

GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

## Effect of Surface Topography on Soil Amplification

Ayhan Doğan<sup>a\*</sup>, Ünal Dikmen<sup>b</sup>

Submitted: 22.03.2023 Revised: 24.06.2023 Accepted: 07.08.2023 doi:10.30855/gmbd.0705074

## ABSTRACT

**Keywords:** Soil amplification,  
Surface topography, Earthquake,  
Geophysics

<sup>a\*</sup> Hacettepe University, Başkent OSB  
Vocational Higher School of Technical  
Sciences, Department of Computer  
Technologies,  
06909 - Ankara, Türkiye  
Orcid: 0000-0002-9872-8889  
e-mail: aydogan@hacettepe.edu.tr

<sup>b</sup> Ankara University  
Faculty of Engineering, Geophysical  
Engineering,  
06830-Ankara, Türkiye  
Orcid: 0000-0002-7603-4296

\*Corresponding author:  
aydogan@hacettepe.edu.tr

Soil amplification is known as the increase in amplitudes of seismic waves as they pass through the soil layers. It depends on many factors such as seismic bedrock depth and slope, the thickness of its layers, physical and lithological properties, discontinuities, and topography. In this study, the effect of surface topography on local soil amplification was investigated. A software called SiteEffect3D has been developed to examine soil behavior with the three-dimensional finite element method. With the software, the effect of surface topography on local soil amplification was investigated using various three-dimensional models. These models were exposed to two synthetic acceleration records as well as the 17 August 1999 Izmit earthquake (Mw. 7.4) acceleration record. Peak ground acceleration values at the nodal points of the surface topography elements were obtained and plotted as a result of the dynamic analysis.

Dynamic analysis results show that peak ground acceleration values change significantly when surface topography is used. Peak ground acceleration values are high on hills with few flat areas, and the slope of the hill also affects the result. There are also remarkable changes in the Peak Ground Acceleration results on the hills located in the regions where the flat areas are wider. However, the effect of the slope is relatively less on the hills in the wide plains.

## Yüzey Topoğrafyasının Zemin Büyütmesine Etkisi

## ÖZ

Zemin büyütmesi, sismik dalgaların zemin tabakalarından geçerken genliklerindeki artış olarak bilinir. Zemin büyütmesi, sismik ana kaya derinliği ve eğimi, fiziksel ve litolojik özellikleri, yanal ve düşey süreksizlikler, tabakaların kalınlığı ve topoğrafyası gibi birçok etkene bağlıdır. Bu çalışmada, yüzey topoğrafyasının yerel zemin büyütmesine etkisi araştırılmıştır. Zemin tepkisinin 3- Boyutlu sonlu eleman yöntemiyle inceleyebilmek için SiteEffect3D isiminde bir yazılım geliştirilmiştir. Bu yazılım ile yüzey topoğrafyasının yerel zemin büyütmesine etkisi çeşitli 3-Boyutlu modeller kullanılarak incelenmiştir. Bu modeller 17 Ağustos 1999 İzmit depremi (Mw. 7.4) ivme kaydı ve sentetik ivme kayıtlarına maruz bırakılmış, dinamik analiz sonucunda model topoğrafyası üzerindeki sonlu eleman düğümlerinde hesaplanan doruk ivme değeri sonuçlarından grafikler elde edilmiştir.

Dinamik analiz sonuçları, yüzey topoğrafyası kullanıldığında doruk ivme değerlerinin önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir. Düz alanların az olduğu tepeliklerde doruk ivme değerleri yüksek çıkmakta, tepenin eğimi de sonucu etkilemektedir. Düz alanların daha geniş olduğu bölgelerde bulunan tepeliklerde de doruk ivme değeri sonuçlarında dikkate değer değişiklikler görülmüştür. Ancak, geniş düzlükler içerisinde bulunan tepelerde eğim değişiminin etkisi görece daha azdır.

**Anahtar Kelimeler:** Zemin  
büyütmesi, Yüzey topoğrafyası,  
Deprem, Jeofizik

## 1. Giriş (Introduction)

Sismik dalgalar yer içinde yayıldıkça, genliklerinde, frekans bileşenlerinde ve seyahat sürelerinde değişiklikler olur. Bu değişikliklerin çeşitli nedenleri olabilir [1, 2]. Bunlar; en üstteki zemin katmanıyla onun altında bulunan katmanlar ve anakayanın farklı yoğunlukta olması ve bu katmanların sismik hızları farklı etkilemesi nedeniyle oluşan empedans farklılıkları, anakayanın derinliği, zemin tabakalarının kalınlık farkları, süreksizlikler, zemin tabakalarına ait dinamik ve fiziki özellikler, ana kaya ve yeryüzeyi topografyası sayılabilir [3-8].

Topoğrafyanın kuvvetli yer hareketleri sırasında zemin yüzeyindeki etkisi birçok çalışmaya konu olmuştur. Topoğrafik düzensizliklerin zemin büyütmesine etkileri incelenmiştir [2, 9-11]. Haşal (2009) yaptığı çalışmada topoğrafik özellikleri, hem zemin üstünde hem de zemin altında katmanların geometrik özellikleri şeklinde tanımlamaktadır. Yaptığı çalışmanın sonuçlarında, zemin tabakalarının yatay doğrultuda sınırlı genişliği olan ova ve vadi sınırlarında dalga hareketinde dönüşümlere ve yüzey dalgalarına yol açtığını, iki boyutlu rezonans durumları oluşabildiğini, yer hareketinin frekans içeriği ve genliğinin vadi kenarlarıyla ortasında farklılık oluşturduğunu, dik yamaçlarda ve tepelerde ani genlik artışları görülebileceğini belirtmiştir. Başka bir çalışmada, çevresi düz olan tepelik alanlarda SH dalgalarının tepe üstünde yüksek büyütme değerine ulaştığını, vadi olan bölgelerde ise tam tersi küçültme olacağını, büyütmenin ise yatay bileşenlerde çok daha fark edilebilir olduğunu ve bunların eğim, sismik dalgaların geliş açısı ve yönüyle de ilgili olabileceği belirtilmiştir [12]. Jibson (1987) bir yamacın zirvesinde ölçülen ortalama doruk ivme değerlerinin (PGA) tabandakinden 2.5 kat daha yüksek olduğunu söylemiştir. Bazı çalışmalar, alüvyal vadilerde deprem dalgasının etkilerinin 1-Boyutlu (1-B) analizlerle doğru bir şekilde tahmin edilemeyeceğini ortaya koymuştur [13-15]. Başka bir çalışma, P, SV ve SH dalgalarının alüvyal bir vadideki etkilerini incelemişler, spektral büyütmelerin 1-B analizlerle elde edilen sonuçlardan yaklaşık 4 kat daha fazla çıkabileceğini göstermiştir [16]. Bard ve Gariel (1986) sığ ve derin vadilerde 1-B ve 2- Boyutlu (2-B) analizler yaparak, transfer fonksiyonlarının vadi merkezinden kenarlara doğru önemli ölçüde değiştiğini, vadi kenarında ise tamamen farklılaştığını göstermiştir [17]. Bazı çalışmalarda, vadi derinliğinin baskın periyot üzerindeki etkisinin vadi genişliğinden daha çok olduğunu saptamış ve vadi kenarlarındaki eğim arttıkça vadi merkezindeki spektral büyütmenin arttığını belirtmişlerdir [18, 19]. Rassem vd. (1997) yerel zemin baskın periyodunun vadi merkezinde vadinin diğer yerlerine göre daha fazla olduğunu belirtmiştir [18]. Poursartip vd. (2017) çalışmalarında 2-B topoğrafik düzensizliklerin yerel zemin etkisini araştırmış, topoğrafyanın zemin büyütmesine önemli katkıları olduğunu belirterek modelleme yapılırken fiziksel arazinin mümkün olduğu kadar aslına sadık bir geometrik temsilini korumanın önemine vurgu yapmıştır [20]. Derghoum ve Derghoum (2023) Cezayir'in Konstantin şehrinin Ciloc bölgesinde yaptıkları çalışmada yüzey jeolojisi ve topoğrafya düzensizliklerinin zemin büyütmesine etkilerini araştırmışlardır. Maksimum saha büyütmelerinin inceledikleri tepenin arkasında meydana geldiğini ve alüvyal homojen oluşumların diğer durumlara göre yüksek spektral büyütme neden olduğunu belirtmişlerdir [21]. Zhang vd. (2018) Çin, Sichuan, Zigong şehrinde yaptıkları çalışmada topoğrafyanın ve yumuşak malzemelerin yerel varlığının hem arazi gözlemlerinde hem de sayısal modelde yer hareketini önemli ölçüde artırdığını tespit etmiştir [22]. Baron vd. (2022) İtalya'da yaptıkları çalışma sonucunda, topoğrafik eğim ile amplifikasyon arasında ilişki olduğunu ortaya koymuştur [23].

Bu çalışmada, farklı yüzey topoğrafyalarını temsil edecek şekilde oluşturulan sentetik modeller kullanılarak 3-Boyutlu (3-B) dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Bu dinamik analizlerin sonuçlarında sonlu eleman model topoğrafyasına ait düğüm noktalarında hesaplanan PGA değerleri kullanarak haritalandırılmış ve sonuçlar karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmiştir.

## 2. Materyal ve Metot (Material and method)

Çalışma kapsamında çeşitli sentetik 3-B sonlu eleman modelleri hazırlanmıştır. Bunlar, düz eğimsiz zemin (%0 eğim), %30, %45 ve %60 eğimli topoğrafyaya sahip modeller oluşturularak topoğrafyanın etkisi araştırılmıştır. Tüm modellerle dinamik analizler gerçekleştirilmiş, elde edilen PGA değerleri kullanılarak oluşturulan PGA haritaları karşılaştırılmıştır. Daha sonra bu modeller çeşitli ivmelere maruz bırakılarak yeniden dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Sonra X ve Y yönünde daha geniş 3-B modeller oluşturularak daha büyük düzlüklerde bulunan farklı eğimlere sahip tepelerin etkisi araştırılmıştır. Modellerin hazırlanması ve dinamik analizlerin gerçekleştirilmesi SiteEffect3D programı kullanılarak yapılmıştır [2]. MATLAB tabanlı geliştirilen SiteEffect3D yazılımı 3-B ağ oluşturulmasında düzgün dörtyüzlü (tetrahedron) eleman kullanır.

3-B ağı oluşturulmasında ve rafine edilmesinde MATLAB programlama ortamı PDE araç komutlarından yararlanır.

Uygulamalarda modellerin çeşitli giriş ivmelerine maruz kaldıklarındaki sonuçlarda ortaya çıkan değişim de araştırılmıştır. Bunun için kullanılan giriş ivmeleri farklı olduğundan her bir test işlemine ait PGA renk ölçekleri kendi içinde aynı, fakat diğer testlerde farklı kullanılmıştır. Tüm yüzeylerde sınır koşulları uygulanmış olup sadece üst yüzey serbest bırakılmıştır. Makaledeki grafik sayısının çok artmaması için birbirine çok benzer sonuçları bulunan yatay bileşenlerden sadece bir tanesi (X bileşeni) ile düşey bileşen (Z bileşeni) kullanılmıştır. Yapılan dinamik analizlerde sentetik ivme kayıtları ve 17 Ağustos 1999 İzmit depremi (Mw. 7.4) ivme kaydı kullanılmıştır. Kullanılan yapay modeller tekdüze ve izotrop olup zemin parametreleri modellere göre farklılık göstermektedir.

Tüm modellerde ağıdaki sonlu elemanların en boy oranları (aspect ratio) literatüre uygun olarak oluşturulmuştur. Modellerdeki sonlu elemanların en boy oranları, Model 1’de eğimin olmadığı ve eğimin %30 olduğu ilk iki modelde 1-2 arasında, eğimin %45 olduğu modelde 1-3 arasında, eğimin %60 olduğu modelde ise 1-6 arasında değişmektedir. Model 2’de tüm eğimlerdeki modellerde en boy oranları 1-2 arasında değişmektedir. Literatürde sonlu eleman modellerinde kabul edilen ideal en boy oranları 1-3 veya 1-5 aralığındadır. Bazı araştırmacılar en boy oranının 10 değerine kadar dikkatli olarak kullanılabileceğini ancak 10 değerinden sonra kullanılmaması gerektiğini tavsiye etmektedirler [24, 25]. Başka görüşteki araştırmacılar ise en boy oranının sonuçlar üzerindeki etkisinin zannedildiği gibi büyük olmadığını ifade etmektedirler [26-28]. Çalışmada kullanılan sonlu elemanların en boy oranları literatürde belirtilen şartlara uygundur. Buna ek olarak sonlu eleman boyutlarının uygunluğu, deprem ivme kaydının frekans içeriği açısından örnekleme teoremi de dikkate alınarak kontrol edilmiştir.

Çalışmada yapılan dinamik analizlerde Neumann ve Dirichlet sınır koşulları kullanılmıştır. Neumann sınır şartında eleman sınırlarında yer değiştirmelerin türevleri, Dirichlet sınır şartında ise eleman sınırlarında yer değiştirmeler ön tanımlıdır. Model sınırlarından yansımayı azaltmak için, yüzey topografyasını temsil eden elemanlar hariç, model sınır elemanları dışarı doğru uzatılmış ancak dinamik analiz sonuçları değerlendirilirken sadece şekillerde gösterilen model boyutları dikkate alınmıştır.

Yapılan dinamik analizlerde Rayleigh sönüm yaklaşımı kullanılmıştır [29]. Rayleigh sönüm yaklaşımı viskoz sönüm uygulamalarında sıklıkla kullanılan bir sönüm yaklaşımıdır. Rayleigh sönümü Eşitlik 1’de verildiği şekliyle kütle ve sıklıkla orantılı bir sönüm uygular.

$$C_i = \alpha_i M_i + \beta_i K_i \quad (1)$$

Buradaki  $\alpha$  ve  $\beta$  ilgilenilen frekans aralığı ve sönüm oranına bağlı olarak belirlenen sabitleri,  $i$  alt indisi ise hesaplamanın  $i$ . eleman için yapıldığını gösterir.  $M_i$  eleman model kütle dizeyi,  $K_i$  ise eleman sıklık dizeyidir. Ayrıca  $\alpha$  ve  $\beta$  ile sönüm oranı arasında Eşitlik 2’deki gibi bir ilişki mevcuttur.

$$\xi_i = \frac{\alpha_i}{2w} + \beta_i \times w \quad (2)$$

Burada  $w$  frekans değeri,  $\xi$  sönüm oranıdır.  $w$  değeri  $K$  dizeyinin öz değerlerinin karekökü alınarak elde edilir. Rayleigh sönüm dizeyinin doğal frekanslara bağlı değişimi Şekil 1’de gösterilmiştir [30]. Dinamik analiz sürecinde her bir zaman yinelemesi (iterasyonda) sonunda sonlu elemanlarda gelişen deformasyon düzeylerine bağlı olarak eleman sönüm değerleri güncellenir. Zeminlerde frekansın sönüm üzerindeki katkısı ihmal edilebilir düzeydedir. Sönüm için, genel yaklaşım; ilgilenilen frekans bandında düşük sönüm değerlerinin ve bu frekans bandının dışında ise büyük sönüm değerlerinin uygulanması şeklindedir. İlgilenilen iki frekans değerinden küçük olanı,  $w_1$  basitçe incelenen modelin temel kipinin (mode) sahip olduğu frekans değeri seçilir. İkinci frekans değeri Eşitlik 3 ile hesaplanır. Burada  $N$  değerinin belirlenmesi üzerine yapılan çalışmalar (özellikle 1-B), yüksek kipteki titreşimlerin temel kip titreşiminin tek katı olacak şekilde gerçekleştiğini göstermiştir [29].

$$w_2 = N w_1 \quad (3)$$

Burada  $N = W_{deprem}/w_1$  değerinden büyük en yakın tek sayı olacak şekilde seçilir.  $W_{deprem}$  frekansı analizde giriş olarak kullanılan deprem ivme kaydının temel titreşim frekansıdır. Modeldeki her bir sonlu eleman için

$w_1$  ve  $w_2$  frekanslarının belirlenmesiyle  $\alpha_i$  ve  $\beta_i$  değişkenleri Eşitlik (4a, 4b) ile hesaplanır.

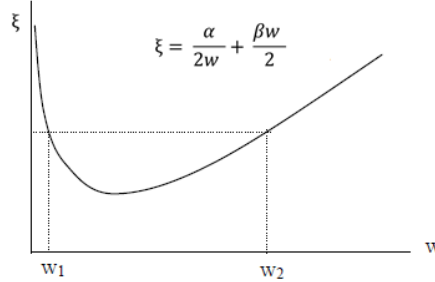
$$\alpha_i = 2\xi_i + \frac{w_1 w_2}{w_1 + w_2} \quad (4a)$$

$$\beta_i = 2\xi_i + \frac{1}{w_1 + w_2} \quad (4b)$$

Her bir elemanın sönüm oranını gösteren  $\xi_i$  değeri, model kütle,  $M$  ve sıklık,  $K$  dizeleri ile modelin  $w_1$  temel titreşim frekansı yardımıyla Eşitlik 5'ten elde edilir.

$$K\varphi^1 = w_1^2 M\varphi^1 \quad (5)$$

Burada  $\varphi^1$  modelin temel kip şeklini gösterir. Şekil 1'de görüleceği üzere, Rayleigh sönüm yaklaşımı sismik dalga üzerinde  $w_1$  ve  $w_2$  frekans aralığında düşük, bu frekansların dışında yüksek sönüm uygulamaktadır.



Şekil 1. Sönüm oranının ( $\xi$ ) doğal titreşim frekansı ile değişimi

### 3. Bulgular ve Tartışma (Findings and Discussion)

Bu çalışmada kullanılan 3-B sonlu eleman modelleri 2 ayrı grup halinde oluşturulmuştur. Her bir model grubu içerisinde %0, %30, %45 ve %60 olmak üzere 4 farklı yüzey eğimiiçermektedir. Modelleri birbirleriyle kıyaslayabilmek için zemin parametreleri tüm modellerde aynı alınmıştır.

#### 3.1. Model 1 (Model 1)

İlk grup modellere ait geometrik özellikler, X ve Y yönünde 180m, Z yönünde 100m olacak şekilde tekdüze yapıda hazırlanmıştır. Modellere ait zemin parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Model 1'e ait zemin parametreleri (Soil parameters of Model 1)

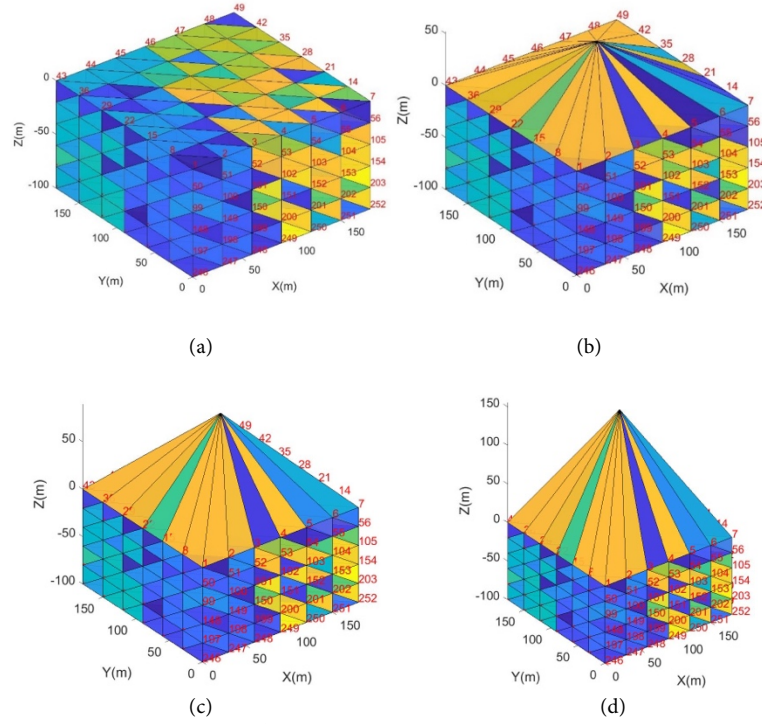
Vp Hızı (m/s)	Vs Hızı (m/s)	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )
770	240	1.9

Model 1 grubundaki sentetik 3-B sonlu eleman modelleri Şekil 2'de verilmiştir.

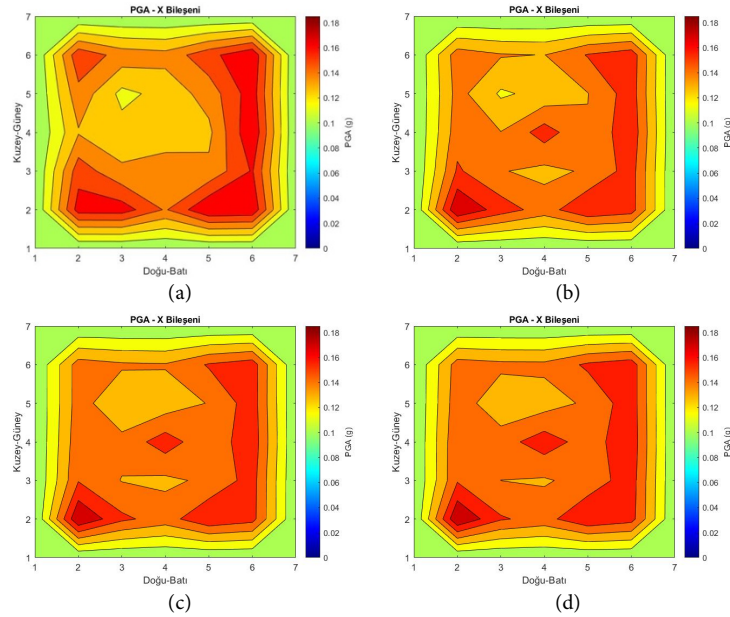
#### 3.1.1. Model 1 - Test 1 (Model 1 - Test 1)

Test 1 için giriş ivmesi X, Y ve Z bileşenlerinde sabit 0.1g olarak verilmiştir. Şekil 2'de verilen farklı eğimlere sahip Model 1 kullanılarak gerçekleştirilen dinamik analizler sonucunda elde edilen X ve Z bileşenlerine ait PGA grafikleri Şekil 3-4'de verilmiştir.

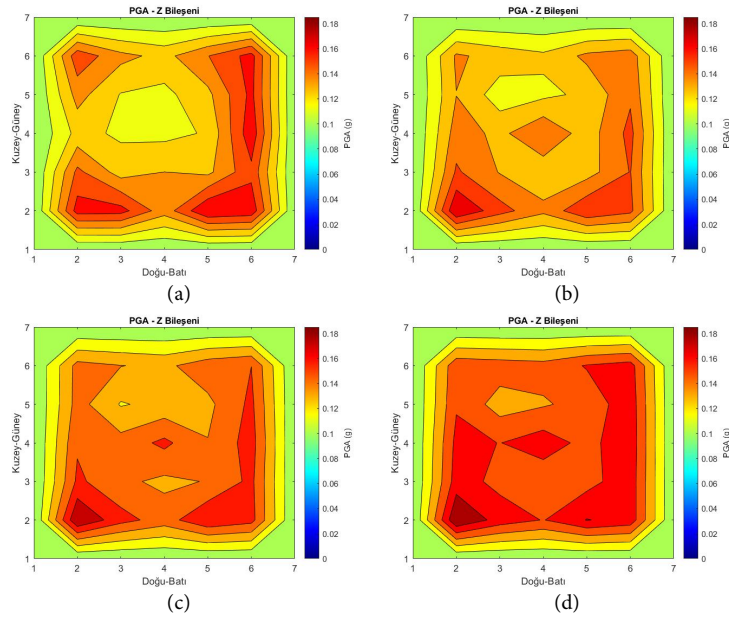
Model 1'in kullanıldığı Test 1'e ait sonuçlar incelendiğinde eğimsiz model (%0 eğim) ile diğer modellerin PGA sonuçlarının farklı olduğu açıkça görülmektedir. X bileşeni sonuçlarına bakıldığında eğimsiz model ile %30 eğimli model sonuçlarının birbirine kısmen daha yakın olduğu, diğer eğimlere sahip modellerle farkın daha fazla olduğu ve eğimsiz modelde PGA değerlerinin özellikle modelin kenarlarında görece daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Z bileşeni sonuçlarına bakıldığında ise eğimsiz model ile diğer eğimlere sahip model sonuçlarının farklı olduğu ve X bileşeninde olduğu gibi eğimsiz modelde PGA değerlerinin özellikle modelin kenarlarında görece daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 2. Farklı eğime sahip yüzey topoğrafyalı modeller, a) Eğim yok, b) Eğim %30, c) Eğim %45 ve d) Eğim %60  
(Models with different sloping surface topographies, a) Flat surface, b) Slope 30%, c) Slope 45% and d) Slope 60%)



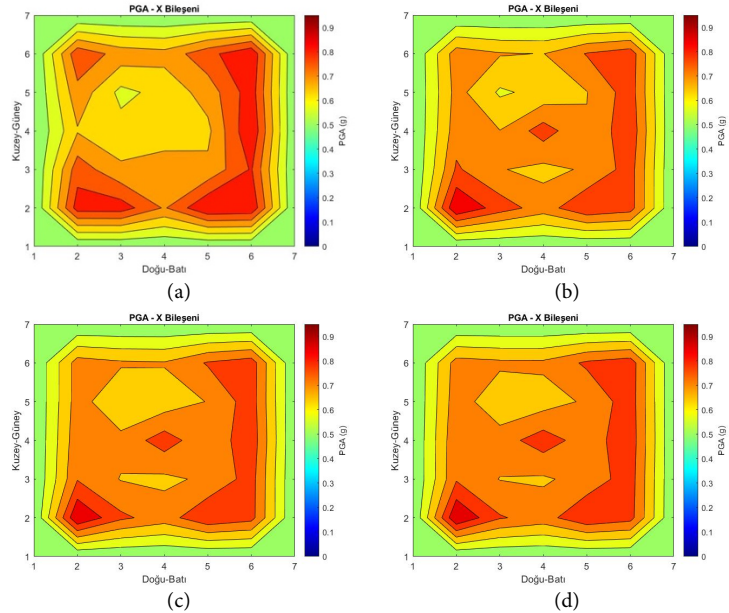
Şekil 3. Test1'den elde edilen X bileşeni PGA grafikleri, a) Eğim yok, b) Eğim %30, c) Eğim %45 ve d) Eğim %60  
(PGA graphics obtained as a result of Testt for X-component, a) Flat surface, b) Slope 30%, c) Slope 45% and d) Slope 60%)



Şekil 4. Test1'den elde edilen Z -bileşeni PGA grafikleri, a) Eğim yok, b) Eğim %30, c) Eğim %45 ve d) Eğim %60 (PGA graphics obtained as a result of Test1 for Z-component, a) Flat surface, b) Slope 30%, c) Slope 45% and d) Slope 60%)

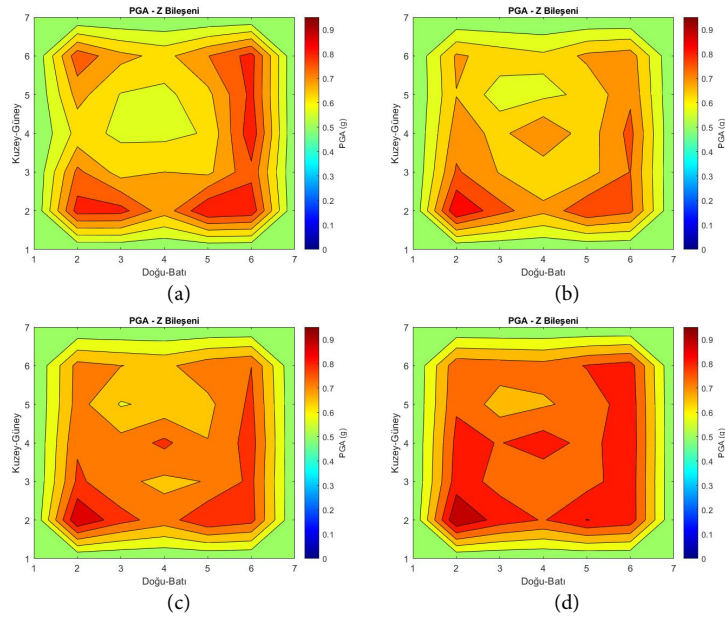
### 3.1.2. Model 1 - Test 2 (Model 1 - Test 2)

Test 2 için giriş ivmesi X, Y ve Z bileşenlerinde sabit 0.5g olarak verilmiştir. Model 1 kullanılarak gerçekleştirilen dinamik analizler sonucunda elde edilen X ve Z bileşenlerine ait PGA grafikleri Şekil 5-6'da verilmiştir



Şekil 5. Test2'den elde edilen X bileşeni PGA grafikleri, a) Eğim yok, b) Eğim %30, c) Eğim %45 ve d) Eğim %60 (PGA graphics obtained as a result of Test2 for X component, a) Flat surface, b) Slope 30%, c) Slope 45% and d) Slope 60%)

Model 1'in kullanıldığı Test 2'ye ait sonuçlar incelendiğinde eğimsiz model (%0 eğim) ile diğer modellerin PGA sonuçlarının farklı olduğu açıkça görülmektedir. X bileşeni sonuçlarına bakıldığında eğimsiz modelde PGA değerlerinin özellikle modelin kenarlarında görece daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Z bileşeni sonuçlarına bakıldığında ise eğimsiz model ile diğer eğimlere sahip model sonuçlarının farklı olduğu ve X bileşeninde olduğu gibi eğimsiz modelde PGA değerlerinin özellikle modelin kenarlarında ortasına göre daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Bununla birlikte, Z bileşeni sonuçlarında %60 eğime sahip modelin PGA değerleri hem kenarlarda hem de ortada yüksektir. Aynı zamanda özellikle Z bileşeni sonuçlarında eğimin artışıyla PGA değerlerinin de arttığı görülmektedir.



Şekil 6. Test2'den elde edilen Z bileşeni PGA grafikleri, a) Eğim yok, b) Eğim %30, c) Eğim %45 ve d) Eğim %60  
(PGA graphics obtained as a result of Test2 for Z component, a) Flat surface, b) Slope 30%, c) Slope 45% and d) Slope 60%)

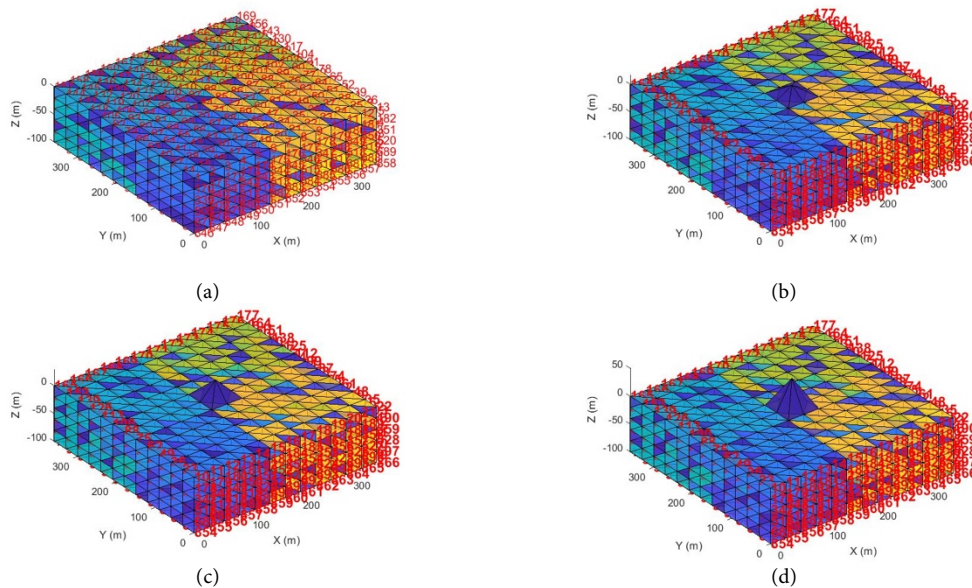
### 3.2. Model 2 (Model 2)

Model 2'de oluşturulan modelin boyutları hem X hem de Y yönlerinde iki kat genişletilmiştir. Modelin X ve Y yönlerindeki uzunluğu, modeldeki düğüm noktaları arasındaki ortalama uzunluk değerinin on iki katıdır. Tüm yüzeylerde sınır koşulları uygulanmış, sadece üst yüzey serbest bırakılmıştır. Aynı düzlem üzerinde en yakın düğüm noktalarının arasındaki mesafe 30m'dir. İkinci grup modellere ait geometrik özellikler, X ve Y yönünde 360m, Z yönünde 100m olacak şekilde homojen yapıda hazırlanmıştır. Modellere ait zemin parametreleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Model 2'ye ait zemin parametreleri (Soil parameters of Model 2)

Vp Hızı (m/s)	Vs Hızı (m/s)	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )
770	240	1.9

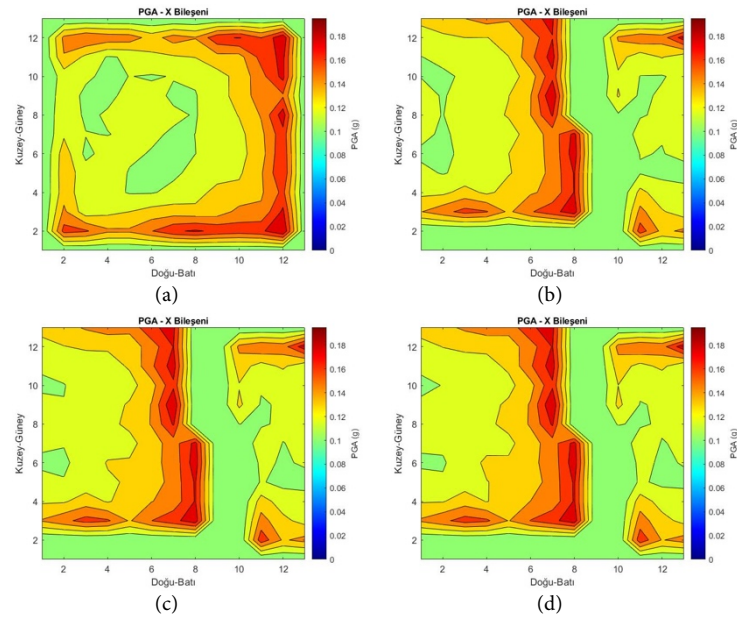
Model 2 grubundaki sentetik 3-B sonlu eleman modelleri Şekil 7'de verilmektedir.



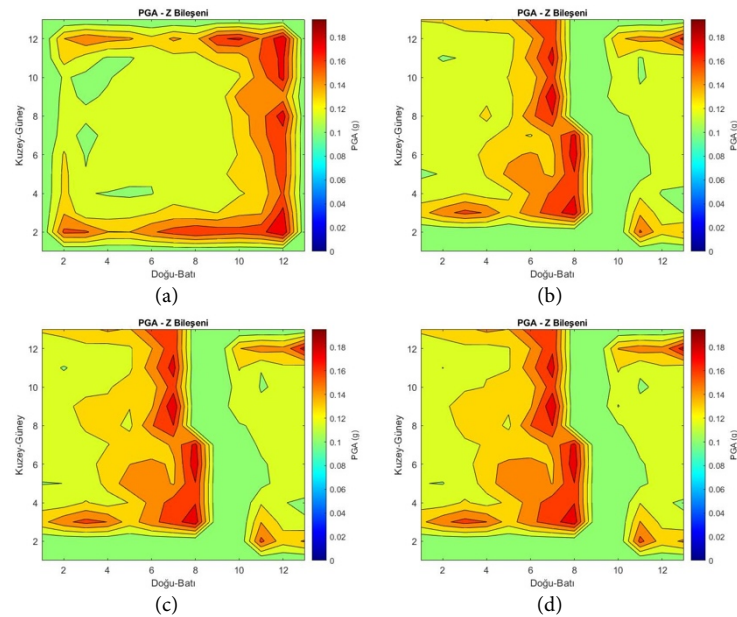
Şekil 7. Geniş alanlı farklı eğime sahip yüzey topoğrafyalı modeller, a) Eğim yok, b) Eğim %30, c) Eğim %45 ve d) Eğim %60  
(Large-area topographic models with different slopes, a) Flat surface, b) Slope 30%, c) Slope 45% and d) Slope 60%)

### 3.2.1. Model 2 - Test 3 (Model 2 - Test 3)

Test 3 için giriş ivmesi X, Y ve Z bileşenlerinde sabit 0.1g olarak verilmiştir. Model 2 kullanılarak gerçekleştirilen dinamik analizler sonucunda elde edilen X ve Z bileşenlerine ait PGA grafikleri Şekil 8 ve 9'da verilmiştir. Model 2'nin kullanıldığı Test 3'e ait sonuçlar incelendiğinde eğimsiz model (%0 eğim) ile diğer modellerin PGA sonuçlarının çok farklı olduğu açıkça görülmektedir. Hem X bileşeni hem de Z bileşeni sonuçlarına bakıldığında eğimsiz modelde PGA değerlerinin özellikle modelin kenarlarında görece daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Bununla birlikte, yine her iki bileşene ait sonuçlarda eğimli modellerde model ortasında yüksek PGA değerlerine sahip bir sırt ile onun bir yanında çok daha düşük PGA değerine sahip bir bölge ve diğer yanında ise sırt bölgesine göre görece daha düşük PGA değerine sahip alanlar ile kenarlara doğru daha düşük PGA değerine sahip alanlar göze çarpmaktadır.



Şekil 8. Test3'ten elde edilen X bileşeni PGA grafikleri, a) Eğim yok, b) Eğim %30, c) Eğim %45 ve d) Eğim %60  
(PGA graphics obtained as a result of Test3 for X component, a) Flat surface, b) Slope 30%, c) Slope 45% and d) Slope 60%)



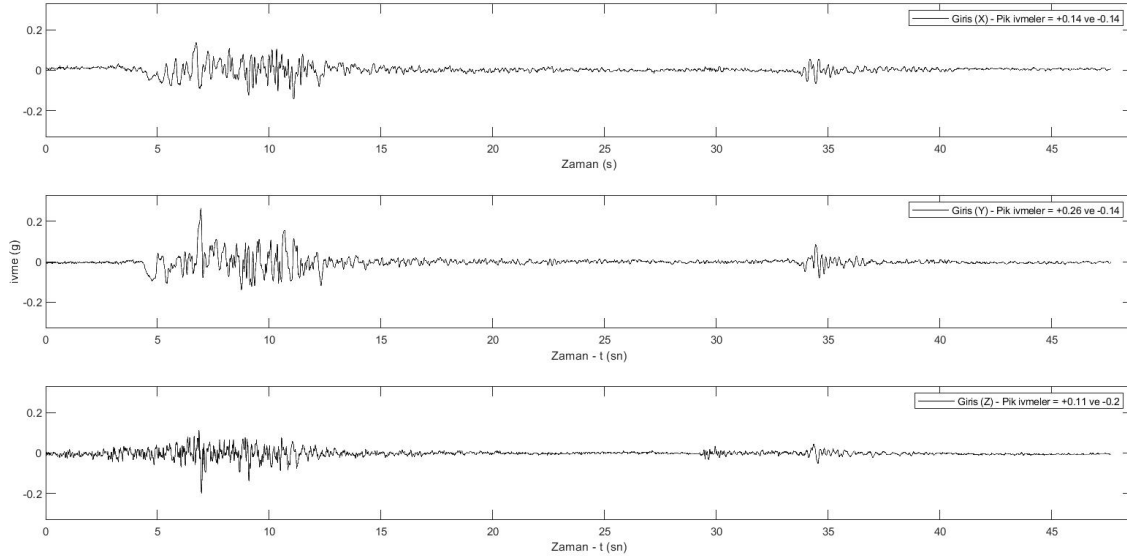
Şekil 9. Test3'ten elde edilen Z bileşeni PGA grafikleri, a) Eğim yok, b) Eğim %30, c) Eğim %45 ve d) Eğim %60  
(PGA graphics obtained as a result of Test3 for Z component, a) Flat surface, b) Slope 30%, c) Slope 45% and d) Slope 60%)



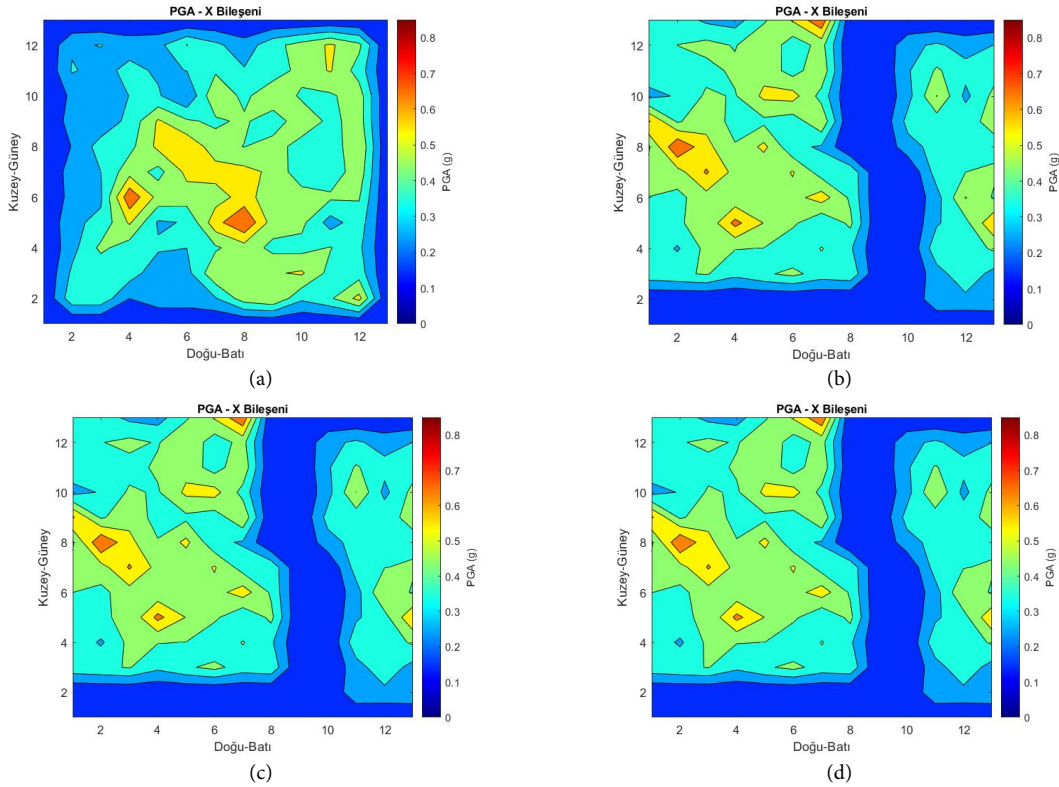
### 3.2.2. Model 2 - Test 4 (Model 2 - Test 4)

Test 4 için giriş ivmesi olarak Afet ve Acil Durum Başkanlığı (AFAD) tarafından işletilmekte olan 4106 kod numaralı Kocaeli Gebze istasyonuna ait 17 Ağustos 1999 ivme kaydı ölçeklenerek verilmiştir (Şekil 10). Model 2 kullanılarak gerçekleştirilen dinamik analizler sonucunda elde edilen X ve Z bileşenlerine ait PGA grafikleri Şekil 11-12'de verilmiştir.

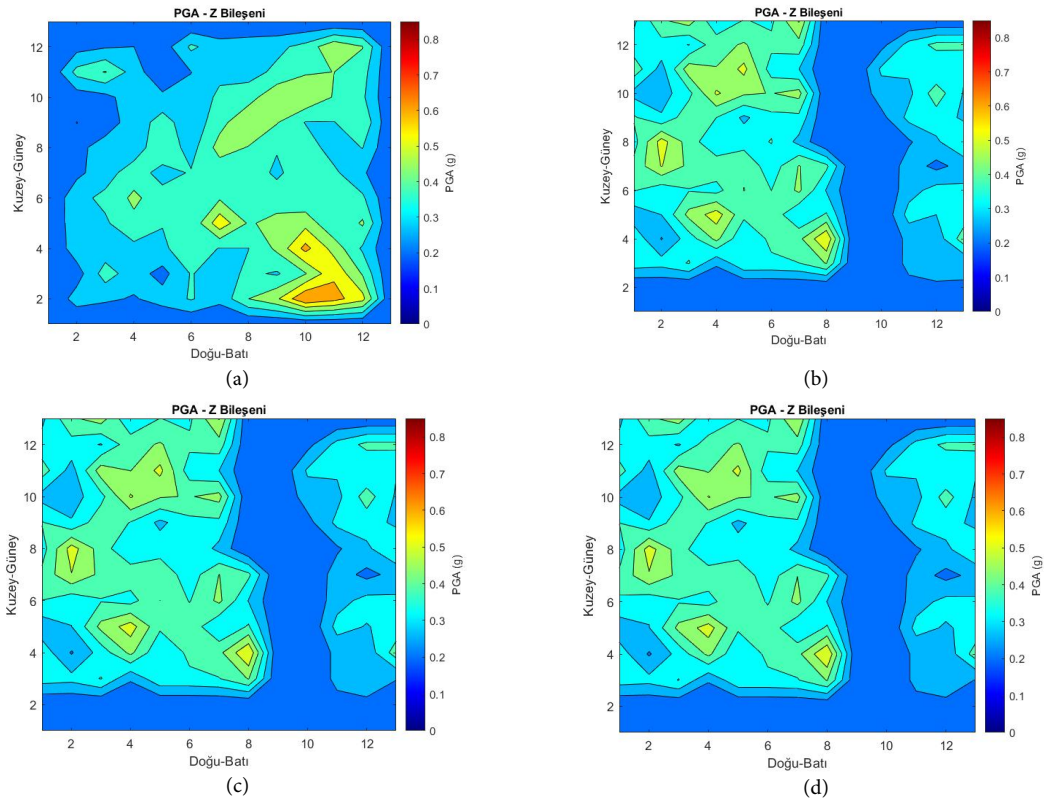
Giriş ivmesi - 17 Ağustos 1999 - 4106 Kocaeli Gebze İstasyonu - Ölçekli



Şekil 10. 17 Ağustos 1999 İzmit depremi (Mw. 7.4) Gebze-Kocaeli istasyonu ivme kaydı - ölçekli (Acceleration record of 17, August 1999 İzmit Earthquake (Mw. 7.4) obtained at Gebze-Kocaeli station - scaled)



Şekil 11. Test4'ten elde edilen X bileşeni PGA grafikleri, a) Eğim yok, b) Eğim %30, c) Eğim %45 ve d) Eğim %60 (PGA graphics obtained as a result of Test4 for X component, a) Flat surface, b) Slope 30%, c) Slope 45% and d) Slope 60%)



Şekil 12. Test4'ten elde edilen Z bileşeni PGA grafikleri, a) Eğim yok, b) Eğim %30, c) Eğim %45 ve d) Eğim %60  
(PGA graphics obtained as a result of Test4 for Z component, a) Flat surface, b) Slope 30%, c) Slope 45% and d) Slope 60%)

Model 2'nin kullanıldığı Test 4'e ait sonuçlar incelendiğinde eğimsiz model (%0 eğim) ile diğer modellerin PGA sonuçlarının çok farklı olduğu açıkça görülmektedir. X bileşeni sonuçlarına bakıldığında eğimsiz modelde PGA değerlerinin özellikle modelin ortalarında görece daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Z bileşeni sonuçlarına bakıldığında eğimsiz modelde PGA değerlerinin özellikle modelin kenarlarında görece daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Bununla birlikte, her iki bileşene ait sonuçlarda eğimli modellerde model ortasından bir kenara doğru görece daha yüksek PGA değerlerine sahip alanlar ile onun diğer yanında çok daha düşük PGA değerine sahip bölge göze çarpmaktadır.

#### 4. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

Dinamik analiz sonucunda, yüzey topoğrafyasının 3-B sonlu eleman modelinde doruk ivme değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Sentetik modellerle yapılan çalışmalarda alanı görece daha dar olan düzlükler üzerinde bulunan tepelerde doruk ivme değerlerinde büyük farklılıklar olduğu ve tepenin eğimine bağlı olarak farklılaştığı görülmüştür. Görece daha geniş düzlüklerde tepelik alanlar olması durumunda yine doruk ivme değerlerinde dikkate değer değişimler olduğu, ancak eğime bağlı etkinin geniş düzlüğe sahip alanlarda azaldığı gözlemlenmiştir. Gerçek deprem ivme kayıtlarıyla yapılan çalışma sonuçlarında farklılıklar olsa da topoğrafya eğiminin değişimiyle sonuçlardaki doruk ivme değerlerindeki değişim açıkça görülmektedir. Gerçek deprem ivme kaydı ile sentetik ivme kayıtları kullanılarak yapılan dinamik analiz sonuçlarındaki farklılığın, frekans içeriğinin farklılık göstermesi ve bunun farklı zemin özelliklerine etkisinin değişkenliğiyle ilişkili olabileceği düşünülmektedir.

Tüm sonuçlar, modelde yüzey topoğrafyasının dikkate alınmamasının dinamik analiz sonuçlarında değişime sebep olabilecek önemli bir faktör olduğunu açıkça göstermektedir. Özellikle tepe, vadi gibi belirgin topoğrafik farklılıkların bulunduğu ortamlarda yapılacak dinamik analiz çalışmalarının topoğrafyanın da modele mutlaka eklenerek 3-B olarak yapılmasının önemli olduğu ve sonuçlar üzerinde kayda değer değişikliklere sebep olabileceği görülmektedir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçların literatürdeki diğer çalışmalardan elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu görülmektedir.

Tüm zemin türleri, ivme kayıtları ve her türlü zemin modelinin tek bir çalışmada değerlendirilmesi mümkün olmadığından, bu çalışma belirlenen zemin parametreleri, kullanılan örnek ivme kayıtları ve modellerle sınırlı tutulmuştur. Yapılan dinamik analizler bu parametrelerle gerçekleştirilmiş ve sonuçlar buna göre elde edilmiştir. İleride yapılması düşünülen çalışmalarda farklı zemin parametreleri ve farklı ivme kayıtları kullanılarak daha farklı topoğrafik zemin türlerinin incelenmesi konunun daha da genişletilmesini sağlayacaktır.

### Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

### Kaynaklar (References)

- [1] K. Bashir, R. Debnath, and R. Saha, "Estimation of local site effects and seismic vulnerability using geotechnical dataset at flyover site Agartala India," *Acta Geophysica*, vol. 70, no. 3, pp. 1003-1036, 2022. doi:10.1007/s11600-022-00753-3
- [2] A. Doğan, "Yer tepkisinin üç boyutlu sonlu eleman yöntemiyle belirlenmesi," Doktora Tezi, Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2021.
- [3] H. Mittal, Kamal, A. Kumar, and S. K. Singh, "Estimation of site effects in Delhi using standard spectral ratio," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 50, pp. 53-61, 2013. doi:10.1016/j.soildyn.2013.03.004
- [4] E. Şafak, "Local site effects and dynamic soil behavior," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 21, no. 5, pp. 453-458, 2001. doi:10.1016/S0267-7261(01)00021-5
- [5] M. K. Koçkar and H. Akgün, "Evaluation of the site effects of the Ankara basin, Turkey," *Journal of Applied Geophysics*, vol. 83, pp. 120-134, 2012. doi:10.1016/j.jappgeo.2012.05.007.
- [6] A. Boominathan, G. R. Dodagoudar, A. Suganthi, and R. Uma Maheswari, "Seismic hazard assessment of Chennai city considering local site effects," *Journal of Earth System Science*, vol. 117, no. 2, pp. 853-863, 2008. doi:10.1007/s12040-008-0072-4
- [7] A. Kandilarov, K. Atakan, J. Havskov, and D. Gospodinov, "An investigation of the significance of local site effects in Plovdiv, Bulgaria," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 7, no. 1, pp. 181-198, 2009/02/01 2009. doi:10.1007/s10518-008-9091-4
- [8] P. Moczo *et al.*, "Key structural parameters affecting earthquake ground motion in 2D and 3D sedimentary structures," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 16, no. 6, pp. 2421-2450, 2018/06/01 2018. doi:10.1007/s10518-018-0345-5
- [9] P. Pelekis, A. Batilas, E. Pefani, V. Vlachakis, and G. Athanasopoulos, "Surface topography and site stratigraphy effects on the seismic response of a slope in the Achaia-Ilia (Greece) 2008 Mw6. 4 earthquake," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 100, pp. 538-554, 2017.
- [10] M. E. Haşal, "Topoğrafik düzensizliklerin zemin büyütmesine etkisi," Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Mühendisliği Programı, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009.
- [11] B. Ruan, K. Zhao, S.-Y. Wang, G.-X. Chen, and H.-Y. Wang, "Numerical modeling of seismic site effects in a shallow estuarine bay (Suai Bay, Shantou, China)," *Engineering Geology*, vol. 260, p. 105233, 2019. doi:10.1016/j.enggeo.2019.105233
- [12] A. Beliceli, "Eskişehir yerleşim yeri zemininin büyütme etkisinin makaslama dalga hızına (Vs) bağlı olarak belirlenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [13] R. Jibson, "Summary of research on the effects of topographic amplification of earthquake shaking on slope stability," US Geological Survey, California, 1987.
- [14] P. Y. Bard and M. Bouchon, "The seismic response of sediment-filled valleys. part 1: The case of incident SH waves," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 70, pp. 1263-1286, 1980a.
- [15] P. Y. Bard and M. Bouchon, "The seismic response of sediment-filled valleys. part 2: The case of incident P and SV waves," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 70, pp. 1921-1941, 1980b.
- [16] P. Y. Bard and M. Bouchon, "The two-dimensional resonance of sediment-filled valleys," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 75, pp. 519-541, 1985, doi:10.1785/BSSA0750020519
- [17] P. Y. Bard and J. C. Gariel, "The seismic response of two-dimensional sedimentary deposits with large vertical velocity gradients," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 76, pp. 343-366, 1986.
- [18] M. Rassem, A. Ghobarah, and A. C. Heidebrecht, "Engineering perspective for the seismic site response of alluvial valleys," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 26, no. 4, pp. 477-493, 1997. doi:10.1002/(SICI)1096-9845(199704)26:4<477::AID-EQE659>3.0.CO;2-T

- [19] M. Rassem, A. C. Heidebrecht, and A. Ghobarah, "A simple engineering model for the seismic site response of alluvial valleys," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 14, no. 3, pp. 199-210, 1995. doi:10.1016/0267-7261(94)00040-N
- [20] B. Poursartip, A. Fathi, and L. F. Kallivokas, "Seismic wave amplification by topographic features: A parametric study," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 92, pp. 503-527, 2017. doi:https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.10.031
- [21] R. Derghoum and I. Derghoum, "Nonlinear finite element analysis for seismic site amplification assessment of urban slopes showing surface geology and topography irregularities," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 166, p. 107729, 2023. doi:10.1016/j.soildyn.2022.107729
- [22] Z. Zhang, J.-A. Fleurisson, and F. L. Pellet, "A case study of site effects on seismic ground motions at Xishan Park ridge in Zigong, Sichuan, China," *Engineering Geology*, vol. 243, pp. 308-319, 2018. doi:10.1016/j.enggeo.2018.07.004
- [23] J. Baron, I. Primofiore, P. Klin, G. Vessia, and G. Laurenzano, "Investigation of topographic site effects using 3D waveform modelling: amplification, polarization and torsional motions in the case study of Arquata del Tronto (Italy)," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 20, no. 2, pp. 677-710, 2022. doi:10.1007/s10518-021-01270-2
- [24] T. A. Burkhart, D. M. Andrews, and C. E. Dunning, "Finite element modeling mesh quality, energy balance and validation methods: A review with recommendations associated with the modeling of bone tissue," *Journal of Biomechanics*, vol. 46, no. 9, pp. 1477-1488, 2013. doi:10.1016/j.jbiomech.2013.03.022
- [25] C. A. Felippa, "Introduction to finite element methods," *University of Colorado*, vol. 885, 2004.
- [26] A. Javidinejad, "FEA Practical Illustration of Mesh-Quality-Results Differences between Structured Mesh and Unstructured Mesh," *ISRN Mechanical Engineering*, vol. 2012, p. 168941, 2012. doi:10.5402/2012/168941
- [27] A. Nemade and A. Shikalgar, "The Mesh Quality significance in Finite Element Analysis," *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, vol. 17, no. 2, pp. 44-48, 2020.
- [28] J. R. Rice, "The Aspect Ratio Significant for Finite Element Problems," Purdue University, Department of Computer Science Technical Reports. Paper 454. Rep No: 85-535, 1985.
- [29] M. Hudson, I. M. Idriss, and M. Beikae, "User manual for Quad4m: A computer program to evaluate the seismic response of soil structures using Finite element procedures and incorporating a compliant base," University of California, California, User's Manual 1994.
- [30] Ü. Dikmen, "Zeminlerde sismik dalga sönümünün kesirsel türev yaklaşımı ile modellenmesi," Doktora tezi, Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2004.

This is an open access article under the CC-BY license

