

Maksimum yer ivmesinin eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan zemin davranış analizleri üzerindeki etkisi

The influence of peak ground acceleration on equivalent linear and nonlinear site response analyses

Mehmet Ömer TİMURAĞAOĞLU* 

Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 16059, Bursa

• Geliş tarihi / Received: 02.09.2024

• Kabul tarihi / Accepted: 17.12.2024

Öz

Zemin davranış analizleri yapının maruz kalacağı etkileri anlamak için önemli bir araç olmasının yanı sıra yapı-zemin etkileşimi analizlerinin önemli bir aşamasını temsil etmektedir. Öte yandan zeminin doğrusal olmayan davranışını temsil etmek için önerilen eşdeğer doğrusal yöntem literatürde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntem doğrusal olmayan zemin davranışını ardışık doğrusal analizler yardımıyla temsil etmeye çalışan pratik bir yaklaşımdır. Bu çalışmada maksimum yer ivmesinin eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analiz üzerindeki etkinliği 1-boyutlu zemin davranış analizleri üzerinden araştırılmaktadır. Bu vesileyle oluşturulan 30m derinliğinde homojen killi zemin tabakası farklı genliklere ölçeklenerek elde edilen kayıtlara maruz bırakılarak eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde model tabanı rijit kabul edilmiştir. Zeminin kayma modülü ve sönüm davranışının kayma birim şekildeğiştirmeyle değişimi için literatürde yaygın bir şekilde kullanılan deneysel çalışma dikkate alınmıştır. Bu ilişkiler programda mevcut olan bir eğri uydurma aracı sayesinde kalibre edilmiştir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda eşdeğer doğrusal analizlerin doğrusal olmayan davranışı belirli yer ivmesi değerine kadar temsil edebildiği, 0.25-0.50g aralığında eşdeğer doğrusal davranışın doğrusal olmayan davranıştan sapmaya başladığı ortaya çıkmıştır. Ayrıca büyük yer ivmesi genliklerinde eşdeğer doğrusal analizlerde elde edilen kayma gerilmesi değerinde doğrusal olmayan analizlere göre daha büyük tepkiler gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Bir boyutlu analiz, Doğrusal olmayan analiz, Sayısal modelleme, Zemin davranış analizi

Abstract

Site response analyses are not only a crucial tool for understanding the effects that a structure will be subjected to but also represent a significant stage in the analysis of soil-structure interaction. On the other hand, the proposed equivalent linear method for representing the nonlinear behavior of soil is frequently utilized in literature. This method offers a practical approach that attempts to represent nonlinear soil behavior through successive linear analyses. In this study, the effectiveness of peak ground acceleration on equivalent linear and nonlinear analyses is investigated through one-dimensional site response analyses. A homogeneous clay layer, 30 meters deep, was subjected to scaled records of varying amplitudes to perform both equivalent linear and nonlinear analyses. In these analyses, the model base was assumed to be rigid. The variation of the soil's shear modulus and damping behavior with shear strain was considered based on widely used experimental studies in the literature. These relationships were calibrated using a curve-fitting tool available in the program. The results of the analyses revealed that equivalent linear analyses could represent nonlinear behavior up to a certain ground acceleration value, with deviations from nonlinear behavior beginning to emerge within the 0.25-0.50g range. Additionally, at higher ground acceleration amplitudes, it was observed that the shear stress values obtained from equivalent linear analyses were greater compared to those from nonlinear analyses.

Keywords: One-dimensional analysis, Nonlinear analysis, Numerical modeling, Site response analysis

*Mehmet Ömer TİMURAĞAOĞLU; omertao@uludag.edu.tr

1. Giriş

1. Introduction

Anakayadan yayılan sismik dalgaların genlik ve frekans özellikleri, zemin yüzeyine ulaşana kadar geçtikleri zemin tabakalarının özelliklerine bağlı olarak değişime uğrarlar. Titreşim özellikleri ise deprem büyüklüğü, merkez üssüne olan uzaklık, süre ve saha özellikleri gibi çeşitli nedenlerden etkilenir. Deprem dalgalarının kaynaktan zemin yüzeyine gelene kadar geçirdiği karmaşık davranış kapsamlı araştırmalara konu olmuştur. Zemin yüzeyinde meydana gelen tepkiyi etkileyen üç temel parametre kaynak etkisi, güzergâh etkisi ve yerel zemin koşulları etkisi olarak ifade edilmektedir. Yerel zemin koşulları mühendislik taban kayasından başlayarak zemin tabakalanmasından geçen ve yüzeye kadar olan zemini belirtmektedir. Zemin davranış analizleri (ZDA) baştaki iki parametrenin yapının hemen altındaki yerel zemin üzerindeki etkisinin incelenmesine olanak sağlamaktadır.

Deprem dalgaları mühendislik taban kayasından yüzeye yaklaştıkça zemin tabakalarında filtrelenebilir, küçülebilir veya büyüyebilir. Zemin tabakalarındaki bu değişimi kapsamlı bir şekilde inceleyebildiğimiz analizler zemin davranış analizleri (ZDA) olarak bilinmektedir. Böylesi analizler yapı zemin etkileşiminin ilk aşaması olarak değerlendirilmektedir (Wolf, 1985). Bu tür analizlerde üstyapının veya yapısal elemanın yokluğunda zemin tabakalarının dinamik yük altındaki tepkisi incelenmektedir. Bu nedenle, deprem anında zeminde meydana gelen büyütmenin/küçülmenin analiz edildiği ZDA, deprem sonucu yapının karşılaşacağı etkilerin değerlendirilmesinde ilk adım ve önemli bir faktördür. Model oluşturmanın pratik olması ve analizlerde işlem yükünün az olması 1-boyutlu (1B) doğrusal ZDA analizlerinin araştırmacılar tarafından sıklıkla tercih edilmesine sebep olmuştur (Astroza vd., 2017; Bilotta vd., 2015; Carlton & Tokimatsu, 2016; Civelekler vd., 2021; Han vd., 2018; Kara & Şahin, 2022; Nghiem & Chang, 2019; Rathje vd., 2010; Sun & Yuan, 2021; Timurağaoğlu vd., 2021). 1B analizler zemin tabaka sınırlarının yatay olması, tabakadaki malzeme özelliklerinin sabit olması, zemin tepkisinin esas olarak alttaki kayadan düşey yayılan kayma dalgaları (SH) tarafından oluşması ve yanal sınırların sonsuz olması kabullerine dayanmaktadır (Idriss & Seed, 1968; Kramer, 1996).

Öte yandan zeminin doğrusal olmayan (DO) davranışını temsil etmek için yaklaşık bir yöntem olarak eşdeğer doğrusal (ED) yöntem yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu yöntemde zeminin DO davranışı tekrarlı iteratif bir prosedür ile temsil edilmektedir. Başlangıçta doğrusal bir kayma modülü ve sönüm değeri dikkate alınarak gerçekleştirilen dinamik analizler her iterasyonda efektif kayma şekildeğiştirmesine (γ_{eff}) bağlı olarak yeniden hesaplanan sekant kayma modülü ve sönüm değeri üzerinden tekrarlanır. Genellikle iki iterasyon arasındaki fark %5-10 civarında (3-5 iterasyon) olduğunda analizler tamamlanır (Schnabel vd., 1972). Yöntemin pratik olması sebebiyle birçok araştırmacı tarafından kullanılmasına olanak sağlamıştır (Fatahi & Tabatabaiefar, 2014; Stanko vd., 2019; Yoshida vd., 2002). Ancak ED yöntemin yalnızca zemin DO davranışının tahmin eden bir yaklaşım olduğunu kabul etmek gerekir. Yöntemin içindeki doğrusal analiz varsayımı, ZDA için kullanıldığında önemli sonuçlar doğurabilmektedir. Öncelikle, DO analizlere göre ED analiz sonucunda bazı frekanslarda gerçekte olmayan tepkiler elde edilebilmektedir. Ek olarak, ED analizde γ_{eff} değeri uygulamada her ne kadar 0.65 olarak kullanılsa da analiz sonucunu önemli oranda etkilediği bilinmektedir (Yoshida vd., 2002). Ayrıca ED analizlerin hangi kayma şekildeğiştirmesi değerine kadar kullanılması gerektiği önem arz eden bir konudur. Bazı araştırmacılar tipik olarak %1'den büyük şekildeğiştirme değerlerinde ED analizin dikkatli kullanılması gerektiğini vurgularken (Kramer & Paulsen, 2004; Matasovic & Hashash, 2012) bazı çalışmalarda ise DO analizi tercih etmek için daha düşük şekildeğiştirme sınırının (0.1-0.4%) gerekli olduğu vurgulanmaktadır (Bolisetti vd., 2014; Kim vd., 2016; Kim & Hashash, 2013). Kaklamanos vd. (2013) ED ve DO analiz arasında seçim yapmak için maksimum kayma şekildeğiştirmesi ve spektral periyoda bağlı olarak 0.1-0.4% şekildeğiştirme değerini geçiş bölgesi olarak göstermişlerdir.

Literatürde maksimum yer ivmesinin limit değeri üzerine yapılan çalışmaların sayısı azdır. ED yöntemin kullanılabilmesi için maksimum yer ivmesi değerini belirlemek için yapılan çalışmada 1-10 Hz frekans aralığında ve 0.4g genliğe sahip yüklemelerde ED ve DO analizlerin uyumlu sonuçlar verdiği ancak daha büyük değerlerde DO büyütme faktörünün daha büyük olduğu belirtilmiştir (Stewart vd., 2008).

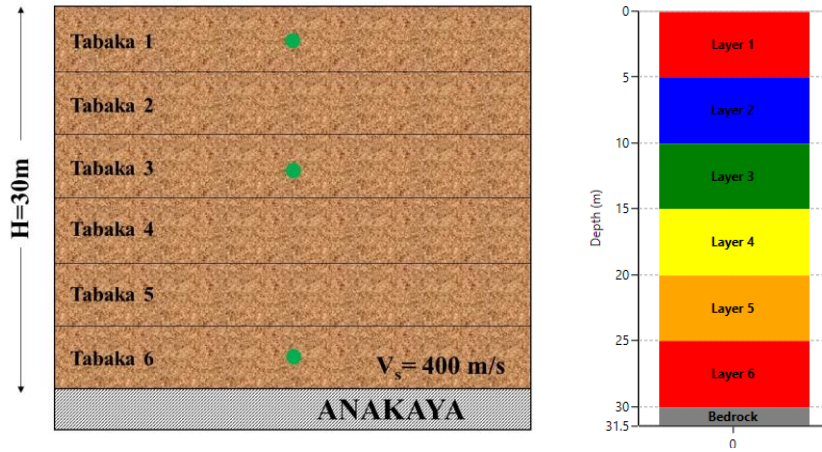
Bu çalışmada maksimum yer ivmesi değerinin ED ve DO 1B ZDA üzerindeki etkisi araştırılmaktadır. Bu kapsamda 30m derinliğinde homojen killi bir zemin tabakasında farklı maksimum yer ivme değerleri dikkate alınarak gerçekleştirilen 1B ED ve DO analiz sonuçlarına göre zeminin farklı derinliklerinde meydana gelen tepkiler tepki spektrumu, kayma gerilmesi-şekildeğiştirme, ivme-zaman ve deplasman-zaman ilişkileri

üzerinden karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmanın diğer çalışmalardan farkı maksimum yer ivmesinin hangi değerde ED ve DO sonuçlarını değiştirmeye başladığını ortaya koymaktır.

2. Materyal ve metot

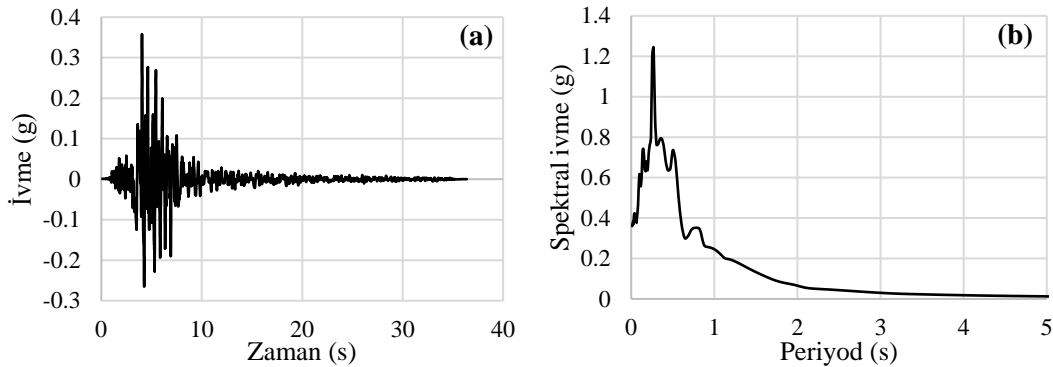
2. Material and method

Bu çalışmada 30m kalınlığa sahip killi homojen bir zemin tabakasının sismik davranışı araştırılmaktadır. Bu sebeple Deepsoil (Hashash vd., 2017) paket programında oluşturulan model Şekil 1’de görülmektedir. Homojen tabaka 5m’lik alt tabakalara bölünmüş, modelin tabanı ise rijit kabul edilmiştir. Killi zeminin kayma dalgası hızı 400 m/s, yoğunluğu 1940 kg/m³ ve poisson oranı 0.4 olarak belirlenmiştir. Zeminin tabanı rijit olarak dikkate alınmıştır. Analizlerde Friuli depreminin Tolmezzo kaydının maksimum yer ivmesi 0.05g, 0.25g, 0.5g, 0.75g ve 1g değerlerine ölçeklenerek 5 farklı kayıt kullanılmıştır. Orijinal kayıt ve kayda ait tepki spektrumu Şekil 2’de verilmektedir. Kaydın deprem büyüklüğü 6.5, maksimum yer ivmesi 0.357g ve merkez üssünden uzaklığı 23 km’dir. Kötü bir zemini temsil etmesi açısından killi zeminin plastisite indisi (PI) %0 kabul edilmiş ve kayma modülü azalımı ($G/G_0-\gamma$) ile sönüm değişimi ($\xi-\gamma$) kayma birim şekildeğiştirme ilişkisi için literatürde geçerliliği olan Vucetic & Dobry (1991) tarafından geliştirilen eğriler kullanılmıştır (Şekil 3). Histeretik yükleme-boşaltma davranışı için Masing kriteri (Masing, 1926) kullanılmıştır. Analizlerde Deepsoil’de mevcut olan Konder & Zelasko (1963) malzeme modeline dayanan model kullanılmıştır. Modifiye Konder Zelasko olarak bilinen bu model iskelet eğrisini oluşturan Beta (β) ve s olmak üzere iki ek parametre kullanılmaktadır. Deepsoil’de bulunan bir eğri uydurma aracı, belirli bir kayma modülü ve sönüm eğrileri için model parametrelerini deneysel sonuçlara göre kalibre etmek için kullanılır. Bu araç kullanılarak belirlenen zemin davranışı Şekil 3’te, zemin model parametreleri ise Tablo 1’de verilmektedir. Eğri uydurmanın önemli bir avantajı da mevcut deneysel çalışmalara göre şekildeğiştirme düzeyinin %10’a kadar belirlenebilmesidir.



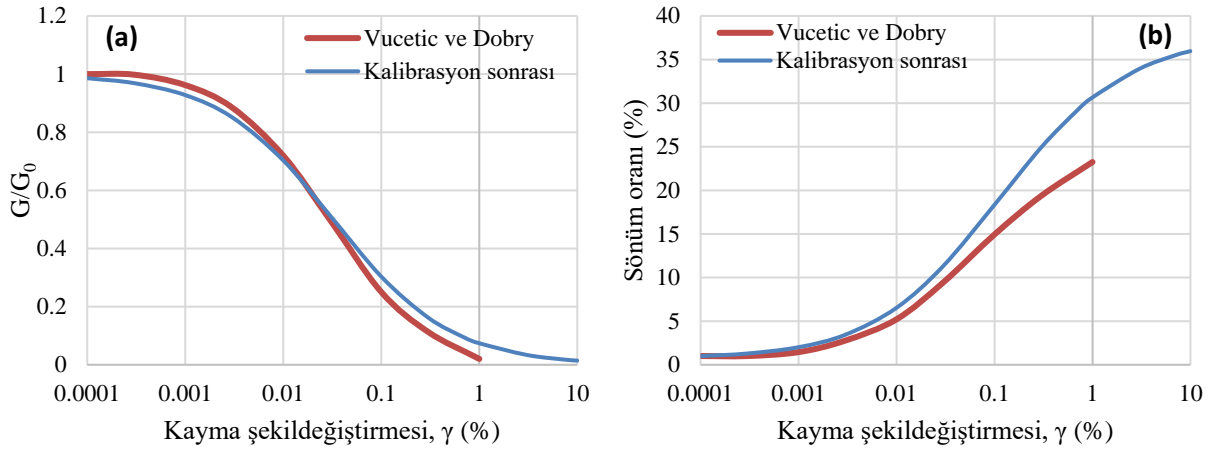
Şekil 1. Oluşturulan 1B zemin modelin özellikleri ve görünümü: Çizim (Sol), Deepsoil (Sağ)

Figure 1. Properties and view of generated 1D soil model: Drawing (Left), Deepsoil (Right)



Şekil 2. Friuli depremi tolmezzo kaydının (a) ivme-zaman değişimi ve (b) tepki spektrumu

Figure 2. (a) Acceleration-time and (b) response spectrum of Tolmezzo record of Friuli earthquake



Şekil 3. Killi zemin (PI=0) için (a) Kayma modülü ve (b) Sönüm değişimi

Figure 3. Variation of (a) Shear modulus (b) Damping for Clay soil (PI=0)

Tablo 1. Killi zemin için belirlenen MKZ model parametreleri

Table 1. MKZ model parameters determined for clay soil

Tanım	Kil (PI=%0)
Küçük şekildeğiştirme sönüm oranı ¹ , ξ (%)	0.7675
Referans şekildeğiştirme ² , γ_r (%)	0.0546
Referans gerilme (MPa)	0.180
Model parametresi, β	1.470
Model parametresi, s	0.735

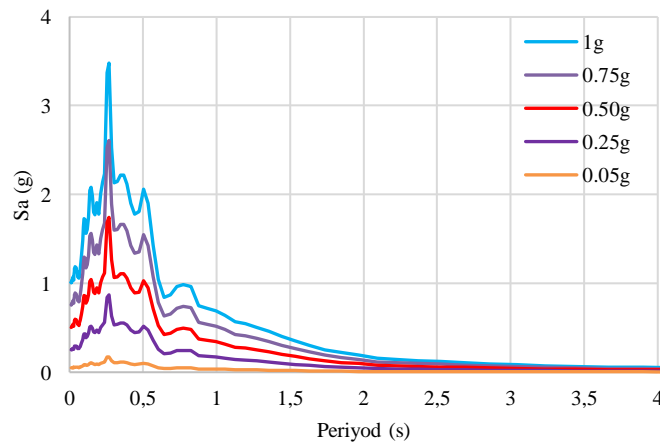
¹ Basınç bağımlı (sönüm eğrisi) parametresi $d=0$

² Basınç bağımlı (referans şekildeğiştirme) parametresi $b=0$

3. Bulgular ve tartışma

3. Results and discussion

Bu çalışmada 5 adet ED ve 5 adet DO model analiz sonuçlarından elde edilen bulgular karşılaştırmalı olarak tartışılmaktadır. Çalışma kapsamında deprem kayıtlarının ölçeklenmiş tepki spektrumları Şekil 4'te verilmektedir. Analizlerde boşluk suyu basıncının değişimi dikkate alınmamıştır.

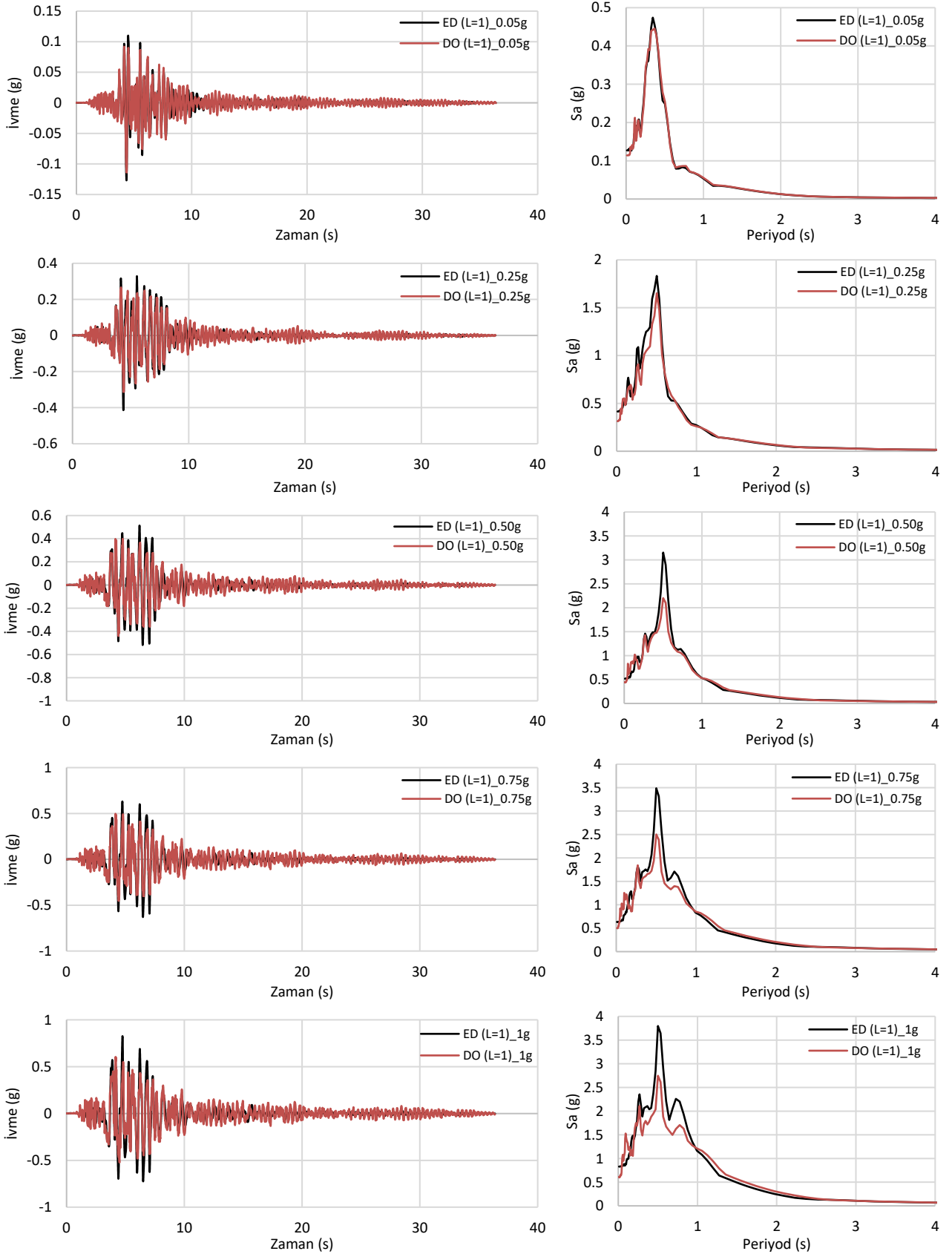


Şekil 4. Ölçeklenmiş kayıtların tepki spektrumları

Figure 4. Response spectrums of scaled records

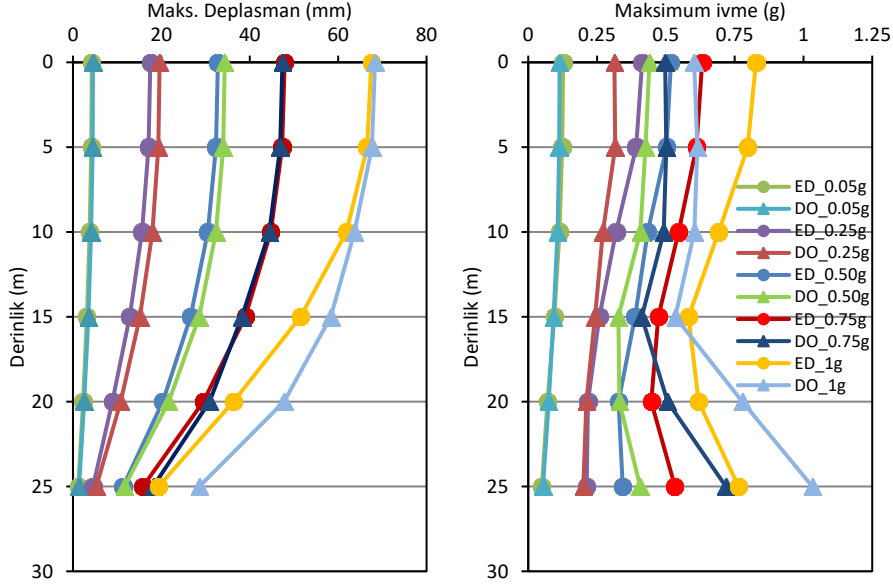
Zemin üst yüzünde (tabaka 1) farklı genlikler için gerçekleştirilen ED ve DO analizlerden elde edilen ivme-zaman kayıtları ve bu kayıtlara ait tepki spektrumları Şekil 5'te verilmiştir. Grafikler incelendiğinde düşük genliklerde ED ve DO analizler uyumlu iken genlik büyüdükçe ED analizler doğrusal analiz tabanlı olduğundan DO analizlere göre daha büyük tepkiler ortaya koymaktadır. Bu sonuca göre ED yönteminin

literatürle uyumlu bir şekilde (Stewart vd., 2008) 0.25g genliğe kadar DO davranışı temsil edebildiğini, 0.5g genlikte ise DO davranışı yansıtamadığını göstermektedir. Maksimum yer ivmesi değerinin 0.5g'nin üzerinde olduğu durumlarda ED sonuçların DO sonuçlardan uzaklaşacağı ve DO davranışı temsil edemeyeceği belirtilmelidir.



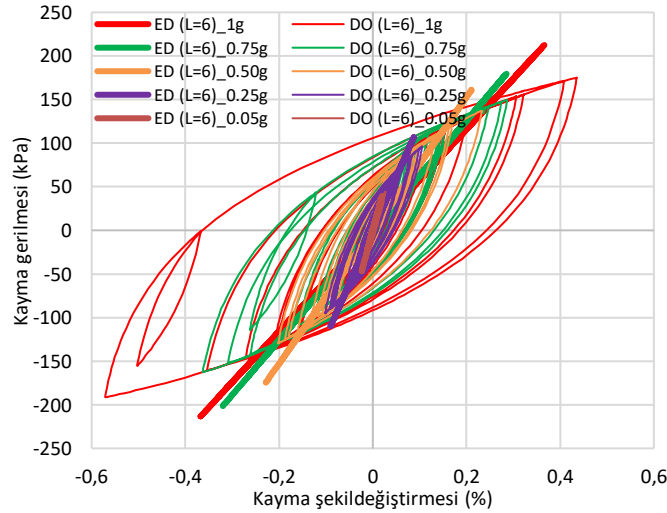
Şekil 5. Zemin üst yüzünde farklı genliklerde ivme-zaman ilişkisi ve tepki spektrumu
Figure 5. Acceleration-time and response spectrum of surface for various amplitudes

Gerçekleştirilen analizlerde maksimum deplasman ve ivmenin derinlikle değişimi Şekil 6'da verilmektedir. Deplasman değişimine bakıldığında 1g sonuçları hariç bütün modellerde uyumlu sonuçlar görülmektedir. Öte yandan ivme değişiminde küçük genliklerde uyumlu sonuçlar göze çarparken genlik büyüdükçe sonuçların da birbirinden uzaklaştığı ve ED analiz sonuçlarının DO'na göre daha büyük ivmeler ürettiği anlaşılmaktadır. Büyük genliklerde tabanda ivme değerlerinin daha büyük olmasının sebebi ise rijit taban olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 6. Maksimum deplasman ve ivmenin derinlikle değişimi
Figure 6. Variation of maximum displacement and acceleration with depth

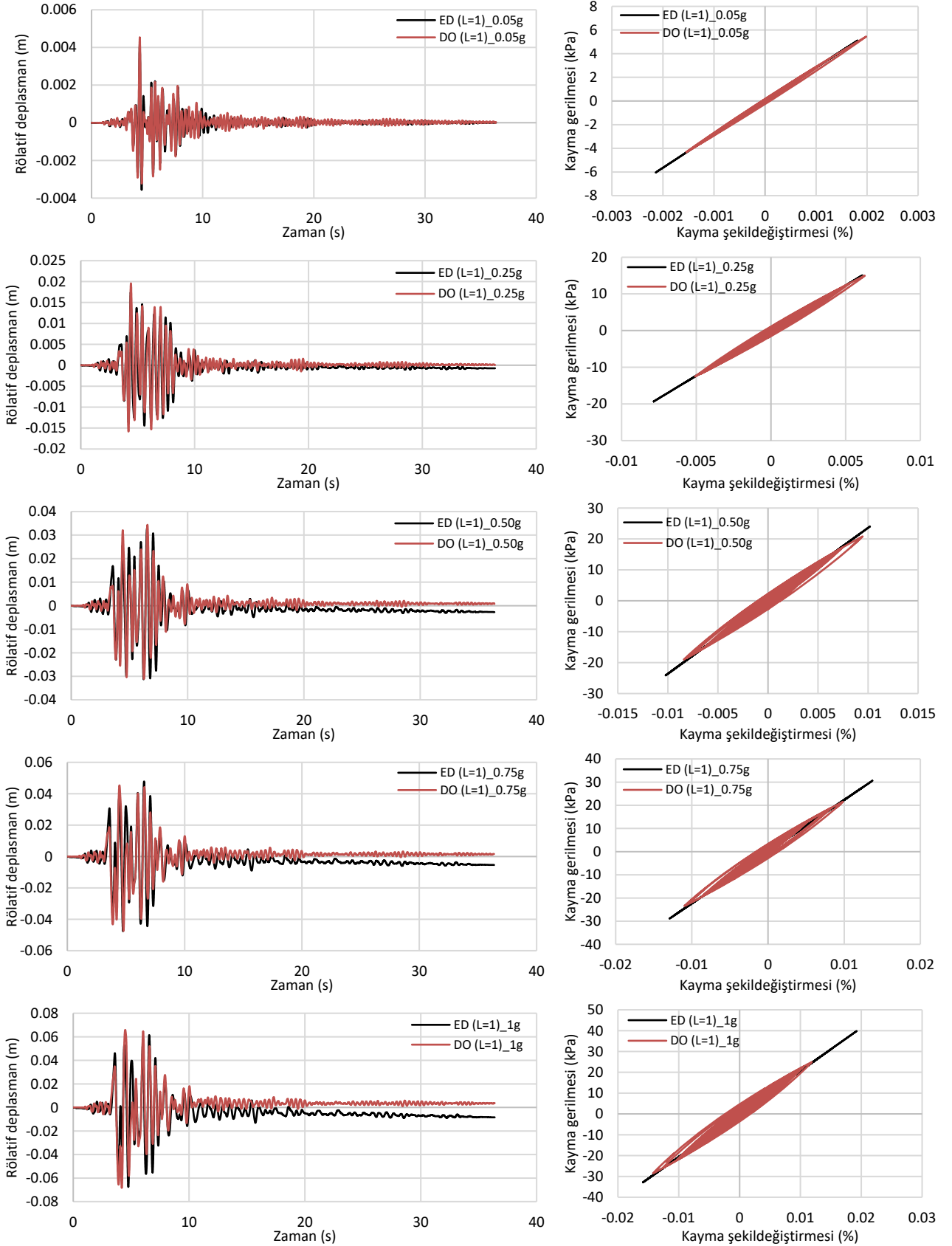
Rijit tabanın üstündeki tabakada farklı genliklerde meydana gelen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 7'de gösterilmektedir. Şekil 7 incelendiğinde küçük genliklerde doğrusala yakın davranış hakim olduğundan ED modelin rijitliği DO modelin rijitliğine yakın olmakta ve benzer davranış sergilemektedir. Ancak genlik büyüdükçe DO davranış hakim olduğundan başlangıç kayma modülü ile nihai kayma modülü arasında önemli bir fark ortaya çıkmakta ve ED modelin sonuçları DO modelin sonuçlarından önemli oranda farklılık olmaktadır.



Şekil 7. Taban tabakada farklı genliklerdeki kayma gerilmesi-şekildeğiştirme ilişkilerinin karşılaştırılması
Figure 7. Comparison of shear stress-strain relationships at different amplitudes in the base layer

Zemin üst yüzünde (Tabaka 1) farklı genlikler için gerçekleştirilen ED ve DO analizlerden elde edilen deplasman-zaman ve kayma gerilmesi-şekildeğiştirme eğrileri Şekil 8'de verilmiştir. Deplasman zaman ilişkileri dikkate alındığında maksimum genlik arttıkça ED analiz sonucunda meydana gelen kalıcı şekildeğiştirmelerin DO sonuçlarına göre daha yüksek olduğu açıkça görülmektedir. Kayma gerilmesi-

şekildeğiştirme ilişkisi incelendiğinde ED analizlerden elde edilen maksimum şekildeğiştirme düzeyi DO sonuçların üzerinde kalmaktadır. Bu durumda ED analizlerin daha büyük şekildeğiştirmelere ve deplasmanlara sebebiyet verdiği anlaşılmaktadır.



Şekil 8. Zemin üst yüzünde farklı genliklerde deplasman-zaman ve kayma gerilme şekildeğiştirme ilişkisi
Figure 8. Displacement-time and shear stress strain relations at the surface for various amplitudes

4. Sonuçlar

4. Conclusions

Bu çalışma kapsamında homojen killi zeminlerde maksimum yer ivmesi değerinin ED ve DO zemin davranış analizleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla 30m derinliğe sahip 1B model oluşturulmuştur. Model tabanının rijit kabul edildiği model farklı genliklerdeki kayıtlar altında gerçekleştirilen ED ve DO analiz sonuçları aşağıda maddeler halinde değerlendirilmiştir:

- İvme-zaman değişimi dikkate alındığında maksimum yer ivmesi arttıkça ED yöntemin DO davranışı temsil edemediği ortaya çıkmıştır.
- Zemin yüzündeki ED ve DO tepki spektrumları karşılaştırıldığında büyük yer ivmelerinde ED yöntemin DO yöntemine göre daha büyük tepkiler ürettiği görülmüştür.
- Zemin yüzündeki deplasman-zaman ilişkileri açısından ED yöntemin zeminde kalıcı plastik şekildeğiştirmelere sebep olduğu anlaşılmıştır.
- Kayma gerilmesi-şekildeğiştirme davranışı dikkate alındığında ED yöntemin zemin yüzünde daha büyük şekildeğiştirmelere neden olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışma homojen killi bir zemin için geçerli olmakla beraber başka tür zeminler için ayrıca araştırılması gerekmektedir. Bu sonuçlar ışığında homojen killi bir zeminde ED yöntemin kullanılabileceği maksimum yer ivmesi değerinin literatürle uyumlu şekilde 0.25-0.50g arasında olacağı söylenebilir. Bu aralığın zemin türü, tabakalanma, deprem frekans içeriği gibi birçok parametreye bağlı olduğunu hatırlatmak gerekir. Maksimum yer ivmesinin ED ve DO yöntem üzerindeki etkisinin gelecek çalışmalarda daha kapsamlı araştırılması önem arz etmektedir. Tabakalanmanın, kumlu zemin türlerinin ve sıvılaşmanın etkisi araştırılabilecek etmenler arasındadır.

Yazar katkısı

Author contribution

Mehmet Ömer Timurağaoğlu: Yazma-inceleme ve düzenleme, Orijinal taslak, Doğrulama, Kavramsallaştırma

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarı, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

References

- Astroza, R., Pastén, C., & Ochoa-Cornejo, F. (2017). Site response analysis using one-dimensional equivalent-linear method and Bayesian filtering. *Computers and Geotechnics*, 89, 43-54. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2017.04.004>
- Bilotta, E., De Sanctis, L., Di Laora, R., D'Onofrio, A., & Silvestri, F. (2015). Importance of seismic site response and soil-structure interaction in dynamic behaviour of a tall building. *Geotechnique*, 65(5), 391-400. <https://doi.org/10.1680/geot.SIP.15.P.016>
- Bolisetti, C., Whittaker, A. S., Mason, H. B., Almufti, I., & Willford, M. (2014). Equivalent linear and nonlinear site response analysis for design and risk assessment of safety-related nuclear structures. *Nuclear Engineering and Design*, 275, 107-121. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.04.033>

- Carlton, B., & Tokimatsu, K. (2016). Comparison of Equivalent Linear and Nonlinear Site Response Analysis Results and Model to Estimate Maximum Shear Strain. *Earthquake Spectra*, 32(3), 1867-1887. <https://doi.org/10.1193/021215EQS029MR1>
- Civelekler, E., Afacan, K. B., Volkan Okur, D., (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. <https://doi.org/10.31796/OGUMMF.839703>
- Fatahi, B., & Tabatabaiefar, S. H. R. (2014). Fully Nonlinear versus Equivalent Linear Computation Method for Seismic Analysis of Midrise Buildings on Soft Soils. *International Journal of Geomechanics*, 14(4), 04014016. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000354](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000354)
- Han, B., Zdravković, L., & Kontoe, S. (2018). Analytical and numerical investigation of site response due to vertical ground motion. *Géotechnique*, 68(6), 467-480. <https://doi.org/10.1680/jgeot.15.P.191>
- Hashash, Y. M. A., Musgrove, M. I., Harmon, J. A., Ilhan, O., Groholski, D. R., Philips, C. A., & Park, D. (2017). DEEPSOIL 7.0, User Manual.
- Idriss, I. M., & Seed, H. B. (1968). Seismic Response of Horizontal Soil Layers. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 94(4), 1003-1031. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001163>
- Kara, F. İ., & Şahin, B. (2022). Sahaya Özel Zemin Davranış Analizlerinde Profil Derinliği Değişiminin İncelenmesi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 8(1), 37-52. <https://doi.org/10.21324/DACD.855902>
- Kaklamanos, J., Bradley, B. A., Thompson, E. M., & Baise, L. G. (2013). Critical Parameters Affecting Bias and Variability in Site-Response Analyses Using KiK-net Downhole Array Data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(3), 1733-1749. <https://doi.org/10.1785/0120120166>
- Kim, B., & Hashash, Y. M. A. (2013). Site response analysis using downhole array recordings during the March 2011 Tohoku-Oki earthquake and the effect of long-duration ground motions. *Earthquake Spectra*, 29(SUPPL.1), 37-54. <https://doi.org/10.1193/1.4000114>
- Kim, B., Hashash, Y. M. A., Stewart, J. P., Rathje, E. M., Harmon, J. A., Musgrove, M. I., Campbell, K. W., & Silva, W. J. (2016). Relative Differences between Nonlinear and Equivalent-Linear 1-D Site Response Analyses. *Earthquake Spectra*, 32(3), 1845-1865. <https://doi.org/10.1193/051215EQS068M>
- Konder, R. L., & Zelasko, J. S. (1963). A hyperbolic stress-strain formulation of sands. *Proceedings of the 2nd Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 289-324.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Kramer, S. L., & Paulsen, S. B. (2004). Practical use of geotechnical site response models. *Proceedings, Int. Workshop on Uncertainties in Nonlinear Soil Properties and their Impact on Modeling Dynamic Soil Response*, PEER Center Headquarters, Richmond, California, 1-10.
- Masing, G. (1926). Eigenspannungen und verfestigung beim messing. In *Proceedings, second international congress of applied mechanics*, 332-335.
- Matasovic, N., & Hashash, Y. M. A. (2012). Practices and Procedures for Site-Specific Evaluations of Earthquake Ground Motions (A Synthesis of Highway Practice). <https://doi.org/10.17226/14660>
- Nghiem, H. M., & Chang, N.-Y. (2019). A new viscous damping formulation for 1D linear site response analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 127, 105860. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105860>
- Rathje, E. M., Kottke, A. R., & Trent, W. L. (2010). Influence of Input Motion and Site Property Variabilities on Seismic Site Response Analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(4), 607-619. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000255](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000255)
- Schnabel, P. B., Lysmer, J. L., & Seed, H. B. (1972). SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Report EERC 72-12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

- Stanko, D., Gülerce, Z., Markušić, S., & Šalić, R. (2019). Evaluation of the site amplification factors estimated by equivalent linear site response analysis using time series and random vibration theory based approaches. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 117, 16-29. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.11.007>
- Stewart, J. P., Kwok, A. O., Hashash, Y. M. A., Matasovic, N., Pyke, R., Wang, Z., & Yang, Z. (2008). Benchmarking of Nonlinear Geotechnical Ground Response Analysis Procedures.
- Sun, R., & Yuan, X. (2021). A holistic equivalent linear method for site response analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 141(October 2020), 106476. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106476>
- Timurağaoğlu, M. Ö., Fahjan, Y., & Dogangun, A. (2021). Bir ve üç boyutlu zemin davranış analizlerinin karşılaştırılması. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, X, 1-6. <https://doi.org/10.5505/pajes.2021.40565>
- Vucetic, M., & Dobry, R. (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response. *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(1), 89-107.
- Wolf, J. P. (1985). *Dynamic soil-structure interaction*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Yoshida, N., Kobayashi, S., Suetomi, I., & Miura, K. (2002). Equivalent linear method considering frequency dependent characteristics of stiffness and damping. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(3), 205-222. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(02\)00011-8](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(02)00011-8)