

Bir ve üç boyutlu zemin davranış analizlerinin karşılaştırılması Comparison of one and three dimensional site response analyses

Mehmet Ömer TİMURAĞAOĞLU^{1*}, Yasin FAHJAN², Adem DOĞANGÜN¹

¹İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye.
omertao@uludag.edu.tr, adogangun@uludag.edu.tr

²İnşaat Mühendisliği Bölümü, İnşaat Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
fahjan@itu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 26.01.2021
Kabul Tarihi/Accepted: 04.06.2021

Düzeltilme Tarihi/Revision: 04.05.2021

doi: 10.5505/pajes.2021.40565
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Zemin davranış analizleri, anakayada meydana gelen kuvvetli yer hareketlerinin anakaya üzerinde bulunan yerel zeminler tarafından nasıl etkilendiğinin belirlenmesi esasına dayanmaktadır. Yerel zemin tepkisi, gerçekte üç boyutlu olan sistemin basitleştirilmiş bir boyutlu doğrusal analizler sonucunda belirlenmesine rağmen, küçük şekil değiştirmelerde plastik davranış sergileyen zeminin doğrusal olmayan davranışını temsil etmede yetersiz kalmaktadır. Eşdeğer doğrusal analiz yöntemi, zeminin doğrusal olmayan davranışını temsil etmek için diğer yöntemler (doğrusal ya da doğrusal olmayan) arasında daha yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak, zemin ortamının her üç boyutta değişkenlik gösterdiği veya yatay tabakalardan oluşmadığı ve ayrıca özellikle yapı-zemin etkileşimi yapılacağı durumlarda iki veya üç boyutlu analizlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, üç boyutlu modelleme stratejileri üzerinde durulmakta ve yansıtmayan sınır eleman boyları, zeminin (sistemin) boyutları, sonlu eleman boyutu ve sönüm için seçilen frekans aralığının üç boyutlu sistemin tepkisi üzerindeki etkileri araştırılmaktadır. Bir boyutlu ve üç boyutlu zemin davranış analiz sonuçları maksimum yer ivmesi, maksimum deplasman ve tepki spektrumu dikkate alınarak literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılmaktadır. Yapılan kıyaslamalar sonucunda, doğru bir şekilde oluşturulan üç boyutlu modelin, bir boyutlu analizlerin kullanılamayacağı durumlarda zemin davranışını belirlemede uygulanabileceğini ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Zemin davranış analizi, Eşdeğer doğrusal yöntem, 3B modelleme, Sonsuz eleman.

Abstract

Site response analysis is based on determining how strong ground motions occurring in bedrock are affected by local soils above the bedrock. Although the local ground response is determined as a result of simplified one-dimensional linear analysis of the system, which is actually three-dimensional, it is insufficient to represent the nonlinear behavior of soil which exhibiting plastic behavior under small deformations. The equivalent linear analysis method is more commonly used among other methods (linear or non-linear) to represent the nonlinear behavior of the soil. However, two or three dimensional analyzes are required in cases where the soil environment varies in all three dimensions or does not consist of horizontal layers, and especially when soil-structure interaction will be applied. In this study, three-dimensional modeling strategies are dwelled on and the effects of non-reflective boundary element lengths, dimensions of the soil (system), finite element size and the frequency range selected for damping on the response of the three-dimensional system are investigated. One-dimensional and three-dimensional soil behavior analysis results are compared with the studies in the literature in terms of the maximum ground acceleration, maximum displacement and response spectrum. As a result of the comparisons, it is revealed that the correctly generated three-dimensional model can be applied in determining the ground behavior in cases where one-dimensional analysis cannot be used.

Keywords: Site response analyses, Equivalent linear method, 3D modeling, Infinite element.

1 Giriş

1920'lerden bu yana, ana kayaya uygulanan deprem hareketleri altında yerel saha koşullarının tepkisini değerlendirmek için zemin davranış analizleri (ZDA) araştırılmaktadır. ZDA herhangi bir dinamik zemin-yapı etkileşim analizinin ilk adımı olarak düşünülebilir [1]. Böylesi bir analizde, üst yapı yüklerinin yokluğunda gerilme dalgalarının ana kayadan zeminin üst yüzeyine yayılması araştırılır ve zeminin ana kayanın üzerinde herhangi bir derinlikte tepkisi belirlenebilir. Sismik dalgaların herhangi bir derinlikte genlik (gerilme, şekil değiştirme, ivme vb.), süre ve frekans içeriği cinsinden değişimi ZDA ile değerlendirilebilir. Yerel toprak stratigrafisi, malzeme özellikleri, yer topoğrafyası, yeraltı suyu seviyesi ve depremin karakteristikleri (süresi, pik yer ivmesi ve frekans içeriği) zemin tepkisini ve modelleme stratejisini büyük ölçüde etkilemektedir. [2],[3].

Bir boyutlu (1B) ZDA deprem yükleri altında yerel zeminin dalga yayılımı üzerindeki etkilerini dikkate almak için yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu tür analizler,

- (i) Tüm sınırların yatay olduğu,
- (ii) Zemin tabakalarının tepkisine ana kayadan dikey (düşey) olarak yayılan kayma dalgalarının (SH) neden olduğu,
- (iii) Zemin ve ana kayanın yatay yönde sonsuz uzanımlı olduğu kabullerine dayanır [2].

1B ZDA'nın dayandığı doğrusal analiz yöntemi, küçük gerilmeler altında zemin tepkisini temsil edebilirken, artan gerilmeler altında kayma modülünde (G-γ) ve sönümdeki (ξ-γ) değişimler nedeniyle gerçek zemin davranışını yansıtamamaktadır. Bu açıdan, zeminin doğrusal olmayan davranışını temsil etmek için tekrarlı (iteratif) doğrusal analiz prosedürü olan eşdeğer doğrusal analiz yaklaşımı [4] araştırmacılar tarafından yaklaşık bir çözüm olarak yaygın bir

*Yazışılan yazar/Corresponding author

şekilde tercih edilmektedir. Bu yöntemin sadeliği, birçok farklı alanda kullanılmasına yol açmıştır [5]-[9].

Bir boyutlu model yaklaşımı, basitliği nedeniyle araştırmacılar tarafından yaygın bir şekilde kabul görmüştür. Ancak zemin ortamının yatay tabakalardan oluşmadığı, kayma şekil değiştirme değerinin %1'i aşmadığı [10] veya zemin özelliklerinin her üç boyutta önemli ölçüde değiştiği yerler (örneğin dar bir vadi veya baraj) gibi zemin durumlarında 1B yaklaşımın doğasında var olan kabuller nedeniyle uygulanabilirliği sınırlıdır. Bu nedenle, probleme bağlı olarak iki boyutlu (2B) veya üç boyutlu (3B) analizlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bununla birlikte, yakın zamana kadar, bu tür analizler hesaplama maliyetleri, kalibrasyon sürecindeki zorluklar ve en önemlisi bu analizleri yapabilecek kapasiteli bilgisayarların bulunmasındaki zorluklar vb. nedenlerle tercih edilmemiştir.

Son zamanlarda, karmaşık problemleri çözebilen yüksek performanslı bilgisayarların ve buna paralel olarak bilgisayar programlarının geliştirilmesiyle, yapı-zemin etkileşimini dikkate alan 3B direkt analizler mühendisler/uzmanlar tarafından tercih edilen yöntemlerden olmaya başlamıştır. Özellikle yapı-zemin etkileşiminin zorunlu kılındığı durumlarda yapı-zemin etkileşiminin ilk adımı genellikle zemin davranış analizleri olmaktadır. Bu sebeple, zemin davranış analizlerinin 3B modellenmesinin önemi artmaktadır.

Genel olarak yapı-zemin etkileşimine esas olacak şekilde zemin davranış analizleri gerçekleştirilmiştir. Zeminin dinamik davranışının irdelenmesinin statik davranışına göre oldukça karmaşık olduğu da bir gerçektir. Bu gibi nedenlerle zemin dinamik davranışının irdelendiği çalışmalar için çoğunlukla 1B-Bir Boyutlu modeller kullanılmıştır. Ancak, tüm sınırlar yatay tabakalardan oluşmuyorsa, zemin sonsuz ortam değilse (dar vadi gibi) veya her üç doğrultuda değişkenlik gösteriyorsa bu durumda 1B modeller davranışı gerçekçi olarak temsil edememektedir. Bu durumda İki Boyutlu (2B) ve 3B modellerin kullanılması zorunlu olmaktadır. Yazarlar bu konuda sınırlı sayıda olarak değerlendirilebilecek 2B modeller için [11],[12], 3B modeller için ise [13]-[15] çalışmalarına ulaşabilmişlerdir. İnşaat mühendisleri yapı-zemin etkileşimi analizlerinde ilk aşamada zeminden gelen dalgaların yayılmasını incelemek için 3B modellerin kullanıldığı zemin dinamik analizlerini gerçekleştirmek zorundadır. Gerçekleştirilen bu çalışma ile zeminin üç boyutlu dinamik davranışı konusunda literatüre katkı sağlanması amaçlanmıştır.

Bu çalışmada öncelikle 1B ve 3B model oluşturulurken dikkat edilmesi gereken hususlara değinilmektedir. Hemen ardından, yapılacak 1B modellerin/kullanılan programın doğruluğunu ortaya koyması açısından literatürde bulunan iki farklı çalışma (homojen ve iki tabakalı), maksimum yer ivmesi, maksimum deplasman ve tepki spektrumu dikkate alınarak 3B model sonuçları ile kıyaslanmaktadır. Sonrasında, 3B model için zemin boyutları değiştirilerek yansıtmayan sınırların ne kadar uzaklıkta konumlandırılacağı irdelenmektedir. Ayrıca, yansıtmayan sınır eleman boyu, sönüm için frekans aralığı ve sonlu eleman boyutunun (mesh) sistemin tepkisi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yansıtmayan sınırları sağlayabilmek için paket programda mevcut olan sonsuz elemanlar kullanılmıştır.

2 Materyal ve yöntem

1B ZDA temelde transfer fonksiyonlarının kullanımına dayanmaktadır. Hesaplama karmaşık sayıların kullanımını içermesine rağmen, yaklaşımın kendisi oldukça basittir. Ancak,

süperpozisyon ilkesine dayandığından, bu yaklaşım doğrusal sistemlerin analizi ile sınırlıdır. Bununla birlikte, doğrusal olmayan davranış, iteratif bir prosedür kullanılarak tahmin edilebilir. Bu prosedüre eşdeğer doğrusal yaklaşım denir. Bu yaklaşımda, birinci aşamada küçük şekil değiştirmedeki kayma modülü (G) ve sönüm (ξ) değeri seçilir ve her tabaka için kayma gerilmeleri-zaman eğrisi elde etmek için tabakalı bir sistem için doğrusal yer davranış analizi gerçekleştirilir. Etketif şekil değiştirme değeri hesaplanır ve bu değer ile yeni G ve ξ değerleri elde edilir. Bu süreç genellikle aradaki farkın bir önceki döngüye göre %5-10 değerinden düşük olması sonlanır. Doğrusal ve eşdeğer doğrusal 1B zemin davranış analizleri için DEEPSOIL v7 [16] paket programı kullanılmıştır. Burada, 1B eşdeğer analiz sonuçlarından elde edilen kayma şekil değiştirmesine (γ) bağlı olarak belirlenen G ve ξ değerlerinin 3B modele girdi olarak işlendiğini belirtmek uygun olmaktadır.

Diğer yandan, 3B zemin modeli sonlu elemanlar programı ABAQUS ile oluşturulmuştur. Bu aşamada 3B modelin oluşturulma adımlarına da kısaca değinmekte yarar vardır. Nitekim 3B modelleme 1B modellemeye göre biraz daha karmaşıktır. Zemin ve sonsuz elemanların türü için, sırasıyla, 8-düğümlü, lineer kumsaati (hourglass) kontrolü ile azaltılmış entegrasyonlu ve 8-düğümlü bir doğrultuda sonsuz elemanlar seçilmiştir. Ağ boyutları ile ilgili detaylar Bulgular ve Tartışma bölümünde verilmiştir. Zemin tabanı ankastre seçilmiş, deprem doğrultusunda ötelenme serbest bırakılmıştır. Yüklemeye dik doğrultuda yatay ötelenme tutulurken düşey serbestlikler serbest bırakılmıştır. Analizlerde işlem adımı 0.01 olarak seçilmiştir. Zemin için sınır koşulu olarak ABAQUS'te mevcut olan sonsuz (infinite) eleman seçilmiştir. Bu elemanlar zeminin dört tarafında veya iki tarafında (1-doğrultuda analiz için) sınırlara yerleştirilir. Sonsuz elemanlar için sadece elastik malzemenin tanımlanması gerekmektedir [17]. Sonsuz elemanlar bir sönümlenme matrisi etkisi ile sonlu elemanlar modeline "sessiz" (yansıtmayan) sınır şartını sağlarken, sonlu elemanın rijitlik matrisine katkı sağlamamaktadır. Sonsuz elemanlar sistemin öz modlarına hiçbir katkı sağlamaz. Bu elemanlar, statik [18] ve dinamik [19] tepkinin uzak alan (far-field) bölgesi için kullanılır. Burada sadece dinamik analiz için geçerli hareket denklemi verilmiştir, ancak okuyucunun ayrıntılı sonsuz elemanlar teorisi için kullanıcı kılavuzuna bakması tavsiye edilir. Hareket denklemi aşağıdaki gibidir:

$$\rho \ddot{u}_i = G \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + (G + \lambda) \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_j \partial x_j} \quad (1)$$

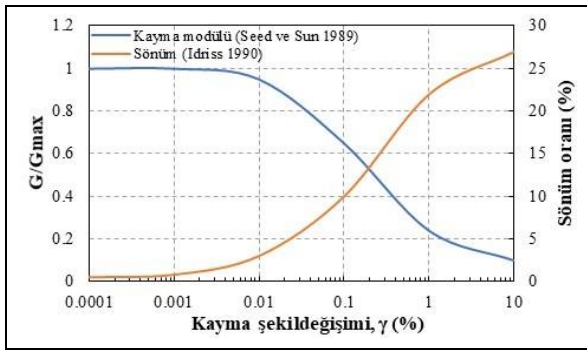
Bu denklemde, G ve λ Lamé sabitleridir, ρ ise malzemenin yoğunluğunu temsil etmektedir. Sonsuz elemanlardaki uzak alan düğümleri dinamik tepki sırasında yer değiştirmeyecektir [17]. Bu yüzden, sonsuz eleman boyunun yeterli boya (uzunluğa) sahip olması gerekir. Zemin tabanı ise ankastre olarak tanımlanır ve burada deprem ivmesi zemin kütlelerine uygulanır. Öte yandan, bilindiği üzere eleman boyutunun büyümesi analizdeki hatayı büyütürken, küçülmesi ise analiz süresini oldukça uzatmaktadır. Bu amaçla oluşturulan 3B sistem öncelikle büyük boyutlar seçilerek analiz edilmektedir. Nihayetinde, 1B sistem sonuçlarıyla örtüşen boyutlar seçilmektedir. Zemin sönümü de deprem hareketlerini değiştirmekte ve yapıların dinamik tepkisini etkilemektedir. Bu yüzden, zemindeki sönümü temsil etmesi açısından literatürde yaygın bir şekilde kullanılan Rayleigh sönümü tercih edilmiştir. Bu modelde sönüm, kütle orantılı (α) ve rijitlik orantılı (β) sönüm katsayıları ile aşağıdaki eşitlik yardımıyla

tanımlanmaktadır. Bu eşitlikte $[C]$ sönüm matrisini, $[M]$ sistemin kütle matrisini ve $[K]$ ise rijitlik matrisini temsil etmektedir.

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (2)$$

3 Bulgular ve tartışma

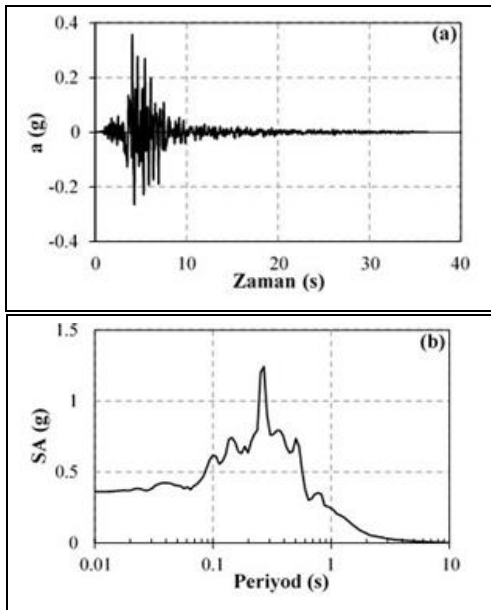
Bu bölümde literatürde analiz sonuçları bulunan iki farklı model sonuçları ile 1B ve 3B zemin davranış analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilecektir. Dikkate alınan ilk model [9] 30 m yüksekliğindeki homojen bir zemindir. Bu zeminin yoğunluğu (ρ) 1940 kg/m³, kayma dalgası hızı (V_s) 150 m/s ve Poisson oranı (ν) 0.4 olarak seçilmiştir. Zemin kayma modülü [20] ve sönümün [21] kayma şekil değiştirmesi ile değişimi Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Zeminin kayma modülü ve sönüm değişimi.

Figure 1. The change of shear modulus and damping of the soil.

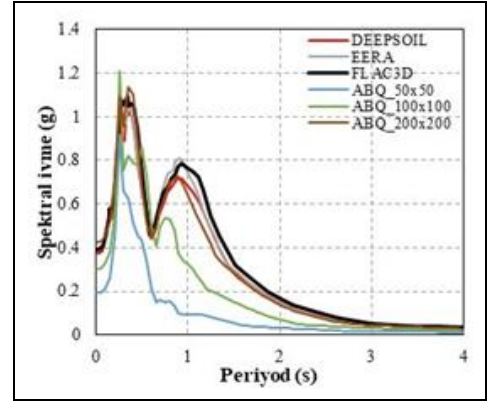
Zemin 30 eşit tabakaya bölünerek (her tabaka 1 m) DEEPSOIL programında dinamik yükler altında eşdeğer doğrusal analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde Friuli depreminin Tolmezzo (A-TMZ000) kaydı kullanılmıştır (Şekil 2). Bu deprem kaydının büyüklüğü $M_w=6.5$, maksimum yer ivmesi 0.357g ve merkez üssünden uzaklığı 23 km'dir.



Şekil 2. Tolmezzo kaydının. (a): İvme-zaman değişimi ve (b): Tepki spektrumu.

Figure 2. Tolmezzo record, (a): Acceleration-time and (b): Response spectrum.

Daha önce EERA ve FLAC3D programları ile yapılan analizler DEEPSOIL programı ile tekrarlanmış ve spektral ivme için elde edilen sonuçlar Şekil 3'te verilmiştir. Şekilde DEEPSOIL sonuçlarının diğer programlar ile uyumlu sonuçlar verdiği görülmektedir. Ayrıca, ABAQUS sonlu elemanlar programı ile oluşturulan 50x50m, 100x100m ve 200x200m boyutlarındaki zeminlerin analiz sonuçları verilmiştir. Şekil incelendiğinde sistemin boyutları büyürken sonuçların örtüşmeye başladığı görülmektedir. Sonuç olarak, sonsuz eleman kullanırken sistem boyutlarının seçimine dikkat edilmesi gerekir. Doğru bir şekilde seçilmeyen boyutlar sistemin tepkisinde ciddi sapmalara sebep olabileceği anlaşılmaktadır.



Şekil 3. Zemin yüzündeki tepki spektrumu.

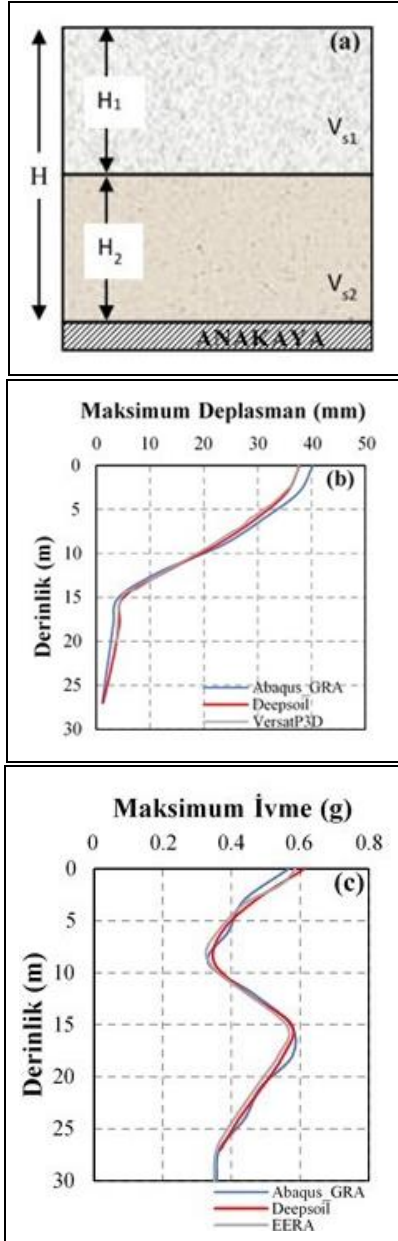
Figure 3. The response spectrum of the soil surface.

İkinci örnek ise iki tabakalı 30 m yüksekliğindeki Şekil 4(a)'da verilen bir zemin modelidir [22]. Bu modelde her iki zeminin yoğunluğu (ρ) 1940 kg/m³, yükseklikleri (H) 15 m ve Poisson oranları (ν) 0.4'tür. Ancak kayma dalgası hızları sırasıyla $V_{s1}=100$ m/s ve $V_{s2}=400$ m/s olarak verilmiştir Şekil 4(a). Zemin 10 eşit tabakaya bölünerek (her tabaka 3 m) DEEPSOIL programında dinamik yükler altında doğrusal analizleri yapılmıştır. Benzer şekilde ABAQUS programı ile 3B model oluşturulmuştur. Analizlerde Friuli depreminin Tolmezzo (A-TMZ000) kaydı kullanılmıştır (Şekil 2). Yapılan analizler VERSATP3D ve EERA analiz sonuçları ile karşılaştırılmaktadır. Zeminde meydana gelen maksimum deplasmanın derinlik ile değişimi Şekil 4(b)'de görülmektedir. Şekilden anlaşıldığı üzere DEEPSOIL ve ABAQUS ile yapılan analiz sonuçları VERSATP3D sonuçları ile iyi derecede örtüşmektedir. Zeminde meydana gelen yer ivmesinin derinlik ile değişimi Şekil 4(c)'de görülmektedir. Benzer şekilde, DEEPSOIL ve ABAQUS ile yapılan analiz sonuçlarının VERSATP3D ve EERA sonuçları ile önemli oranda örtüştüğü görülmektedir. Şekil 4c'de ivmede süresizlikten kaynaklı bir değişim söz konusudur. Üst tabakanın kayma dalgası hızı daha düşük olduğundan zemin alt tabakadan gelen dalganın genliğini küçültmektedir. Dalga üst tabakadan yüzeye doğru ilerlerken depremin frekans içeriğine bağlı olarak tekrardan bir artış meydana gelmektedir.

Bu aşamada ise 10m yüksekliğinde homojen, kohezyonlu bir zemin ABAQUS ve DEEPSOIL analiz sonuçları irdelenmek üzere seçilmiştir. Seçilen zeminin yoğunluğu (ρ) 1600 kg/m³, Poisson oranı (ν) 0.35 ve elastisite modülü (E) 55 MPa ($V_s=113$ m/s) olarak belirlenmiştir.

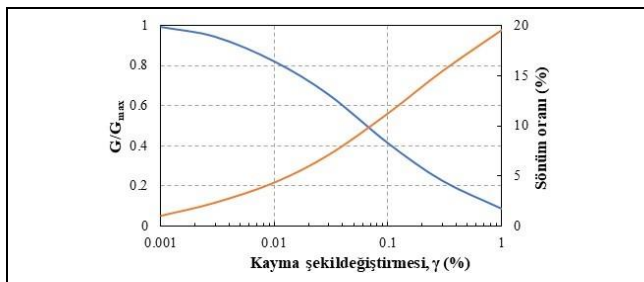
Zemin kütlesi yukarıdaki örneklerde olduğu gibi anakaya seviyesinden Friuli depreminin Tolmezzo (A-TMZ000) kaydına maruz bırakılmıştır. Eşdeğer doğrusal analizlerde kohezyonlu zeminler için önerilen ve Şekil 5'te verilen kayma modülü ve

sönüm oranı eğrisi kullanılmıştır [23]. Bu analizlerde plastisite indisi (PI) 15% olan eğriler seçilmiştir.



Şekil 4(a): İki tabakalı model, (b): Maksimum deplasman-derinlik ve (c): Maksimum yer ivmesi-derinlik değişimleri.

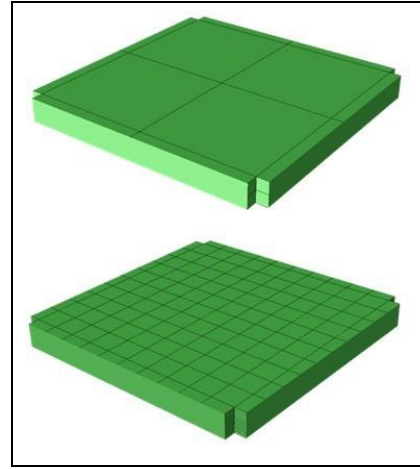
Figure 4(a): Two layer model, (b): Maximum displacement-depth and (c): Maximum ground acceleration-depth variations.



Şekil 5. Zeminin kayma modülü ve sönüm değışimi.

Figure 5. The change of shear modulus and damping of the soil.

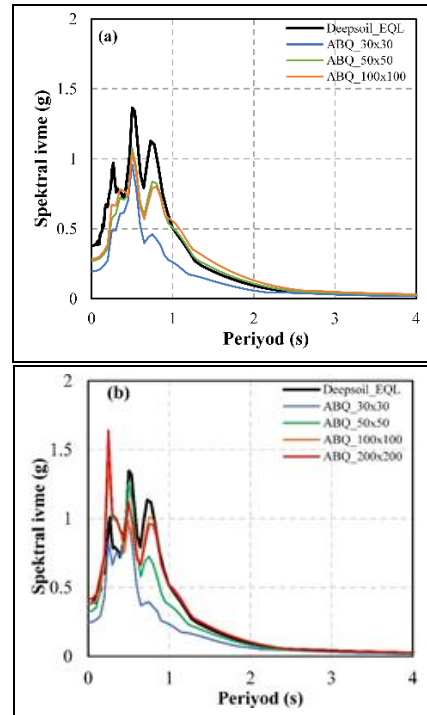
3B modelde, sistem düşeyde iki elemana, yatayda ise 4 elemana bölünerek (sonsuz elemanlarla birlikte toplamda 24 eleman) ve düşeyde on elemana, yatayda 25 elemana bölünerek (toplamda 7250 eleman) iki farklı şekilde modellenmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. Abaqus ile oluşturulan farklı mesh boyutlarında model.

Figure 6. The generated models with different mesh in Abaqus.

Ayrıca yansıtmayan sınırların doğru çalışıp çalışmadığını anlayabilmek için 30x30 m, 50x50 m, 100x100 m ve 200x200 m boyutlarında modellenip analiz edilmiştir. Büyük ve küçük elemanlarla oluşturulan modellerin DEEPSOIL ve ABAQUS ile yapılan analizler sonucu elde edilen tepki spektrumları sırasıyla Şekil 7(a) ve (b)'de görülmektedir.



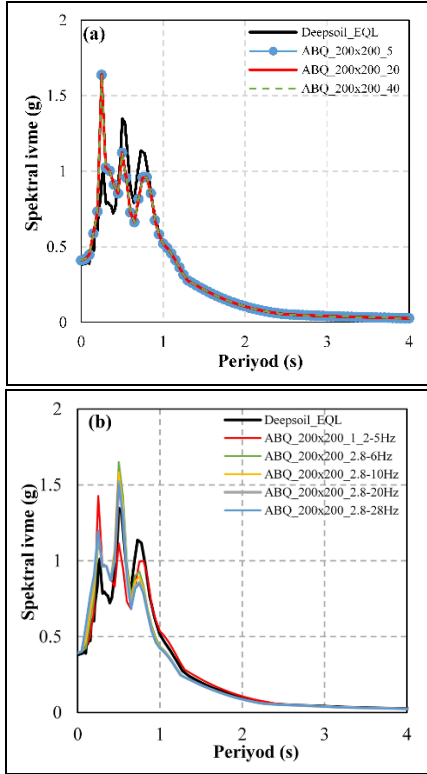
Şekil 7. Tepki spektrumlarının karşılaştırılması, düşeyde, (a): İki elemanlı (15 m) ve (b): 10 elemanlı (3 m).

Figure 7. Comparison of response spectra, vertically, (a): Two elements (15 m) and (b): 10 elements (3 m).

Şekilden anlaşıldığı üzere, 30x30 m boyutlarındaki sistemin tepkisi diğerlerine göre daha fazla sönümlenmiştir. Buna sebep ise yansıtmayan sınırlarda bulunan ek sönümün sistemdeki

sönümle birleşince toplam sönümü arttırması şeklinde ifade edilebilir. Bu sebeple, sonsuz eleman kullanırken sistem boyutlarının biraz daha büyük seçilmesinde yarar olacağı açıktır. Bunlara ek olarak, çok büyük boyutlar seçilmesi de analiz süresini uzatmaktan öteye geçmeyecektir. Ayrıca, eleman boyutlarının da şekillerden görüldüğü gibi sonuçlar üzerinde önemli oranda etkisi bulunmaktadır.

Diğer taraftan, sonsuz elemanların uzunluğunun da önemiyet arz ettiğini belirtmek gerekir. Farklı uzunluklara (5 m, 20 m ve 40 m) sahip sonsuz elemanlar ile yapılan analiz sonuçları Şekil 8(a)'da görülmektedir. Şekil incelendiğinde bu çalışma özelinde sonsuz eleman boyunun sonuçları etkilemediği gözlemlenmiştir. Ancak bu boyu çok küçük (0.1 m gibi) bir değer seçmekten kaçınmak gerekir. Zeminin hakim periyodu 0.35s olarak hesaplanmıştır ($4H/V_s=4*10/113$). Bu periyoda yakın periyotlarda uyumlu sonuçlar elde edilmektedir. Kısa periyotlardaki farklılık eleman boyutundan kaynaklanmaktadır. Ayrıca, sönüm katsayılarını (α ve β) elde etmek için seçilen frekans aralığının sistem davranışı üzerindeki etkisi Şekil 8(b)'de verilmiştir. Yapılan irdelemeler sonucunda frekans aralığının davranış/tepki spektrumu üzerindeki etkisinin kısıtlı olduğu kanaatine varılmıştır.



Şekil 8. Tepki spektrumunun, (a): Sonsuz eleman boyu ve (b): frekans aralığı ile değişimi.

Figure 8. Variation of response spectrum with, (a): Infinite element length and (b): frequency range.

4 Sonuçlar

1B doğrusal, eşdeğer doğrusal ve 3B doğrusal zemin davranış analizleri gerçekleştirilmiş ve 1B analizlerin uygulanamayacağı dar bir vadi veya zemin ortamının her üç boyutta değişkenlik gösterdiği durumlarda kullanılan 3B analizlerin modellenmesinde dikkat edilmesi gereken hususlara değinilmiştir. Deprem ve zeminin özelliklerine bağlı olarak zeminin dinamik davranışı, eleman ve sistem boyutlarından

önemli oranda etkilenmektedir. Yapılacak çok kapsamlı bir çalışma ile boyutlara ilişkin belki belirli aralıklar vermek mümkün olabilir. Dolayısıyla, her problem için geçerli olacak şekilde eleman ve sistem boyutlarına ilişkin kesin değerler vermek şimdilik uygun olmamaktadır. Ancak gerçekleştirilen çalışma sonucuna göre, üç boyutlu modellemede sistemin boyutları seçilirken 1B tepki spektrumuna en yakın sonucu veren boyutların seçilmesinin uygun olduğu belirtilebilir. Ayrıca, 3B modellemede yansıtmayan sınırların tanımlaması için kullanılan sonsuz (infinite) elemanların uzunlukları sistemin tepe noktasındaki (zemin üst yüzeyi) davranışını/tepki spektrumunu önemli oranda değiştirdiği gözlemlenmiştir. Diğer taraftan, 3B modellemede sönüm için frekans aralığı seçiminin sonuçları küçük oranlarda etkilediği anlaşılmıştır. Nihai olarak, yapılan çalışmalar 3B analizlerin, sistemin doğru bir şekilde modellenmesi şartıyla, gerçekçi sonuçlar verebildiğini göstermiştir.

5 Conclusions

1D linear, equivalent linear and 3D linear site response analyzes (SRA) were performed and the issues that need to be considered in modeling 3D systems used in cases a narrow valley where 1D analysis cannot be applied or where ground environment changes in all three dimensions are addressed. Depending on the characteristics of the earthquake and soil, the dynamic behavior of soil is significantly affected by the element and system dimensions. With a very comprehensive study to be done, it may be possible to give certain intervals regarding the dimensions. Therefore, it is not appropriate for now to give precise values for element and system dimensions to be valid for every problem. However, according to the results of the study, it can be stated that it is appropriate to choose the dimensions that give the closest result to the 1D response spectrum when choosing the dimensions of the system in 3D modeling. In addition, it has been observed that the lengths of infinite elements used for the definition of non-reflective boundaries in 3D modeling do not change the behavior/response spectrum at the top of the system (surface of the ground). On the other hand, it is understood that the selection of the frequency range for damping in 3D modeling affects the results to a small extent. Finally, studies have shown that 3D analysis can give realistic results provided that the system is modeled correctly.

6 Teşekkür

Yazarlar "Abaqus Lisansı" dolayısıyla Bursa Uludağ Üniversitesi'ne teşekkür eder.

7 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Mehmet Ömer TİMURAĞAOĞLU literatür taraması, tasarımın yapılması, analizlerin gerçekleştirilmesi ve yazım başlıklarında; Yasin FAHJAN fikrin oluşması, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ve eleştirel inceleme başlıklarında; Adem DOĞANGÜN yazım denetimi, eleştirel inceleme ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

8 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur."

"Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır".

9 Kaynaklar

- [1] Wolf JP. *Dynamic Soil-Structure Interaction*. 1st ed. New Jersey, USA, Prentice Hall, 1985.
- [2] Kramer SL. *Geotechnical Earthquake Engineering*. 1st ed. New Jersey, USA, Prentice Hall, 1996.
- [3] Matasovic N, Hashash YMA. "Practices and Procedures for Site-Specific Evaluations of Earthquake Ground Motions (A Synthesis of Highway Practice)". National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington, D.C., USA, Scientific Report, 78, 2012.
- [4] Idriss IM, Seed HB. "Response of horizontal soil layers during earthquakes". *Soil Mechanics and Bituminous Materials Research Laboratory, University of California, Berkeley, California, USA, 1967*.
- [5] Stanko D, Gülerce Z, Markušić S, Šalić R. "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, 2019.
- [6] Astroza R, Pastén C, Ochoa-Cornejo F. "Site response analysis using one-dimensional equivalent-linear method and Bayesian filtering". *Computers and Geotechnics*, 89, 43-54, 2017.
- [7] Bolisetti C, Whittaker AS, Mason HB, Almufti I, Willford M. "Equivalent linear and nonlinear site response analysis for design and risk assessment of safety-related nuclear structures". *Nuclear Engineering and Design*, 275, 107-121, 2014.
- [8] Tabatabaiefar HRS, Fatahi B, Samali B. "An empirical relationship to determine lateral seismic response of mid-rise building frames under influence of soil-structure interaction". *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 23(7), 526-548, 2014.
- [9] Luo R, Yang M, Li W. "Assessments of kinematic bending moment at pile head in seismic area". *Journal of Earthquake Engineering*, 25(5), 970-991, 2018.
- [10] TBDY. "Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı için Esaslar". Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, Türkiye, 417, 2018.
- [11] Amoroso S, Gaudiosi I, Tallini M, Di Giulio G, Milana G. "2D site response analysis of a cultural heritage: the case study of the site of Santa Maria di Collemaggio Basilica (L'Aquila, Italy)". *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(10), 4443-4466, 2018.
- [12] Bakır BS, Özkan MY, Cılız S. "Effects of basin edge on the distribution of damage in 1995 Dinar, Turkey earthquake". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(4), 335-345, 2002.
- [13] Amorosi A, Boldini D, di Lernia A. "Seismic ground response at Lotung: Hysteretic elasto-plastic-based 3D analyses". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 85, 44-61, 2016.
- [14] Makra K, Chávez-García FJ. "Site effects in 3D basins using 1D and 2D models: an evaluation of the differences based on simulations of the seismic response of Euroseistest". *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14(4), 1177-1194, 2016.
- [15] Smerzini C, Paolucci R, Stupazzini M. "Comparison of 3D, 2D and 1D numerical approaches to predict long period earthquake ground motion in the Gubbio plain, Central Italy". *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9(6), 2007-2029, 2011.
- [16] Hashash YMA, Musgrove MI, Harmon JA, Ilhan O, Groholski DR, Philips CA, Park D. "DEEPSOIL 7.0, User Manual". Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign. Urbana, IL, Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign, 2020.
- [17] Abaqus. "Documentation". Dassault Systemes Simulia Corporation, USA (online documentation) 2019.
- [18] Zienkiewicz OC, Emson C, Bettess P. "A novel boundary infinite element". *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 19, 393-404, 1983.
- [19] Lysmer J, Kuhlemayer RJ. "Finite dynamic model for infinite media". *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 95(4), 859-878, 1969.
- [20] Seed BH, Sun JI. "Implications of site effects in the Mexico city earthquake of September 19, 1985 for earthquake-resistant design criteria in the San Francisco Bay Area of California". University of California at Berkeley, California, USA, Scientific Report, 140, 1989.
- [21] Idriss IM. "Response of soft soil sites during earthquakes". *Proceedings to Honor Professor Harry Bolton Seed*, Berkeley, California, USA, 05 May 1990.
- [22] de Sanctis L, Maiorano RMS, Aversa S. "A method for assessing kinematic bending moments at the pile head". *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 39, 1133-1154, 2010.
- [23] Vucetic M, Dobry R. "Effect of soil plasticity on cyclic response". *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(1), 89-107, 1991.