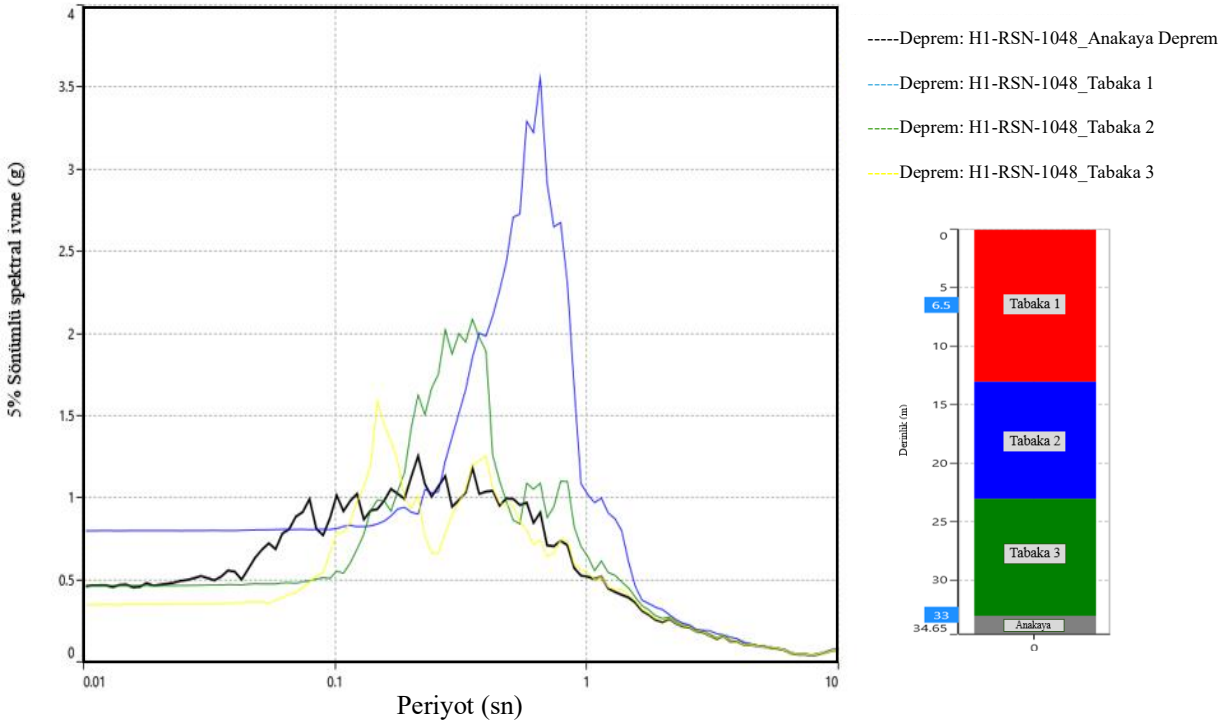
Şekil 122. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-725



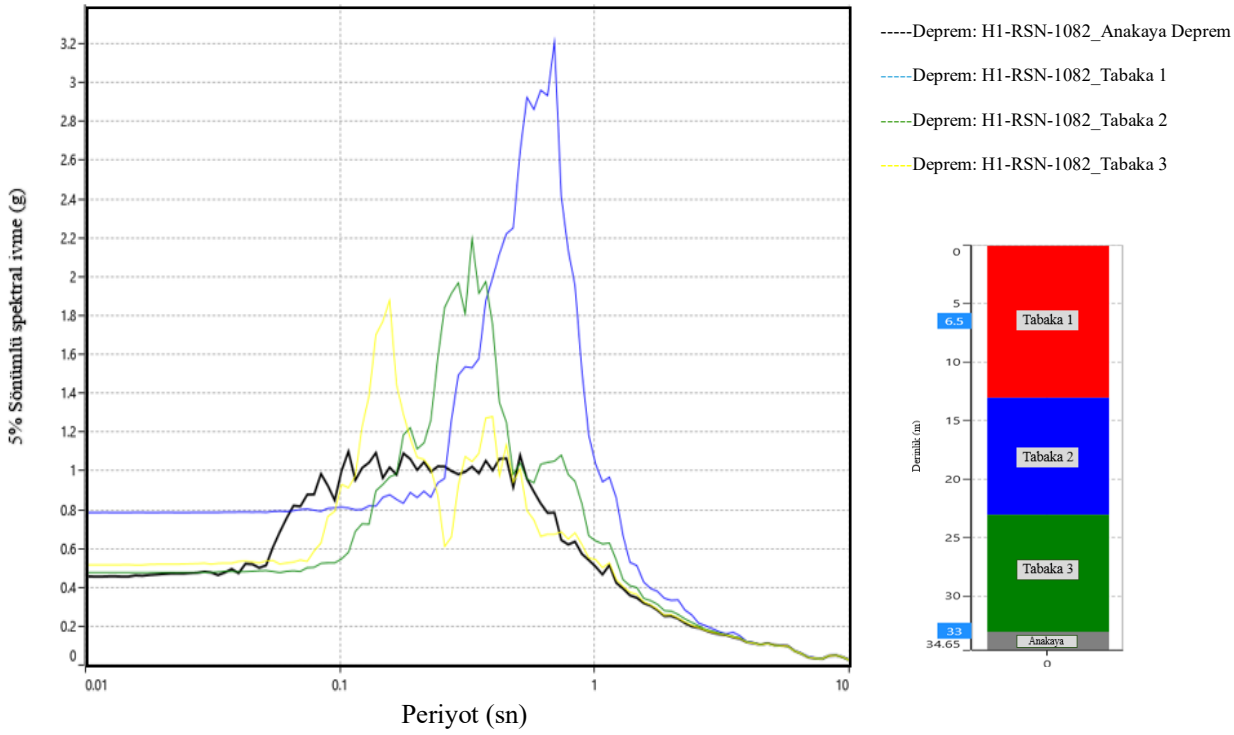
Şekil 123. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-768



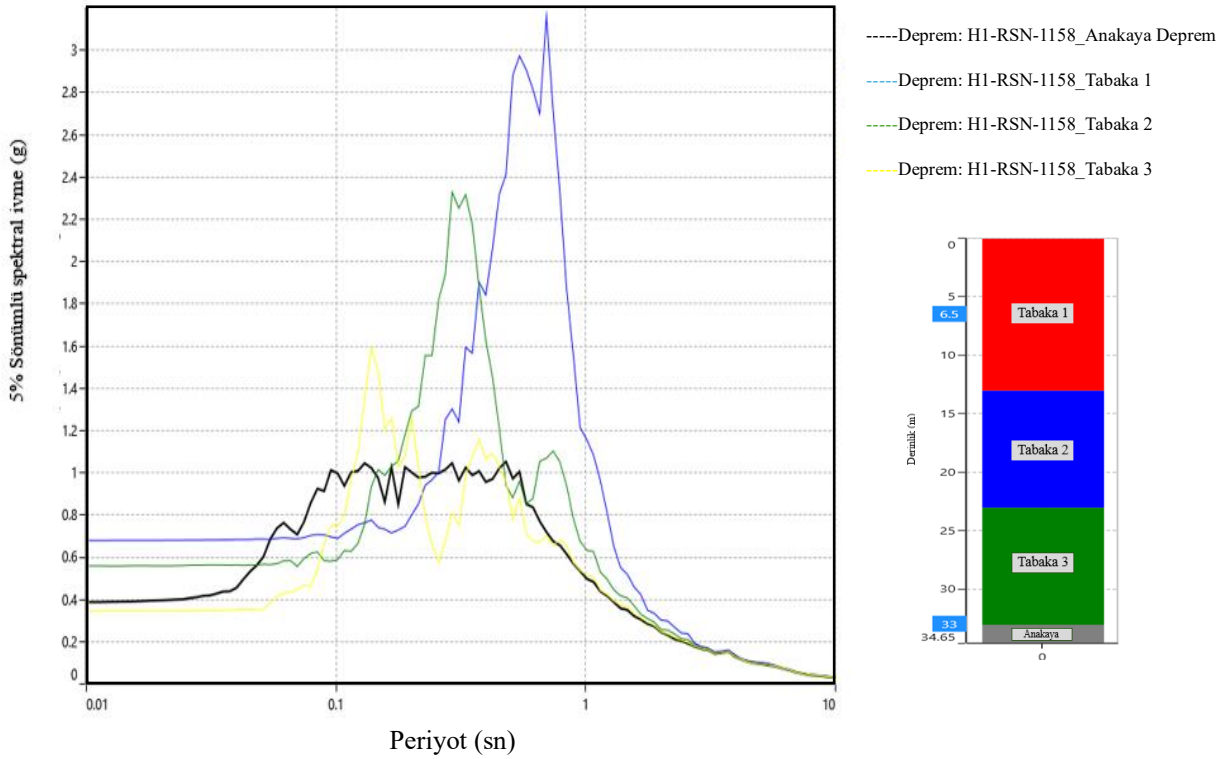
Şekil 124. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-959



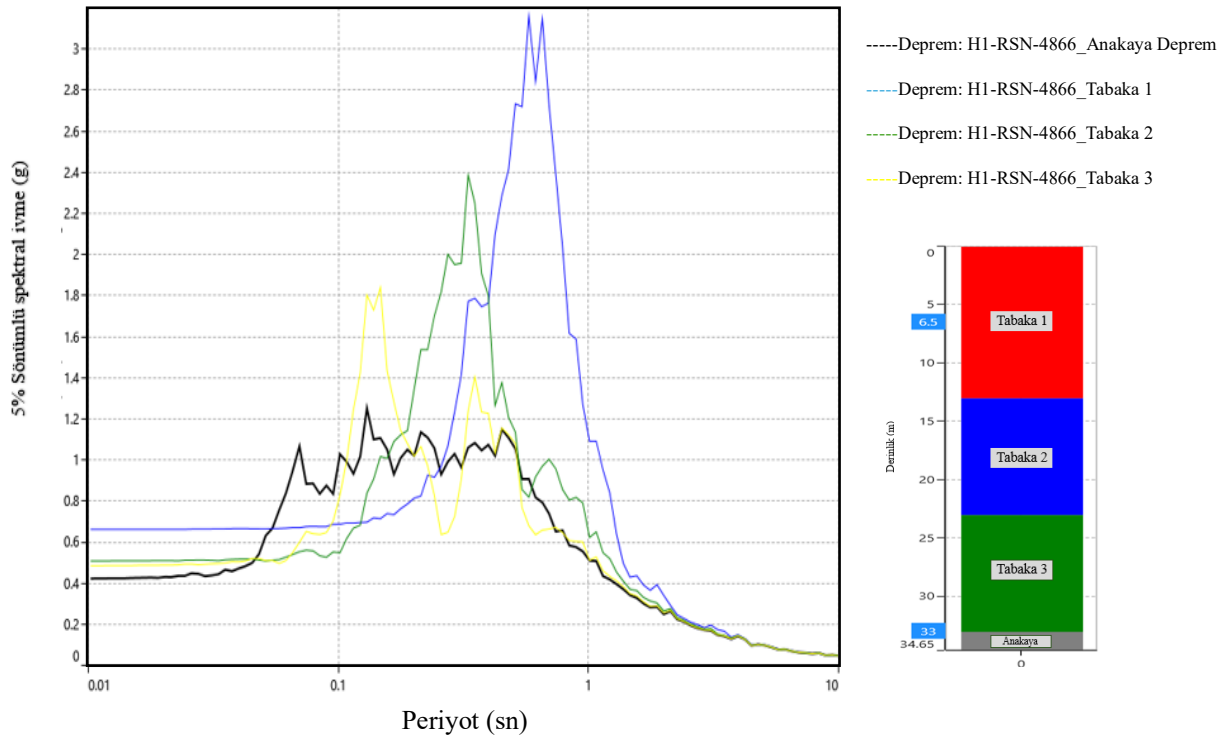
Şekil 125. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-1048



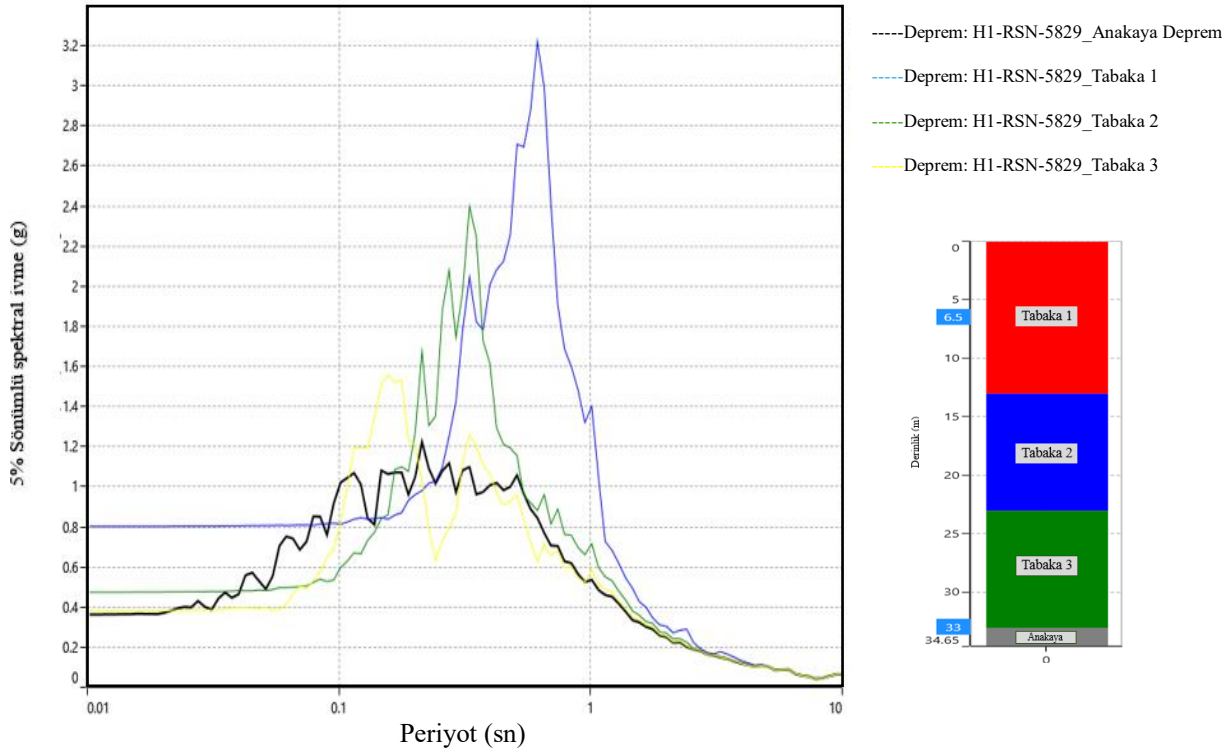
Şekil 126. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-1082



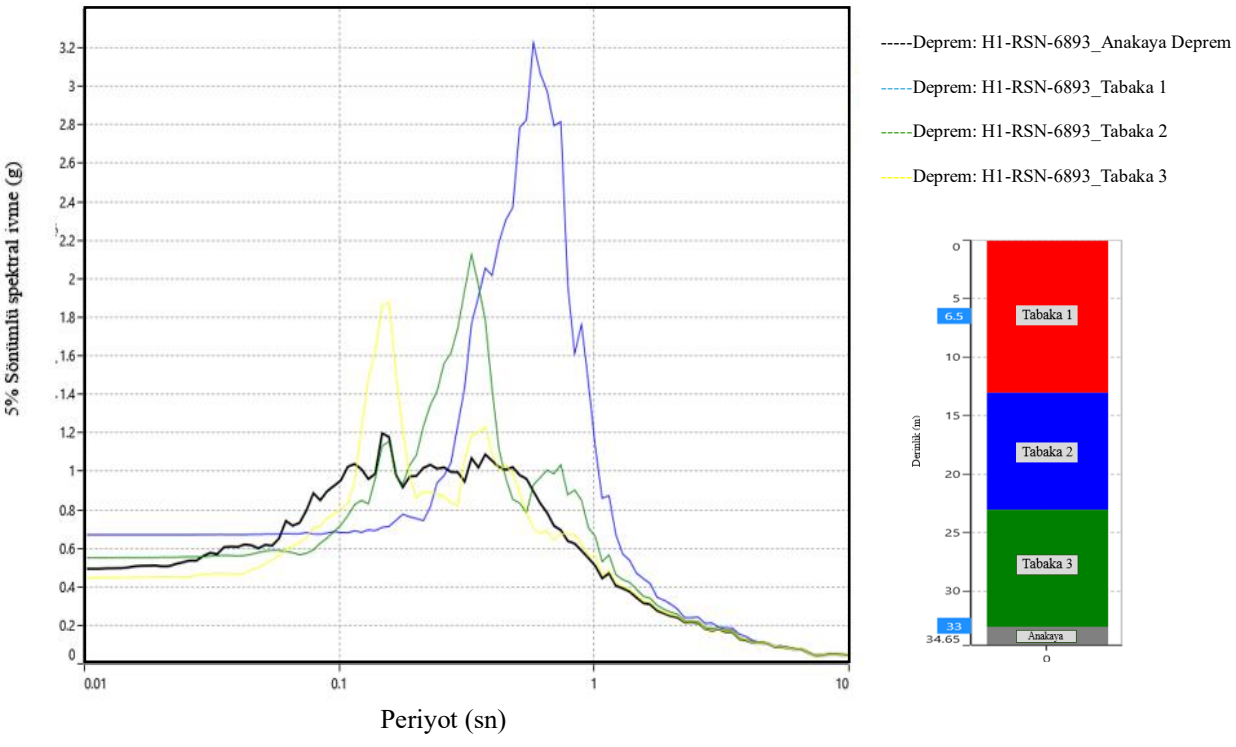
Şekil 127. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-1158



Şekil 128. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-4866

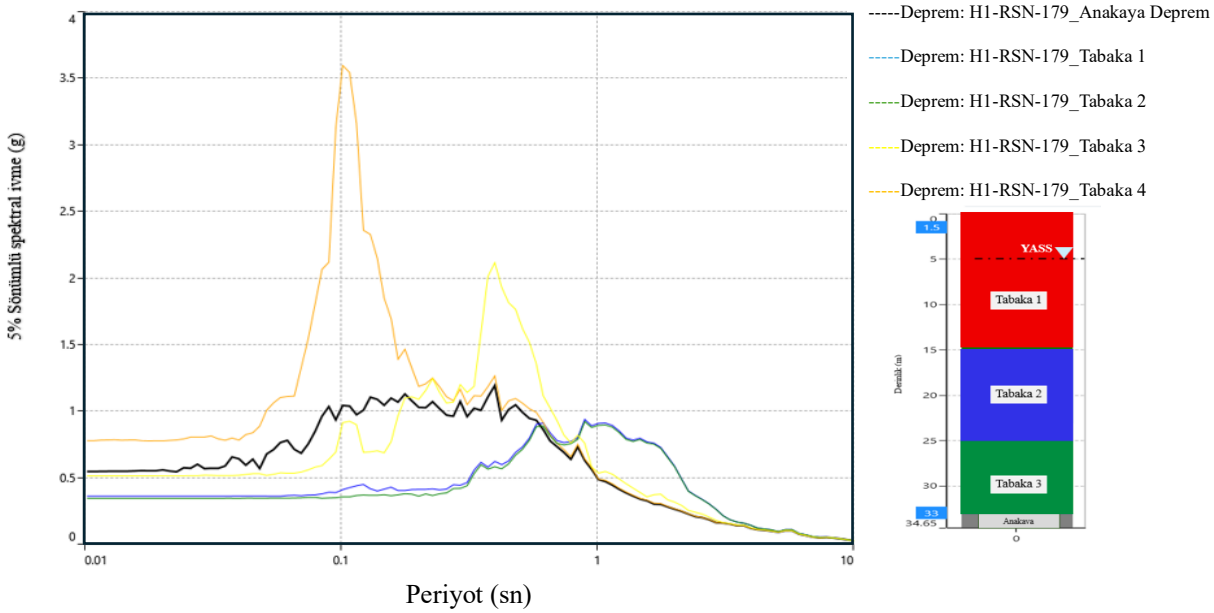


Şekil 129. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-5829

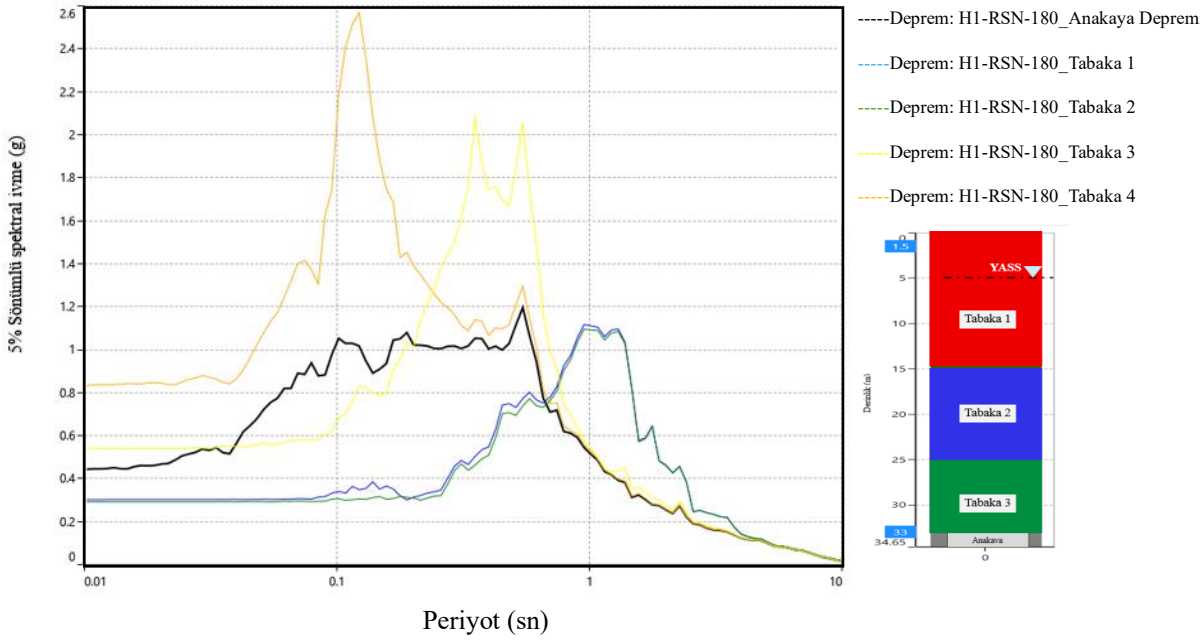


Şekil 130. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-6893

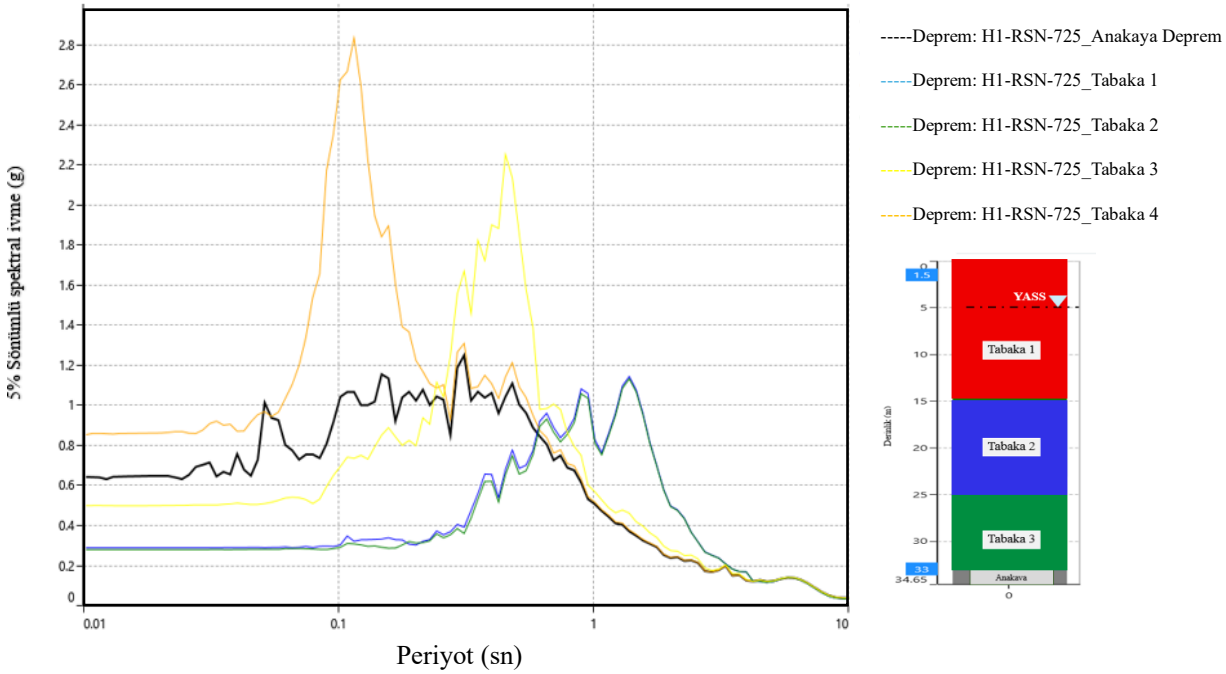
Model-3 için H1 yönlü deprem kayıtlarıyla yapılan Non-Lineer analiz sonuçlarının tabakalara göre spektral değişim grafiği aşağıda verilmiştir. Model-3 için H2 yönlü diğer deprem kayıtlarıyla yapılan Non-Lineer analiz sonuçlarının tabakalara göre spektral değişim grafikleri Ekler kısmında Şekil 209-219'da verilmiştir.



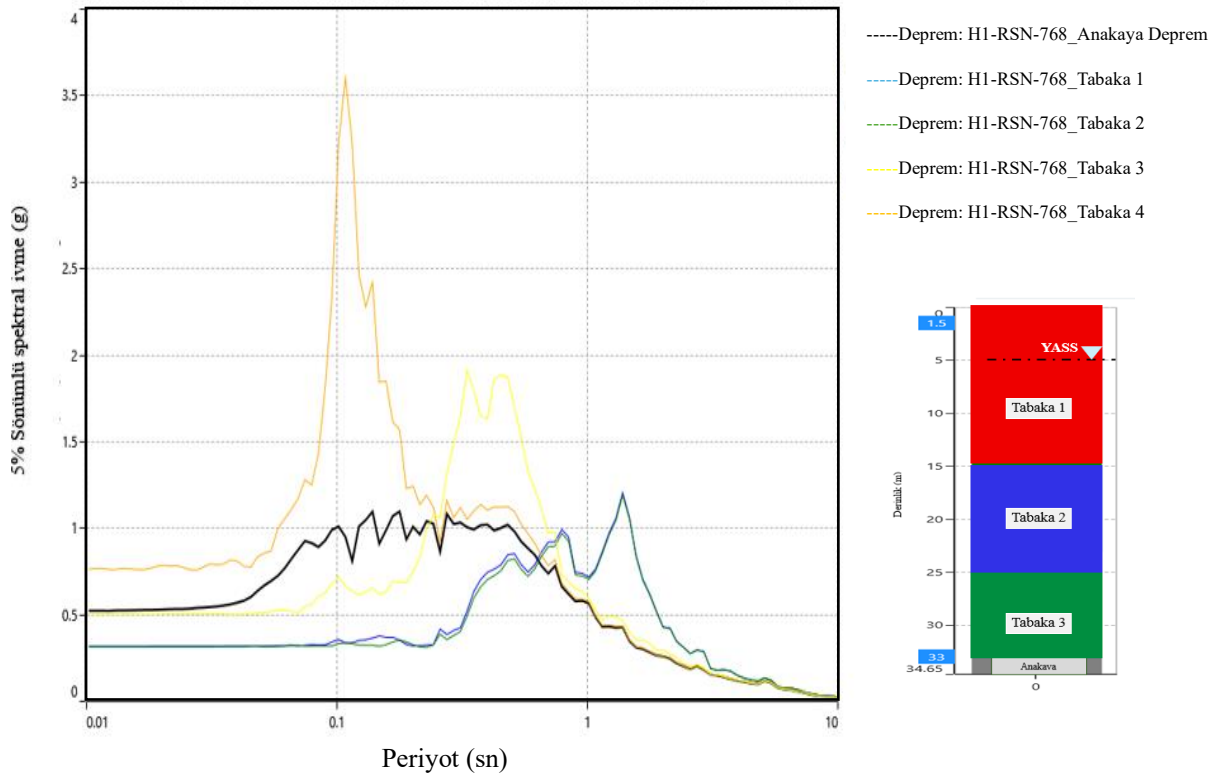
Şekil 131. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-179



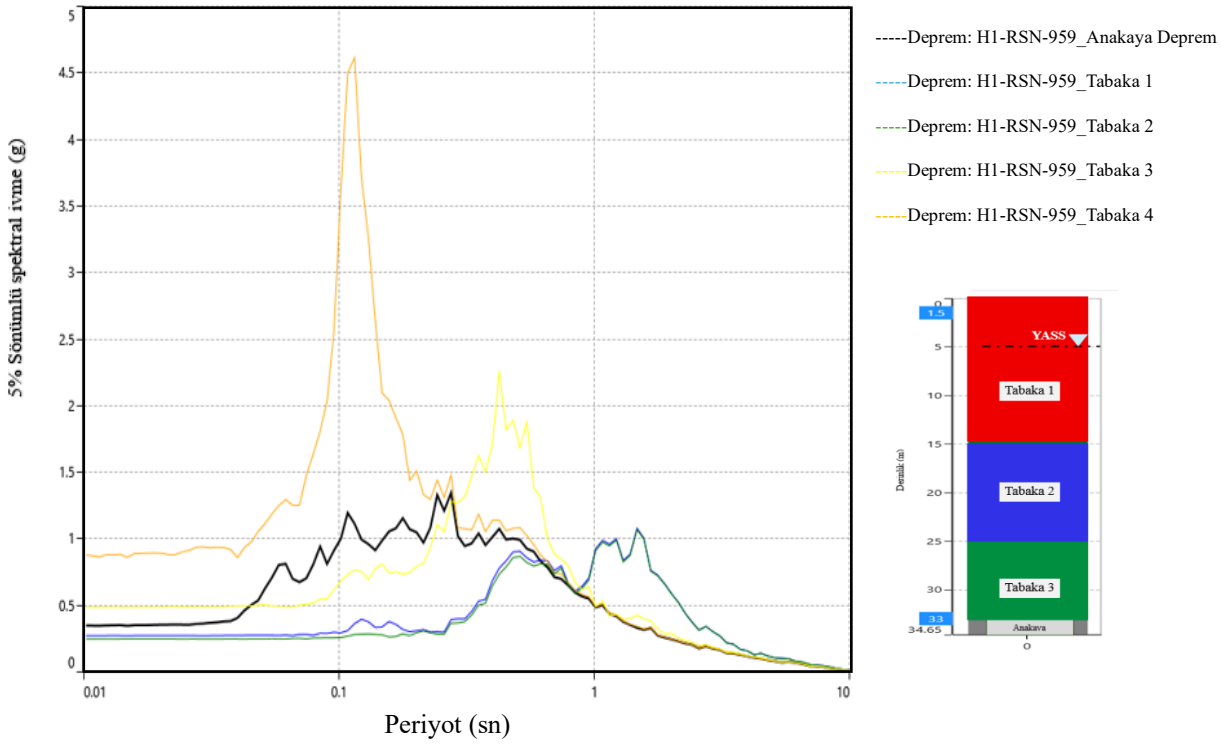
Şekil 132. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-180



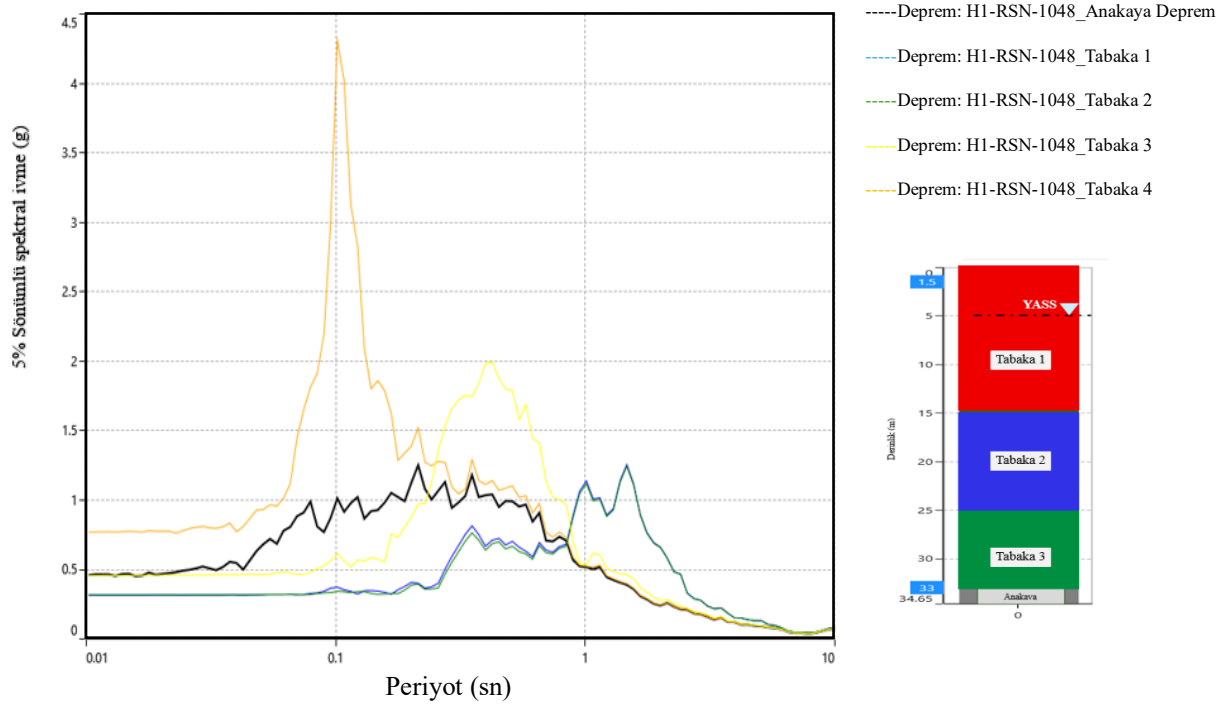
Şekil 133. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-725



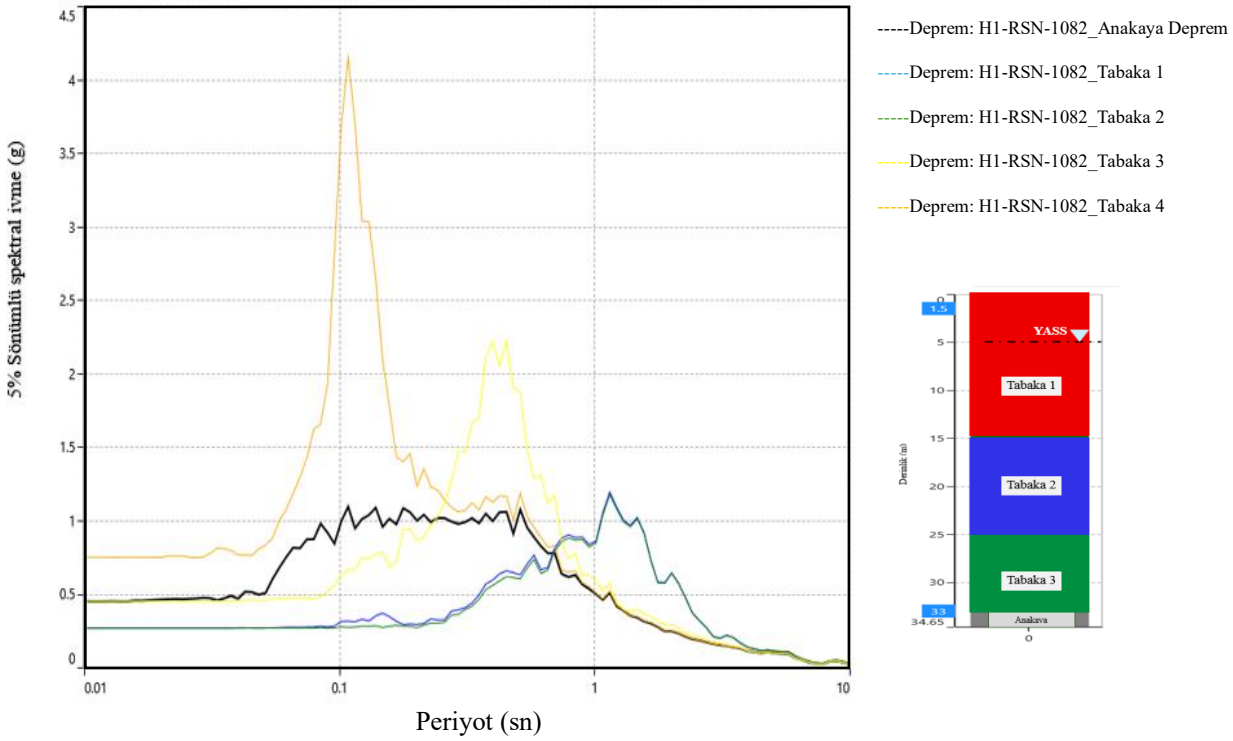
Şekil 134. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-768



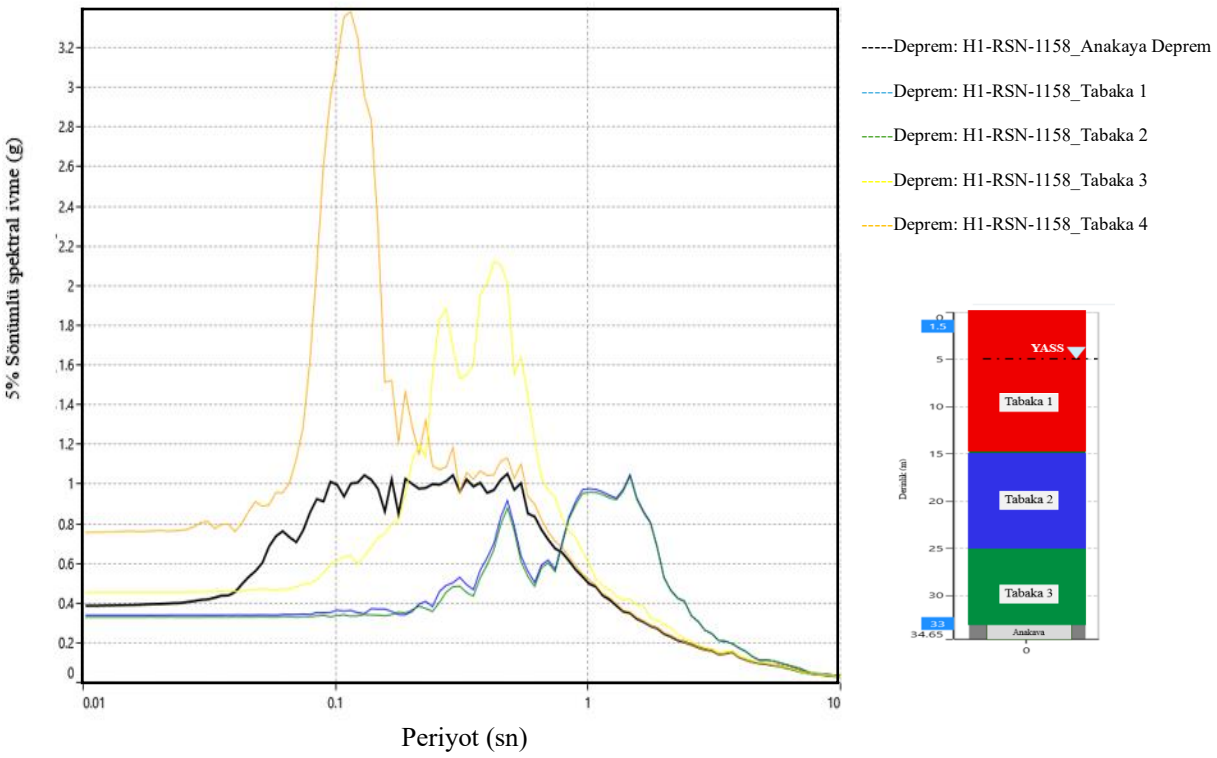
Şekil 135. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-959



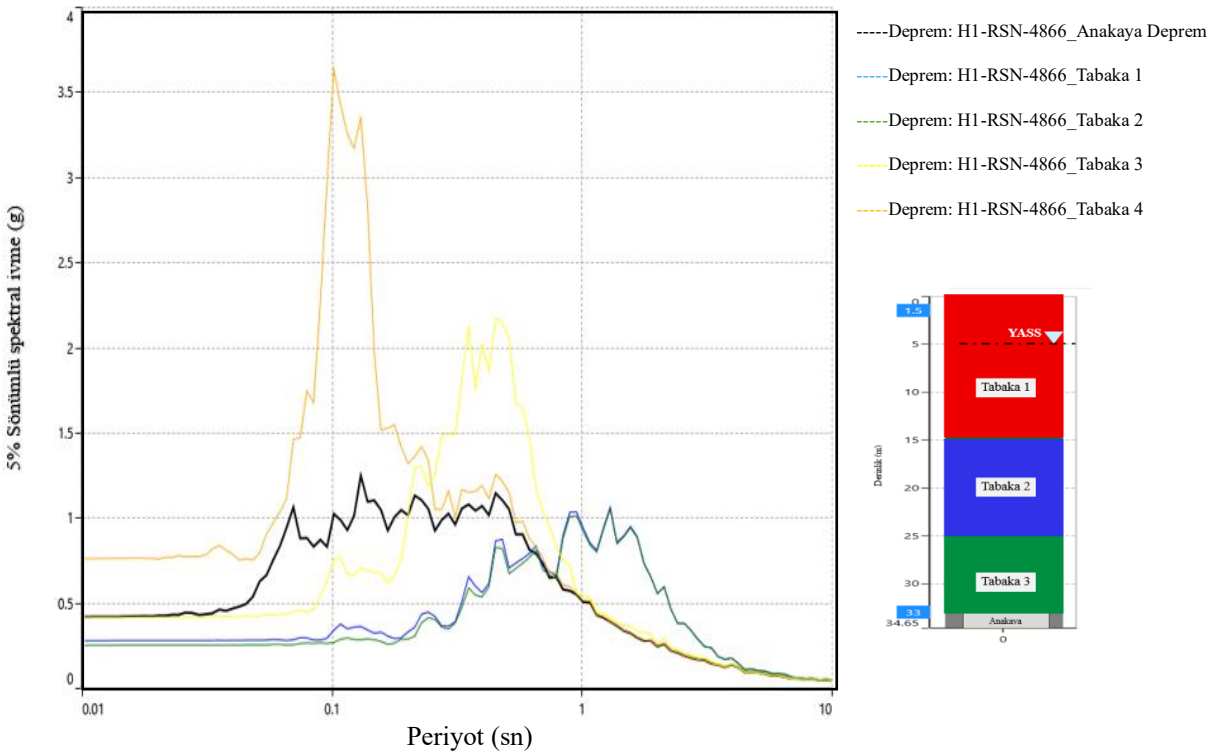
Şekil 136. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-1048



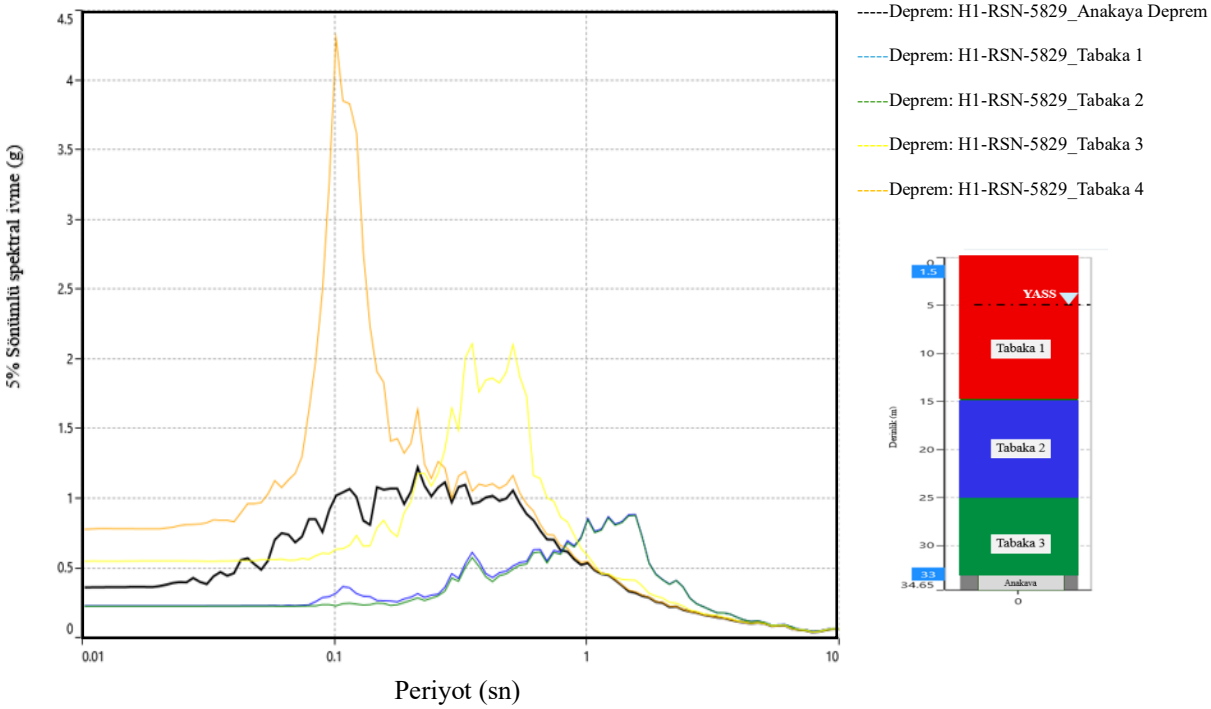
Şekil 137. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-1082



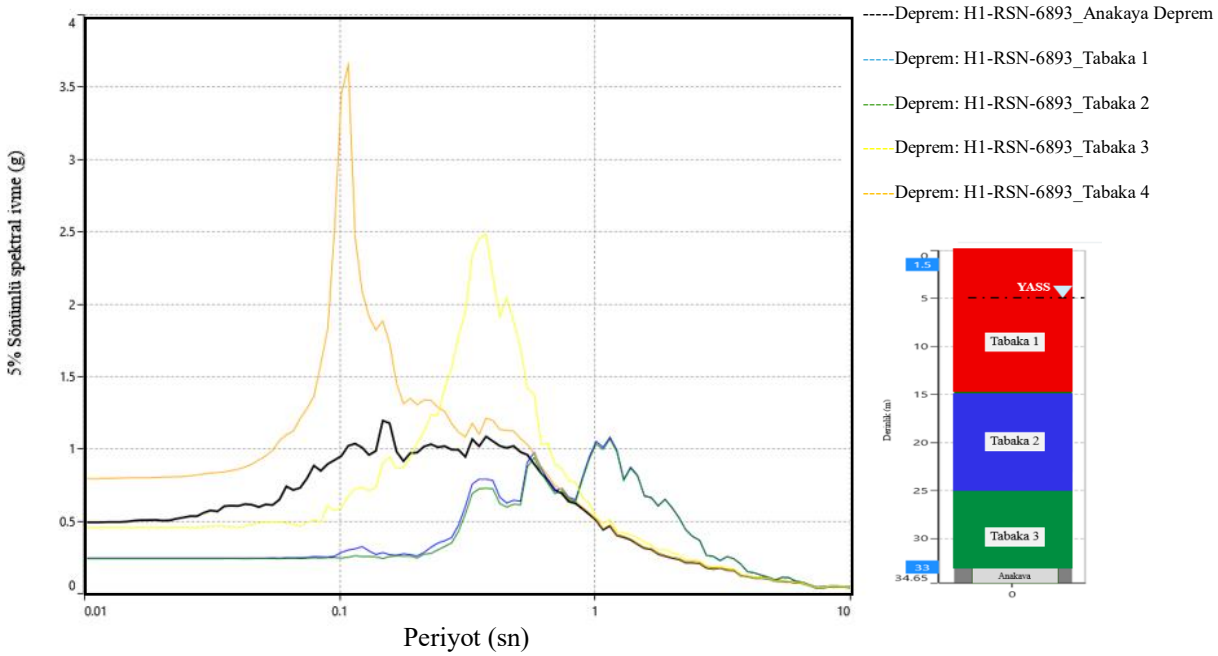
Şekil 138. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-1158



Şekil 139. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-4866

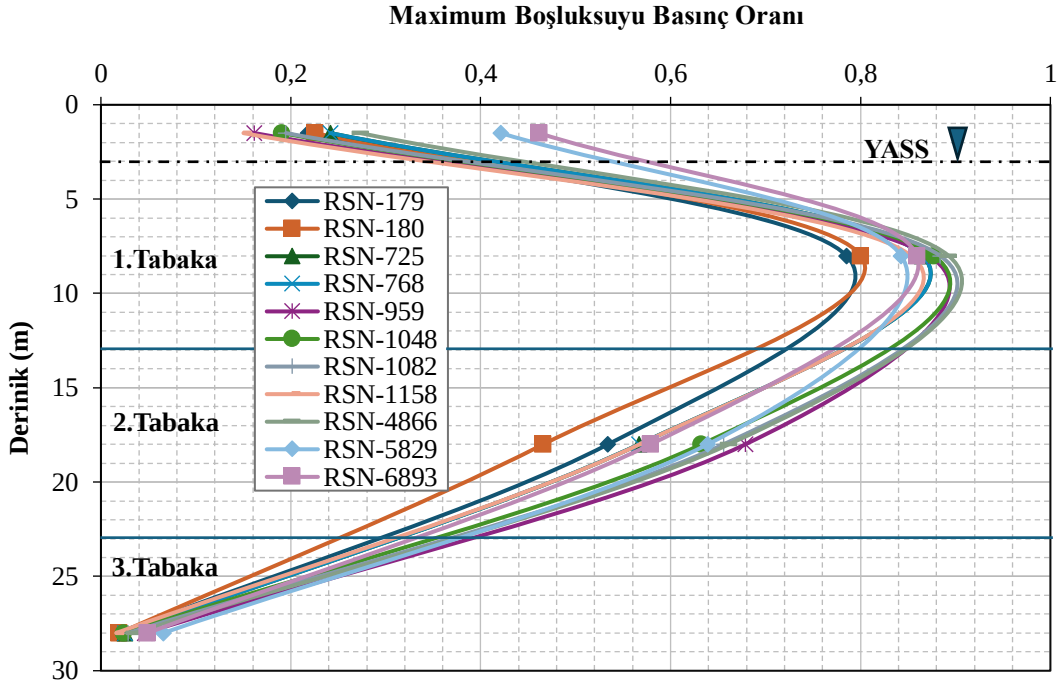


Şekil 140. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-5829



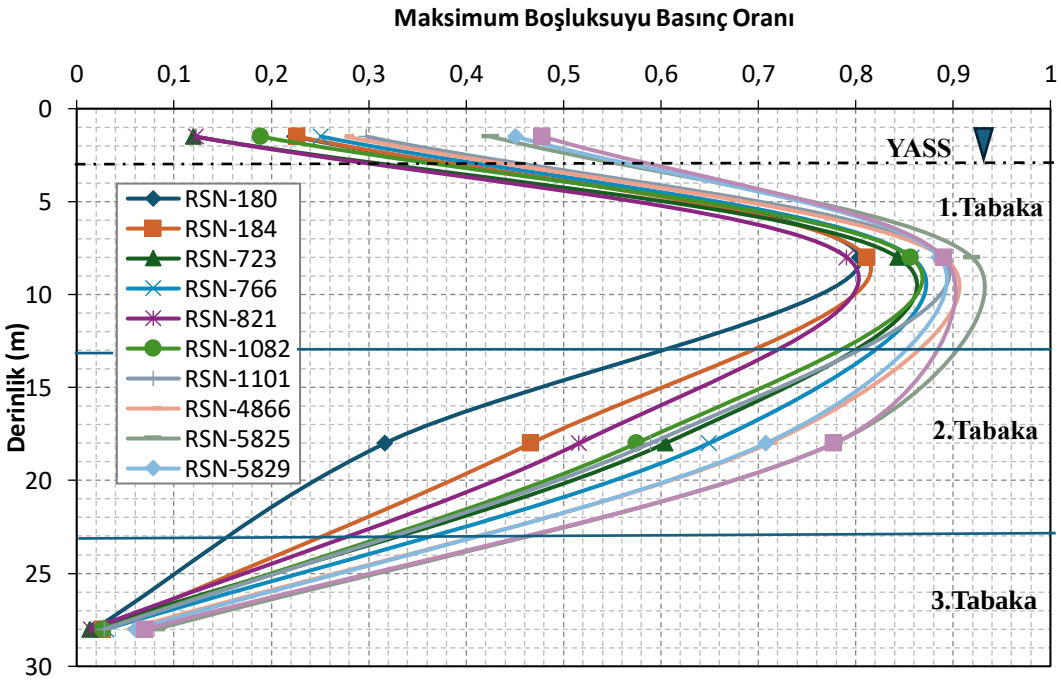
Şekil 141. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-6893

Model-3 için H1 yönlü depremlerle yapılan Non-Lineer analiz sonuçlarının derinlik boyunca boşluksuyu basınç oranı grafiği Şekil 142'de verilmiştir.



Şekil 142. Model-3 için H1 yönlü depremler durumunda derinlikle boşluksuyu basınç oranı değişimi

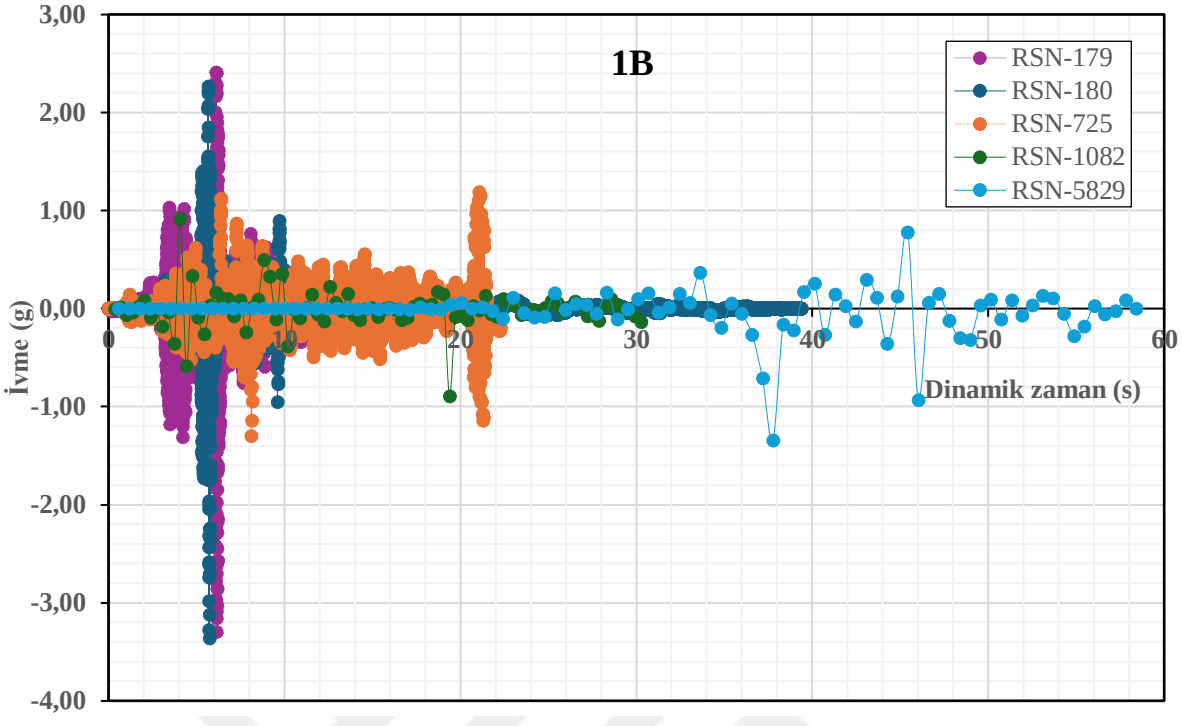
Model-3 için H2 yönlü depremlerle yapılan Non-Lineer analiz sonuçlarının derinlik boyunca boşluksuyu basınç oranı grafiği Şekil 143'te verilmiştir.



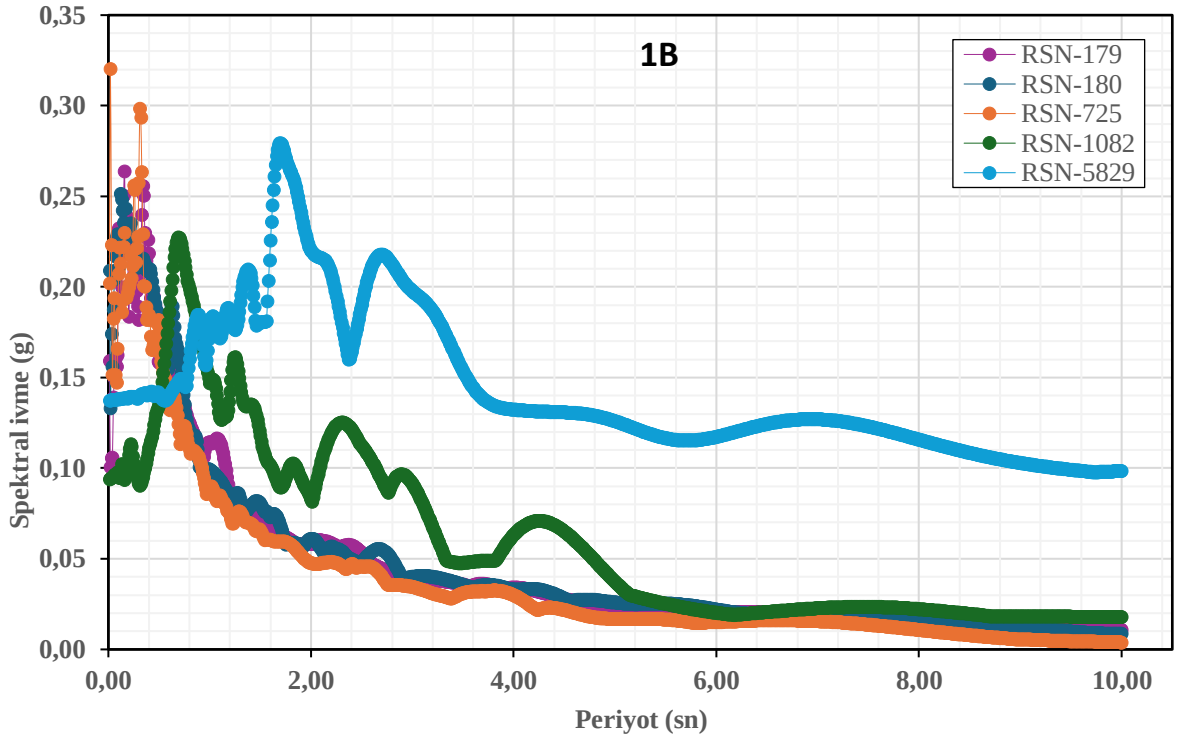
Şekil 143. Model-3 için H2 yönlü depremler durumunda derinlikle boşluksuyu basınç oranı değişimi

3.2. Plaxis 2D Programı ile Bir Boyutlu (1B) ve İki Boyutlu (2B) Analiz Sonuçları

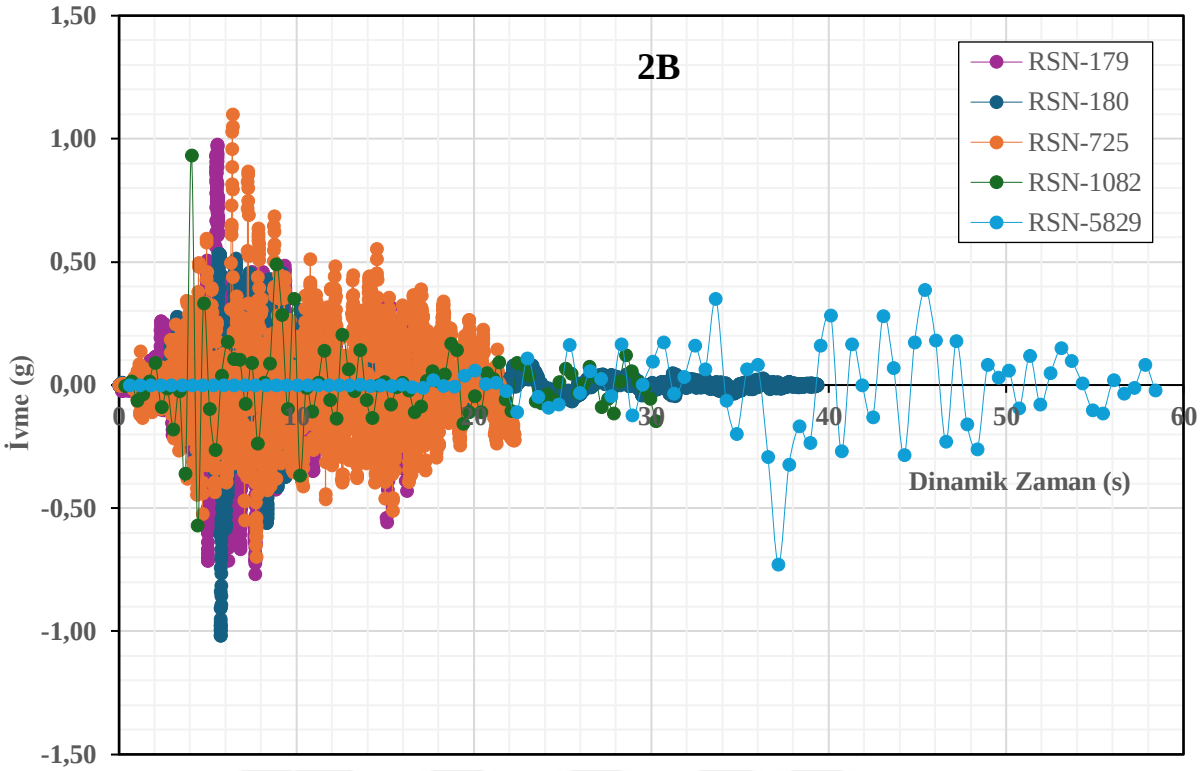
DeepSoil programı ile yapılan bir boyutlu analiz sonuçlarına bakılarak seçilen Tablo 8'deki deprem kayıtlarıyla Model-1 için Plaxis 2D programı kullanılarak bir boyutlu ve iki boyutlu analizler yapılmış ve ilgili grafikler Şekil 144-147'de verilmiştir.



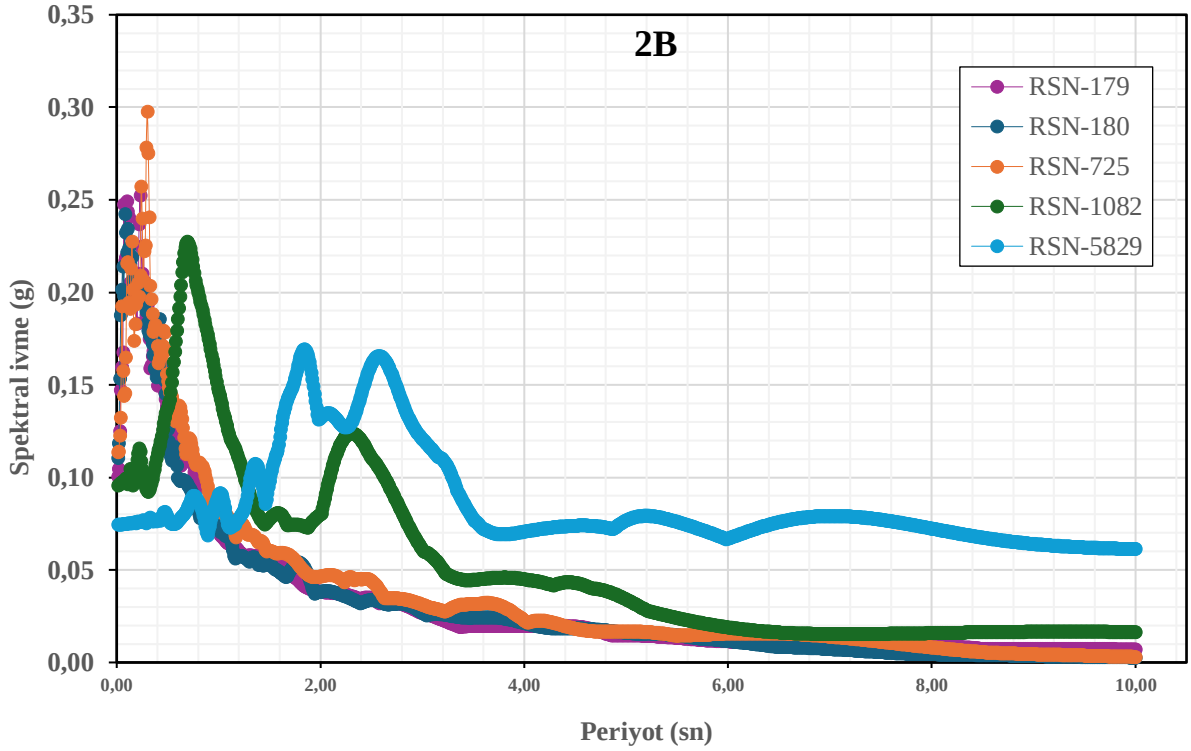
Şekil 144. Plaxis 2D ile Model-1 için yapılan bir boyutlu analiz sonucu bulunan İvme-Zaman grafiği



Şekil 145. Plaxis 2D ile Model-1 için yapılan bir boyutlu analiz sonucu bulunan Spektral ivme-Periyot grafiği

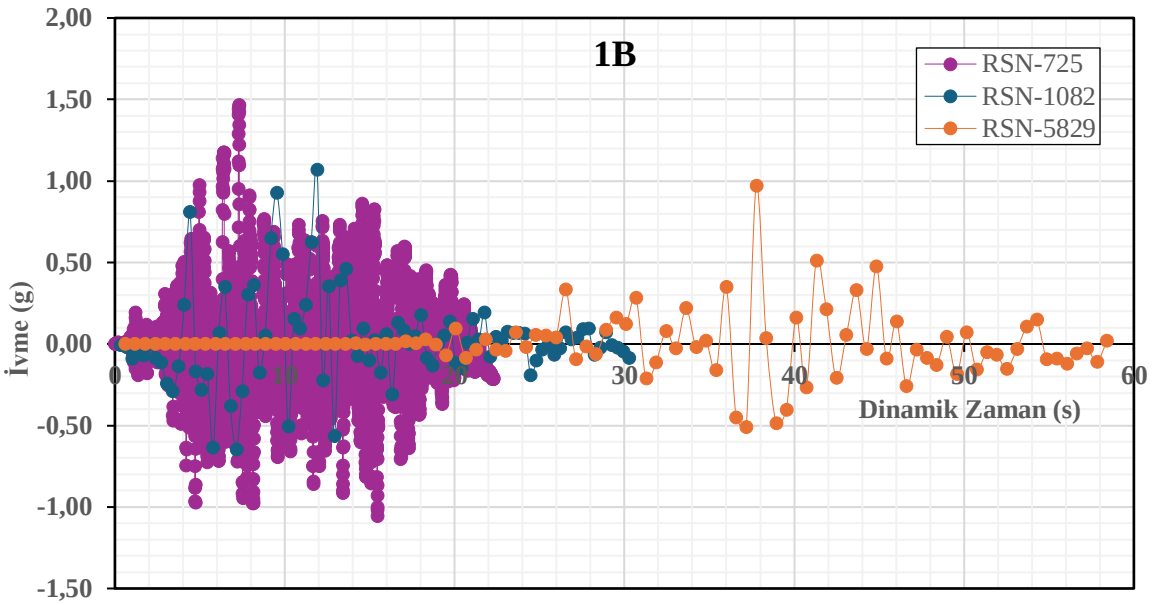


Şekil 146. Plaxis 2D ile Model-1 için yapılan iki boyutlu analiz sonucu bulunan İvme-Zaman grafiği

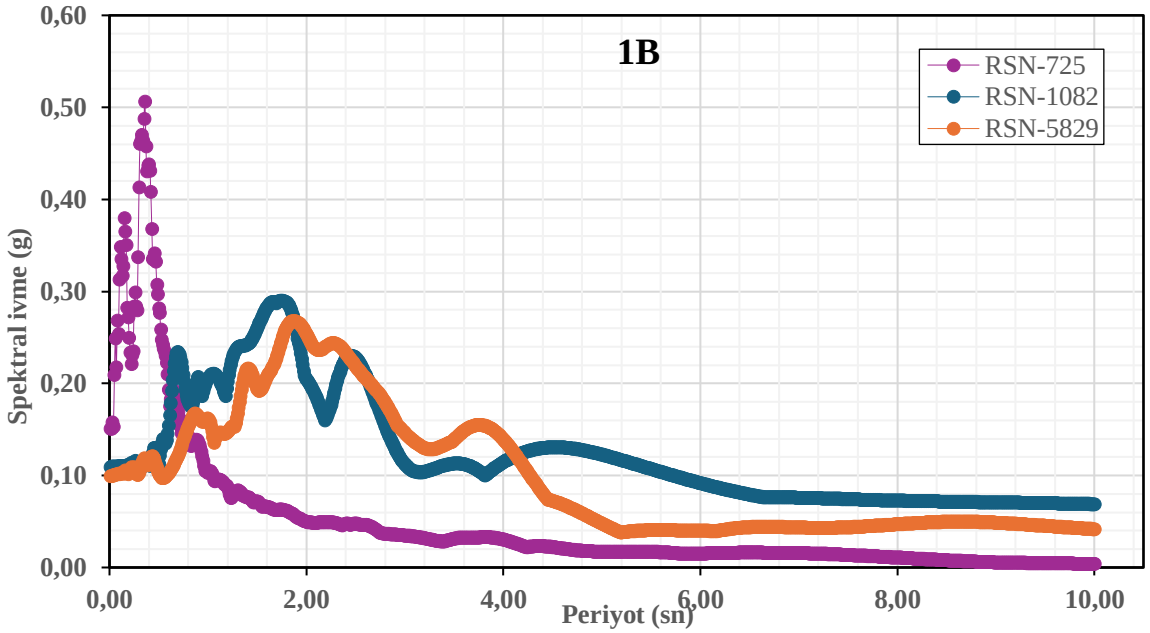


Şekil 147. Plaxis 2D ile Model-1 için yapılan iki boyutlu analiz sonucu bulunan Spektral ivme-Periyot grafiği

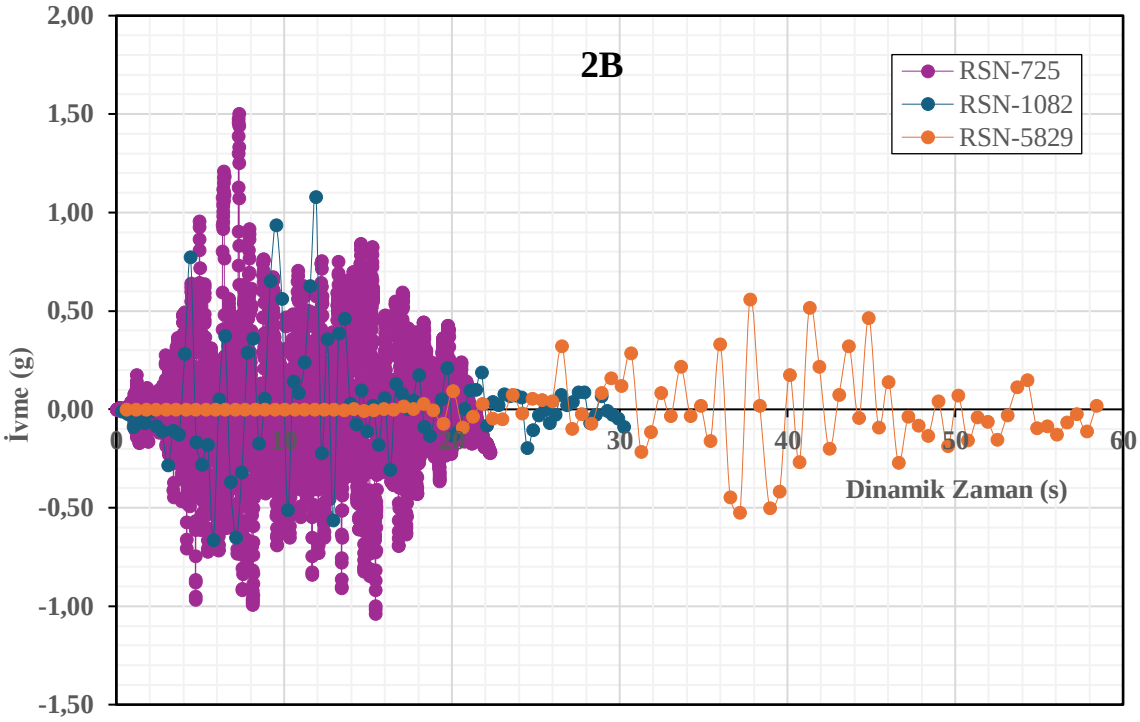
DeepSoil programı ile yapılan bir boyutlu analiz sonuçlarına bakılarak seçilen Tablo 8'deki deprem kayıtlarıyla Model-2 için Plaxis 2D programı kullanılarak bir boyutlu ve iki boyutlu analizler yapılmış ve ilgili grafikler Şekil 148-151'de verilmiştir.



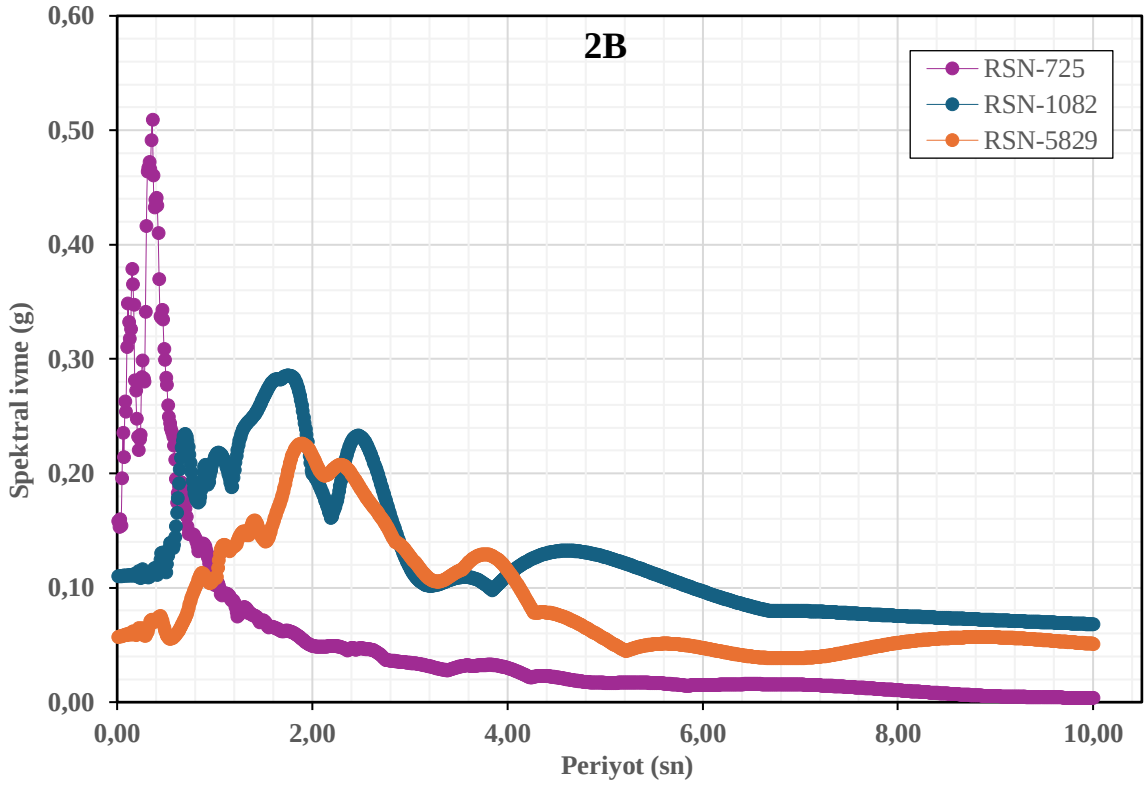
Şekil 148. Plaxis 2D ile Model-2 için yapılan bir boyutlu analiz sonucu bulunan İvme-Zaman grafiği



Şekil 149. Plaxis 2D ile Model-2 için yapılan bir boyutlu analiz sonucu bulunan Spektral ivme-Periyot grafiği

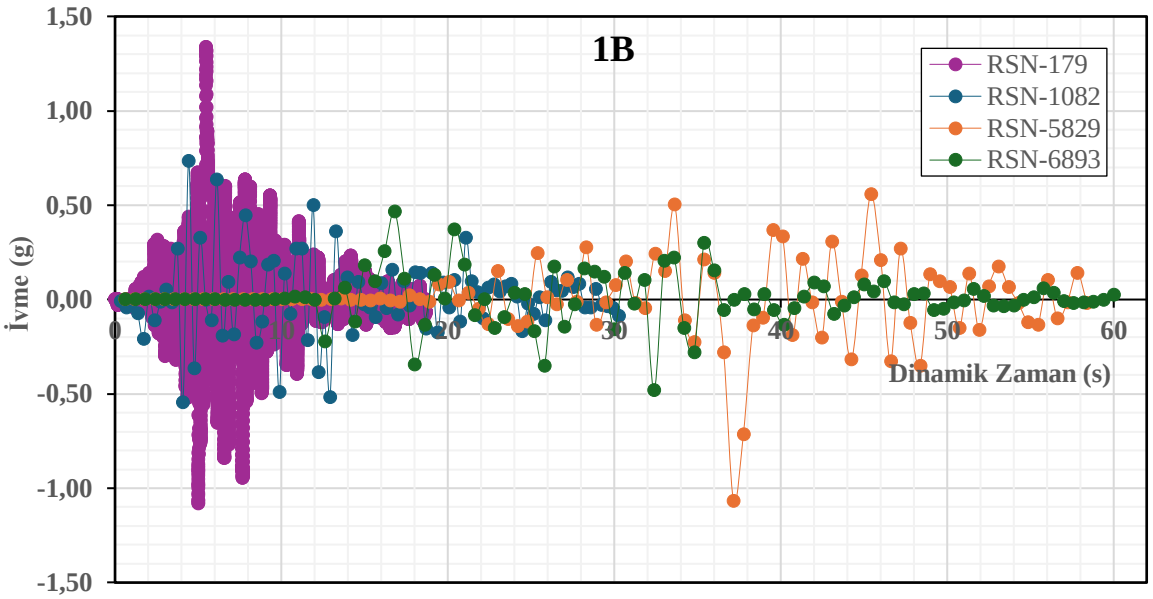


Şekil 150. Plaxis 2D ile Model-2 için yapılan iki boyutlu analiz sonucu bulunan İvme-Zaman grafiği

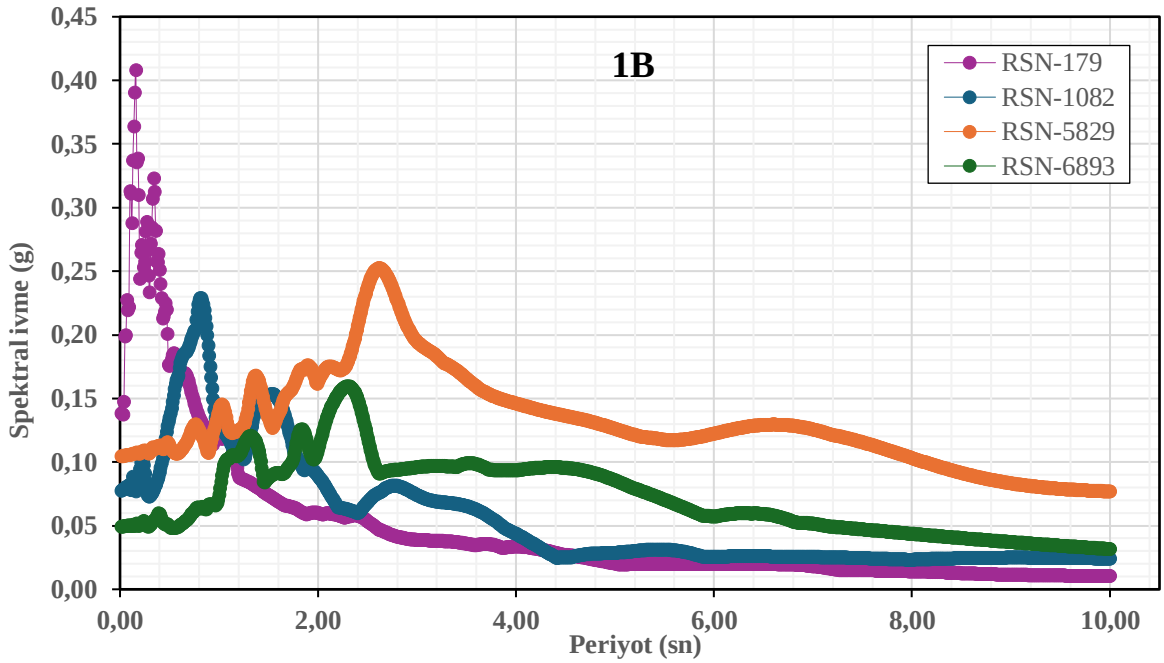


Şekil 151. Plaxis 2D ile Model-2 için yapılan iki boyutlu analiz soucu bulunan Spektral ivme-Periyot grafiği

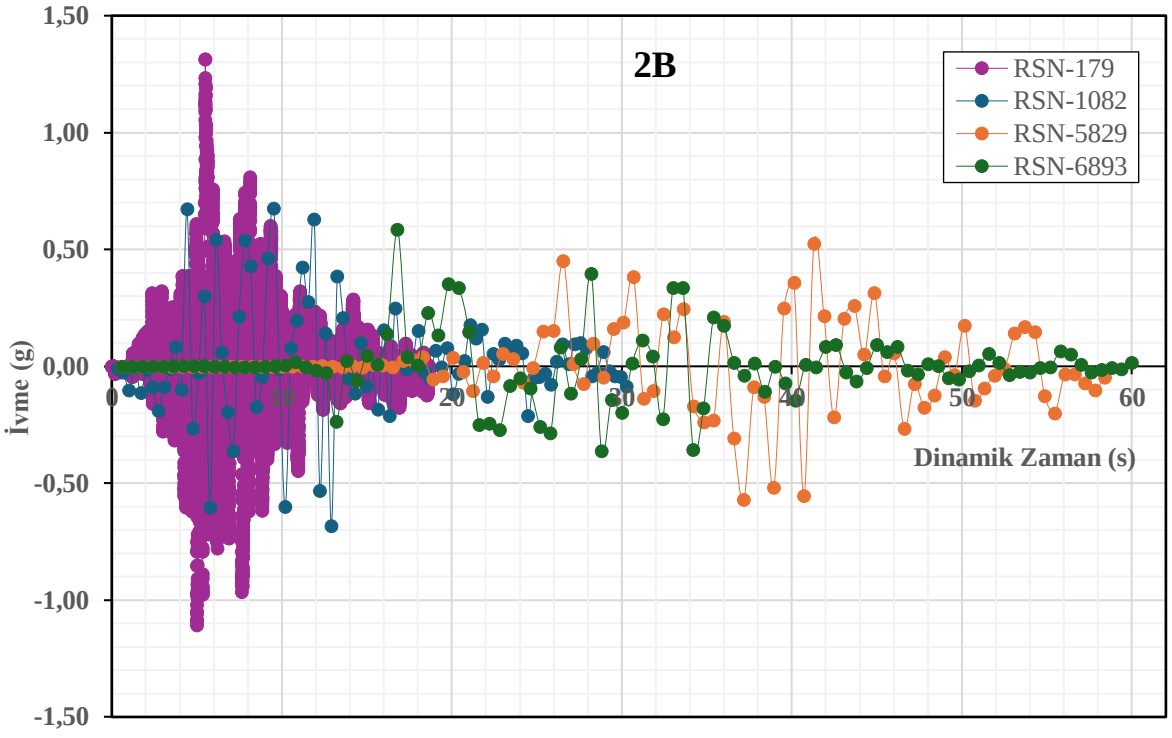
DeepSoil programı ile yapılan bir boyutlu analiz sonuçlarına bakılarak seçilen Tablo 8'deki deprem kayıtlarıyla Model-3 için Plaxis 2D programı kullanılarak bir boyutlu ve iki boyutlu analizler yapılmış ve ilgili grafikler Şekil 152-155'de verilmiştir.



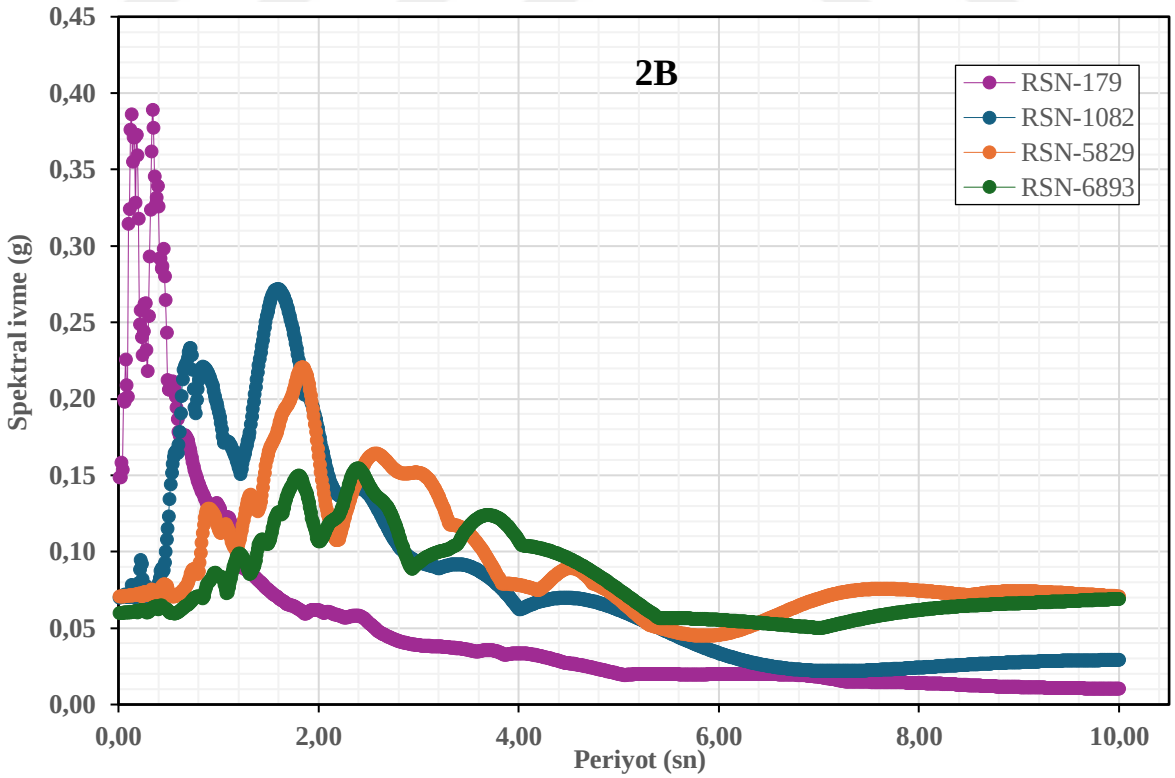
Şekil 152. Plaxis 2D ile Model-3 için yapılan bir boyutlu analiz sonucu bulunan İvme-Zaman grafiği



Şekil 153. Plaxis 2D ile Model-3 için yapılan bir boyutlu analiz sonucu bulunan Spektral ivme-Periyot grafiği



Şekil 154. Plaxis 2D ile Model-3 için yapılan iki boyutlu analiz sonucu bulunan İvme-Zaman grafiği



Şekil 155. Plaxis 2D ile Model-3 için yapılan iki boyutlu analiz sonucu bulunan Spektral ivme-Periyot grafiği

Model-1'de ivme değerlerinin derinlikle değişimi incelendiğinde, yüzeye doğru belirgin bir ivme büyütmesi gözlenmektedir. Özellikle orta sıkı kum tabakasının, deprem dalgalarını yüzeye doğru iletme sırasında enerjiyi büyütme eğilimi sergilediği görülmektedir. Alt tabakalarda ivme değerleri düşük kalırken, yüzeye yaklaştıkça ivmelerin artışı, deprem enerjisinin üst tabakalarda yoğunlaştığını göstermektedir. Bu durum, tek tabakalı ve homojen zeminlerin deprem yükleri karşısında daha öngörülebilir ancak büyütme açısından kritik bir davranış sergilediğini ortaya koymaktadır.

Model-2'de ivme–derinlik grafikleri, farklı tabakalardan oluşan heterojen yapının etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Tabakalar arasındaki geçişlerde ivme büyütmeleri farklı oranlarda gerçekleşmiş, özellikle düşük sıkılıkta olan ara tabakalarda ivme değerleri keskin değişimler göstermiştir. Bu durum, zemin profilinin tabakalaşmasının deprem enerjisinin zemin içerisinde farklı şekillerde dağılmasına neden olduğunu ve bazı derinliklerde yerel büyütmelerin oluştuğunu ortaya koymaktadır. Model-1'e kıyasla daha karmaşık ve heterojen bir ivme dağılımı mevcuttur.

Model-3, yüksek yeraltı suyu seviyesi ile tanımlandığından, ivme dağılımı üzerinde ek bir etkiye sahiptir. Yeraltı suyu seviyesi, efektif gerilmenin azalmasına neden olmuş ve bu durum ivme büyütmelerinin daha belirgin hale gelmesini sağlamıştır. Yüzeyde kaydedilen ivme değerleri, Model-1 ve Model-2'ye kıyasla daha yüksek çıkmıştır. Bu sonuç, yeraltı suyu seviyesinin deprem sırasında zemin davranışını daha hassas hale getirdiğini ve büyütme etkisini artırdığını göstermektedir. Üç model kıyaslandığında:

- Model-1, homojen yapısı nedeniyle ivme dağılımı daha düzenli ve öngörülebilirdir.
- Model-2, tabakalı yapısı nedeniyle farklı derinliklerde farklı ivme büyütmeleri sergilemiş, bu da deprem enerjisinin heterojen şekilde taşındığını göstermiştir.
- Model-3, yüksek yeraltı suyu seviyesi nedeniyle en yüksek yüzey ivmelerini ortaya koymuş ve deprem tehlikesinin en kritik senaryosunu yansıtmıştır.

Bu bulgular, literatürde yer alan saha ve laboratuvar çalışmalarını doğrulamaktadır. Seed & Idriss (1971), gevşek kumlu zeminlerde yeraltı suyu seviyesi (YASS) yüksekliğinin ivme büyütmelerini azalttığını belirtmiştir. Ishihara (1996) da tabakalı zeminlerin farklı derinliklerde farklı büyütme davranışı sergileyebileceğini vurgulamaktadır. Ayrıca Kramer (1996), eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerin sonuçlarının özellikle yeraltı suyu varlığında farklılık göstereceğini ortaya koymuştur. Bu tez kapsamında elde edilen sonuçlar, söz konusu çalışmalardaki teorik ve deneysel bulgularla büyük ölçüde uyum göstermektedir.

Model-1'de yatay deplasman grafiklerinde, yüzeye doğru artan bir deformasyon eğilimi gözlenmektedir. Alt tabakalarda deplasman değerleri oldukça sınırlıyken, yüzeyde maksimum deplasman değerlerine ulaşılmıştır. Bu durum, tek tabakalı homojen zeminde deprem yüklerinin üst tabakalarda daha yoğun bir şekilde deformasyona neden olduğunu göstermektedir. Yatay deplasman dağılımının düzenli ve monoton artış göstermesi, homojen yapı nedeniyle enerjinin daha dengeli aktarıldığını işaret etmektedir.

Model-2'de deplasman–derinlik değişimi, tabakaların farklı sıkılık ve rijitlik değerlerinden dolayı düzensiz bir dağılım sergilemiştir. Özellikle daha gevşek tabakalarda deplasman değerlerinde ani artışlar gözlenmiştir. Bu tabakalar, enerjiyi daha az sönümlediği için üst tabakalara aktarılan deformasyon miktarı artmıştır. Yüzeye yakın bölgelerde, Model-1'e kıyasla daha yüksek deplasman değerleri oluşmuş; bu da tabakalı yapıların deprem yükleri karşısında daha karmaşık ve riskli bir davranış sergileyebileceğini göstermektedir.

Model-3'te yeraltı suyu seviyesinin etkisi belirgin bir şekilde ortaya çıkmıştır. Yeraltı suyu seviyesinin artması, zeminin efektif gerilmesini düşürmüş ve deformasyon miktarını artırmıştır. Bu nedenle hem orta derinliklerde hem de yüzeye yakın tabakalarda yatay deplasman değerleri Model-1 ve Model-2'ye kıyasla daha yüksek gerçekleşmiştir. Özellikle sıvılaşma riski olan (r_u değerinin 1'e yaklaştığı) bölgelerde deformasyon değerlerinin en büyük değerlere ulaştığı tespit edilmiştir. Üç model kıyaslandığında:

- Model-1, daha düzenli ve düşük deplasman değerleri ile görece daha güvenli bir davranış sergilemiştir.
- Model-2, tabaka farklılıklarının etkisiyle düzensiz ve daha yüksek deplasman değerleri üretmiştir.
- Model-3, en yüksek deplasman değerlerini ortaya koyarak, yüksek yeraltı suyu seviyesinin deprem sırasında zemin deformasyonlarını ciddi ölçüde artırabileceğini göstermiştir.

Bu sonuçlar, literatürdeki saha gözlemleri ve sayısal analizlerle uyumludur. Özellikle Idriss & Boulanger (2008), yeraltı suyu seviyesinin yükselmesinin deformasyon miktarını artırdığını belirtmiştir. Ayrıca Bolton (1986), zeminlerin sıkılık derecesine bağlı olarak deformasyon kapasitesinde ciddi farklılıklar oluşabileceğini göstermiştir. Çalışmanın bulguları, gevşek ve suya doygun tabakalarda daha yüksek yatay deplasmanların meydana geleceğini vurgulayan Youd vd. (2001) çalışmalarıyla da örtüşmektedir.

Model-1'de maksimum gerilme değerleri, derinlik arttıkça azalma eğilimi göstermektedir. Özellikle yüzeye yakın bölgelerde gerilme dağılımı daha yüksek değerlere

ulaşmıştır. Bu durum, deprem yüklerinin yüzeye doğru taşınması sırasında gerilmenin yoğunlaşmasıyla açıklanabilir. Tek tabakalı homojen zemin yapısı nedeniyle gerilme dağılımı daha düzenli olup, belirgin bir doğrusal azalma eğrisi sergilemiştir.

Model-2'de tabakalı zemin yapısının etkisi, maksimum gerilme dağılımlarında açıkça gözlenmiştir. Farklı sıkılıklara sahip tabakalarda gerilme değerleri ani değişimler göstermiştir. Özellikle düşük rijitlikteki ara tabakalarda gerilme değerlerinde yükselmeler görülmüştür. Bu durum, deprem enerjisinin tabaka sınırlarında farklı şekilde iletildiğini ve bazı bölgelerde yerel gerilme yoğunlaşmalarına neden olduğunu ortaya koymaktadır. Model-1'e kıyasla daha karmaşık bir dağılım söz konusudur.

Model-3'te yeraltı suyu seviyesinin etkisi maksimum gerilme grafikleri üzerinde belirginleşmiştir. Yeraltı suyu, zeminin efektif gerilmesini düşürdüğünden, deprem sırasında taşıyıcı kapasite azalmakta ve bazı tabakalarda gerilme birikmeleri daha yoğun gözlenmektedir. Bu nedenle, yüzeye yakın tabakalarda maksimum gerilme değerleri kritik seviyelere ulaşmıştır. Özellikle sıvılaşmaya yatkın bölgelerde, gerilmenin ani artışı yapı güvenliği açısından tehlikeli bir senaryoyu ortaya koymaktadır. Üç model kıyaslandığında:

- Model-1, daha düzenli ve öngörülebilir bir maksimum gerilme dağılımı göstermektedir.
- Model-2, tabaka farklılıkları nedeniyle ani gerilme değişimlerine sahiptir ve bazı tabakalarda yüksek değerler ortaya çıkmaktadır.
- Model-3, yeraltı suyu seviyesi nedeniyle en kritik sonuçları vermekte; gerilme birikmeleri özellikle yüzey tabakalarında daha yoğun şekilde gözlenmektedir.

Bu bulgular, literatürdeki saha ve laboratuvar gözlemleriyle uyumludur. Ishihara (1996), tabakalı zeminlerde gerilme dağılımının homojen zeminlere göre çok daha düzensiz olacağını belirtmiştir. Ayrıca Seed & Idriss (1971), yüksek yeraltı suyu seviyesine sahip zeminlerde efektif gerilmenin azalması sonucu deprem sırasında kritik gerilme birikmelerinin ortaya çıkabileceğini vurgulamıştır. Kramer (1996) ise, doğrusal olmayan analizlerde özellikle yüksek ivmeli depremlerde yüzey tabakalarında gerilme birikmelerinin yapısal riskleri artırdığını göstermektedir.

Model-1'de kayma gerilmesi oranı (τ/σ') grafiklerinde, derinlik arttıkça değerlerin azaldığı, yüzeye doğru ise artış gösterdiği görülmektedir. Orta sıkı kum tabakasının dinamik yükler altında kayma gerilmesi üretme kapasitesi, yüzeye yakın tabakalarda daha belirgin hale gelmiştir. Bu sonuç, homojen zeminde kayma gerilmesi oranlarının daha öngörülebilir

bir şekilde dağıldığını ortaya koymaktadır. Kritik seviyelere yaklaşmamakla birlikte, üst tabakalarda sıvılaşma ihtimalinin başlangıç koşullarının oluştuğu gözlenmektedir.

Model-2'de kayma gerilmesi oranı, tabakalı yapının etkisiyle düzensiz bir dağılım göstermiştir. Özellikle gevşek tabakalarda kayma gerilmesi oranı belirgin şekilde yükselmiş, bu tabakalar enerji birikiminin daha yoğun gerçekleştiği bölgeler haline gelmiştir. Yerel büyütmelerin oluşması, zeminin farklı tabakalarında farklı risk seviyelerinin varlığını göstermektedir. Bu durum, homojen yapıya sahip Model-1'e kıyasla daha riskli bir davranış sergilemektedir.

Model-3'te kayma gerilmesi oranı değerleri kritik seviyelere ulaşmış, hatta bazı tabakalarda sıvılaşma potansiyelini işaret eden eşik değerlere yaklaşılmıştır. Yeraltı suyu seviyesinin yüksek olması, efektif gerilmeyi düşürerek kayma gerilmesi oranlarının yükselmesine yol açmıştır. Yüzeye yakın bölgelerde kayma gerilmesi oranı en yüksek değerlere ulaşarak, sıvılaşma riskini en fazla artıran senaryoyu ortaya koymuştur. Üç model kıyaslandığında:

- Model-1: Homojen yapısı sayesinde kayma gerilmesi oranı daha dengeli dağılmış, kritik değerlerin altında kalmıştır.
- Model-2: Tabaka farklılıkları nedeniyle yerel büyütmeler ve düzensiz dağılım göstermiştir.
- Model-3: En yüksek kayma gerilmesi oranlarına ulaşmış ve yeraltı suyu seviyesinin sıvılaşma riskini artırıcı etkisini net bir şekilde ortaya koymuştur.

Sonuçlar, literatürdeki saha gözlemleri ve teorik çalışmalarla uyumludur. Seed & Idriss (1971) ve Youd vd. (2001), yüksek kayma gerilmesi oranlarının sıvılaşma potansiyelini doğrudan etkilediğini vurgulamaktadır. Idriss & Boulanger (2008), yeraltı suyu seviyesinin yükselmesiyle efektif gerilmenin azalacağını, bunun da kayma gerilmesi oranını artırarak zeminin dayanımını kritik seviyelere taşıyacağını ifade etmiştir. Ayrıca Vucetic & Dobry (1991), modül azalımı ve sönüm oranı ilişkilerinin kayma gerilmesi oranı üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermiştir. Bu tezde elde edilen bulgular, söz konusu çalışmalarla paralellik göstermektedir.

Model-1'de elde edilen spektral ivme–periyot eğrileri, özellikle kısa periyotlarda belirgin ivme büyütmeleri göstermektedir. Tek tabakalı orta sıkı kum profili, yüksek frekanslı bileşenleri daha fazla büyütmüş, uzun periyotlarda ise spektral ivme değerleri görece düşük kalmıştır. Bu durum, homojen zeminlerin kısa periyotlu yapı davranışlarını

daha fazla etkileyeceğini göstermektedir. Yani bu model altında, düşük katlı ve rijit yapıların deprem sırasında daha fazla ivme etkisine maruz kalması beklenmektedir.

Model-2'de tabakalı yapı nedeniyle spektral ivme–periyot eğrilerinde dalgalı bir dağılım gözlenmiştir. Bazı tabakalarda rezonans etkisiyle belirli periyotlarda ani ivme artışları meydana gelmiştir. Özellikle orta periyotlarda görülen bu artışlar, çok katlı yapıların deprem etkisine karşı daha hassas hale gelebileceğini göstermektedir. Model-1'e kıyasla spektral eğrilerin daha karmaşık bir yapıya sahip olması, tabakalı zeminlerin deprem yüklerini farklı frekans aralıklarında büyütebildiğini ortaya koymaktadır

Model-3'te yüksek yeraltı suyu seviyesinin etkisi, spektral ivme–periyot eğrilerinde açıkça ortaya çıkmıştır. Hem kısa periyotlarda hem de orta periyotlarda spektral ivme değerleri diğer modellere kıyasla daha yüksek çıkmıştır. Bu durum, yeraltı suyunun zeminin rijitliğini azaltarak rezonans etkisini artırmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla hem düşük katlı hem de orta katlı yapıların deprem sırasında daha yüksek risk altında olduğu görülmektedir. Üç model kıyaslandığında:

- Model-1, kısa periyotlarda etkili olup, düşük katlı yapıların deprem yükleri açısından kritik olduğunu göstermektedir.
- Model-2, tabakalı yapı nedeniyle özellikle orta periyotlarda büyütmeler üretmiş, çok katlı yapılar için daha riskli bir senaryo ortaya koymuştur.
- Model-3, tüm periyot aralıklarında en yüksek spektral ivme değerlerini vererek deprem tehlikesini en kritik düzeyde yansıtmıştır.

Bu bulgular, literatürdeki deprem mühendisliği çalışmalarını desteklemektedir. Kramer (1996), spektral ivme–periyot ilişkilerinde zemin büyütmesinin özellikle kısa ve orta periyotlarda yapısal davranışa doğrudan etki ettiğini vurgulamıştır. Ayrıca AFAD (2019) ve TBDY (2018) yönetmeliklerinde de sahaya özgü spektrumların özellikle zemin büyütmesi açısından kritik öneme sahip olduğu belirtilmiştir. Seed & Idriss (1971) tarafından geliştirilen saha temelli bağıntılar, yeraltı suyu varlığının spektral büyütmeleri artırabileceğini ortaya koymuştur. Bu tezde elde edilen bulgular, söz konusu literatürle tam uyum içindedir.

Model-1'de boşluk suyu basıncı oranı (r_u) değerleri incelendiğinde, genel olarak kritik eşik değerin altında kaldığı görülmektedir. Yüzeye yakın tabakalarda yer yer artış olsa da değerler sıvılaşmayı tetikleyecek seviyelere ulaşmamıştır. Bu durum, homojen ve orta sıkı kum profiline sahip zeminin deprem sırasında sıvılaşmaya karşı görece daha dayanıklı olduğunu göstermektedir.

Model-2'de tabakalı yapının etkisiyle r_u değerlerinde düzensiz bir dağılım gözlenmiştir. Özellikle gevşek ve suya doygun tabakalarda r_u değerleri belirgin şekilde yükselmiş ve bazı tabakalarda sıvılaşma eşiğine yaklaşılmıştır. Bu sonuç, tabakalı zeminlerin deprem sırasında farklı derinliklerde farklı risk seviyeleri oluşturduğunu göstermektedir. Özellikle orta tabakalarda r_u değerlerinin yüksek çıkması, yapı temelleri açısından kritik bir tehlike arz etmektedir.

Model-3'te yeraltı suyu seviyesinin yüksek olması, r_u değerlerinde dramatik bir artışa yol açmıştır. Birçok tabakada boşluk suyu basıncı oranı kritik eşik değer olan 1'e yaklaşmış, bazı tabakalarda ise bu değerin aşıldığı görülmüştür. Bu sonuç, sıvılaşma potansiyelinin son derece yüksek olduğunu ve deprem sırasında zemin dayanımının büyük ölçüde kaybolabileceğini göstermektedir. Model-3, deprem etkisi altında en kritik senaryoyu yansıtmaktadır. Üç model kıyaslandığında:

- Model-1, r_u değerlerini düşük seviyelerde tutarak sıvılaşma açısından görece güvenli bir profil sunmaktadır.
- Model-2, tabaka farklılıklarının etkisiyle orta tabakalarda kritik değerlere yaklaşmış ve sıvılaşma potansiyeli oluşturmuştur.
- Model-3, yeraltı suyu seviyesinin yükselmesiyle en yüksek r_u değerlerini üretmiş ve sıvılaşma riskini en tehlikeli boyuta taşımıştır.

Bu bulgular, literatürdeki saha ve deneysel çalışmalarla tam uyumludur. Seed & Idriss (1971) ve Ishihara (1996), boşluk suyu basıncındaki artışın sıvılaşma potansiyelinin temel göstergesi olduğunu vurgulamıştır. Idriss & Boulanger (2008) da yüksek yeraltı suyu seviyesinin r_u değerlerini kritik düzeylere çıkardığını ve sıvılaşma riskini artırdığını belirtmiştir. Ayrıca 1999 Kocaeli ve 2023 Kahramanmaraş depremlerinde gözlenen saha bulguları, yüksek yeraltı suyu seviyesine sahip gevşek kumlu zeminlerde sıvılaşmanın ciddi hasarlara yol açtığını göstermiştir. Bu tezde elde edilen sonuçlar, söz konusu saha gözlemleriyle doğrudan örtüşmektedir.

4. SONUÇLAR

Bu tez kapsamında deprem etkisi altındaki davranışları, üç farklı zemin modeli (homojen kum profili, tabakalı kumlu zemin profili ve yüksek yeraltı suyu seviyesine sahip tabakalı kumlu zemin profili) üzerinden DeepSoil ve Plaxis 2D programlarıyla kapsamlı biçimde analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, zemin profilinin litolojik özelliklerinin, tabakalanmanın ve yeraltı suyu koşullarının deprem dalgalarının yayılımını, ivme büyütmesini, gerilme dağılımını ve sıvılaşma eğilimini doğrudan etkilediğini göstermiştir.

1. Model bazlı değerlendirme:

Homojen yapıda ve orta sıkı karakterdeki zemin (Model-1), deprem dalgalarının yüzeye düzgün biçimde iletildiği bir davranış sergilemiştir. İvme–derinlik grafikleri, enerji aktarımının düzenli olduğunu, maksimum ivme değerlerinin kısa periyotlarda yoğunlaştığını göstermektedir. Bu durum, rijit zeminlerde yüksek frekanslı bileşenlerin baskın olduğu ve düşük sönüm oranı nedeniyle kısa periyotlu salınımların büyütüldüğünü belirten Seed & Idriss (1971) ve Kramer (1996)'in sonuçlarıyla örtüşmektedir. Ancak bu tür zeminler, düşük katlı yapılar açısından rezonans riski taşıyabilir.

Tabakalı zemin profilinde (Model-2) deprem dalgalarının yayılımı, tabakalar arasındaki empedans kontrastlarının etkisiyle karmaşık bir karakter sergilemiştir. Sıkı tabakalardan daha gevşek tabakalara geçişlerde dalga enerjisinin iletimi sırasında ivme büyütmeleri gözlenirken, ters yöndeki geçişlerde ise enerji kısmen sönümlenmiştir. Bu durum, Ishihara (1996) tarafından tanımlanan zemin geçişlerinde meydana gelen dalga kırılmaları ve faz farklılıklarının tipik bir yansımasıdır. Benzer biçimde, Kuhlemeyer & Lysmer (1973) de farklı rijitlikteki tabakalar arasında oluşan empedans farklarının yansıma ve kırılma dalgaları oluşturarak deprem dalgalarının genlik ve faz içeriğini önemli ölçüde değiştirdiğini belirtmiştir. Dolayısıyla, bu modelde gözlenen heterojen ivme ve deplasman dağılımları, tabaka geçişlerinde ortaya çıkan dalga etkileşimlerinin doğrudan bir sonucudur. Ayrıca spektral ivme–periyot ilişkileri, orta periyot aralığında büyütmelerin arttığını göstermiş; bu da çok katlı yapıların rezonans olasılığını artırmaktadır. Aynı zamanda, Plaxis 2D analizlerinde kenar etkileri nedeniyle lokal büyütme bölgeleri oluşmuştur (Brinkgreve vd., 2018).

Yüksek yeraltı suyu seviyesine sahip modelde (Model-3) gözlenen ivme genliklerindeki azalma ve boşluk suyu basıncındaki artış, Kokusho (1980, 2004) tarafından yürütülen deneysel çalışmalarla güçlü bir paralellik göstermektedir. Kokusho, doygun kumlu zeminlerde artan su basıncının efektif gerilmeyi azaltarak zeminin kayma rijitliğini düşürdüğünü, bunun sonucunda ivme büyütmesinin sınırlandığını ancak salınım süresinin uzadığını ortaya koymuştur. Bu tez çalışmasında Model-3'te gözlenen uzun süreli, düşük genlikli salınımlar ve boşluk suyu basıncı oranının (r_u) 0.9–1.0 değerlerine ulaşması, bu mekanizmanın açık bir göstergesidir. Yeraltı suyu seviyesinin yükselmesiyle birlikte efektif gerilmenin azalması, zeminin rijitliğini azaltarak deprem dalgalarının genlik ve frekans içeriğini değiştirmiştir. Böylece yüzeydeki ivme büyütmesi azalmış, ancak sarsıntının süresi belirgin biçimde artmıştır. Bu bulgu, yüksek yeraltı suyu koşullarının sıvılaşma eğilimini artırdığını bildiren Youd & Idriss (2001) ve Idriss & Boulanger (2008)'in saha gözlemleriyle uyumludur. Benzer biçimde, Tokimatsu & Seed (1987) ve Çetin vd. (2004) de gevşek ve suya doygun kumlarda ani boşluk suyu basıncı artışlarının yapısal dayanımı önemli ölçüde azalttığını ve sıvılaşma potansiyelini artırdığını rapor etmişlerdir. Bu nedenle, yüksek yeraltı suyu seviyesine sahip zeminlerde deprem dalgalarının genlik, periyot ve süresinde gözlenen değişimlerin temel nedeni, efektif gerilme kaybına bağlı olarak gelişen rijitlik azalması ve artan sıvılaşma duyarlılığıdır.

Doğrusal olmayan analizlerde gözlenen kayma modülü indirgeme ve sönüm artışı, Darendeli (2001) tarafından geliştirilen ampirik modellerle güçlü bir uyum içerisindedir. Darendeli'nin önerdiği G/Gmax–γ ilişkisine göre, birim şekil değiştirme arttıkça kayma modülü azalmaktadır; bu çalışmada da benzer biçimde, büyük deformasyonlarda zemin rijitliği önemli ölçüde düşmüş ve enerji sönümü artmıştır. Bu durum Model-3'te gözlenen düşük ivme-yüksek deformasyon davranışını açıklamaktadır. Sonuç olarak doğrusal olmayan analizler, özellikle orta ve yüksek deformasyon seviyelerinde zemin davranışını gerçeğe en yakın biçimde yansıtmaktadır. Bu analizlerde Darendeli (2001) tipi modellerin kullanılması, kayma modülü indirgeme ve sönüm oranı eğrilerinin saha koşullarına uygun biçimde kalibre edilmesine olanak tanımaktadır.

2. Analiz yöntemlerinin karşılaştırılması:

Elde edilen sonuçlar, Hashash vd. (2010)'un da belirttiği üzere, eşdeğer doğrusal analizlerin yüksek deformasyon koşullarında enerji sönümünü ve kayma modülündeki

değişimi tam olarak temsil edemediğini ortaya koymuştur. Bu yöntem, küçük deformasyon seviyelerinde tatmin edici sonuçlar üretse de yüksek genlikli hareketlerde zemin davranışını olduğundan daha rijit tahmin etmiş ve bu nedenle yüzey ivme değerlerini kısmen düşük öngörmüştür. Buna karşılık, doğrusal olmayan modeller, zeminin histeretik enerji yutma kapasitesini dikkate alarak kayma modülündeki azalmayı ve sönüm oranındaki artışı zaman içinde doğru biçimde yansıtmıştır. Bu yaklaşım, özellikle yüksek yeraltı suyu koşullarında zeminlerin gerilme–şekil değiştirme ilişkisini daha gerçekçi biçimde temsil etmiş ve DeepSoil yazılımının doğrusal olmayan modülünde elde edilen sonuçların sahadaki davranışla uyumlu olduğunu göstermiştir. Elde edilen bulgular, doğrusal olmayan analizlerin büyük deformasyon seviyelerinde daha güvenilir tepkiler ürettiğini belirten Carlton & Tokimatsu (2016) ve Akdoğan (2019)'un sonuçlarıyla da örtüşmektedir. Dolayısıyla, deprem etkisi altındaki kohezyonsuz zeminlerin dinamik davranışının doğru biçimde değerlendirilebilmesi için doğrusal olmayan analizlerin tercih edilmesi gerekmektedir.

3. Plaxis 2D analizlerinin önemi:

İki boyutlu analizler, zemin davranışında yan sınır koşullarının ve dalga yansımalarının etkilerini ortaya koymuştur. Özellikle tabakalı ve suya doygun zeminlerde, 2B analizlerde elde edilen maksimum yüzey ivmeleri 1B analizlere kıyasla %15–25 oranında daha yüksek bulunmuştur. Bu fark iki boyutlu modellemenin zemin dalga yayılımını daha gerçekçi biçimde temsil ettiğini göstermektedir (Brinkgreve vd., 2018).

4. Genel değerlendirme:

Elde edilen tüm sonuçlar, Seed & Idriss (1971), Ishihara (1996), Kramer (1996), Youd vd. (2001) gibi temel literatürlerde ifade edilen dinamik zemin prensipleriyle uyumludur. Zeminin tabakalı olması, dalga enerjisinin yerel büyütmelere neden olmasına; yeraltı suyu seviyesi ise efektif gerilmenin düşmesi sonucu dayanım kaybına ve sıvılaşma riskine yol açmaktadır. Bu bağlamda, deprem tehlikesi altındaki bölgelerde zemin davranışının değerlendirilmesinde sahaya özgü analizlerin yapılması, özellikle yeraltı suyu koşulları ve tabakalı yapıların dikkate alınması büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma, zemin profilinin özelliklerinin deprem sırasında yapısal güvenlik üzerinde belirleyici olduğunu vurgulamakta ve mühendislik uygulamalarında detaylı geoteknik modellemelerin

zorunluluğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle, Kahramanmaraş gibi yüksek sismik tehlikeye sahip bölgelerde, yerel zemin koşullarının dikkate alınmadığı analizlerin güvenli tasarım için yetersiz olacağı sonucuna varılmıştır.

5.ÖNERİLER

Bu çalışmada elde edilen bulgular ışığında, deprem tehlikesi altındaki bölgelerde zemin davranışının güvenilir biçimde değerlendirilebilmesi ve yapı güvenliğinin artırılabilmesi için aşağıdaki öneriler geliştirilmiştir:

1. Sahaya özgü analizlerin zorunluluğu

Zemin davranışı, geoteknik özelliklerin çeşitliliğine bağlı olarak büyük değişiklik göstermektedir. Bu nedenle her proje sahasında, doğrusal ve doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizlerinin birlikte kullanıldığı saha-özel değerlendirmeler yapılmalıdır (Kramer, 1996; Idriss & Boulanger, 2008).

2. Yeraltı suyu koşullarının dikkate alınması ve zemin iyileştirme:

Yeraltı suyu seviyesinin yüksek olduğu bölgelerde efektif gerilmenin azalması sıvılaşma riskini artırmaktadır. Yeraltı suyu seviyesinin yüksek olduğu bölgelerde, sıvılaşma riskinin azaltılması için drenaj sistemleri, vibroflotasyon, taş kolon ve jet grout gibi yöntemlerin uygulanması önerilmektedir (Ishihara, 1996; Youd vd., 2001; Çetin vd., 2004).

3. Tabakalı zeminlerde detaylı inceleme:

Tabakalı zemin profillerinde farklı derinliklerde farklı büyütme ve deformasyon davranışları gözlenebilmektedir. Tabaka geçişlerinin etkisini doğru değerlendirmek için SPT, CPT, MASW, Rezonans Kolon, SSIP gibi arazi ve laboratuvar deneylerinin birlikte kullanılması gereklidir (Vucetic & Dobry, 1991; Stokoe vd., 1999).

4. Zemin-Yapı etkileşimi analizleri:

Spektral ivme–periyot eğrileri sonuçları, farklı yapı türlerinin (düşük katlı – orta katlı) deprem sırasında farklı risklerle karşı karşıya olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, yapıların doğal periyotlarının zemin büyütme karakteristikleri ile örtüşüp örtüşmediği kontrol edilmeli ve tasarım sürecinde zemin–yapı etkileşimi analizlerine yer verilmelidir. Bu

nedenle tasarım aşamasında yapı periyotlarının zeminin baskın titreşim periyotlarından uzak tutulması önemlidir (Seed & Idriss, 1971; Kramer, 1996).

5. Yönetmeliklerle uyum:

AFAD (2019) ve TBDY (2018) yönetmeliklerinde vurgulandığı üzere, tasarım spektrumlarının belirlenmesinde sahaya özgü spektrumların kullanılması gereklidir. Bu bağlamda, mühendislik projelerinde standart spektrum eğrilerinin yerine sahaya özgü analizlerden elde edilen spektrumların dikkate alınması önerilmektedir.

6. Laboratuvar-sayısal model kalibrasyonu:

Sayısal analizlerde kullanılan kayma modülü ve sönüm oranı değerlerinin, laboratuvar deneyleriyle kalibre edilmesi önerilmektedir (Vucetic & Dobry, 1991; Akdoğan, 2019).

7. Üç boyutlu analizlerin yapılması:

2B analizler belirli kabullerle sınırlıdır; bu nedenle 3B dinamik modellemelerle dalga yayılımı daha gerçekçi biçimde temsil edilebilir (Brinkgreve vd., 2018).

8. Farklı deprem kayıtlarıyla parametrik çalışmalar:

Gelecek çalışmalarda farklı büyüklük ve ivme karakteristiğine sahip deprem kayıtları kullanılarak zemin tepkisinin frekans duyarlılığı incelenmelidir (Idriss & Boulanger, 2008).

9. Mikro-bölgeleme ve şehir planlaması:

Bu çalışmada elde edilen ivme büyütmesi ve sıvılaşma sonuçları, mikro-bölgeleme haritalarının hazırlanmasında temel veri olarak kullanılabilir (Çetin vd., 2004; AFAD, 2019).

6. KAYNAKLAR

AFAD (2019). Türkiye Deprem Tehlike Haritası ve Parametre Değerleri. Ankara: T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı.

Akdoğan, P. (2019). Dynamic Soil Amplification In Saturated Soil Profiles Using Effective Stress Based Nonlinear Methods (Yüksek Lisans Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi.

Andrus, R. D., & Stokoe, K. H. II. (2000). Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126(11), 1015–1025.

Benz, T. (2007). Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences (Doctoral dissertation, Universität Stuttgart). Institut für Geotechnik, Universität Stuttgart.

Bolton, M. D. (1986). The strength and dilatancy of sands. Géotechnique, 36(1), 65–78.

Brinkgreve, R. B. J., Engin, E., & Swolfs, W. M. (2018). PLAXIS 2D Reference Manual. Plaxis bv.

Carlton, B., Tokimatsu, K. (2016). Comparison of equivalent linear and nonlinear site response analysis results and model to estimate maxmum shear strain. Earthquake EngineeringResearchInstitute,32(3)1867-1887.
doi: http://dx.doi.org/10.1193/021215EQS029MR1

Cetin, K. O., Seed, R. B., Der Kiureghian, A., Tokimatsu, K., Harder, L. F., Kayen, R. E., & Idriss, I. M. (2004). Standard penetration test-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130(12), 1314–1340.

Civelekler, E., Afacan, K. B., & Okur, D. V. (2021). Eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan yaklaşımlara göre sismik yük etkisindeki zeminlerde davranış analizi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 29(2), 158-171.

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

Das, B. M. (2010). Principles of geotechnical engineering (7th ed.). Cengage Learning.

Gücek, S., Afacan, K. B. & Zorluer, İ. (2023). 6 Şubat 2023 Depremleri Sonrası Zemin Büyütmesi ve Sıvılaşma Gerçeği: Antakya, Gölbaşı, Türkoğlu Örnekleri. Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering, 035601, 740-752.

Hardin, B. O., & Drnevich, V. P. (1972a). Shear modulus and damping in soils: Measurement and parameter effects. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 98(SM6), 603–624.

Hardin, B. O., & Drnevich, V. P. (1972b). Shear modulus and damping in soils: Design equations and curves. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 98(SM7), 667–692.

Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Okan, I., Xing, G., Numanoglu, O., Groholski, D.R., Phillips, C.A., and Park, D. (2020) "DEEPSOIL 7.0, User Manual". Urbana, IL, Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign.

Hashash, Y. M. A., Phillips, C., & Park, D. (2010). Nonlinear seismic site response analysis—State of the art and potential improvements. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 30(4), 353–369.

Idriss, I. M., & Boulanger, R. W. (2008). Soil liquefaction during earthquakes (EERI Monograph No. 12). Oakland, CA: Earthquake Engineering Research Institute.

Ishihara, K. (1996). Soil behaviour in earthquake geotechnics. Oxford, UK: Clarendon Press.

Işkın, Ö. & Özener, P. (2024). Sıvılaşma Sırasında Bina Performansına Temel Derinliğinin Etkisinin Nümerik Analizlerle İncelenmesi. Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 19. Ulusal Konferansı. Ankara

Kale, Ö. (2017). Tasarım Spektrumu Parametreleri için Olasılıksal Sismik Tehlike Analizlerine Bağlı Bir Çalışma. Teknik Dergi, 28 (4), 8077-8103. doı: https://doi.org/10.18400/tekderg.331837

Kokusho, T. (1980). Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range. Soils and Foundations, 20(2), 45–60.

Kokusho, T. (2004). Nonlinear site response and seismic ground motion. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 33(7), 929–945.

Kuhlemeyer, R. L., & Lysmer, J. (1973). Finite element method accuracy for wave propagation problems. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 99(SM5), 421–427.

Kramer, S.L. (1996). Geotechnical Earhquake Engineering, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA.

Plaxıs 2D (2017). Plaxıs Material Models Manuel.

Plaxıs 2D (2017). Plaxıs Reference Manuel.

Practical Foundation Engineers Council. (2008). Technical review and comments on the EERI Monograph "Soil Liquefaction During Earthquakes" by Idriss & Boulanger (2008).

Pruiksma, J. P. (2016). Nonlinear and equivalent linear site response analysis for the groningen area. TNO Report, TNO 2016 R10460, 1-30. Erişim adresi: https://www.nlog.nl/sites/default/files/18-tno2016-r10460-nonlinear-and-equivalent-linear-siteresponse-analysis-for-the-groningen-area25032016.pdf

Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 97(9), 1249–1273.

Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1970). Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses (Report No. EERC 70-10). Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

Selçuk, M. E., Kılıç, H., Özaydın, K. (2007). Comparison of linear and non-linear site response analysis of deep soils. Sixth National Conference on Earthquake Engineering. Istanbul, 187-198.

Sivrikaya, O. (2021). İnşaat Mühendisliğinde Temel İnşaatı- I. Trabzon: Birsen Yayınevi.

Stokoe, K. H., Andrus, R. D., & Hryciw, R. D. (1999). Dynamic soil properties and site characterization. Proceedings of the 2nd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Lisbon.

Tokimatsu, K., & Seed, H. B. (1987). Evaluation of settlements in sands due to earthquake shaking. Journal of Geotechnical Engineering, 113(8), 861–878.

Türkiye Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (2018). Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı, Ankara.

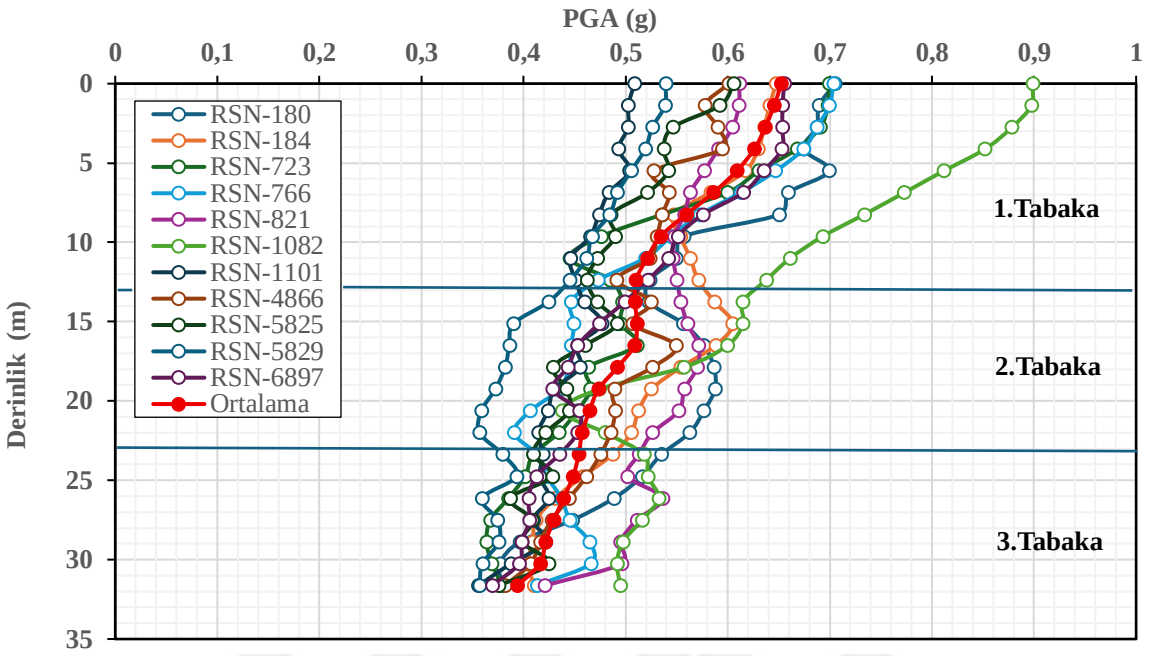
Vucetic, M., & Dobry, R. (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 117(1), 89–107.

Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Arango, I., Castro, G., Christian, J. T., Dobry, R., Finn, W. D. L., Harder, L. F., Hynes, M. E., Ishihara, K., Koester, J. P., Liao, S. S. C., Marcuson, W. F., Martin, G. R., Mitchell, J. K., Moriwaki, Y., Power, M. S., Robertson, P. K., ... Stokoe, K. H. II. (2001). Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(10), 817–833.

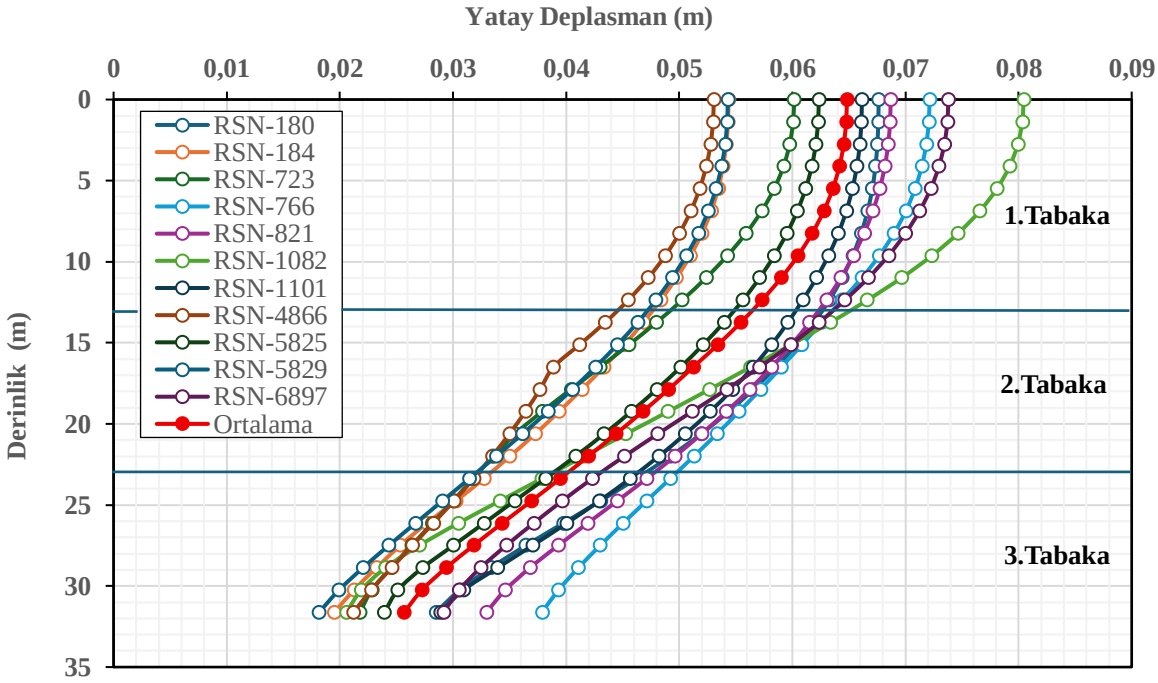
Youd, T. L., & Idriss, I. M. (Eds.). (2001). Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(4). 297–313

7. EKLER

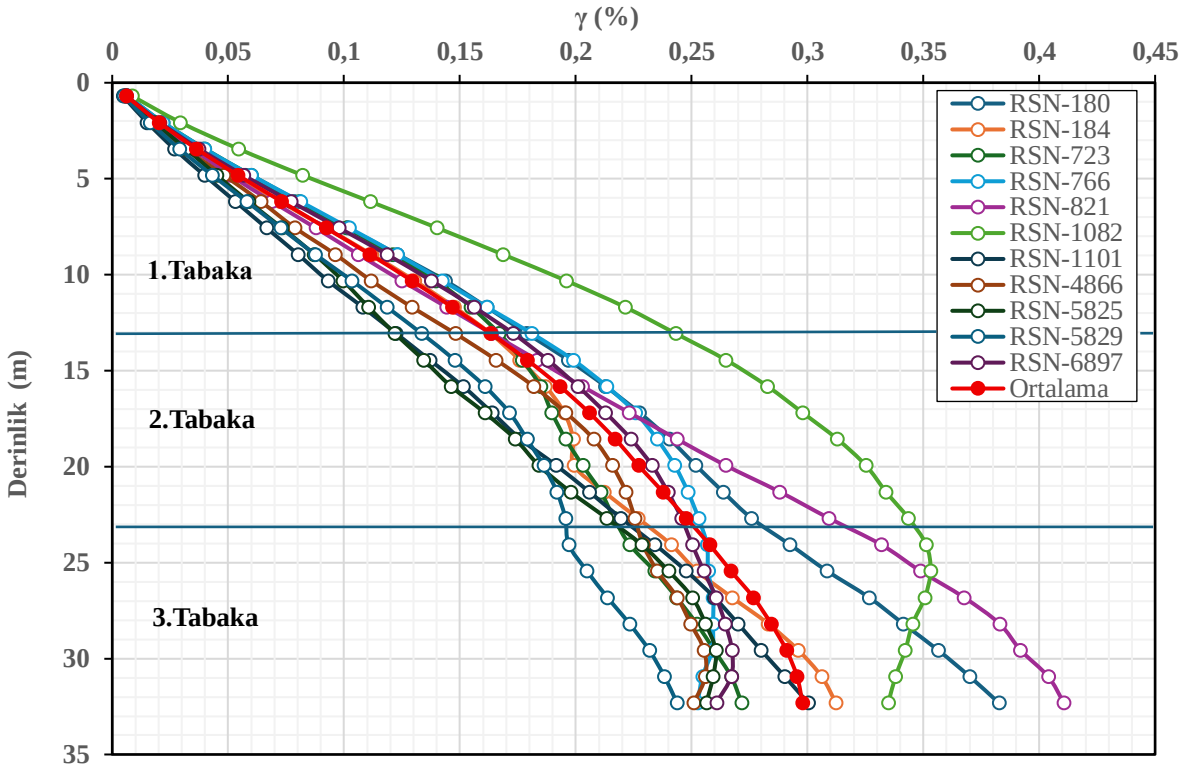
Ek-1. Model 1 için H2 yönlü depremler durumunda Non-Lineer Analiz ile PGA-Derinlik, Yatay deplasman-derinlik, maksimum yanal deformasyon-derinlik ve kayma gerilmesi oranı-derinlik sonuçları



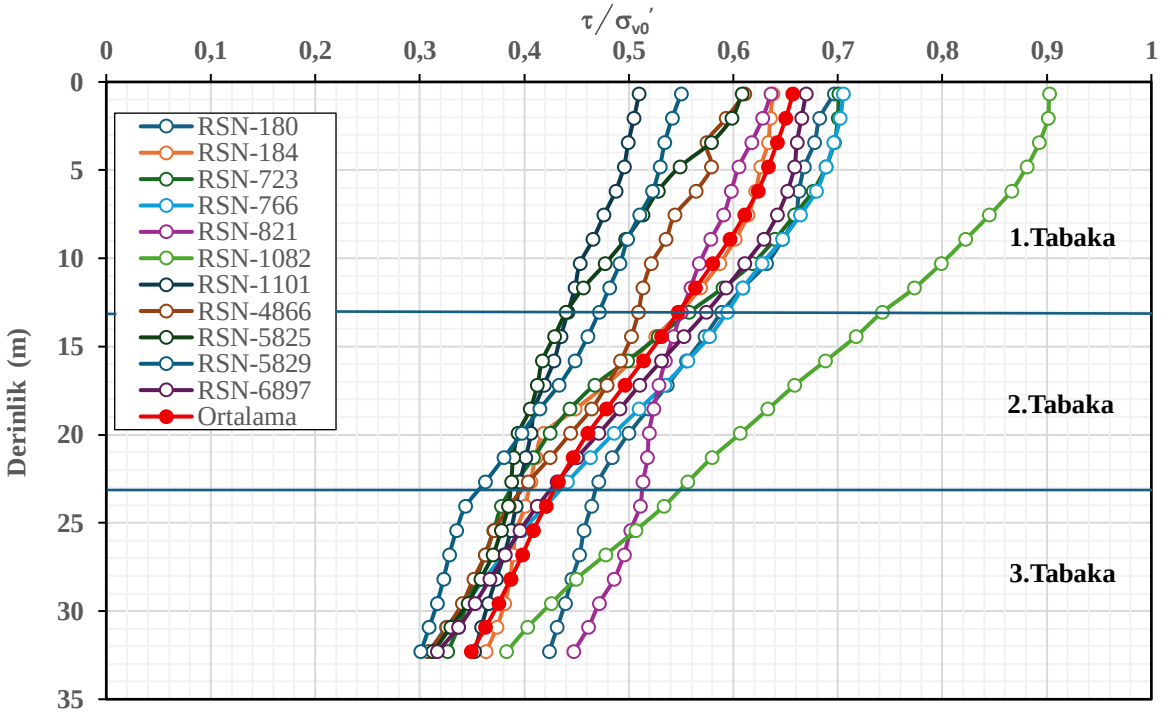
Şekil 156. Model-1 için H2 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan ivmenin derinlikle değişimi



Şekil 157. Model-1 için H2 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan yatay deplasmanın derinlikle değişimi

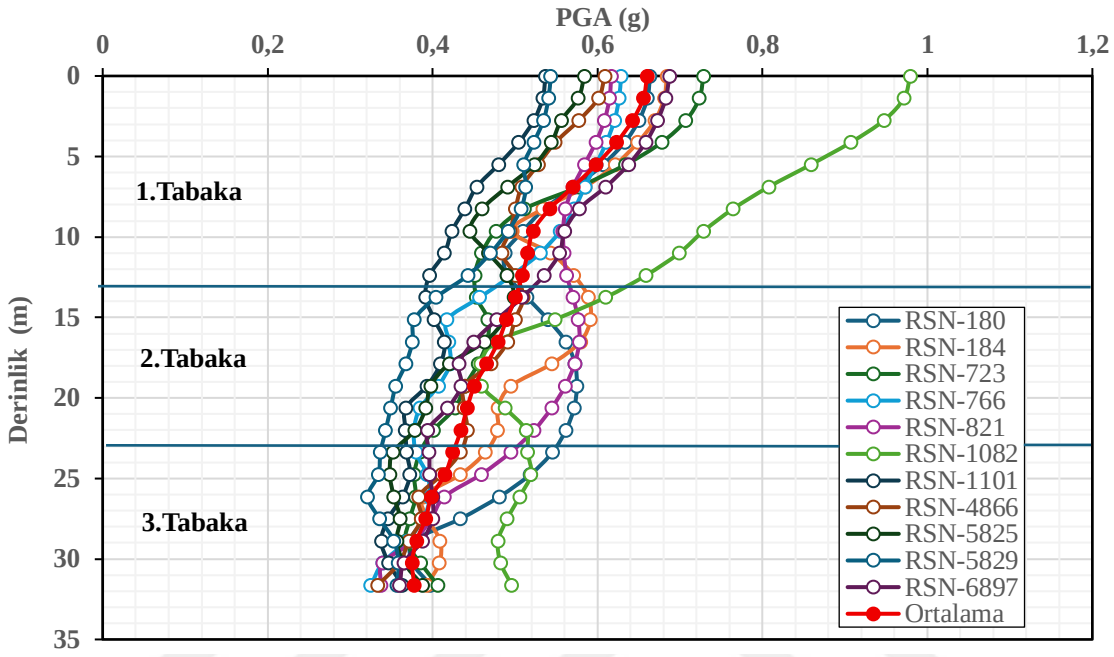


Şekil 158. Model-1 için H2 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan maksimum yanal deformasyonun derinlikle değişimi

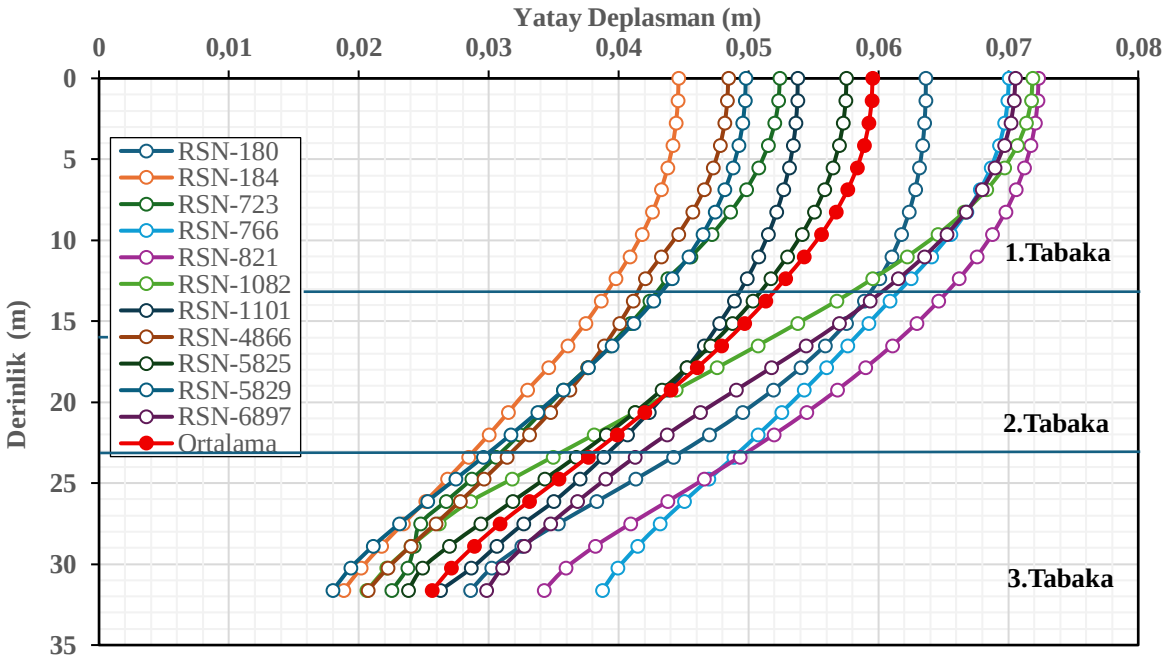


Şekil 159. Model-1 için H2 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan kayma gerilmesi oranının derinlikle değişimi

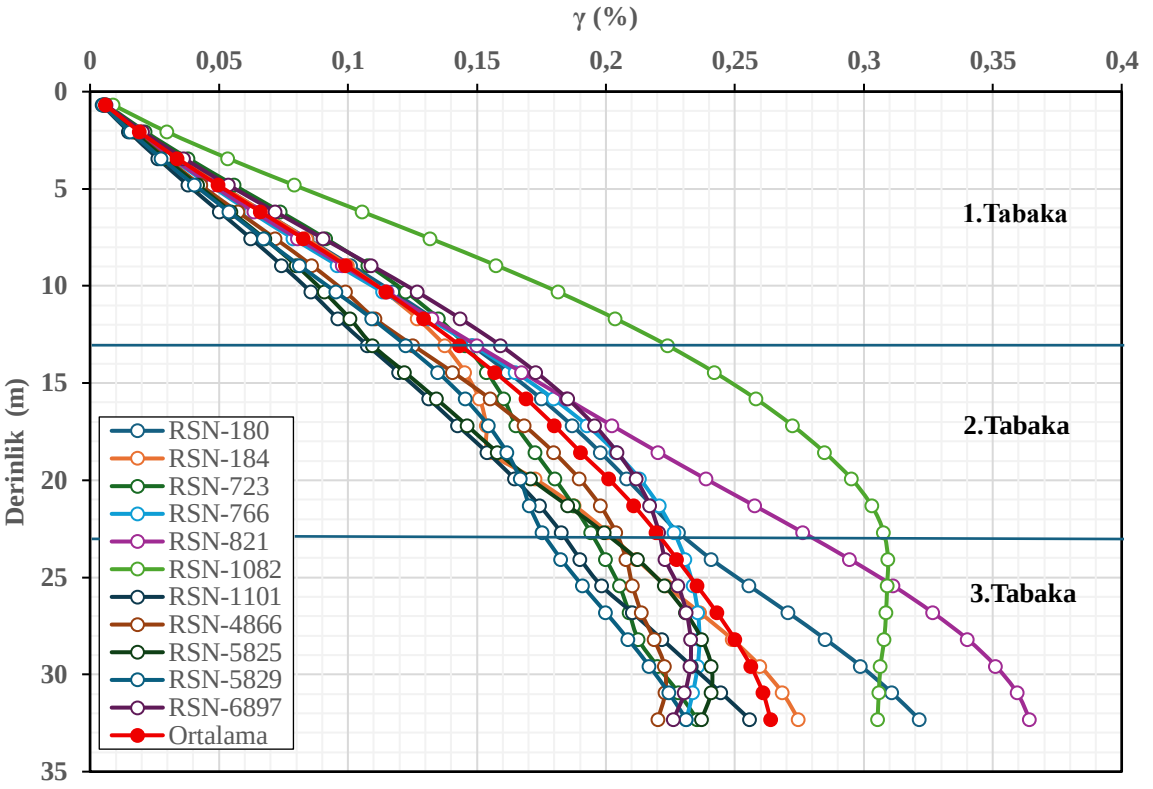
Ek-2. Model 1 için H2 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer Analiz ile PGA-Derinlik, Yatay deplasman-derinlik, maksimum yanal deformasyon-derinlik ve kayma gerilmesi oranı-derinlik sonuçları



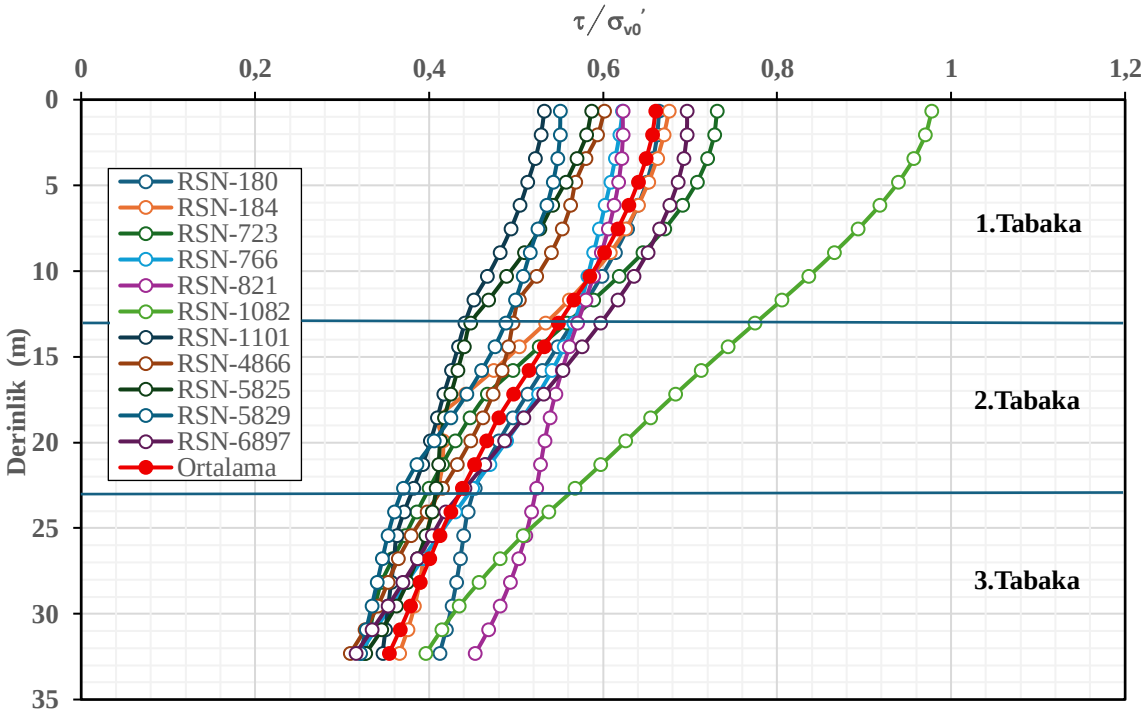
Şekil 160. Model-1 için H2 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer analiz sonucu bulunan ivmenin derinlikle değişimi



Şekil 161. Model-1 için H2 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer analiz sonucu bulunan yatay deplasmanın derinlikle değişimi

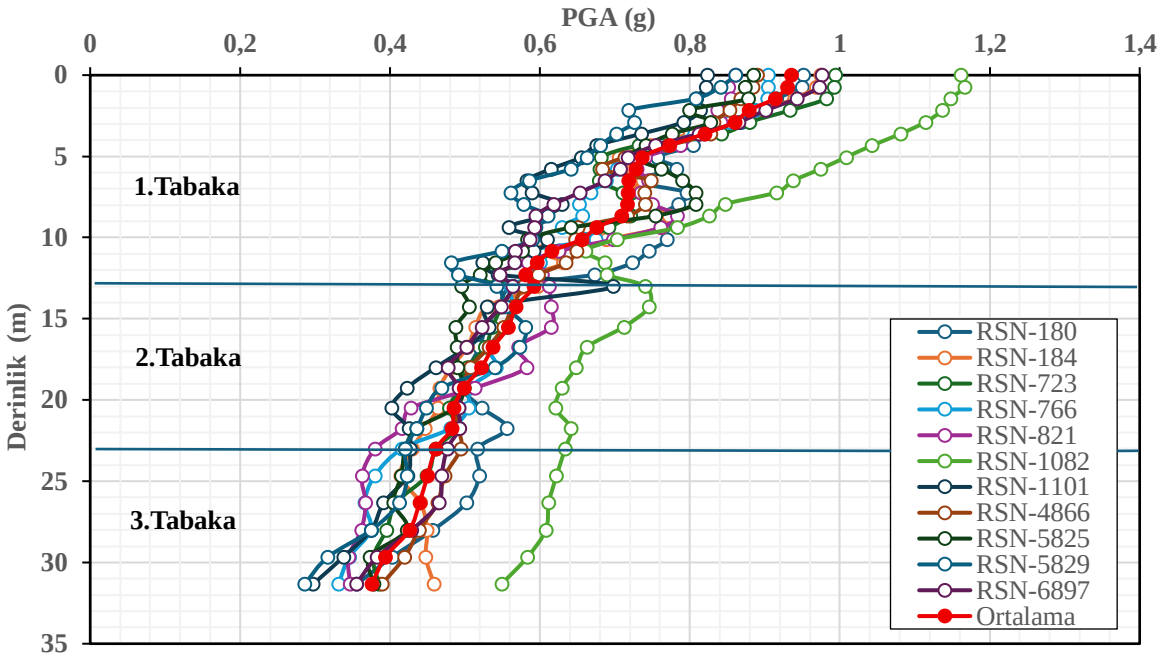


Şekil 162. Model-1 için H2 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer analiz sonucu bulunan maksimum yanal deformasyonun derinlikle değişimi

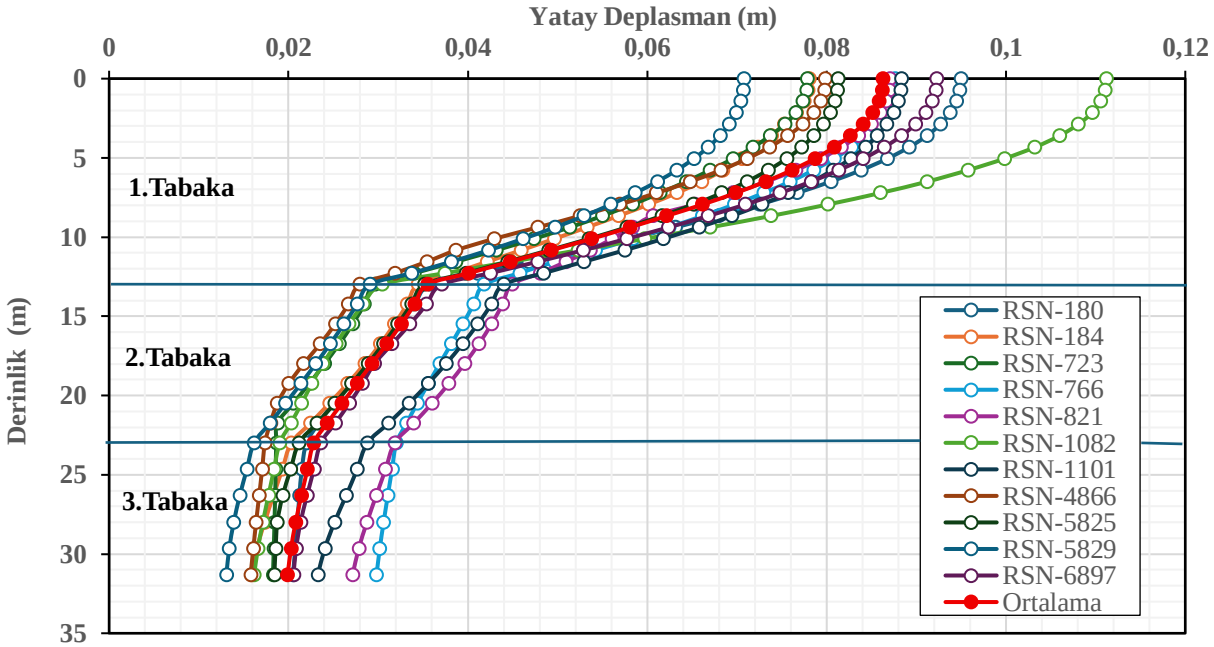


Şekil 163. Model-1 için H2 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer analiz sonucu bulunan kayma gerilmesi oranının derinlikle değişimi

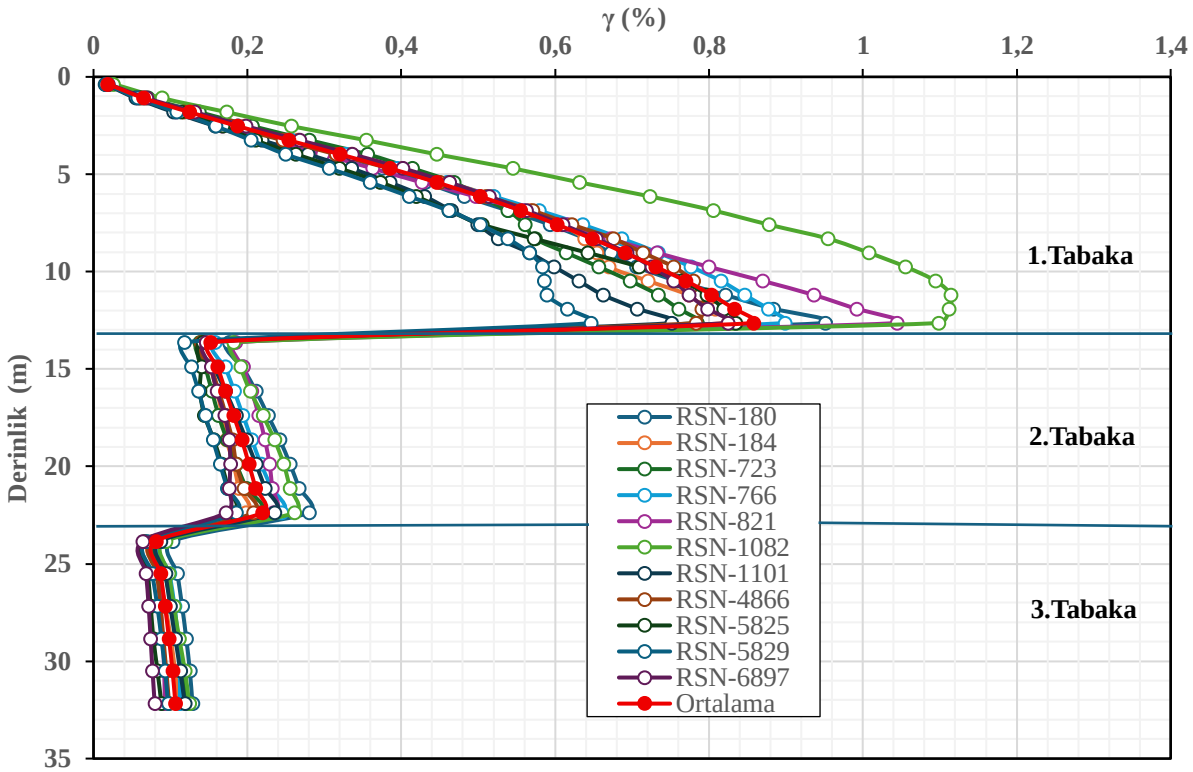
Ek-3. Model 2 için H2 yönlü depremler durumunda Non-Lineer Analiz ile PGA-Derinlik, Yatay deplasman-derinlik, maksimum yanal deformasyon-derinlik ve kayma gerilmesi oranı-derinlik sonuçları



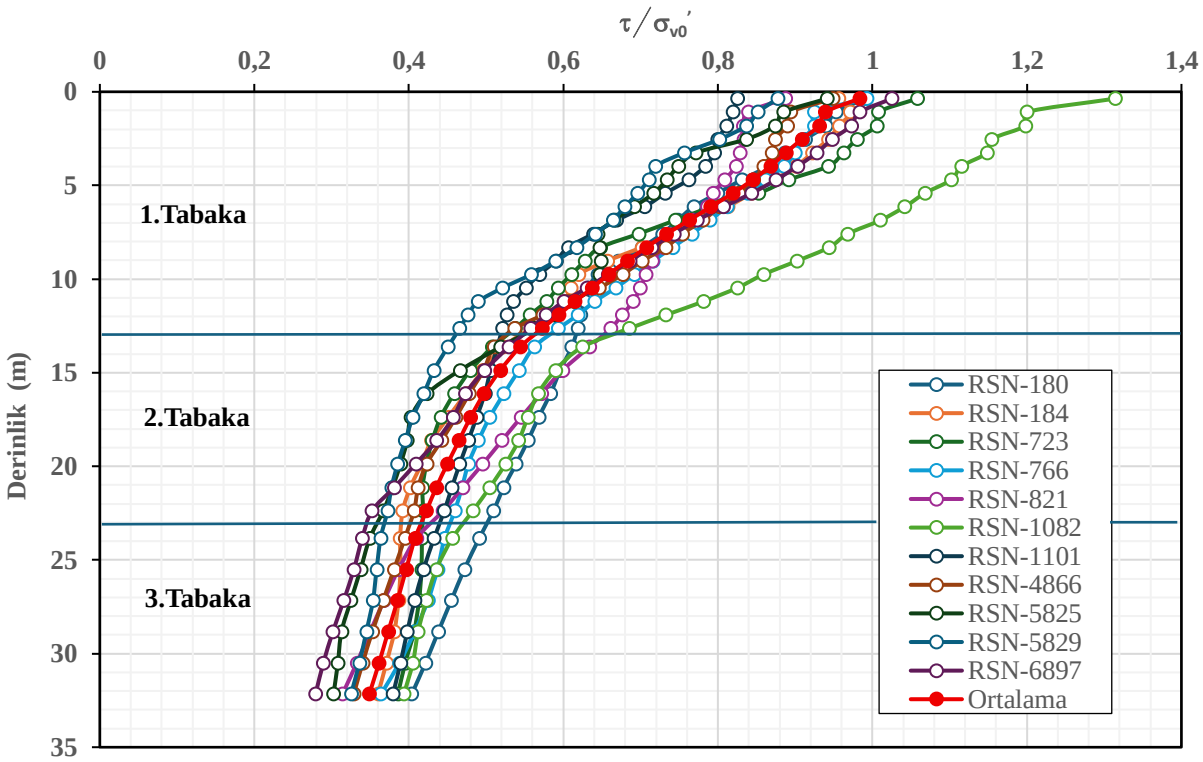
Şekil 164. Model-2 için H2 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan ivmenin derinlikle değişimi



Şekil 165. Model-2 için H2 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan yatay deplasmanın derinlikle değişimi

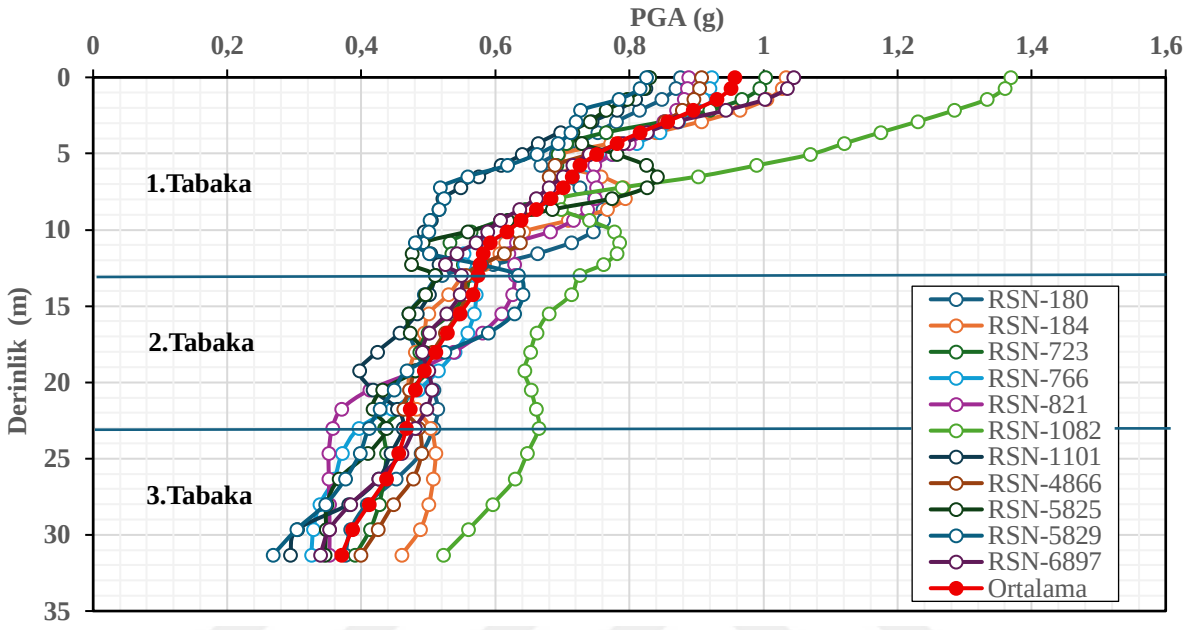


Şekil 166. Model-2 için H2 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan maksimum yanal deformasyonun derinlikle değişimi

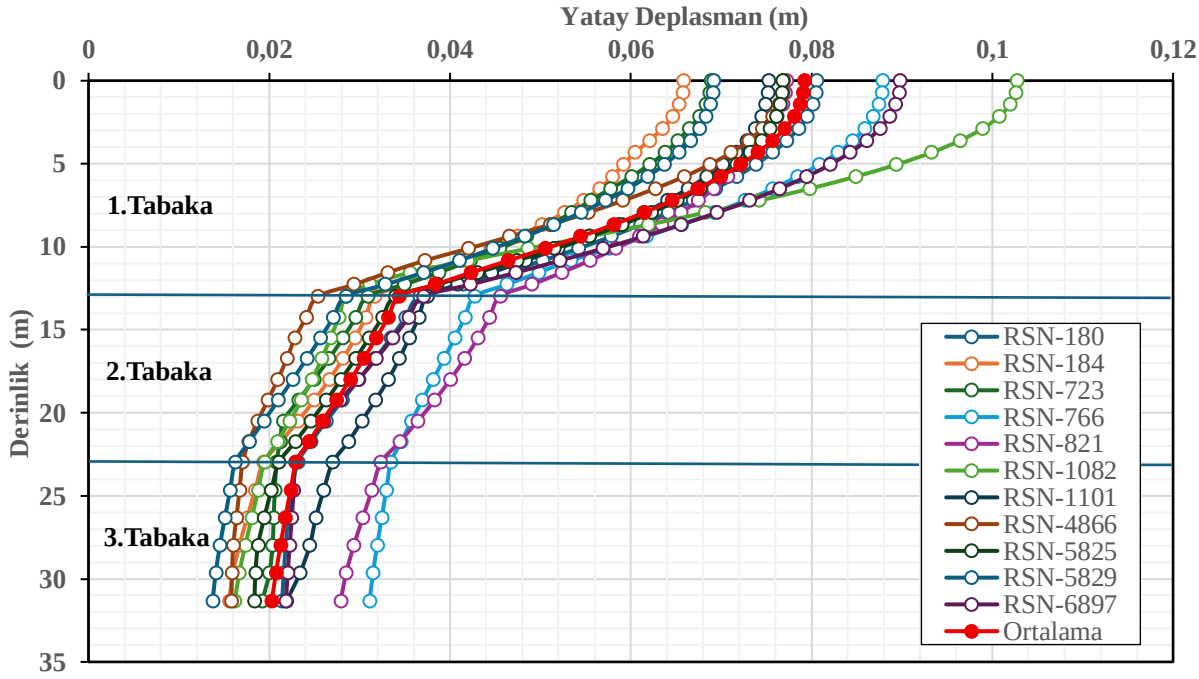


Şekil 167. Model-2 için H2 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan kayma gerilmesi oranının derinlikle değişimi

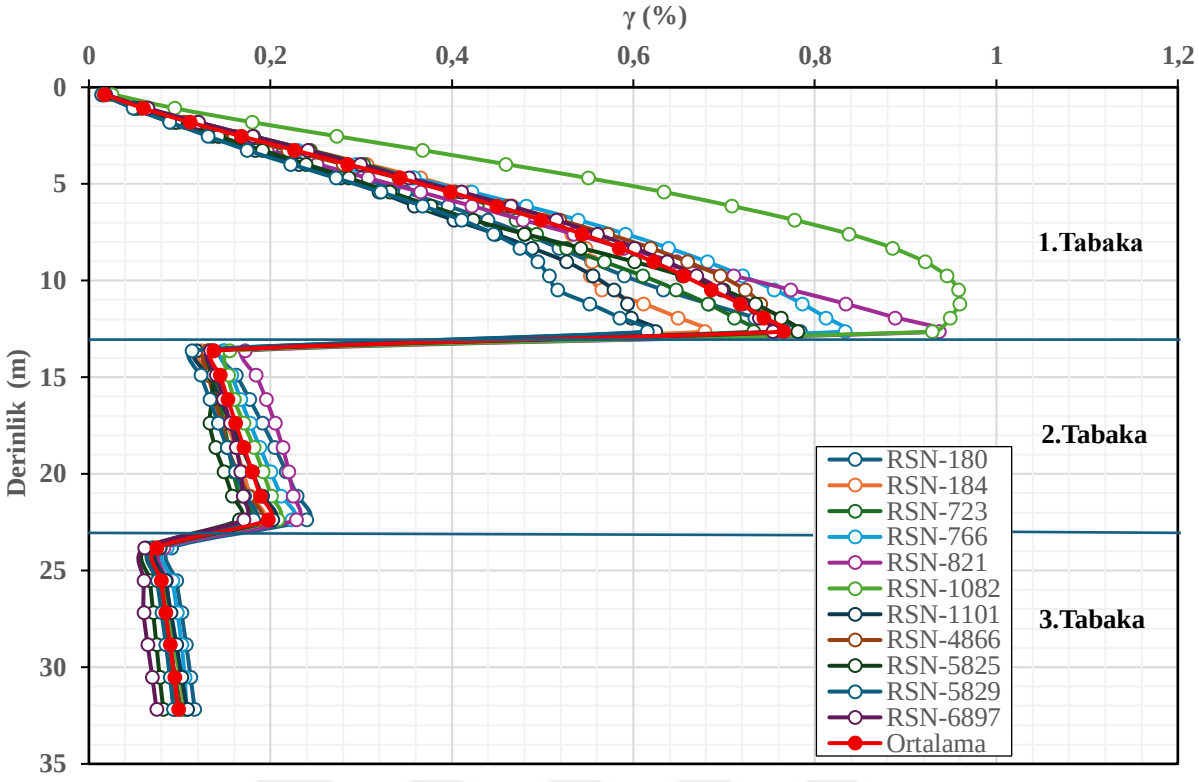
Ek-4. Model 2 için H2 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer Analiz ile PGA-Derinlik, Yatay deplasman-Derinlik, Maksimum yanal deformasyon-Derinlik ve Kayma gerilmesi oranı-Derinlik sonuçları



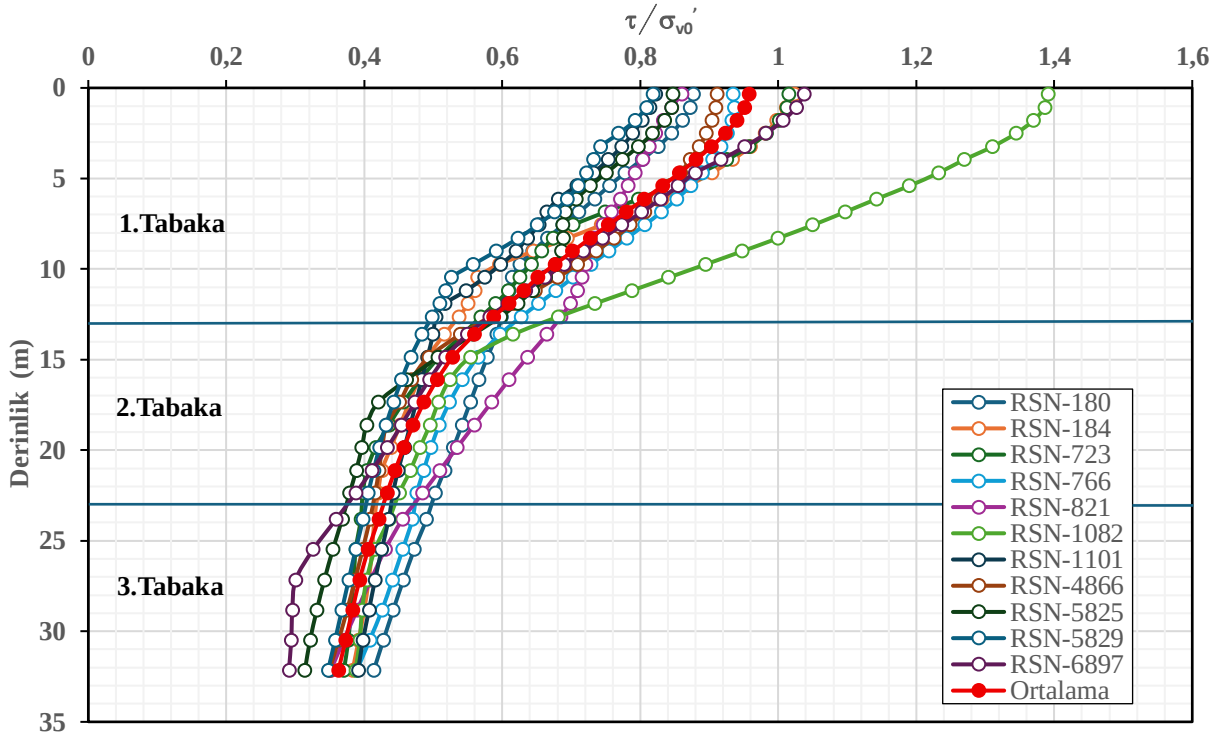
Şekil 168. Model-2 için H2 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer analiz sonucu bulunan ivmenin derinlikle değişimi



Şekil 169. Model-2 için H2 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer analiz sonucu bulunan yatay deplasmanın derinlikle değişimi

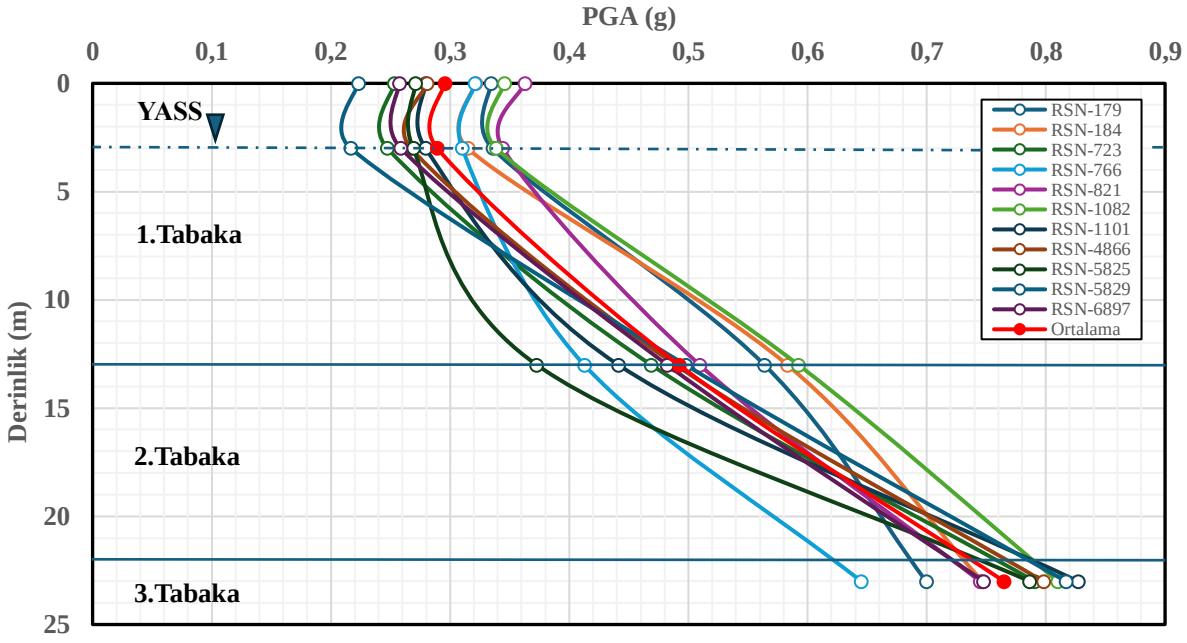


Şekil 170. Model-2 için H2 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer analiz sonucu bulunan maksimum yanal deformasyonun derinlikle değişimi

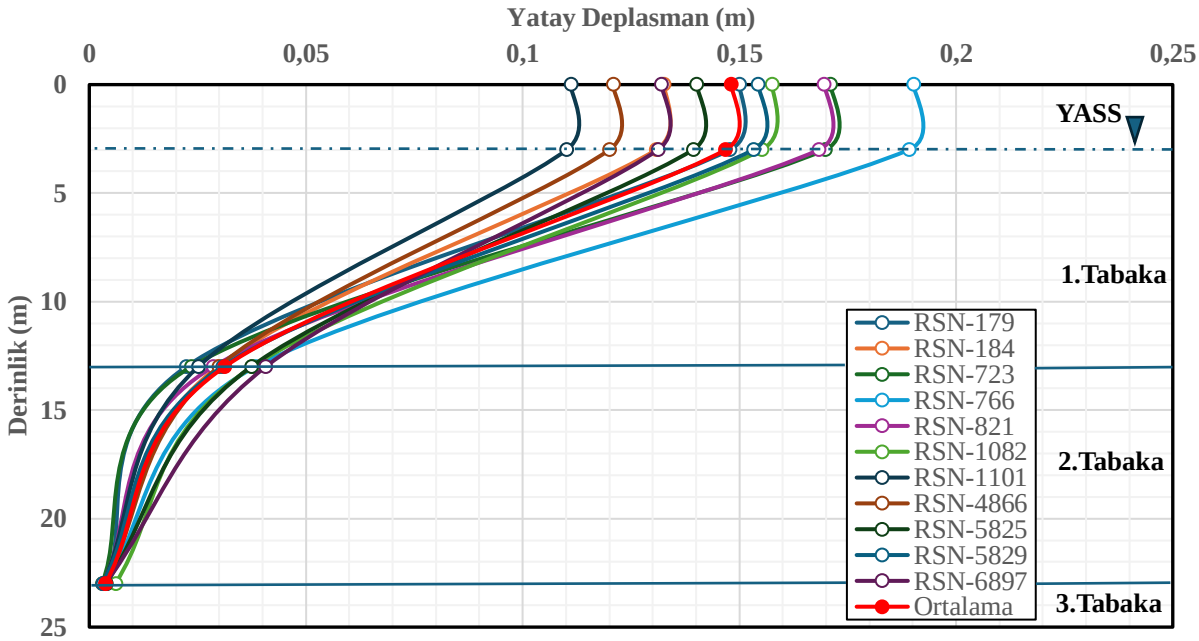


Şekil 171. Model-2 için H2 yönlü depremler durumunda Eşdeğer Lineer analiz sonucu bulunan kayma gerilmesi oranının derinlikle değişimi

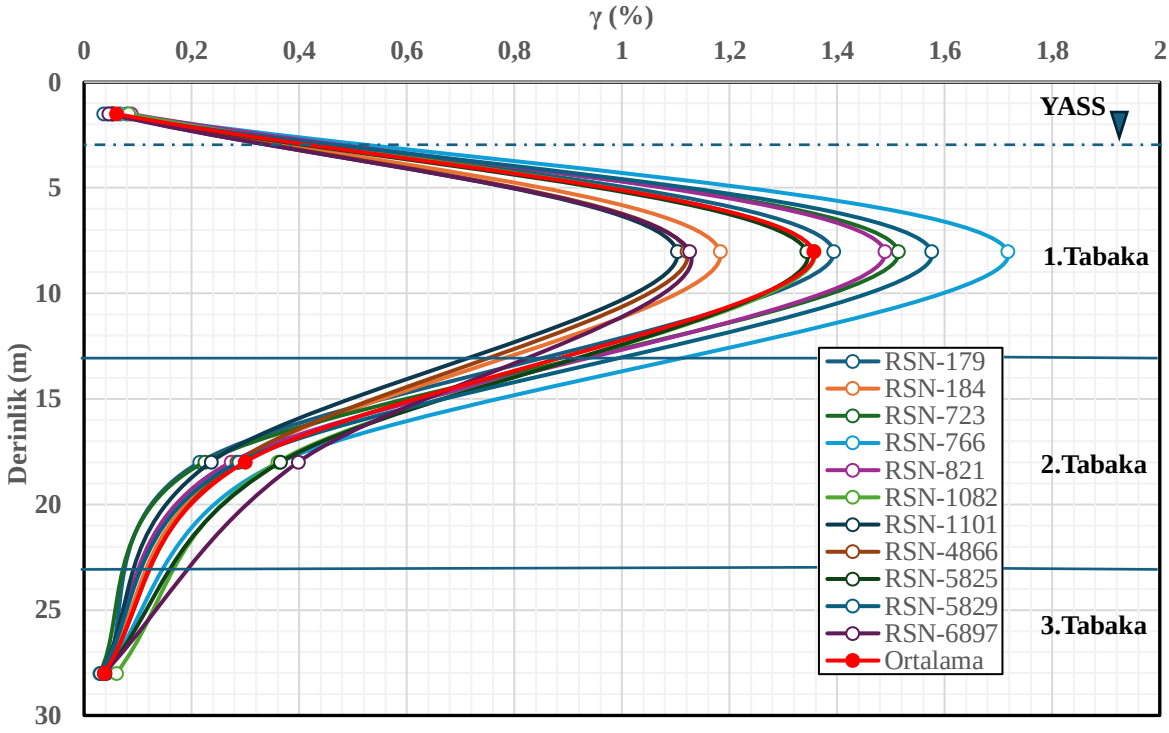
Ek-5. Model 3 için H2 yönlü depremler durumunda Non-Lineer Analiz ile PGA-Derinlik, Yatay deplasman-Derinlik, Maksimum yanal deformasyon-Derinlik ve Kayma gerilmesi oranı-Derinlik sonuçları



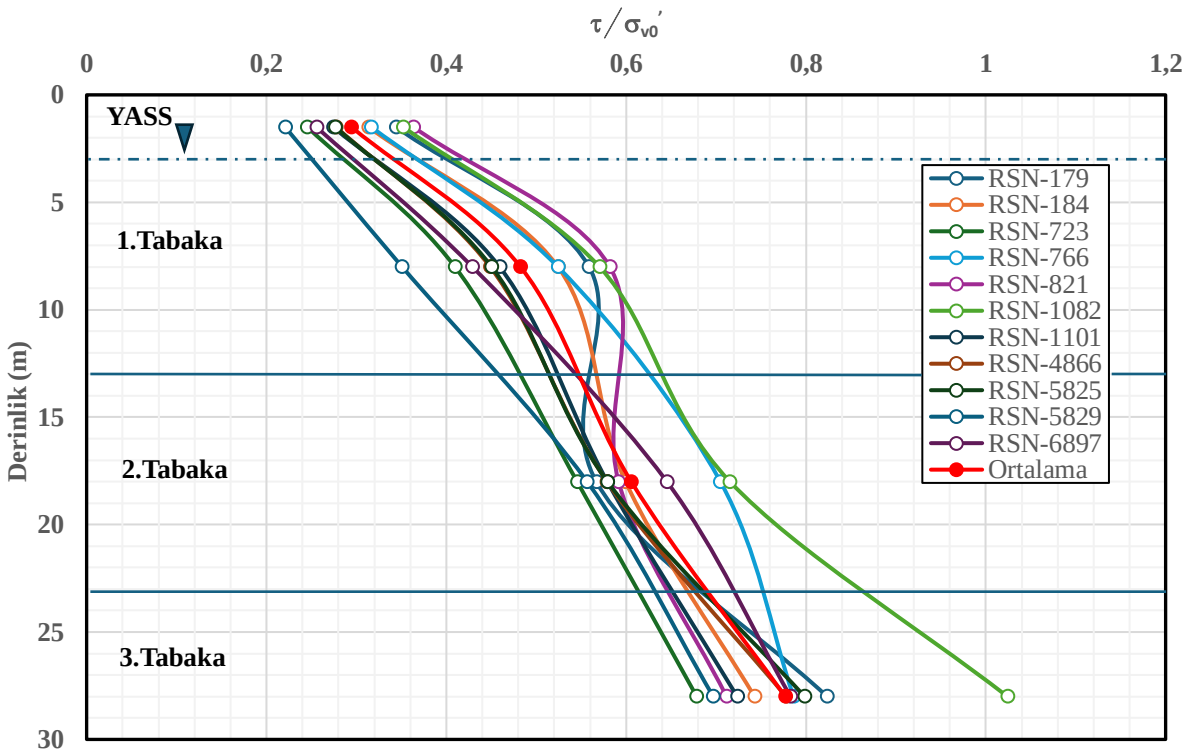
Şekil 172. Model-3 için H2 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan ivmenin derinlikle değişimi



Şekil 173. Model-3 için H2 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan yatay deplasmanın derinlikle değişimi

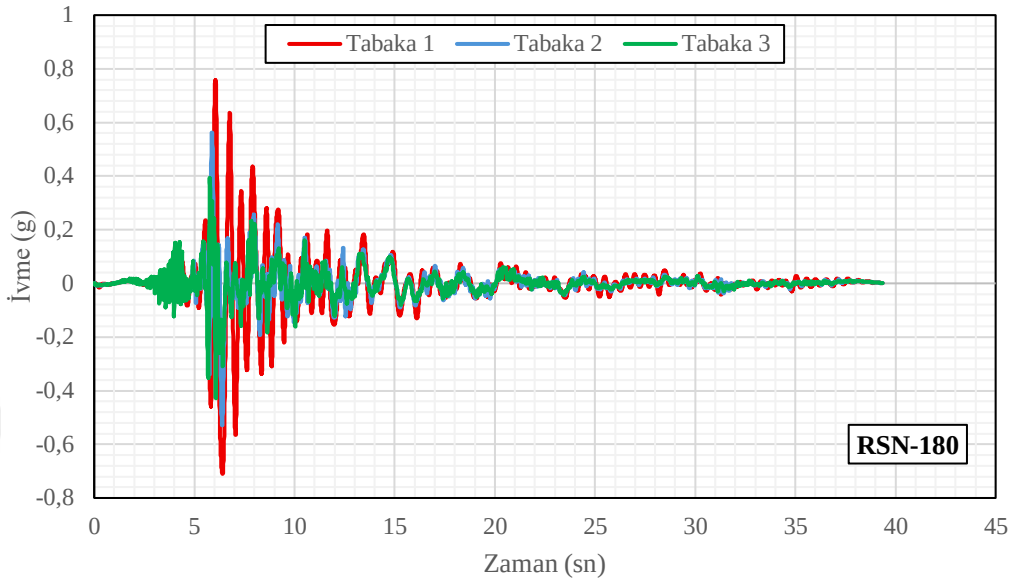


Şekil 174. Model-3 için H2 yönlü depremler durumunda Non-Lineer analiz sonucu bulunan maksimum yanal deformasyonun derinlikle değişimi

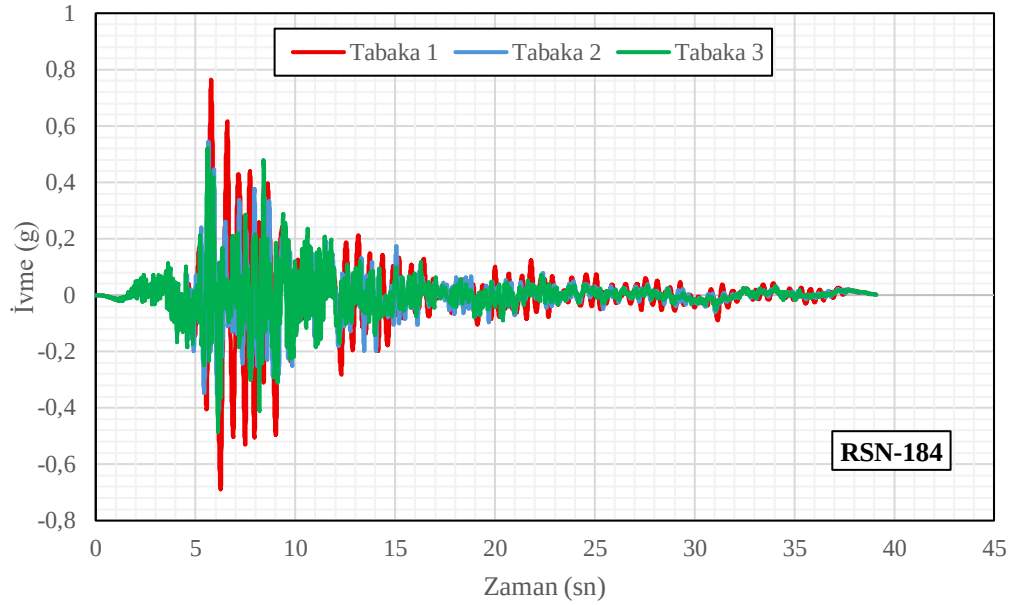


Şekil 175. Model-3 H2 yönlü depremler durumunda için Non-Lineer analiz sonucu bulunan kayma gerilmesi oranının derinlikle değişimi

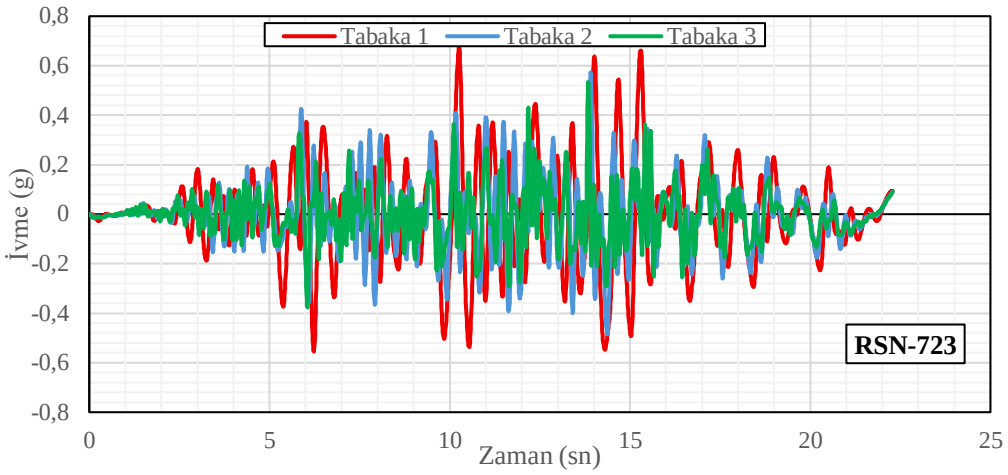
Ek-6. Model 2 için H2 yönlü depremler durumunda Non-Lineer Analiz ile tabakalara göre İvme-Zaman sonuçları



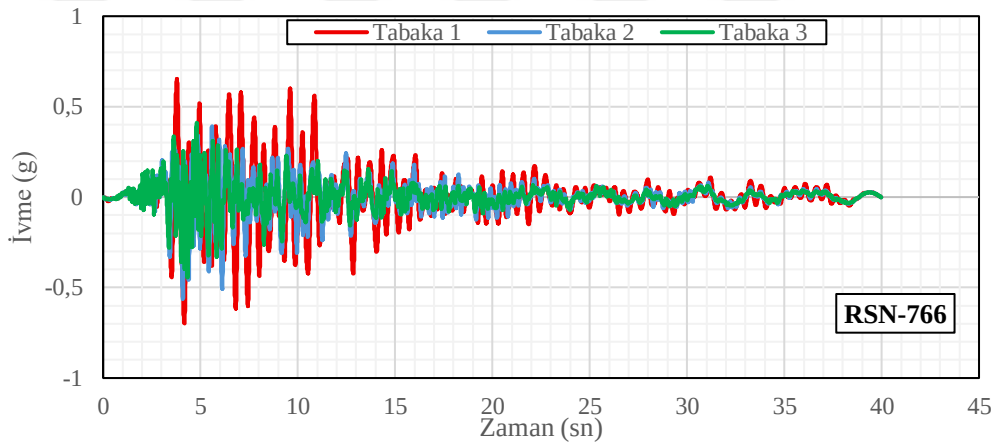
Şekil 176. Model-2 için H2 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-180



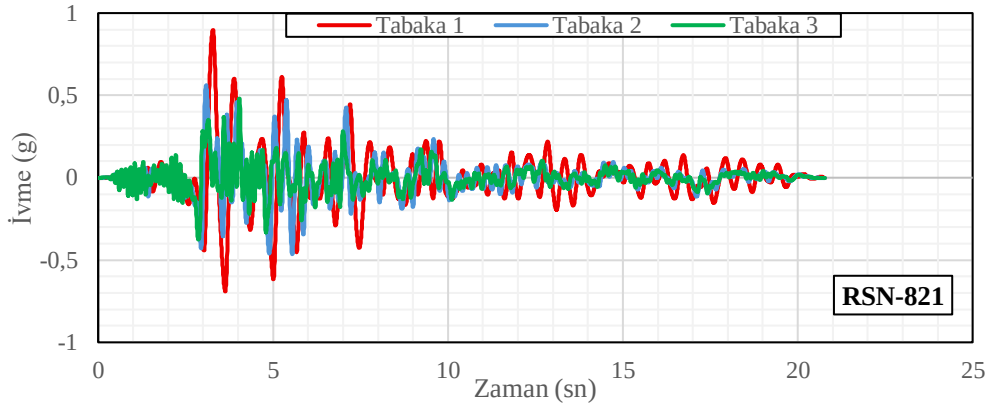
Şekil 177. Model-2 için H2 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-184



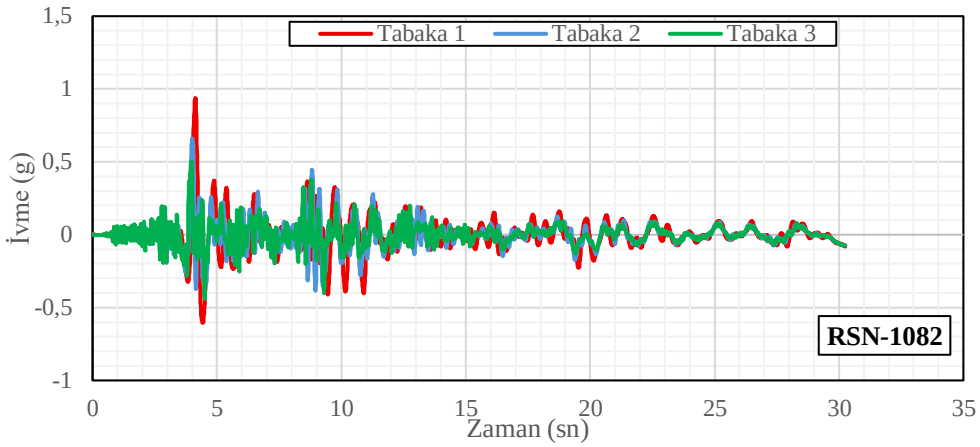
Şekil 178. Model-2 için H2 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-723



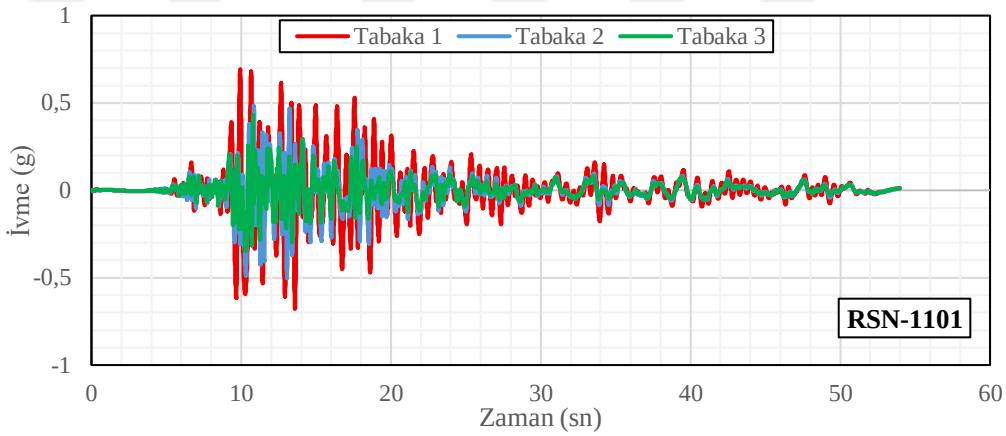
Şekil 179. Model-2 için H2 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-766



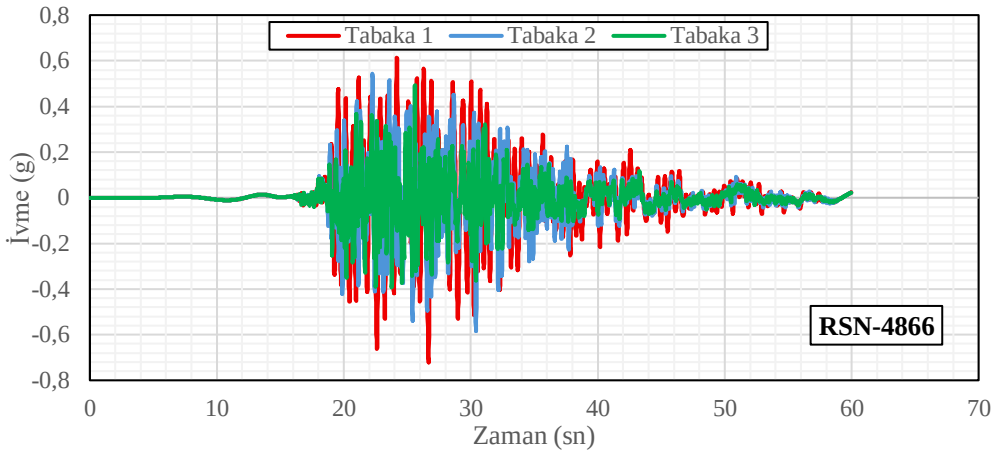
Şekil 180. Model-2 için H2 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-821



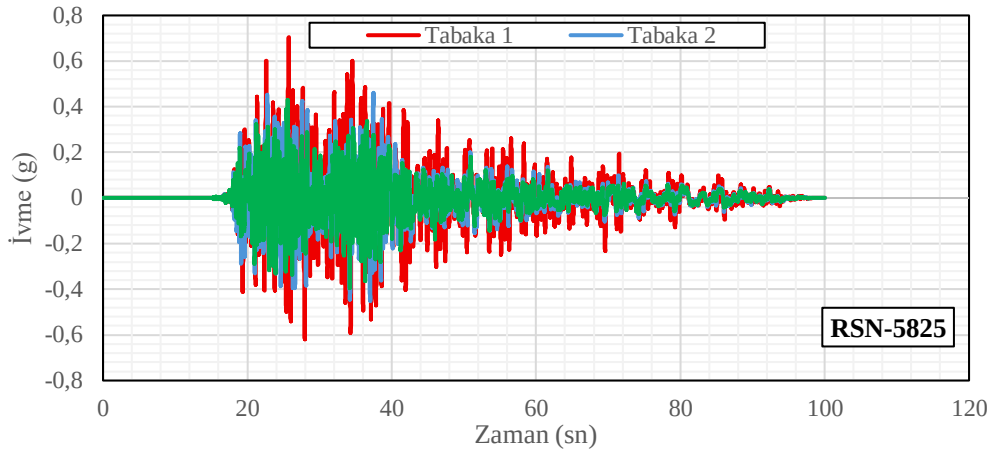
Şekil 181. Model-2 için H2 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-1082



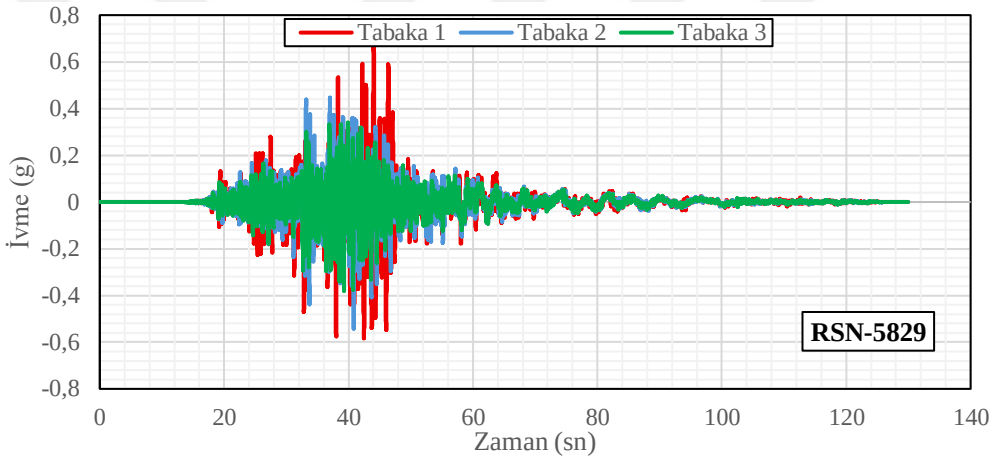
Şekil 182. Model-2 için H2 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-1101



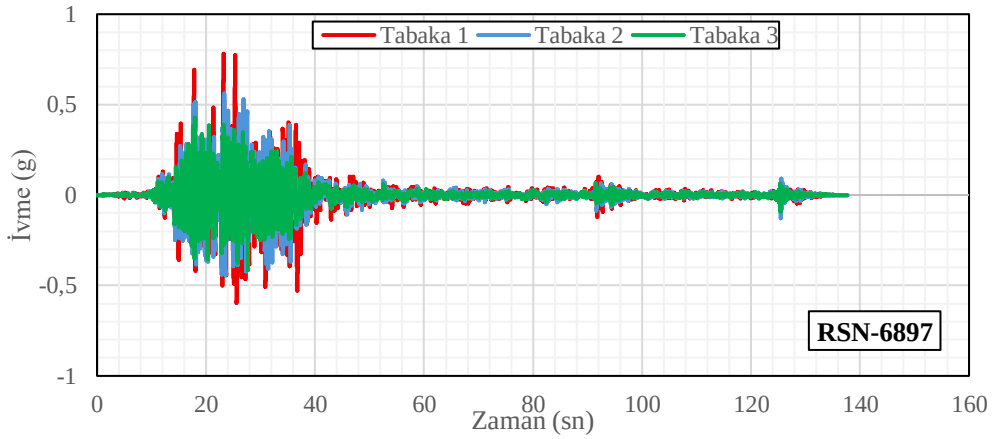
Şekil 183. Model-2 için H2 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-4866



Şekil 184. Model-2 için H2 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-5825

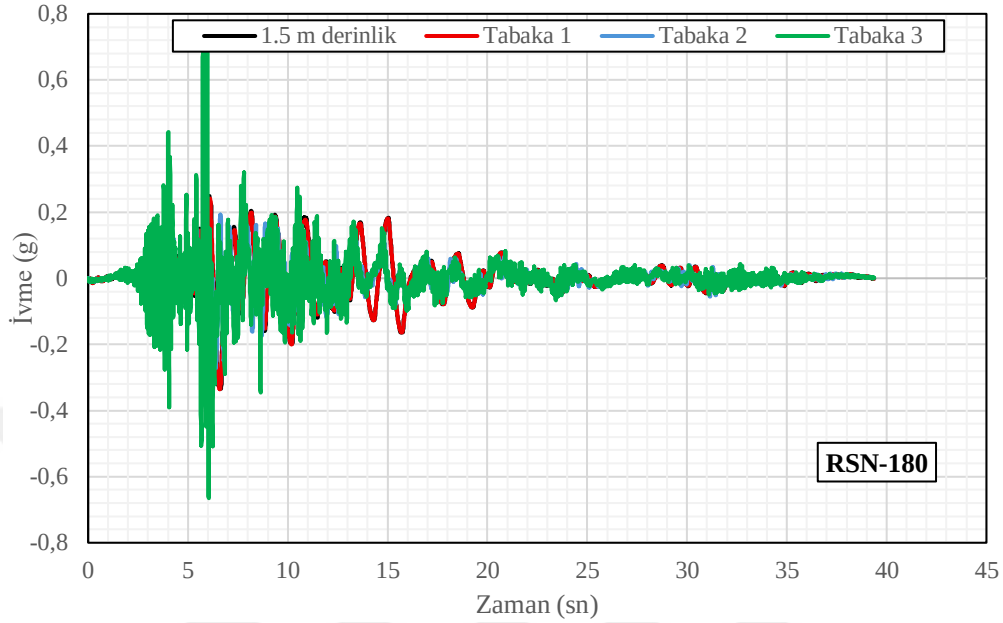


Şekil 185. Model-2 için H2 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-5829

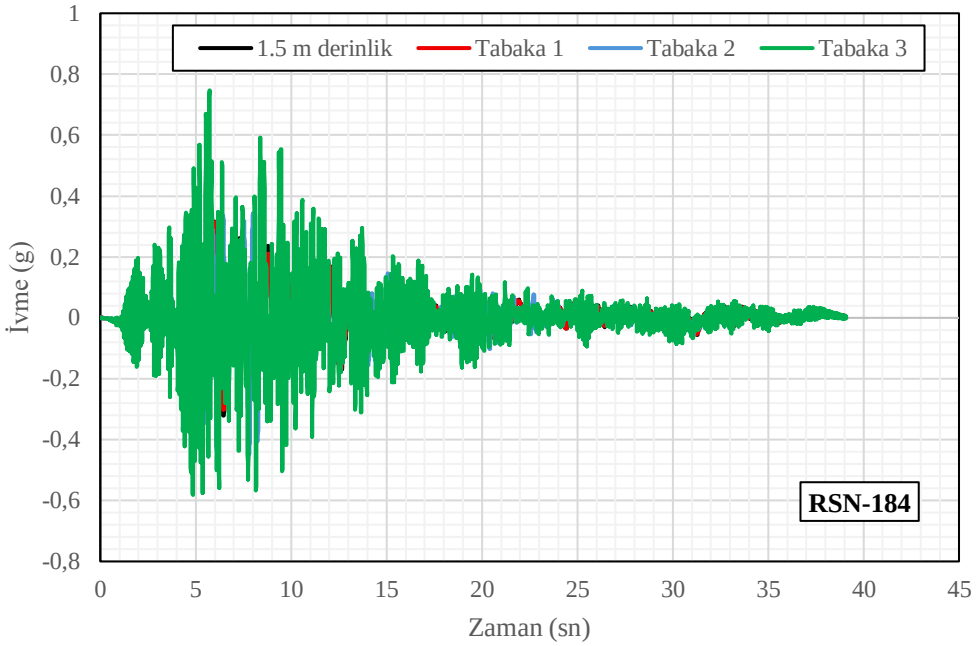


Şekil 186. Model-2 için H2 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-6897

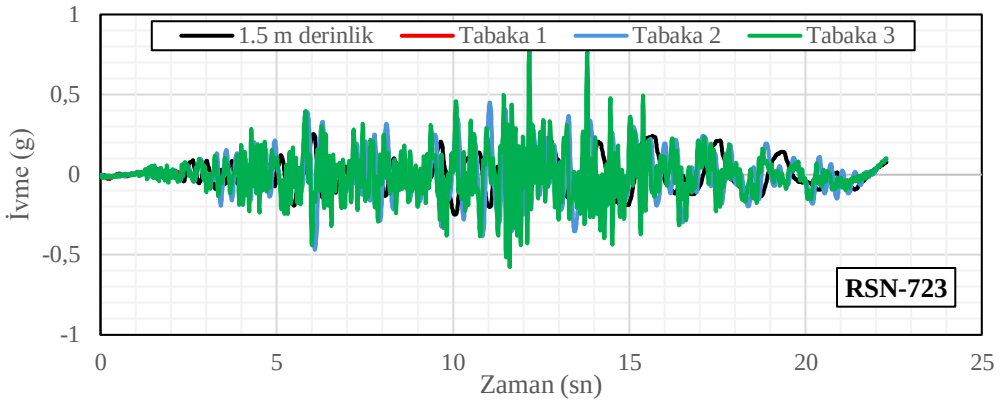
Ek-7. Model 3 için H2 yönlü depremler durumunda Non-Lineer Analiz ile tabakalara göre İvme-Zaman sonuçları



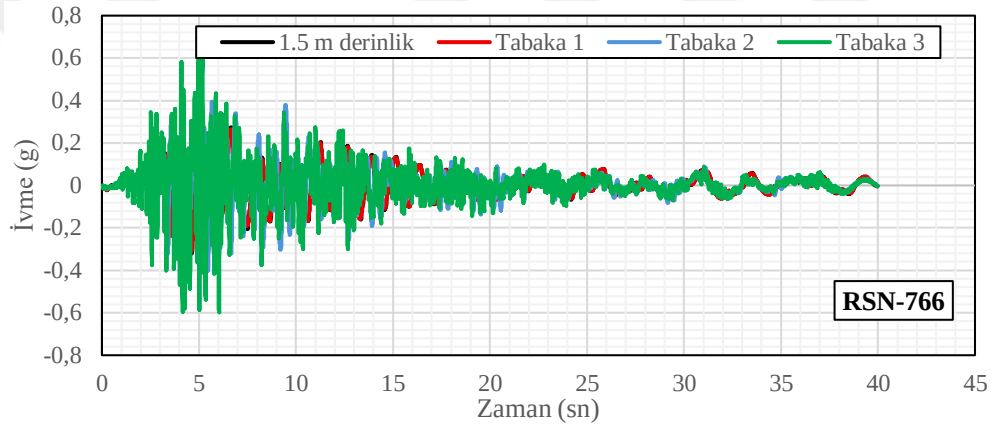
Şekil 187. Model-3 H2 için yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-180



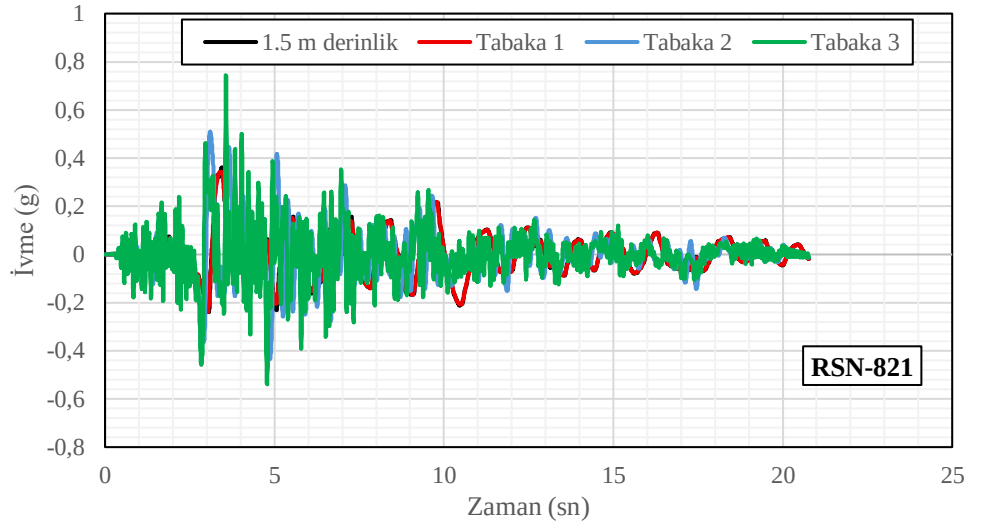
Şekil 188. Model-3 H2 için yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-184



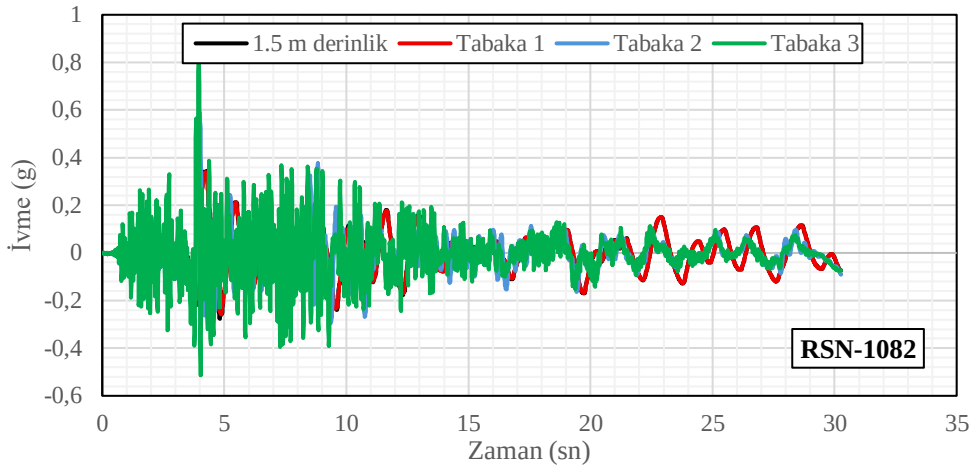
Şekil 189. Model-3 için H2 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-723



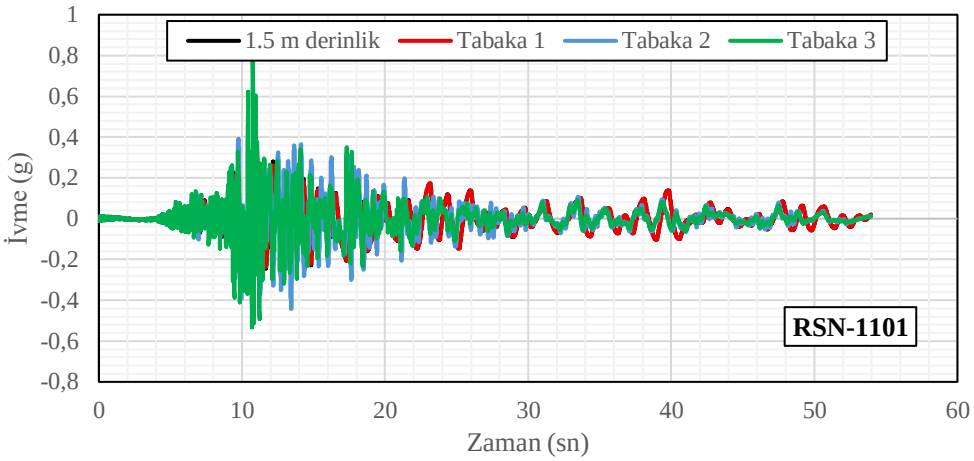
Şekil 190. Model-3 H2 için yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-766



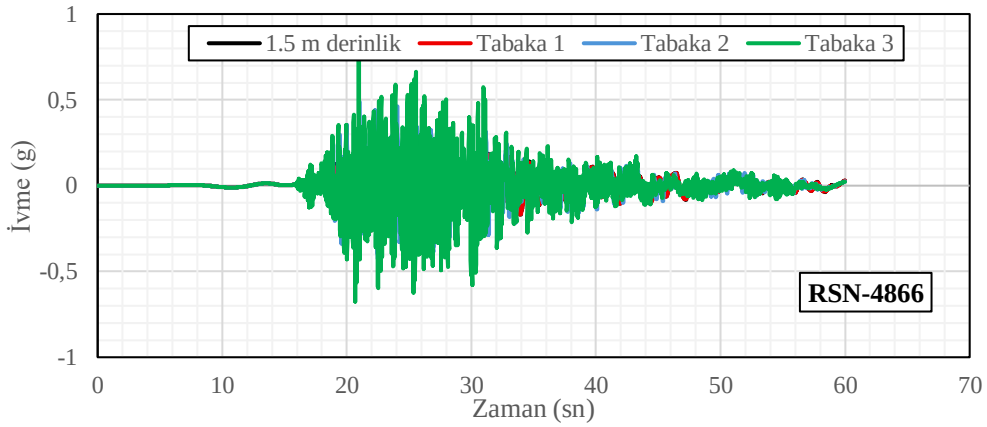
Şekil 191. Model-3 için H2 yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-821



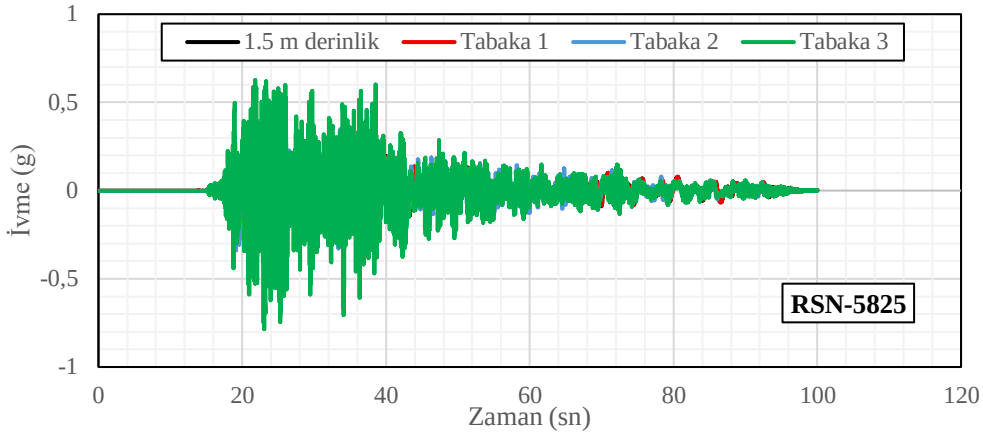
Şekil 192. Model-3 H2 için yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-1082



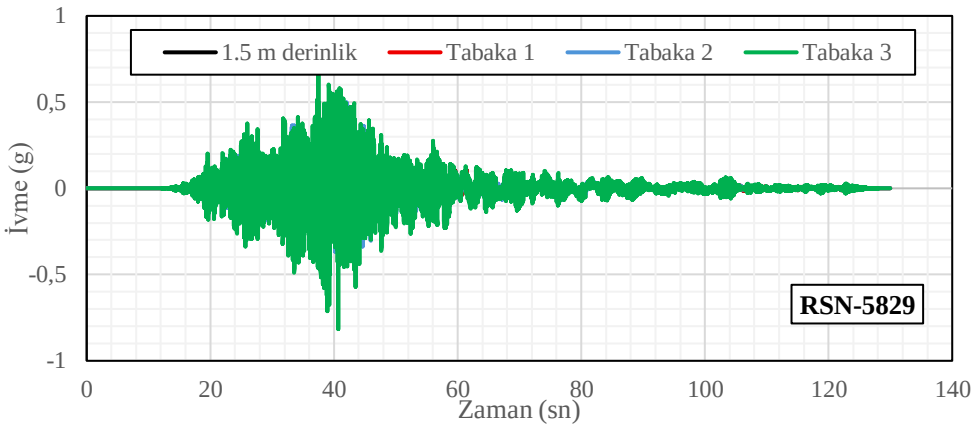
Şekil 193. Model-3 H2 için yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-1101



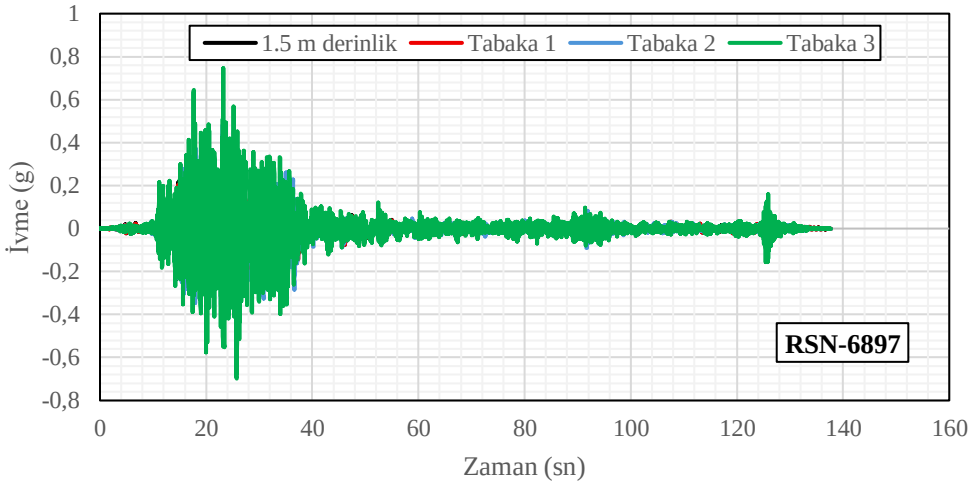
Şekil 194. Model-3 H2 için yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-4866



Şekil 195. Model-3 H2 için yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-5825

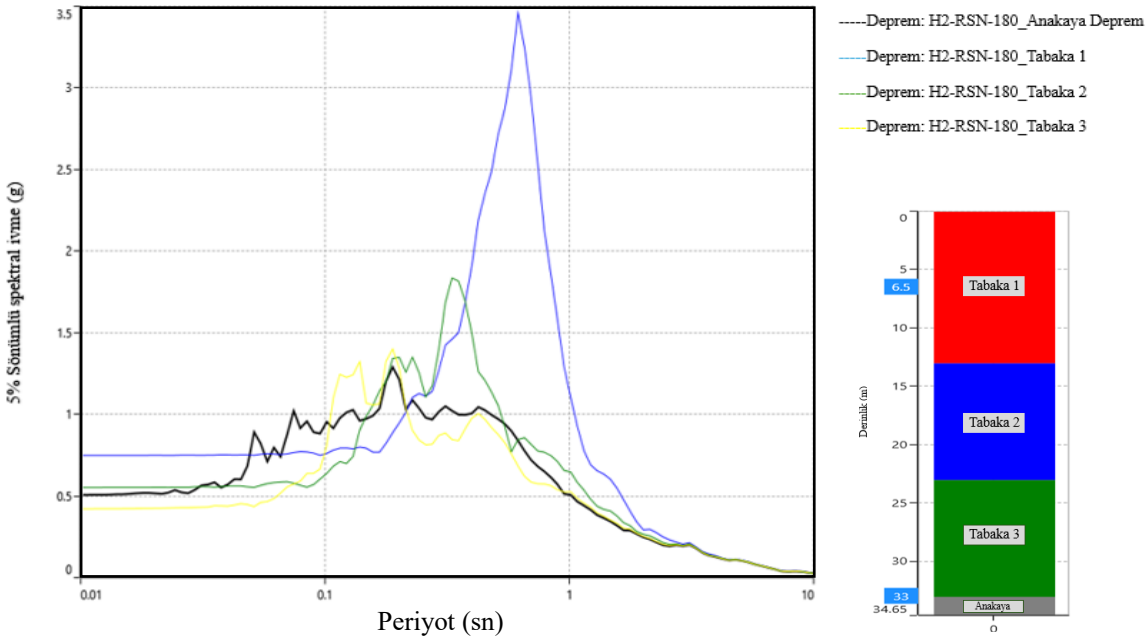


Şekil 196. Model-3 H2 için yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-5829

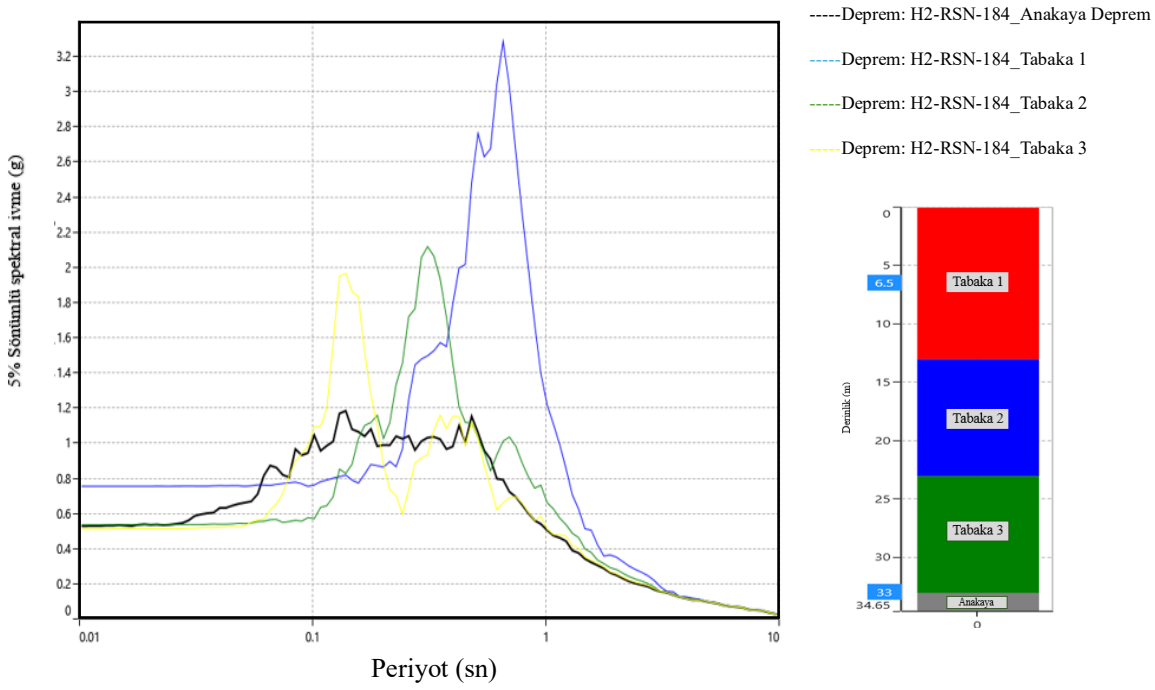


Şekil 197. Model-3 H2 için yönlü depremlerin tabakalara göre ivme zaman değişim grafiği RSN-6897

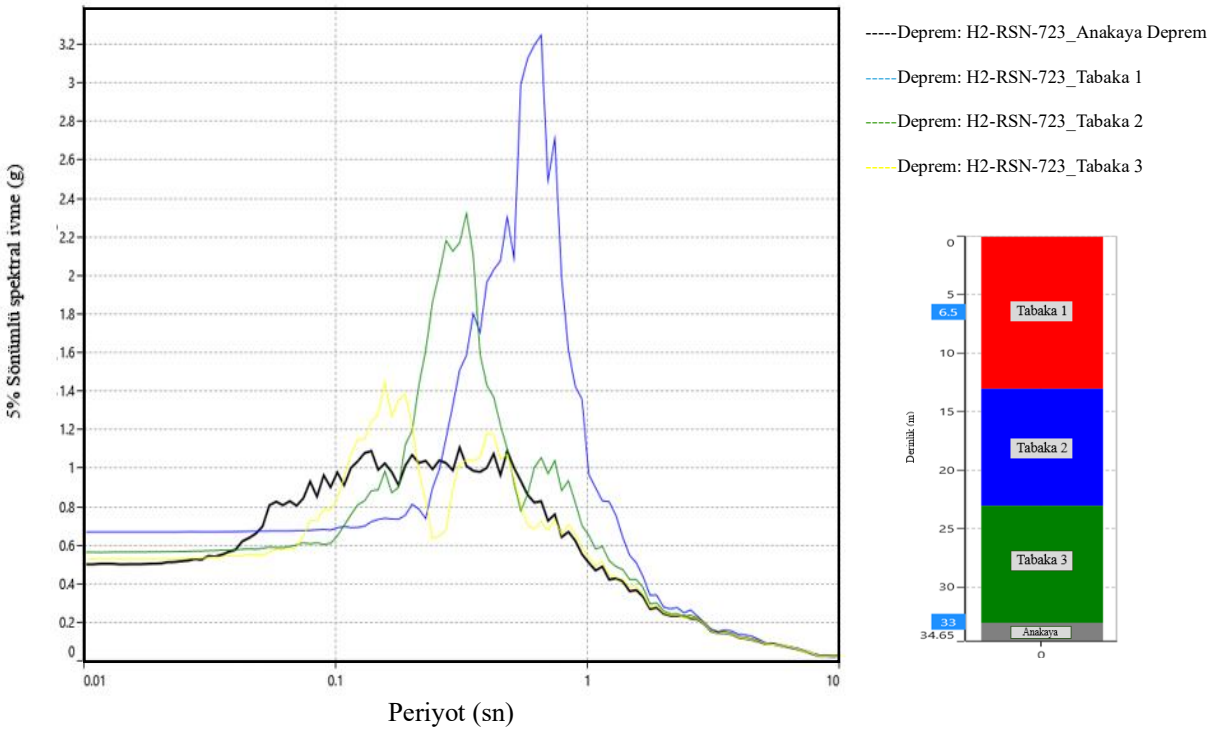
Ek-8. Model 2 için H2 yönlü depremler durumunda Non-Lineer Analiz ile tabakalara göre Spektral ivme-Periyot sonuçları



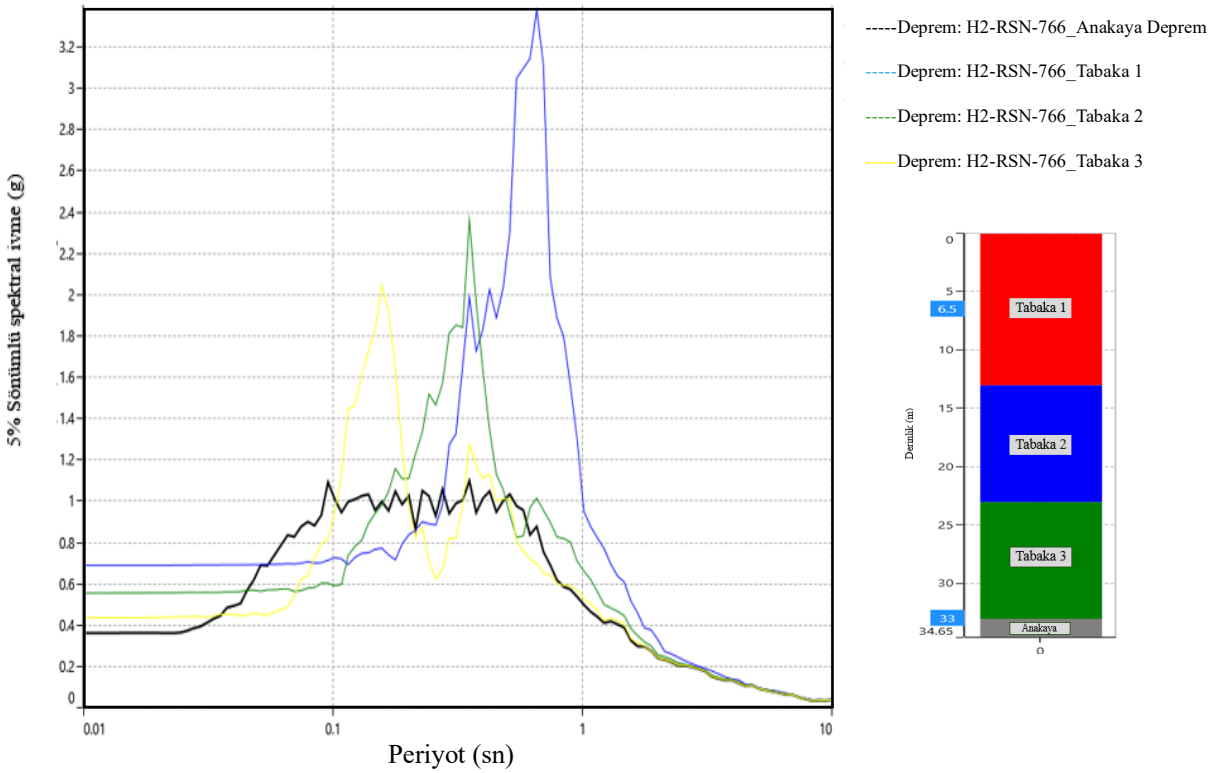
Şekil 198. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-180



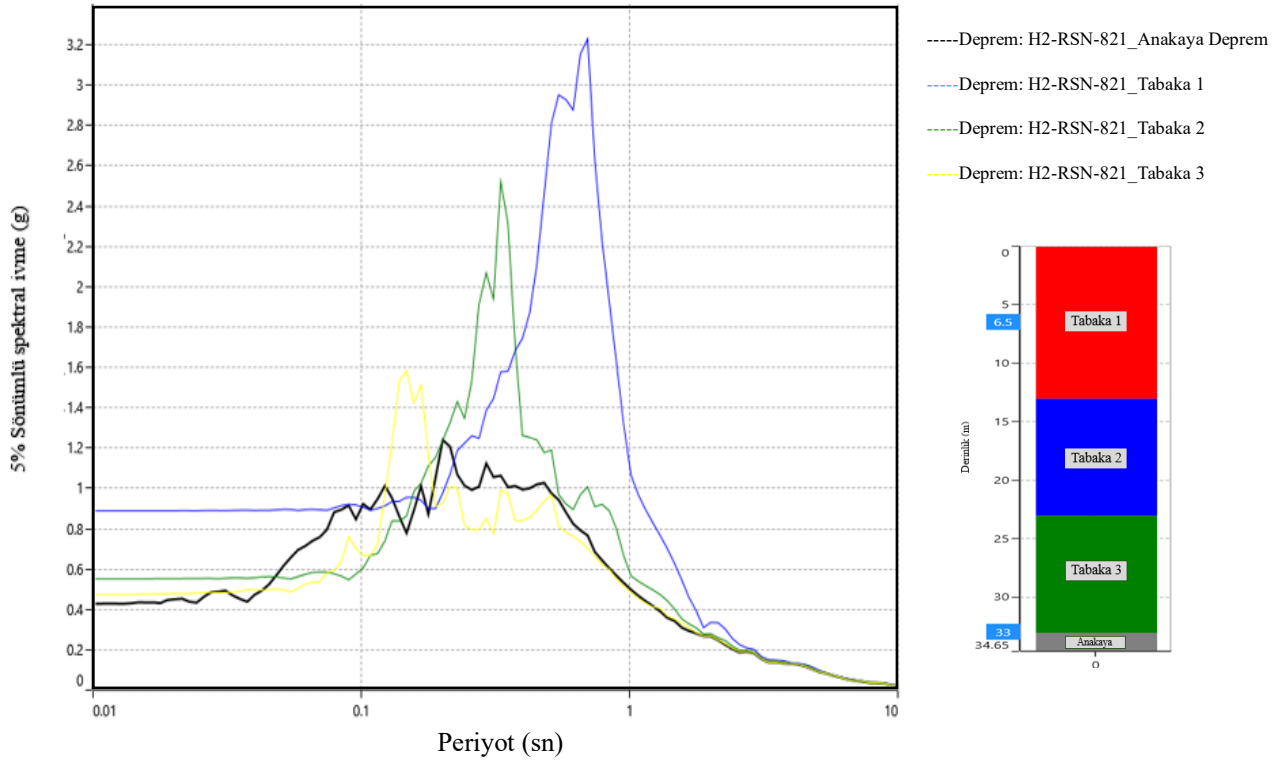
Şekil 199. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-184



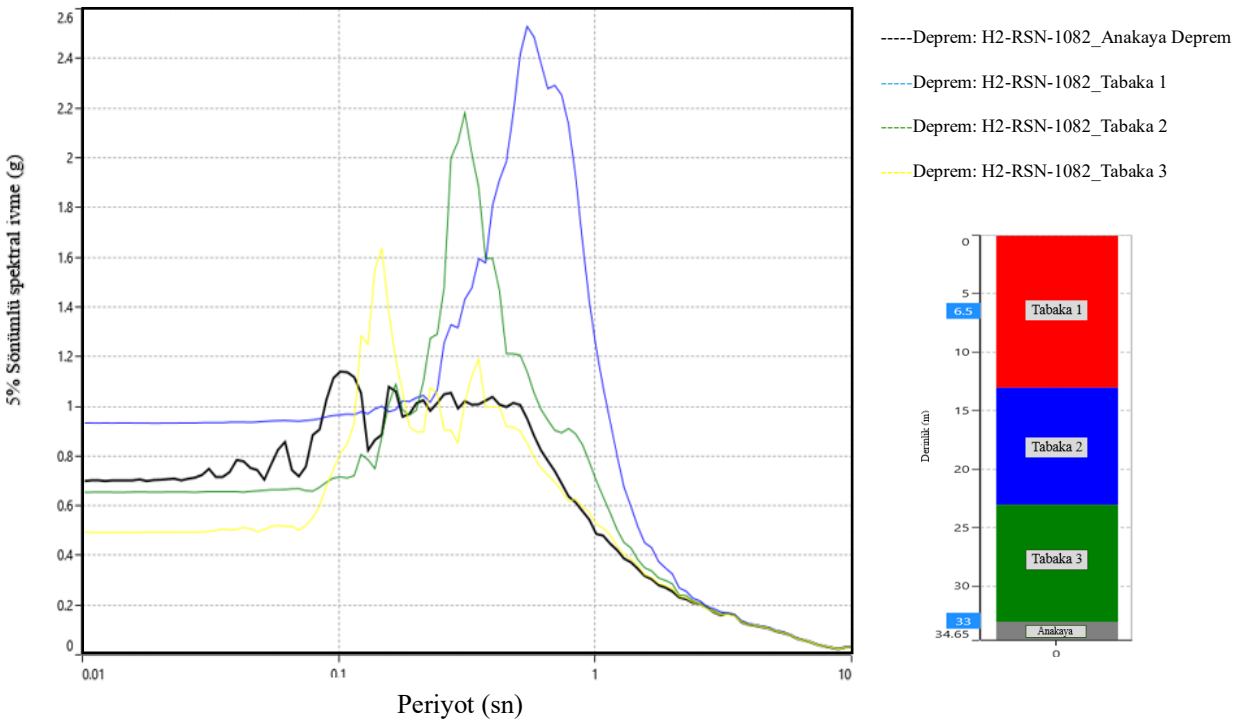
Şekil 200. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-723



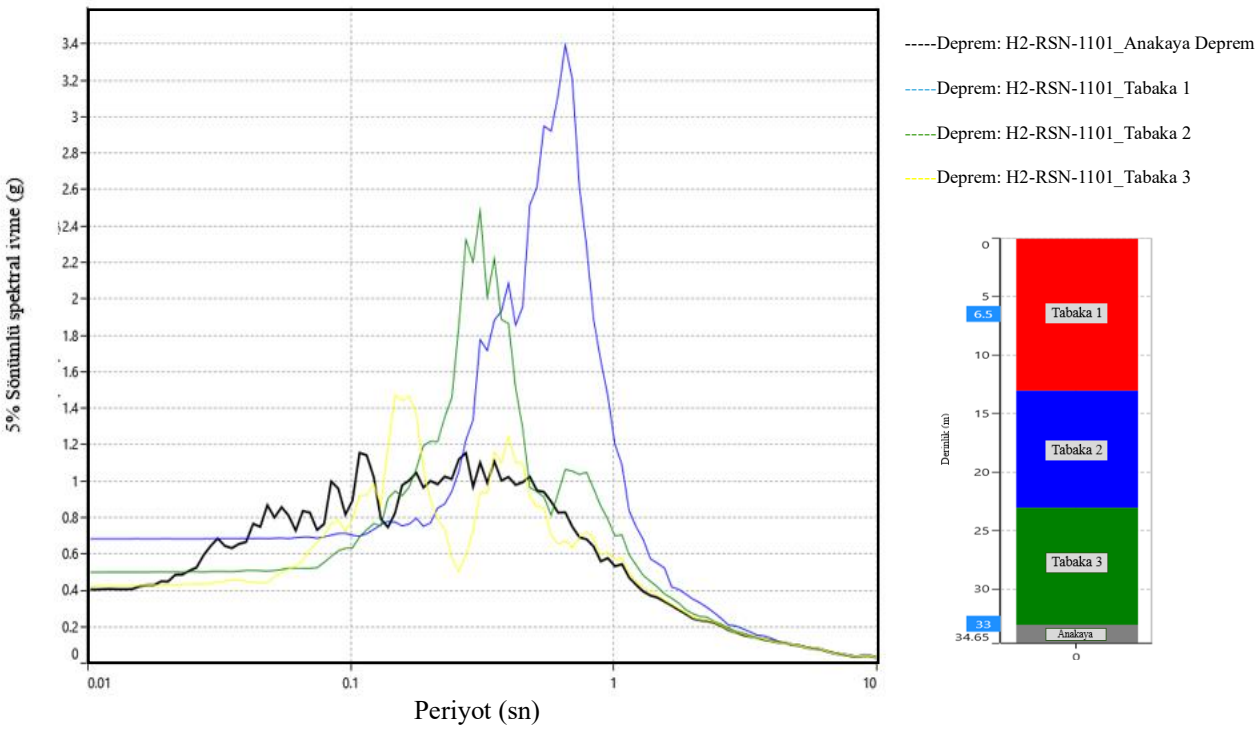
Şekil 201. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-766



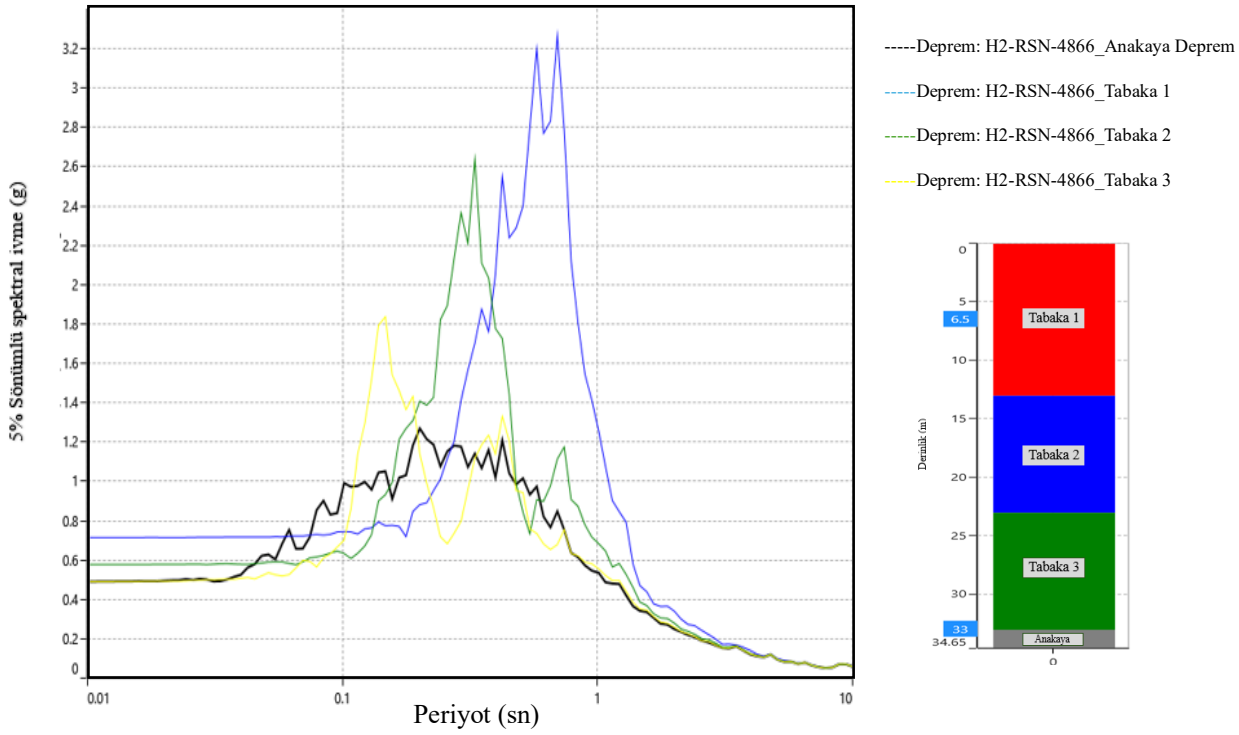
Şekil 202. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-821



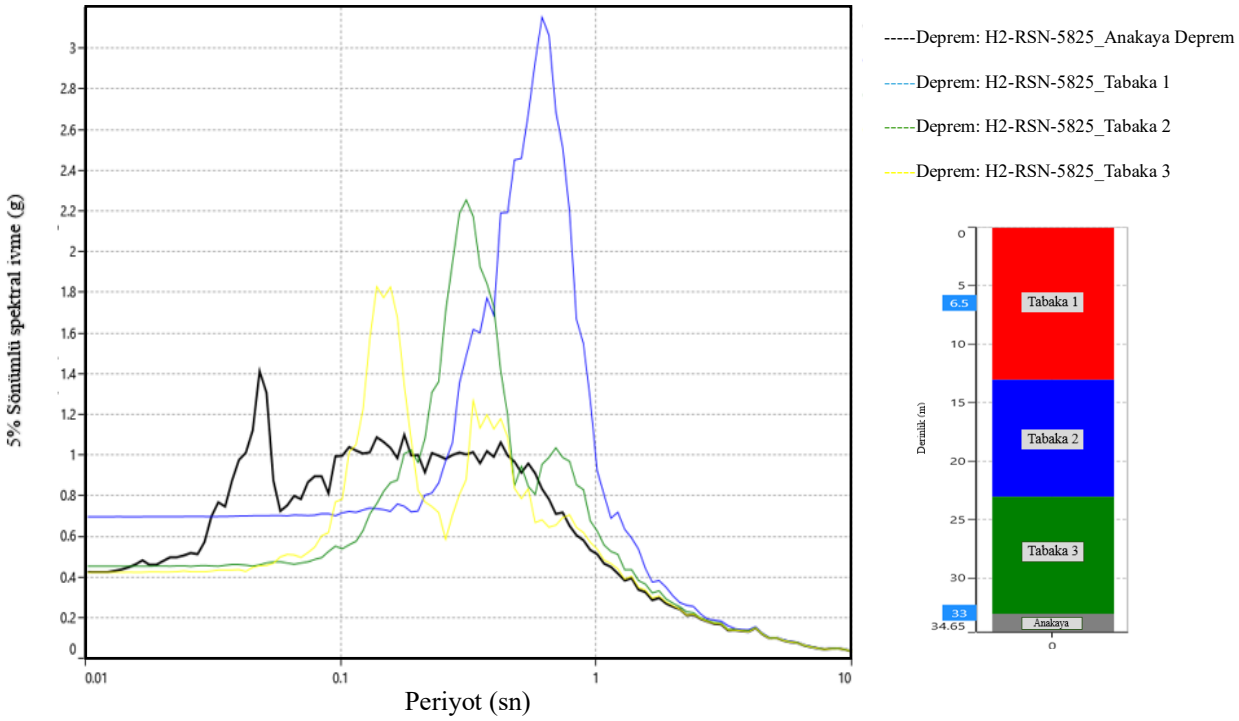
Şekil 203. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-1082



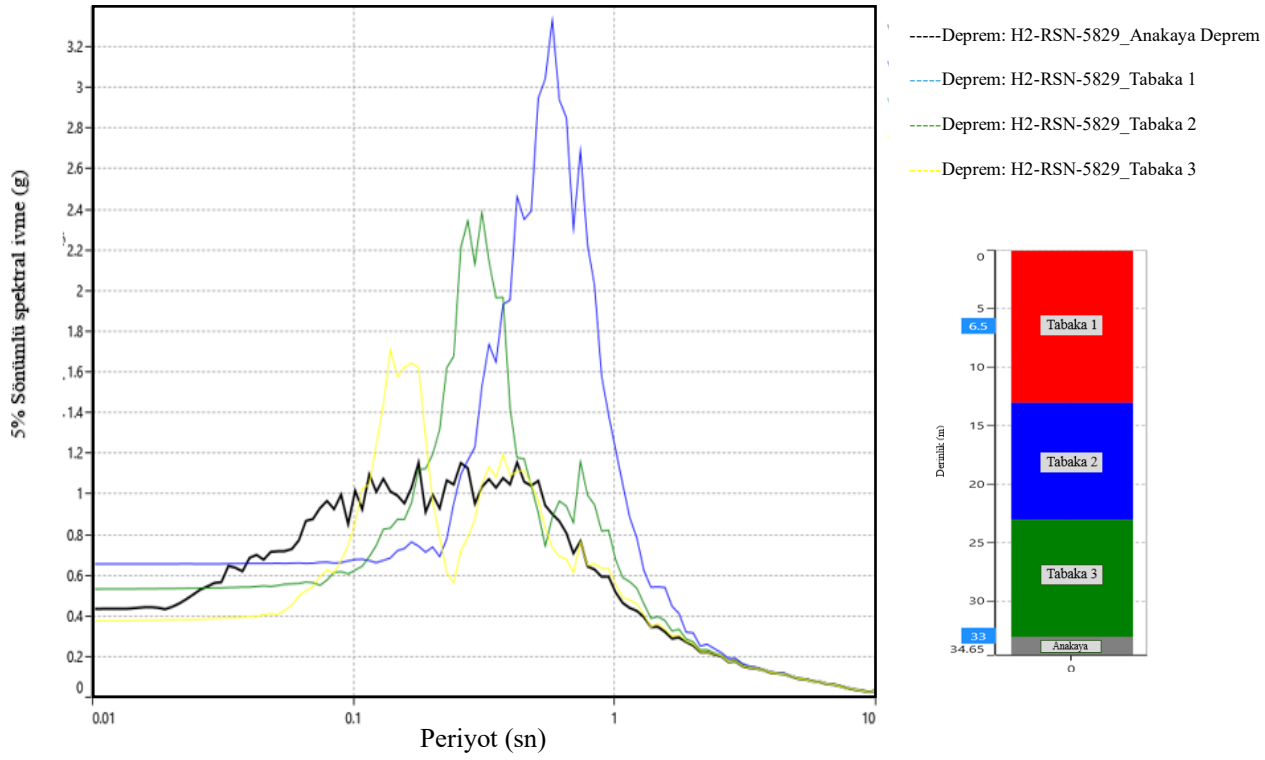
Şekil 204. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-1101



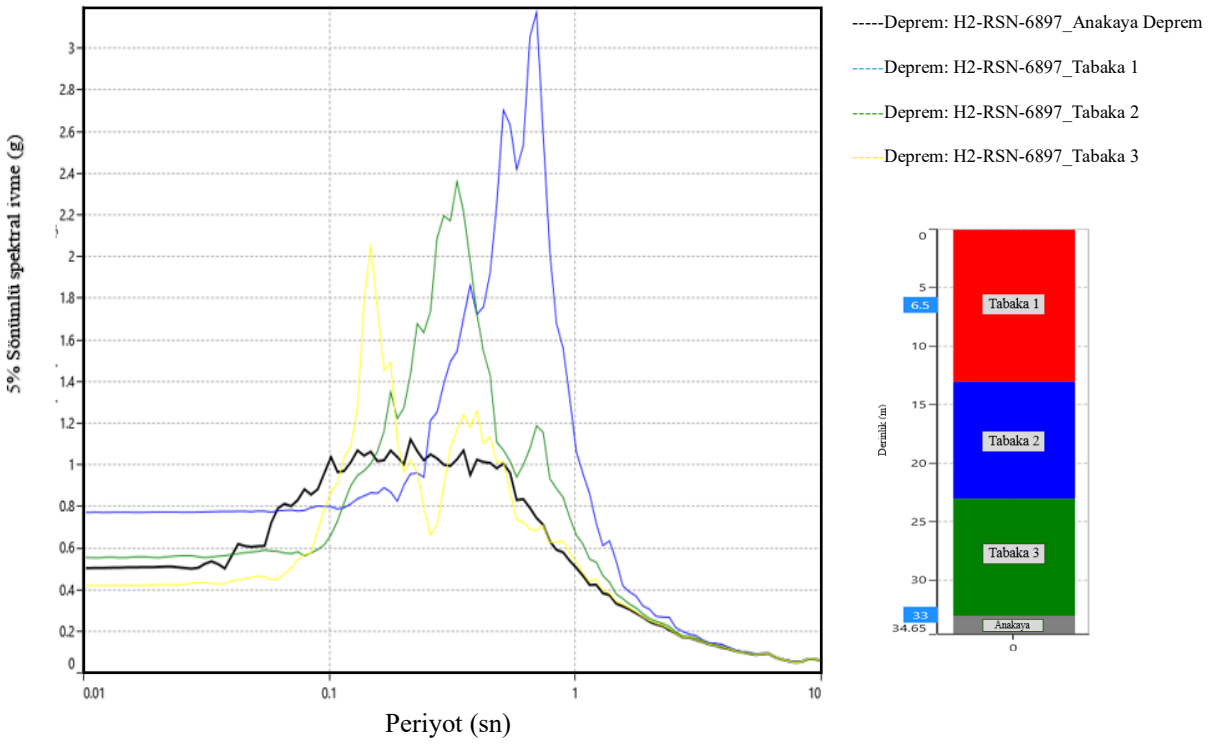
Şekil 205. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-4866



Şekil 206. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-5825

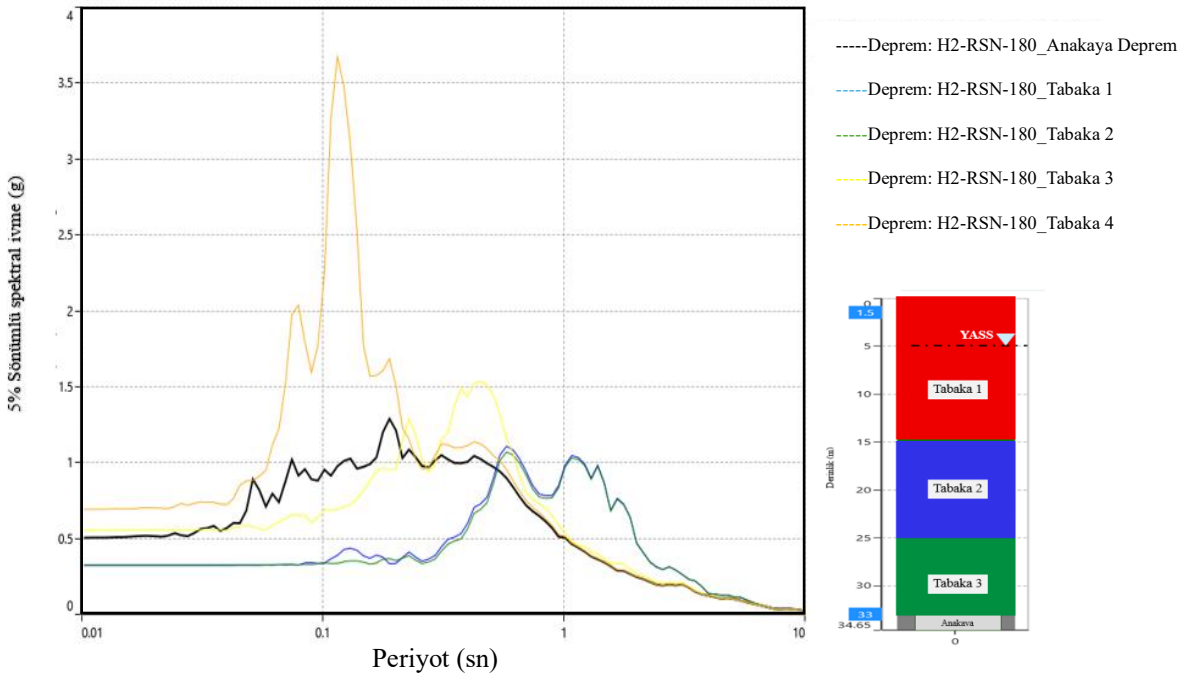


Şekil 207. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-5829

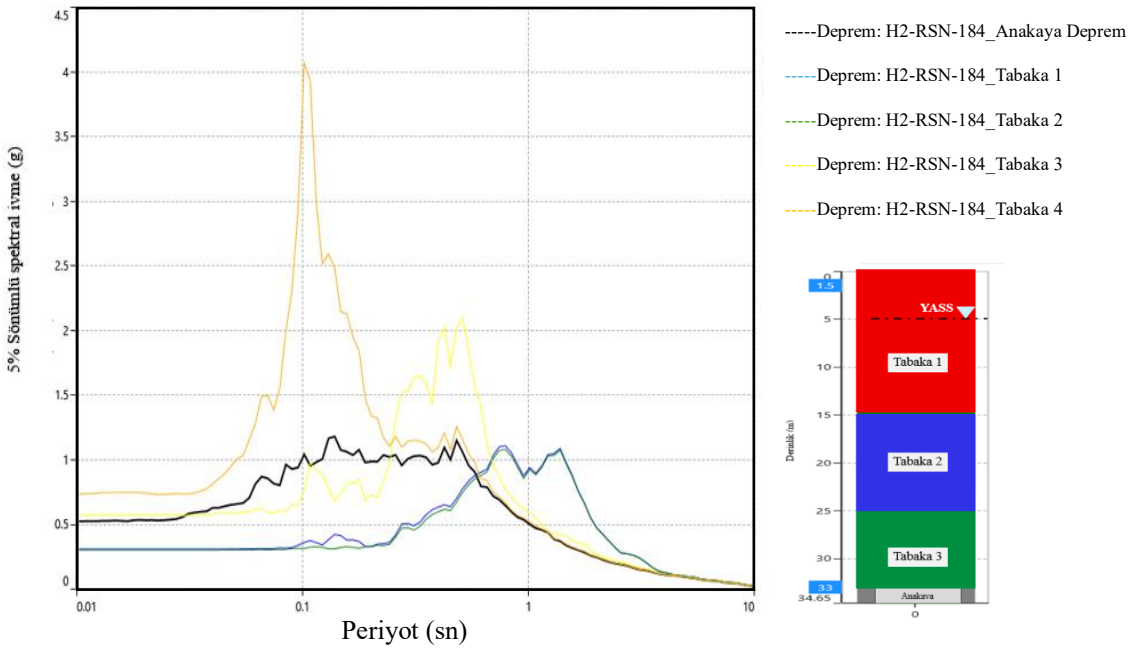


Şekil 208. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-2 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-6897

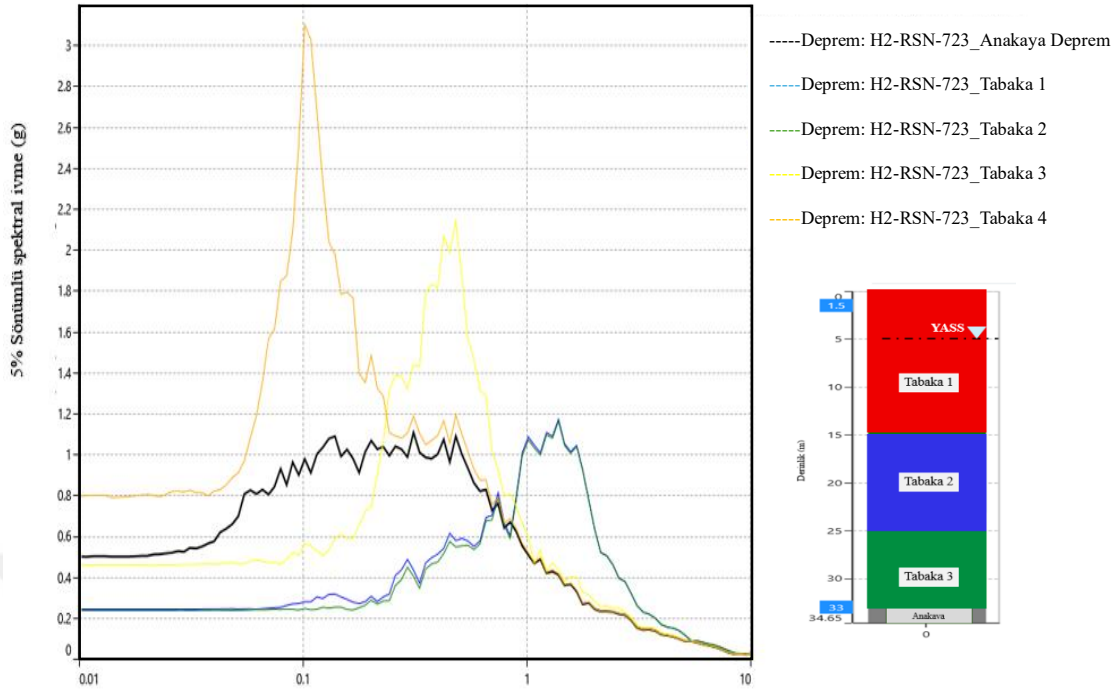
Ek-9. Model 3 için H2 yönlü depremler durumunda Non-Lineer Analiz ile tabakalara göre Spektral ivme-Periyot sonuçları



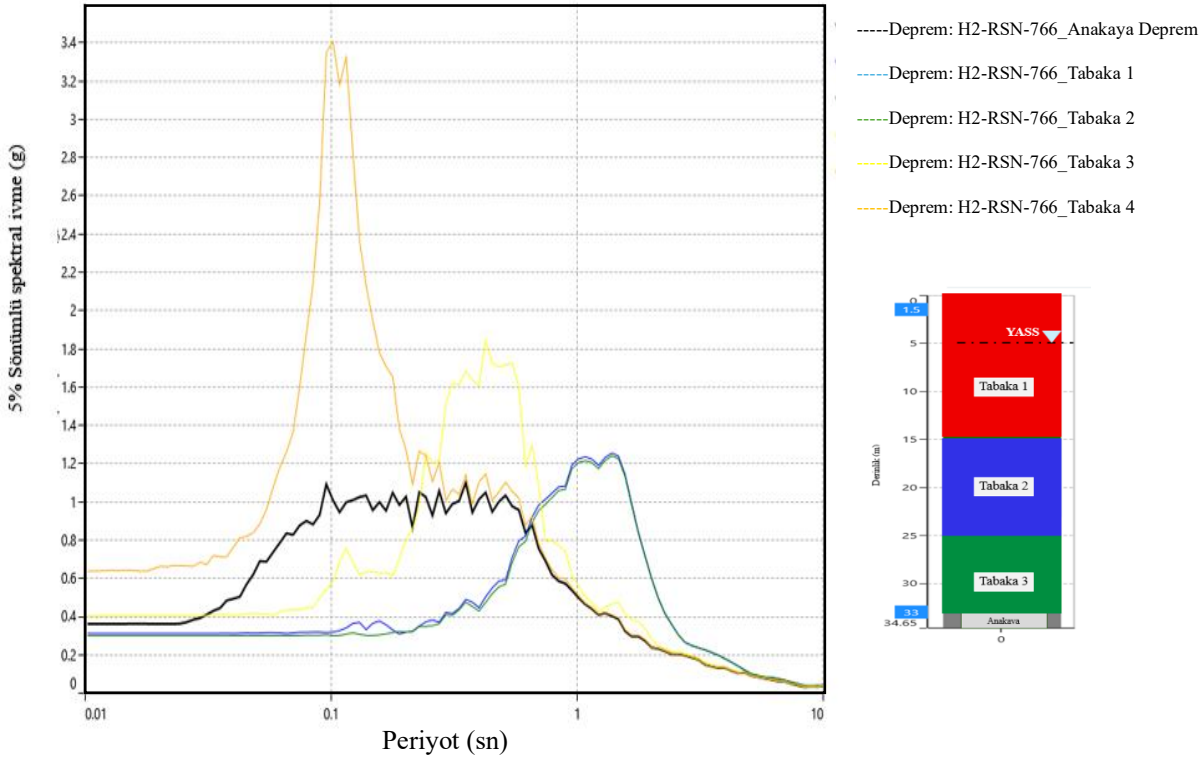
Şekil 209. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-180



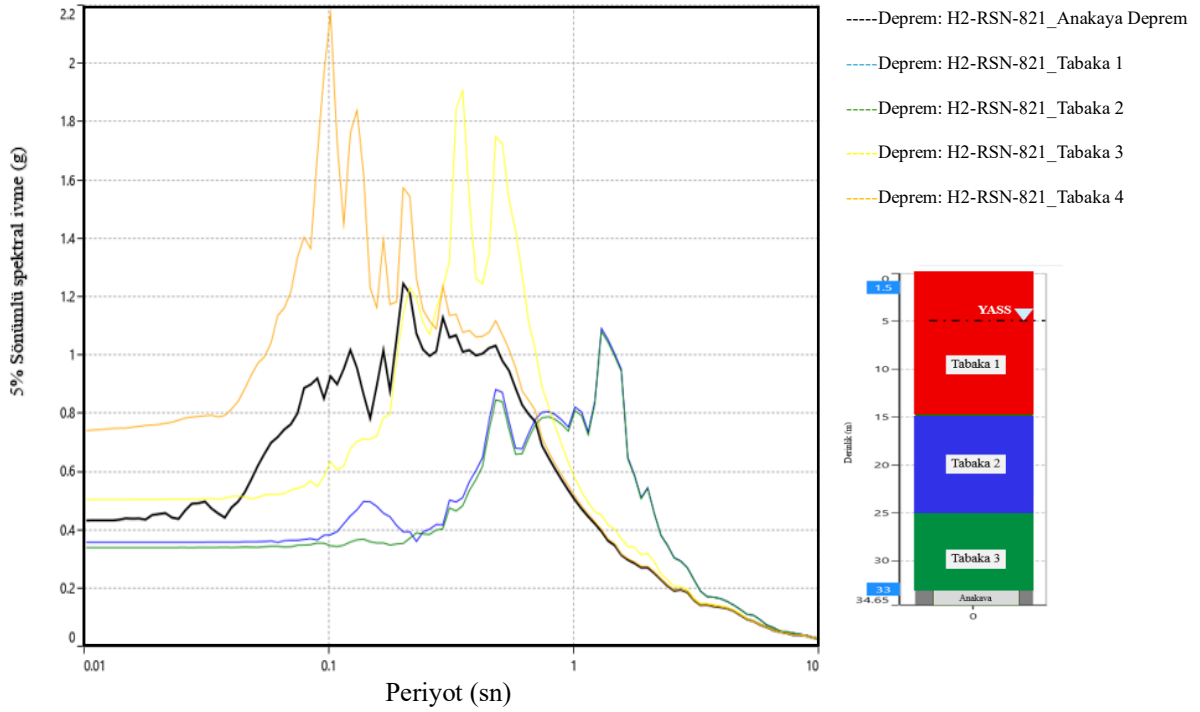
Şekil 210. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-184



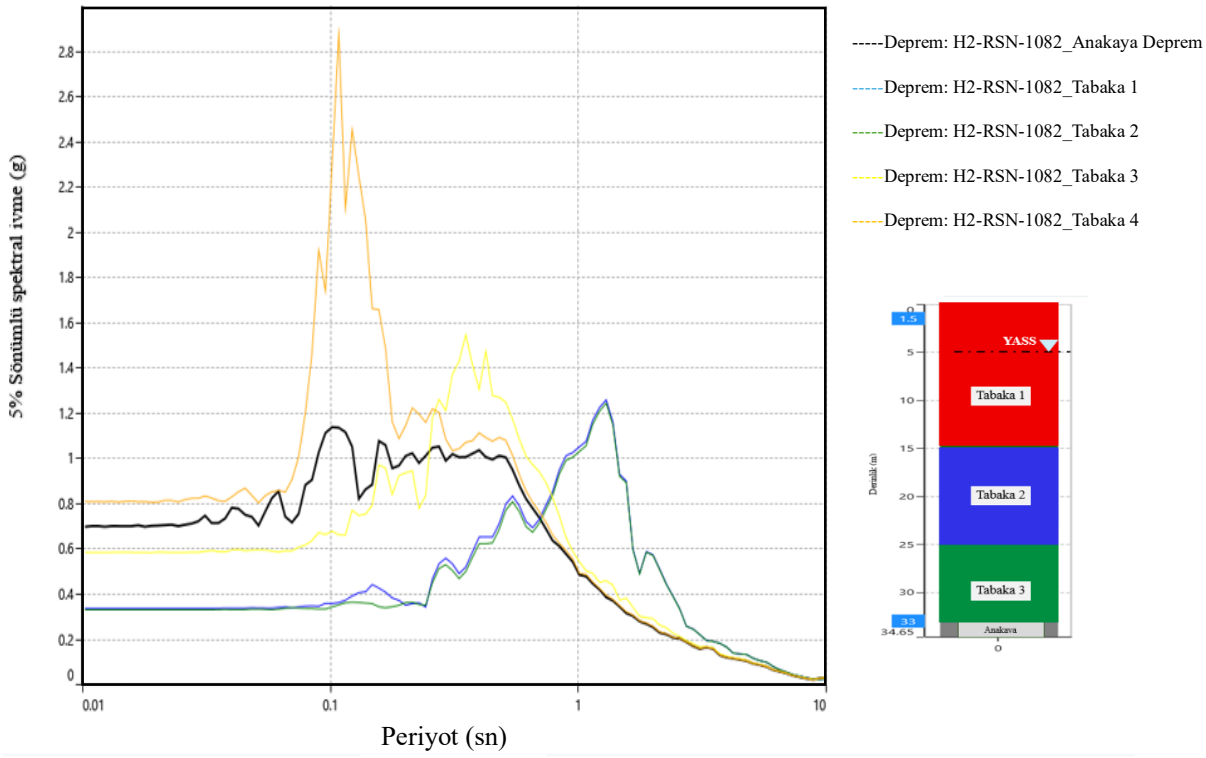
Şekil 211.DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-723



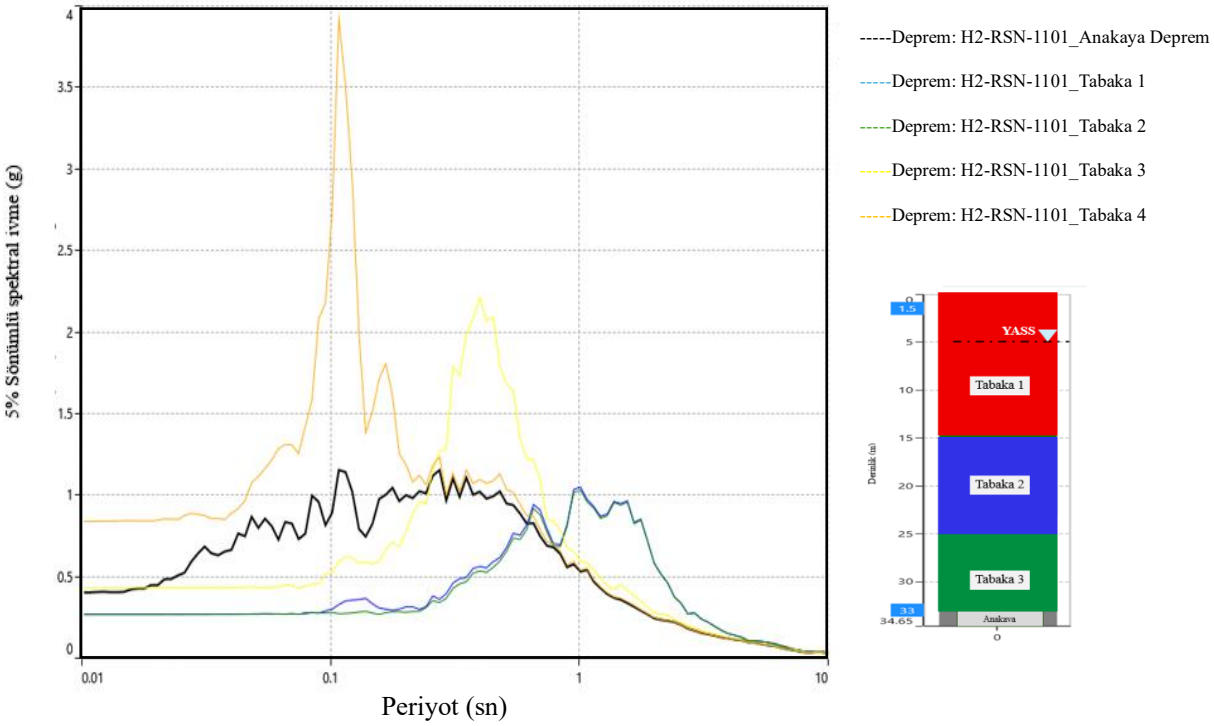
Şekil 212. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-766



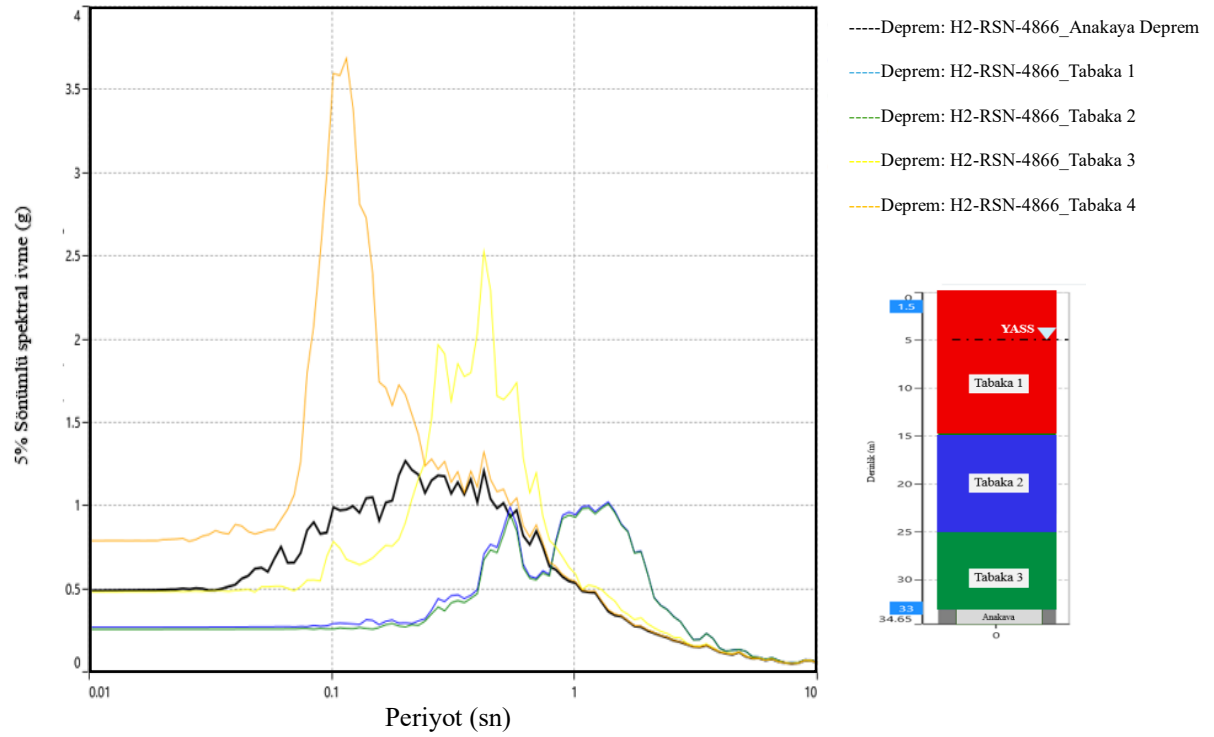
Şekil 213. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-821



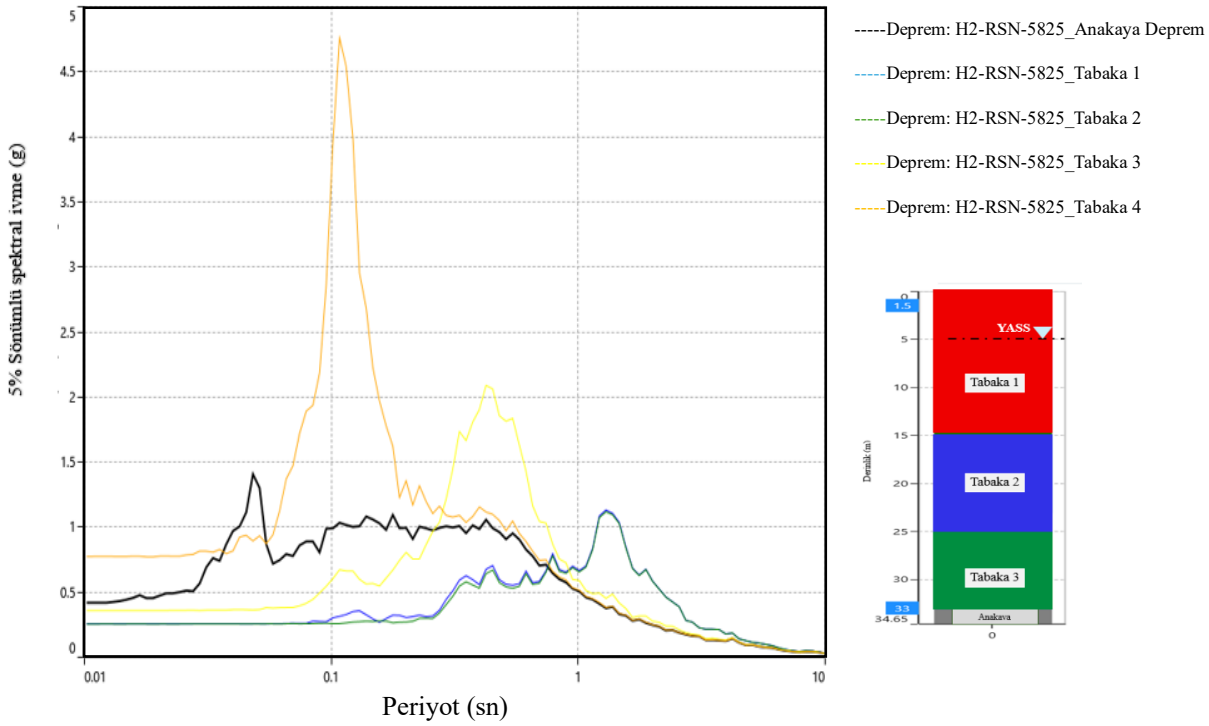
Şekil 214. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-1082



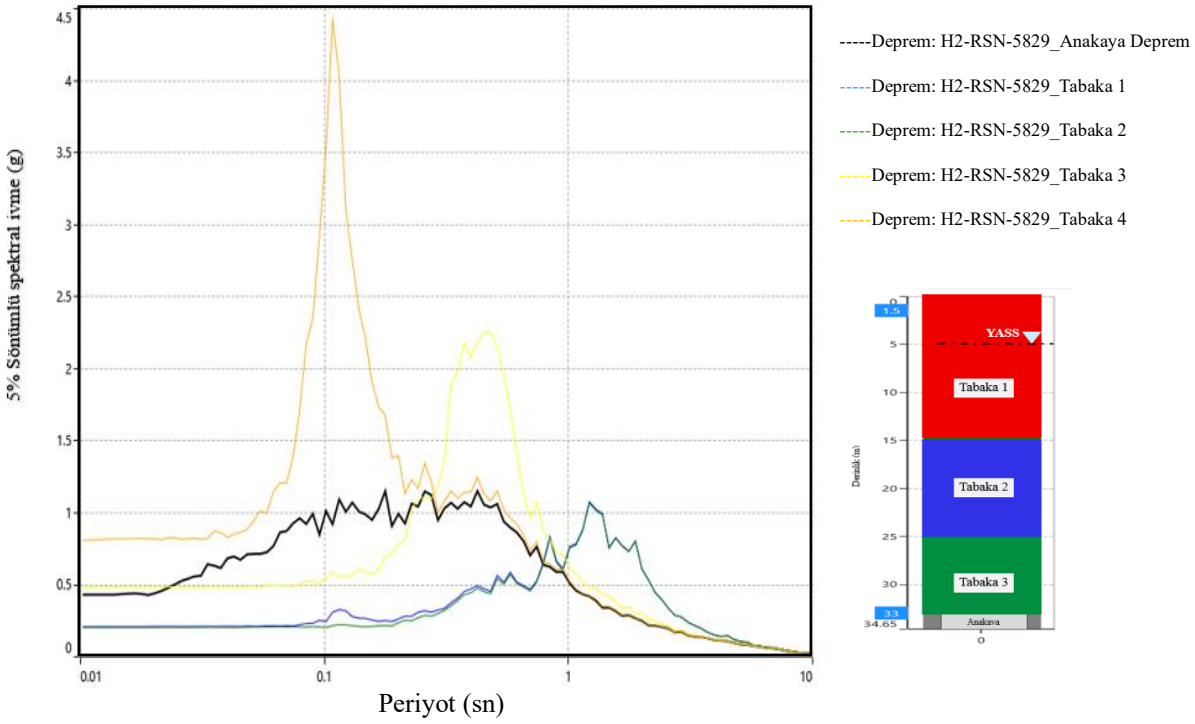
Şekil 215. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-1101



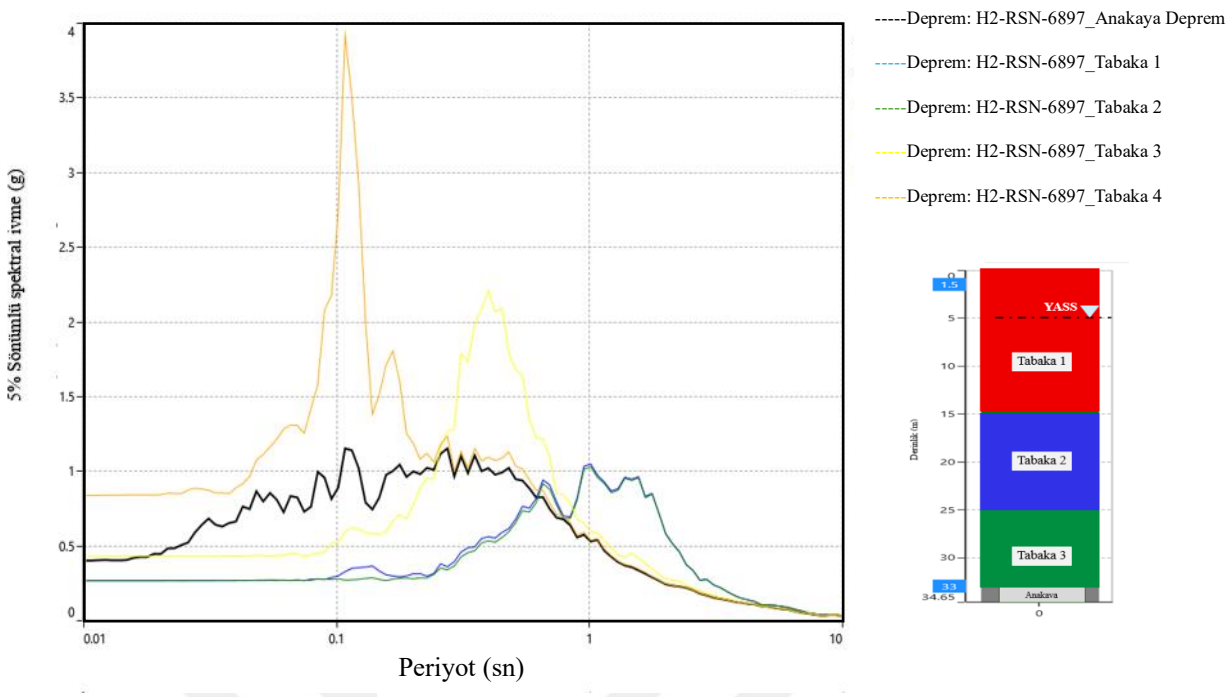
Şekil 216. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-4866



Şekil 217. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-5825



Şekil 218. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-5829



Şekil 219. DeepSoil Non-Lineer analiz Model-3 tabakalar arası spektral ivme-periyot değişimi RSN-6897

ÖZGEÇMİŞ

Ceren SELİM, ilköğrenimini Akoluk İlköğretim Okulu'nda bitirdikten sonra lise eğitimini 2017 yılında Kanuni Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2017 öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başlayıp 2021 öğretim yılında eğitimini tamamladı. Aynı sene Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı. Orta seviyede İngilizce bilgisine sahiptir.