



## Determination of spectral aggravation factors in alluvial basins by nonlinear numerical analyses

Bilal Özasan\*<sup>1</sup>, Recep İyisan<sup>2</sup>

Istanbul Technical University, Faculty of Civil Engineering, Department of Civil Engineering, 34469, Maslak, Istanbul, Turkey

### Highlights:

- 2D nonlinear analysis
- Finite Difference Method
- Complex site effect
- Numerical Analysis by FLAC3D

### Keywords:

- Spectral aggravation
- Basin effect
- 2D site response
- FLAC3D
- Nonlinear soil properties

### Article Info:

Research Article  
Received: 21.10.2020  
Accepted: 22.05.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.814370

### Acknowledgement:

The authors gratefully acknowledge to the financial support provided by TUBITAK under the grant 218M959.

### Correspondence:

Author: Bilal Özasan  
e-mail: ozasanb@itu.edu.tr  
phone: +90 505 910 8225

### Graphical/Tabular Abstract

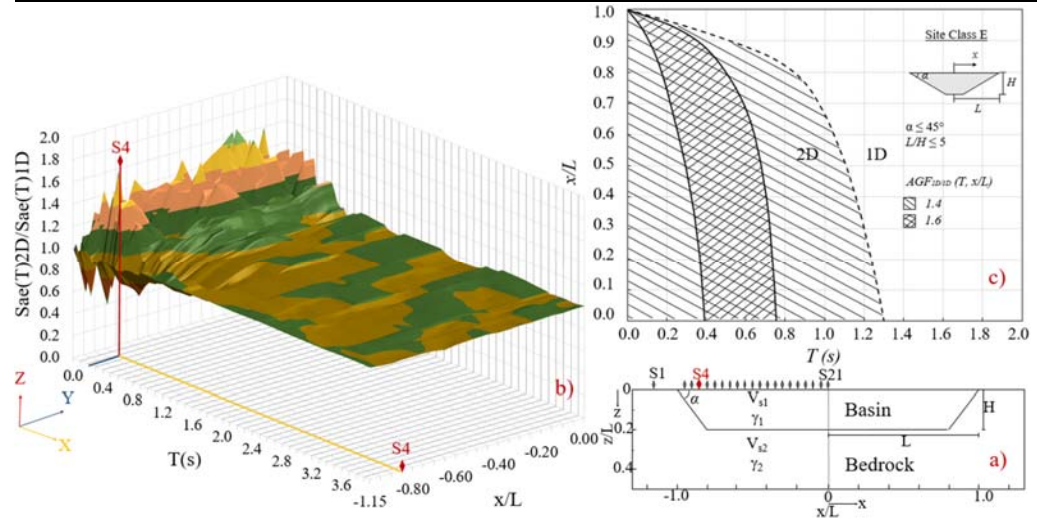


Figure A. The methodology of the analyses to evaluate Spectral Aggravation Factor in the research

**Purpose:** In this study, one (1D) and two-dimensional (2D) dynamic analyses were performed with different bedrock acceleration records by using idealized symmetrical alluvial valley models to research the effects of geotechnical site conditions and the frequency content of strong ground motions on the site amplification.

### Theory and Methods:

The method of the study contains computing 1D and 2D response spectra for several different ground motions on defined alluvial basin models and investigate the effects of lateral discontinuities with compared smoothed mean spectra. The major effects of geotechnical site conditions and bedrock inclination of basin edge were investigated for different site classes defined by seismic codes. Geotechnical properties of the soil layers in the models were defined as site classes ZD and ZE that mostly needed site-specific dynamic analysis by classification of Turkish Building Earthquake Code 2018 provisions. In the basin models, the soil layers were assumed to extend horizontally and limited with basin edges having a constant slope. The acceleration time histories and acceleration spectrums were calculated at different points on the ground surface using 1D and 2D analyses by excitation of 22 strong ground motions.

### Results:

The absolute acceleration spectrum values and amplifications were calculated on the surface of the basin. Thus, aggravation factors of the basin effect could be derived depending on location and periods as  $AGF_{2D/1D}(T, x/L)$ . 2D responses especially on the high frequencies are mostly larger on the basin edge and between the 0.1 and 1 second periods, the curve of 2D spectra is ordinarily on the top of the curve of the 1D response due to the focalization of the narrow basin structure. The results of the 2D and 1D dimensional dynamic analyses were compared, and the variations of the amplifications with the distance from the basin edges were investigated.

### Conclusion:

The reciprocation of the surface waves which are derived from both edges of the basin and superposition of the progressive motions into the center of the basin, trigger to produce larger amplification particularly at lower frequencies in 2D analysis compared to results of the 1D soil column approach.



## Alüvyon havzalar için spektral şiddet faktörlerinin doğrusal olmayan sayısal analizlerle belirlenmesi

Bilal Özasan\*<sup>1</sup>, Recep İyisan<sup>2</sup>

İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- İki boyutlu (2D) ve bir boyutlu (1D) zemin modellerinde sahaya özel ivme spektrumlarının karşılaştırılması
- Alüvyon havzalarda konuma ve periyoda bağlı spektral şiddet faktörlerinin tanımlanması
- Zaman tanım alanında sonlu farklar yöntemi ile zemin modellerinin doğrusal olmayan analizi

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 21.10.2020

Kabul: 22.05.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.814370

### Anahtar Kelimeler:

Spektral şiddet faktörü,  
havza etkisi,  
2D saha tepkisi,  
FLAC3D,  
doğrusal olmayan dinamik  
analizler

### ÖZ

yansıması, dönüşümü, üst üste binmesi ve yüzey dalgalarıyla olan girişiminin kuvvetli yer hareketlerine etkisi araştırılmıştır. Yarı sonsuz ortamda yatayda sürekli olmayan tabakalaşma nedeniyle meydana gelen karmaşık saha davranışı Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 hükümlerinde zayıf olarak nitelendirilen ve analize ihtiyaç duyulan ZD ve ZE zemin sınıflarında sonlu farklar yaklaşımı kullanılarak bir boyutlu (1D) ve iki boyutlu (2D) doğrusal olmayan saha tepki analizleriyle incelenmiştir. Farklı seviyelerdeki 22 adet deprem ivme kaydı anakaya hareketi olarak modellere etkilerek yüzeye eşit aralıkla sıralanan çok sayıda yapay kayıtçılarla ivme zaman geçmişleri toplanmış, tüm noktalarda ivme spektrumları ve zemin büyütme belirlenmiştir. Sonuç olarak dar havzalar için bir ve iki boyutlu dinamik analizlerle elde edilmiş mutlak ivme spektrumlarının oranıyla her bir noktada periyoda (T) ve havza kenarından boyutsuz mesafeye (x/L) bağlı konuma göre tanımlanan ve henüz yürürlükteki yönetmeliğimizde olmayan Spektral Şiddet Faktörleri (AGF2D/1D) hesaplanmış grafiklerle kullanıma ve bilimsel tartışmaya sunulmuştur. Sonuçların, havza yapısındaki sahalarda yapılara gelecek deprem yüklerini belirleyen spektrumların güvenilir hesaplanmasıyla beklenmeyen hasar ve kayıpların önüne geçilmesinde yardımcı olacağı, deprem haritalarının geliştirilmesine, güvenli yerleşme ve yapılaşmanın sağlanmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

## Determination of spectral aggravation factors in alluvial basins by nonlinear numerical analyses

### H I G H L I G H T S

- Comparison of two-dimensional (2D) and one-dimensional (1D) site-specific acceleration spectra
- Determination of spectral aggravation factors in alluvium basins depending on location and period
- Nonlinear analysis of soil models with finite difference method in time domain

### Article Info

Research Article

Received: 21.10.2020

Accepted: 22.05.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.814370

### Keywords:

Spectral aggravation,  
basin effect,  
2D site response,  
FLAC3D,  
nonlinear dynamic analysis

### ABSTRACT

In this study, it was investigated how strong ground motions are affected by the multiple reflections, transformation, superposition, and interference with surface waves and trapped seismic waves in the near-surface soft soil layer due to the bedrock inclination in narrow alluvial basins. One and two-dimensional (1D and 2D) dynamic analyses were performed to investigate the complex site effects in narrow alluvial basins that have soft soil conditions considering soil nonlinearity and changing geometrical features by numeric models simultaneously. The site classes were defined as ZD and ZE that mostly needed site-specific analysis by classification of Turkish Building Earthquake Code 2018 provisions. The response spectrums and amplifications were calculated under different levels of earthquake excitations. As a result, Spectral Intensity Factors (AGF2D/1D), which are defined for each point depending on the period (T) and the dimensionless distance from the basin edge (x/L), were calculated with the ratio of absolute acceleration spectra of 1D and 2D analyses. Thus, it is considered that the results will guidance to prevent unexpected damages and losses by calculating reliably the spectra that determine the earthquake loads on the structures, contribute to the development of earthquake maps, and ensure safe urbanization and construction.

\*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : \*ozaslanb@itu.edu.tr, iyisan@itu.edu.tr / Tel: +90 505 910 8225

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yerel zemin koşulları bir yapı sahasında oluşacak kuvvetli yer hareketinin genliğini, frekans içeriğini ve süresini önemli derecede değiştirebilmektedir. Zemin etkilerinin araştırıldığı saha davranış analizlerinde zemin sınıfı, kayma mukavemeti değişkenleri ve doğrusal olmayan gerilme-şekil değiştirme özelliklerinin yanında sahadaki anakaya derinliği, anakaya üzerindeki zemin tabakalarının kalınlığı, zemin tabakalarının yatay doğrultudaki süreksizliği ve yüzey topoğrafik özellikleri detaylı inceleme gerektiren başlıca faktörlerdir. Zemin tabakalarının düzenli yarı sonsuz kabul edilebileceği sahalarda oluşturulan tek boyutlu modellerle zemin cinsi ve tabaka kalınlığının dinamik davranışa etkileri incelenebilmektedir. Ancak sürekli yarı sonsuz ortam kabulüne uymayan, zemin tabakalarını sınırlayan anakayanın sebep olduğu iki veya üç boyutlu ortamın etkisi pek çok modelle tanımlanmaya çalışılsa da halen araştırılmaktadır.

Yerel zemin koşullarının yer hareketi üzerindeki etkisini inceleyen çalışmalarda arazi ve laboratuvar deneyleriyle zeminin fiziksel, mekanik ve dinamik özellikleri belirlenmekte, zemin tabakalaşması ve havza (basen) geometrisinin büyütme etkileri dinamik sayısal analizlerle parametrik çalışmalarla incelenmektedir. Yapılan çalışmalarda zemin kesitinde yer alan tabakaların görece daha rijit kayaç tabakalarıyla kesilerek süreksizliğe uğradığı sahalarda havza olarak ifade edilmektedir. Havza yapısındaki sahalarda, depremin oluşturduğu sismik dalgaların havzanın belirli bölgelerinde odaklandığı ve karmaşık bir şekilde ortama dağıldığı sonucuna ulaşılmıştır. İlk olarak Aki ve Larner [1] tarafından yapılan çalışmalarla dalgaların yansıma ve kırılma sonucu etkileşimi incelenmiş, önerdikleri yöntemin elastik ortamların modellenmesinde kolaylık sağladığı görülmüştür. Alüvyon vadilerde P, SV ve SH dalgalarının etkisinde meydana gelecek dinamik davranışı inceleyen King ve Tucker [2], Bard ve Bouchon [3] çalışmalarını, zemin büyütmesinin fiziksel temelinin anlaşılması için konu üzerinde Trifunac [4] tarafından yapılan araştırmalar izlemiştir. Zhang ve Papageorgiou [5] ve Kawase [6], 1995 Kobe Depremi'nde meydana gelen hasarın belirli bir bölgede yoğunlaşmasına basen ortasına doğru yatay ilerleyen Rayleigh yüzey dalgalarıyla düşey ilerleyen basınç dalgası (P) ile yatay ve düşey polarize olmuş kayma dalgalarının (SH, SV) basen kenarında girişime uğraması sonucunda, yüzey hareketi şiddetinin artmasının yol açtığı hipotezini savunmuşlardır. Daha sonra ikinci boyutun tek boyutlu analizle elde edilen büyütme değerlerine ek büyütme özelliklerinin dikkate alındığı çalışmalarda, Euroseistest kapsamında Marka ve Chavez-Garcia [7], havza koşullarının incelenmesi gerektiğini savunan, sismik yansıma ve kırılma deneyleriyle inceledikleri gerçek havza modellerinde kenar eğimi ve yüzeyde oluşan spektral büyütmelerin ilişkisi olduğunu vurgulayan Galegoti vd. [8], İyisan ve Haşal [9], Khanbabazadeh ve İyisan [10], Chen vd. [11], Abraham vd. [12], Makra vd. [13], Asimaki ve Mohammadi [14], Khanbabazadeh vd. [15], Riga vd. [16], Kristek vd. [17], Subaşı vd. [18], çalışmalar

gerçekleştirmişlerdir. Zhu vd. [19], Ozaslan vd. [20, 21], Khanbabazadeh vd. [22] şiddet faktörü değerlerinin bağlı olduğu parametreleri Sonlu Farklar yöntemiyle doğrusal olmayan analizlerle araştırmışlardır. Araştırılan etkilerin ortaya konması her ne kadar zor olsa da var oldukları hemen hemen kesindir. Günümüzde basen etkileri deprenselliğin fazla olduğu ülkelerde yapı tasarım kriterlerine dahil edilmiş ancak Türkiye'nin de içinde olduğu pek çok ülkede yönetmeliklerde henüz yer almamaktadır. Ülkemizde yürürlükte olan yeni deprem yönetmeliğinde coğrafi konuma bağlı olarak harita ivme değerleri verilmekte, yerel zemin etkisi dikkate alınarak tasarım ivme spektrumları belirlenmektedir. Yönetmelik hükümlerince ZA, ZB ve ZC sınıfları dışında kalan zeminlerde dinamik durumda doğrusal olmayan davranışın zaman tanım alanında yapılan analizlerle belirlenmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Ancak zeminin tabakalı yapısının, ortamda mevcut yer altı ve yüzey süreksizliklerinin etkisinin, hareketi oluşturan cisim ve yüzey dalgalarının aynı anda incelenebilmesi için iki ve üç boyutlu zemin dinamik analizlerinin yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada depreme dayanıklı yapı tasarımında kullanılacak elastik tasarım spektrumlarının belirlenmesinde ivme değerlerine yerel zemin koşulları ve yanal süreksizliklerin etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla ilgili sahada yarı sonsuz zemin ortamının bir boyutlu (1D) modellerinde belirlenemeyen kenar etkilerinin ve etkilerin yoğunlaştığı bölge sınırlarının, iki (2D) veya üç boyutlu (3D) modellerle yapılacak analizlerle ortaya çıkarılması amaçlanmıştır. Parametrik çalışma için sonlu eleman ağlarıyla ayrıklaştırılan zemin ortamında gerilme dalgalarının ilerleyişini fiziksel temel hareket denklemleri ve birim deformasyona bağlı olarak değişen malzeme bünye bağıntılarını bir arada kullanarak sonlu farklar yöntemiyle hesaplayan FLAC3D [23] yazılımında kurulan dinamik analizler gerçekleştirilmiştir.

## 2. HAVZA MODELLERİ VE ANALİZ YÖNTEMİ (BASIN MODELS AND THE METHOD OF ANALYSIS)

Serbest saha tepki analizlerinde yaygın yaklaşımdaki bir boyutlu kabule uymayan havza yapısındaki modellerin, karmaşık tabakalaşma nedeniyle geometrik özelliklerden ve rijitlik farkından kaynaklanan eğimli tabaka geçişlerinde sismik dalgaların kırılması, yansıması, odaklanması ve ötelenmesi, serbest sahanın yüzeyindeki her konum ve her periyot için yüzey ivmelerinin farklılaşmasına neden olur. Çalışmanın bu bölümünde, gerçekleştirilen doğrusal olmayan sayısal analizlerde model boyutları, ileri sınır koşulları, malzemelerin bünye modeli özellikleri, kayma modülü ve sönümlenme ilişkileri ve şiddet faktörü hesaplamalarında izlenen yöntem açıklanmıştır.

### 2.1. Havza Geometrisi ve Sınır Koşulları (Basin Geometry and Boundary Conditions)

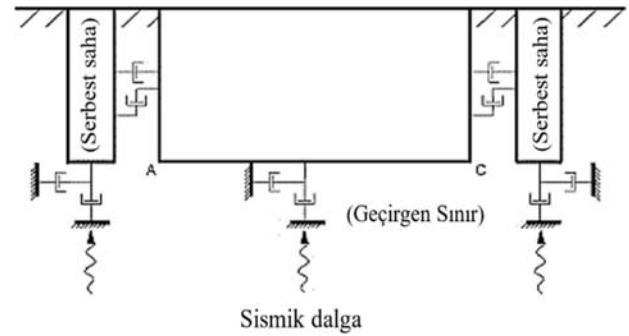
Alüvyon havzalarda yüzeydeki kuvvetli yer hareketinin değişimini incelemek için tabakaların bir boyutlu zemin kolonu olarak tanımlandığı daha basit serbest saha tepki analizleri, üstteki yumuşak zeminin eğimli anakaya ile

sınırlandırıldığı iki boyutlu analizlerle deprem dalgalarına ait yüzey kayıtlarının spektral ivme değerleri karşılaştırılarak incelenmiştir. Bu amaçla anakaya ile üzerinde yer alan yumuşak zemin katmanları arasındaki ara yüzün eğimi  $\tan\alpha=1/1$ ,  $1/2$  ve  $1/4$  (diğer bir deyişle yatayla  $45^\circ$ ,  $26^\circ$  ve  $14^\circ$  açı yaptığı) kabul edilerek yerel zemin sınıfı ZD ve ZE olarak tanımlanan hipotetik modellerde tekrarlı analizler yapılmıştır. Yönetmelikte üst 30 m kalınlık için kayma dalgası hızı değerleri ( $V_{s30}$ ) ZD sınıfı için 180 m/s ile 360 m/s arasında, ZE sınıfı zeminlerde ise 180 m/s değerinden daha küçük olarak verilmektedir. Sadece kenar etkisinin hakim olduğu havzaların incelendiği daha önceden yapılan çalışmalarda incelenen saha modellerinin genişliği, derinliğin en az 10-12 katı olarak alınmıştır [24]. Tamamlanan araştırmalardan bağımsız olarak bu çalışma, kapalı havza tabanındaki eğimli anakayanın nispeten birbirine yakın olduğu sahalarda yumuşak zemin tepkisindeki şiddetlenmeyi gözlemlemeyi amaçlamaktadır. Bu amaçla, dar havza olarak tanımlanan sahaları inceleyen çalışmada model genişliğinin ( $2L$ ) derinliğine ( $H$ ) oranı  $2L/H \leq 10$  olarak seçilmiş, basınç ( $P$ ) ve kayma ( $S$ ) dalgalarının kırılma, yansımaya ve dönüşüm özelliklerine bağlı kenar etkilerinin yanı sıra yüzey ve cisim dalgalarının süperpozisyonlarını da incelemek mümkün olmuştur. Böylece benzeştirilmiş simetrik havzaların genişliği 1000 m derinliği 100 m olarak seçilmiş ve Şekil 1 ile geometrik değişkenler açıklanmıştır. Bu çalışmada dalga yayılımının doğrulaması ve hassaslık testleri hariç 1200 sayısını aşan analiz yapılmış, transfer fonksiyonları ve spektral ivmeler incelenerek konuma bağlı tasarım spektrumları yorumlanmıştır.

Geoteknik mühendisliğinde karşılaşılan tüm problemler yarı-sonsuz zemin uzayında incelenmekte ve çözümler Sonlu Eleman veya Sonlu Farklar yöntemleriyle hesaplama yapan yazılımlarda, ayrıştırılarak benzeştirilen sonlu ortam modellerinde gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle, sorunun çözümüne ilişkin sınır koşulları çok önemlidir ve sonsuz saha koşullarında incelenen dalga yayılımına uygun olarak tanımlanması gerekmektedir. Dinamik analizde, sonlu model sınırlarında oluşacak yansımaları engellemek, dalgaların model içinde hapsolmesini önlemek için geliştirilmiş ileri sınır koşulları çalışmadaki modellerde uygulanmış ve Şekil 2'de verilmiştir.

Şekilden de görüleceği üzere modellerin altında Lysmer ve Kuhlemeyer [25] tarafından geliştirilen "Quiet Boundary" olarak tanımlanan, aşağı yönde ilerleyen dalgaların geri

dönmesini engelleyen viskoz sınır koşulu tanımlanmıştır. Bu türden enerji soğuran sınırların etkinliği, White vd. [26], Kunar ve Rodriguez-Ovejero [27] çalışmalarında hem sonlu fark hem de sonlu eleman modellerinde gösterilmiştir. Modelin yanal sınırlarında, ana eleman ağımsız viskoz sönümleyicilerle serbest alan elemanlarına bağlayarak sürekli sonlu fark ağımsız oluşumunu sağlayan Cundall vd. [28] tarafından geliştirilen "Free Field Boundary" sınır koşulları kullanılmıştır. Her iki koşul, ortamda ilerleyen cisim ve kayma dalgalarını oluşturan normal gerilme ve kayma gerilmelerinin model sınırları boyunca mevcut malzemenin özelliklerine uyumlu olarak viskoz sınırlarda türetilen ve Eş. 1-5'te verilen, karşıt normal ve kayma gerilmeleri ile dengelenmesini, bu sayede sonsuz ortamın en uygun modelinin kurulmasını sağlamaktadır. Yanlarda tanımlı "Free-Field" yani serbest ağımsız ürettiği kuvvetlerin hesabı aşağıda verilen bağıntılarla yapılmaktadır. (Eş. 1-Eş. 5)



Şekil 2. Sınır koşulları ve giriş hareketinin uygulanması (Boundary conditions and application of input motion)

$$t_n = -\rho C_p v_n \quad (1)$$

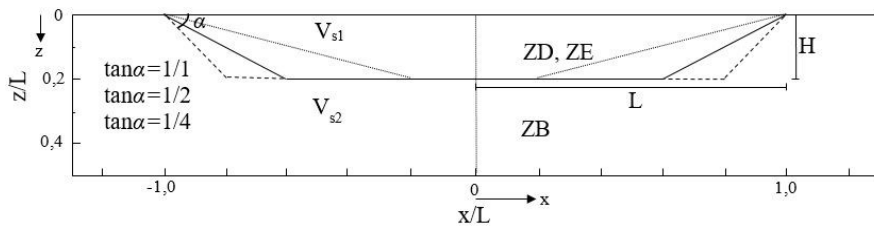
$$t_s = -\rho C_s v_s \quad (2)$$

$t_n$ ,  $t_s$  türetilen karşıt normal ve kayma gerilmeleri,  $\rho$  kütle yoğunluğudur,  $C_p$  ve  $C_s$  basınç ( $P$ ) ve kayma ( $S$ ) dalga hızlarıdır,  $v_n$  ve  $v_s$  yanal sınırdaki malzeme ortam hızının normal ve kayma bileşenleridir.

$$F_x = -\rho C_p (v_x^m - v_x^{ff}) A + F_x^{ff} \quad (3)$$

$$F_y = -\rho C_s (v_y^m - v_y^{ff}) A + F_y^{ff} \quad (4)$$

$$F_z = -\rho C_s (v_z^m - v_z^{ff}) A + F_z^{ff} \quad (5)$$



Şekil 1. Hipotetik havza modellerinin geometrik özellikleri ve sayısal analiz değişkenleri (Geometric properties of the basin models and variables of the numerical analysis)

Bağıntılarda,  $F_x$ ,  $F_y$  ve  $F_z$  olarak verilen değerler x, y ve z doğrultularındaki kuvvetleri,  $\rho$  malzemenin yoğunluğu, A serbest sınır “Free-Field” ağı üzerindeki düğüm noktalarının etkili alanıdır.  $C_s$  ve  $C_p$  yan sınırlara ulaşan P ve S dalgalarının hızlarıdır.  $v_x^m$ ,  $v_y^m$ ,  $v_z^m$ , modeli oluşturan sonlu fark ağının yan sınırlarında bulunan düğüm noktalarının x, y, z eksenlerindeki hızlarıdır.  $v_x^{ff}$ ,  $v_y^{ff}$ ,  $v_z^{ff}$ , “Free-Field” ağı üzerinde bulunan düğüm noktalarının x, y, z eksenlerindeki hızlarıdır.  $F_x^{ff}$ ,  $F_y^{ff}$ ,  $F_z^{ff}$  yan sınırlar boyunca düğüm noktalarına “Free-Field” ağındaki elemanlarda oluşan  $\sigma_{xx}^{ff}$ ,  $\sigma_{yy}^{ff}$ ,  $\sigma_{zz}^{ff}$  gerilmelerinden gelen kuvvetleri göstermektedir.

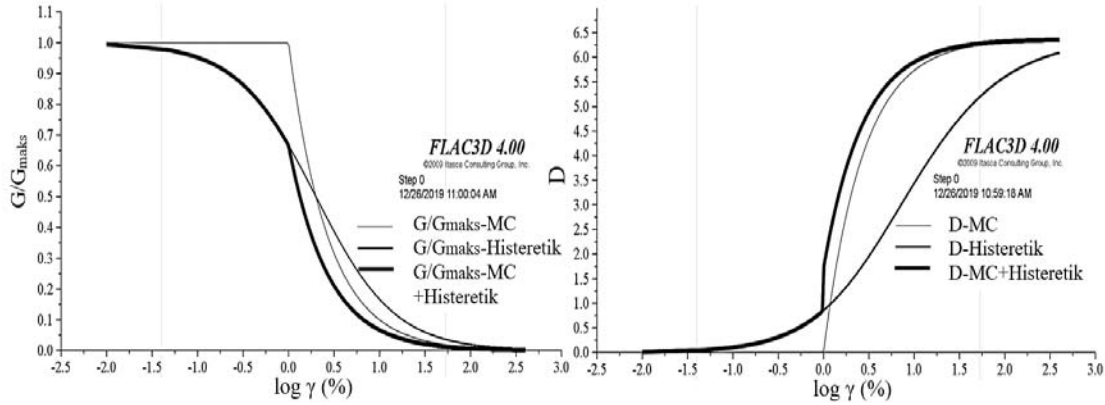
## 2.2. Malzeme Özellikleri ve Sönümleme (Material Properties and Damping)

Havzalarda saha davranışını araştırmak için oluşturulan modellerde zemin sınıfları TBDY 2018 hükümlerine göre ZD ve ZE olarak belirlenmiş, deprem hareketinin havza tabanında modele giriş yaptığı ankayanın kayma dalgası hızları 760 m/s değerinden büyük olarak tanımlanmıştır. Zemin tabakalarının, kayma dalgası hızı ( $V_s$ ), dinamik kayma modülü (G), hacimsel sıkışma modülü (K), yüzeyden 30 m derinliğe kadar tabakaların ortalama kayma dalgası hızları ( $V_{s30}$ ), Poisson oranları ( $\nu$ ), birim hacim ağırlıkları ( $\gamma$ ) ve zeminin kayma mukavemeti parametreleri ( $c$ ,  $\phi$ ) sunulmuştur. Zaman tanım alanında gerçekleştirilen sayısal analizlerde deprem girdi hareketinin, sonlu ağdaki her bir elemanda ve yüklemenin her anının alt adımlarında deformasyon seviyesine bağlı zeminlerin rijitliğindeki değişim dikkate alınmıştır. Oluşan deformasyon seviyesine bağlı olarak düşük şekil değiştirme değerlerinde kayma

modülünün azalım eğrisi ve çevrimsel sönümleme eğrilerinden oluşan histeretik model, yüksek deformasyonlarda ise zemin malzemelerinin plastik deformasyonlarını Mohr-Coulomb modeli ile hesaplamalara dahil edebilen bünye modellerinin deformasyona bağlı kombinasyonu kullanılmıştır. Histeretik sönüm ve Mohr-Coulomb modelinin kombinasyonu Şekil 3’te verilmiştir.

Bu sayede doğrusal olmayan dinamik analizlerde ek sönümlemeye gerek kalmadan homojen ve izotrop olmayan zemin ortamındaki gerilme dalgalarının oluşturduğu yüzey hareketleri incelenebilmiştir. Modellerde tanımlanan zeminlerin malzeme özellikleri ve incelenen havza kenarındaki anakaya eğimleri Tablo 1’de verilmiştir. Analizde kullanılan Ishibashi ve Zhang [29] tarafından tanımlanan histeretik sönümleme eğrileri Şekil 4’te verilmiştir. Seçilen azalım eğrileriyle saha tepkisi hesaplarında zeminlerin plastisite indisleri ve derinlikle efektif gerilmelerde meydana gelen artışlar dikkate alınmıştır.

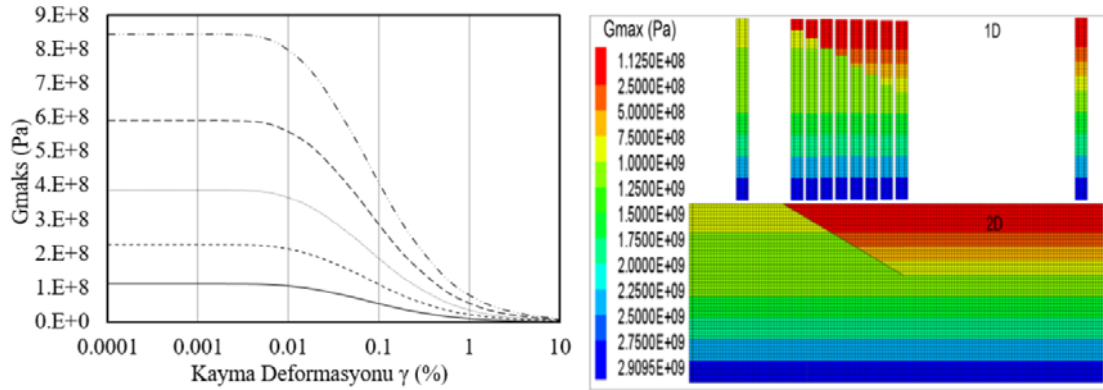
Sayısal analizlerde histeretik modeller, yalnızca geniş aralıklı verilerin tablo formlarında hesap adımlarına çağrılmasıyla dahil edilmektedirler. Ancak, kullanılan FLAC3D yazılımında modül ve sönümleme değişim eğrilerinin asimtotik fonksiyonlara bağlanmasıyla bütün deformasyon değerlerinde rijitlik ve sönüm hesaplanarak Sonlu Farklar ağındaki elemanların gerilme-şekil değiştirme ilişkisi tanımlanmaktadır. Bu nedenle, tercih edilen modül azaltma modelinin asimtotik fonksiyon katsayıları Eş. 6 ve Eş. 7’de verilmektedir.



**Şekil 3.** Histeretik sönüm ve Mohr-Coulomb modelinin kombinasyonu  
(Combination of Hysteretic damping and Mohr-Coulomb model)

**Tablo 1.** Havza modellerini oluşturan zemin sınıflarının ve anakayanın malzeme özellikleri  
(Material properties of the soil classes and bedrock in constituted basin models)

#	Model	$\tan\alpha$	$V_s$ (m/s)	G (MPa)	K (MPa)	$V_{s30}$ (m/s)	$\nu$	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	C (kPa)	$\phi$ (°)
ZD	M11	1/1	250-650	100-850	330-1950	280	0,30-0,35	18-20	100-120	5
	M12	1/2								
	M13	1/4								
ZE	M21	1/1	150-550	35-550	130-1180	170	0,32-0,38	16-18	60-80	5
	M22	1/2								
	M23	1/4								
ZB	-	-	750-1200	1200-3000	2000-4800	-	0,25	22	-	-



Şekil 4. Zemin alt tabakaları için kayma modülünün deformasyona ve derinliğe bağlı değişimi  
(The change of shear modulus for soil sublayers depending on deformation and depth)

$$L = \log_{10}(\gamma) \quad (6)$$

$\gamma$  kayma şekil değiştirmesi ve asimptotik fonksiyon  $M_s$ ,

$$M_s = a / (1 + \exp(-(L - x_0)/b)) \quad (7)$$

$\alpha$ ,  $b$  ve  $x_0$  fonksiyon parametreleri olmak üzere,  $\alpha=1,060$ ,  $b=0,450$  ve  $x_0=1,062$  sabitleriyle tanımlanan “Sigmoidal model 3” asimptotik fonksiyonu kullanılmıştır.

### 2.3. Kuvvetli Yer Hareketlerinin Özellikleri (Strong Ground Motion Properties)

Bir araştırma sahasında beklenen sismik tehlikeye uygun özelliklerde kuvvetli yer hareketlerinin ivme zaman geçmişlerinin seçimi, doğrusal olmayan saha tepki analizlerinde anlamlı sonuçlar elde etmek için çok önemlidir. Herhangi bir sahada meydana gelecek deprem düzeyinin tahmin edilmesi zor bir süreçtir, bu nedenle farklı sismik kodlar, hükümleriyle deprem seçiminde kullanılacak ancak zorunlu olmayan yönlendirici yaklaşımlar önermektedirler. Çalışmada kuvvetli yer hareketinin en büyük yer ivmesi değerine göre düşük ve yüksek seviyeli iki farklı deprem seti oluşturulmuş, sırasıyla 0,2 g ve 0,4 g ivme değerlerinde 11 depremden oluşan setler için yurtiçi ve yurtdışından seçilen toplam 22 adet kuvvetli yer hareketi, deprem kaynak özellikleri ile birlikte Tablo 2'de listelenmiştir.

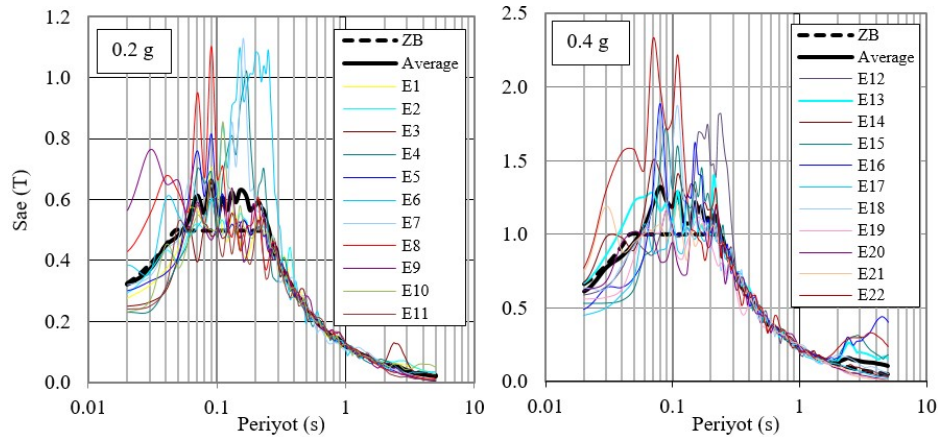
Böylece, havza yapısına sahip sahaların serbest saha davranışının depremin en büyük ivmesine göre değişiminin ne ölçüde olacağı incelenmiş, davranışın hareket seviyesine bağlılığının açıklanması amaçlanmıştır. FEMA P-1051 [30], FEMA P-1050-1 [31] raporlarında yer alan sismik hükümlerde belirtildiği şekliyle spektral eşleşmeye göre seçilen 22 adet deprem, Şekil 5'te E1'den E22'ye kodlanarak verilmiştir. Ayrıca, Akbaş vd. [32] çalışmalarında da vurgulandığı üzere deprem yönetmeliklerinin genelinde sismik tehlike elastik tasarım spektrumu olarak tanımlanırken, tasarım spektrumu ile seçilen kayıtlarla tepki spektrumu arasındaki spektral eşleşme çoğu sismik kodda gereklidir.

### 2.4. Sayısal Analizlerde İzlenen Metod (The Method of Numerical Analysis)

Araştırmada tercih edilen sayısal analiz yöntemi, değişen zemin tabaka şekilleriyle ve doğrusal olmayan bünye modelleriyle, dalga yayılımının eleman ağı boyunca ve model sınırlarında serbest saha koşullarında inceleme imkanı sunan FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua 3D) kullanılmıştır [23]. Yazılımda kullanılan Sonlu Farklar yöntemiyle ayrıklaştırılan modellerde Lysmer ve Kuhlemeyer [25] çalışmalarına uygun olarak izin verilen maksimum birim eleman boyutu belirlenmiş ve sonlu fark ağı oluşturulmuştur. Gerçekleştirilen parametrik analizlerde deprem yönetmeliğinin 16. maddesinde tanımlanmış ZD ve ZE zemin sınıflarında, değişen anakaya eğimlerinin havza yüzeyindeki serbest saha davranışına etkisinin ne olacağı araştırılmıştır. Sayısal analizlerde, şiddet faktörlerini hesaplamada izlenen adımlar Şekil 6'da erilen akış şemasıyla gösterilmiştir. Şekil 6a görselinde 2 boyutlu model ve yüzeyi boyunca eşit aralıklarla yerleştirilen 21 adet yapay kayıtçılar görülmektedir. Devamında b), c) ve d) adlarıyla her bir kayıtçıda ve her periyotta iki boyutlu ve bir boyutlu modellerde hesaplanan ivme spektrumlarının oranıyla belirlenen ve 3 eksenli e) grafiğinde verilen şiddet faktörleri elde edilmiştir. E1 kuvvetli yer hareketi için S4 yapay sismografında elde edilen yüzey hareketi 2D ve 1D analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmış giriş hareketinin tepki spektrumunu  $S_{ae}(T)$ , tüm periyotlar (T) ve her konum ( $x/L$ ) için havza yüzeyi boyunca  $S_{ae}(T)_{2D} / S_{ae}(T)_{1D}$  spektral şiddet faktörleri (AGF) hesaplanmıştır. Şekil 6f ve Şekil 6g, periyot ve konumu ifade eden yatay eksenlere göre en büyük ve en küçük spektral oranlar hakkında ayrıntılı bilgi vermektedir. Bu şekillerden de görülebileceği üzere 1D ve 2D analizlerden elde edilen spektral büyütme farklı periyot aralıklarında farklı değerlerde meydana gelebilmektedirler. Ancak 2D analizlerinde genelde daha yüksek değerlere ulaşılmaktadır. Şekil 6f'de görüldüğü üzere periyodun yaklaşık  $T=1.6$  s ve daha büyük değerlerinde şiddet faktörleri bire yakınsamakta, analiz sonuçları arasındaki fark azalmaktadır. Şekil 6c ve Şekil 6d'de yaklaşık 0.5~1.0 s periyot aralığında tek boyutlu analizlerin daha yüksek büyütme verdiği görülmektedir. Bu durumun nedeni, 1D zemin kolonu ve 2D düzlemin doğal

**Tablo 2.** Analizlerde kullanılan deprem kayıtlarının özellikleri (Features of earthquake records used in analysis)

No	Deprem Adı	İstasyon	Kayıt Bileşeni	Büyükölük Mw	Merkez Üstü Uzaklığı (km)	Kaynak Uzaklığı (km)	Süre (sn)	PGA (g)
E1	Loma Prieta, 1989	Gilroy Array #1	0	6,9	28,6	33,6	40	0,42
E2	Loma Prieta, 1989	Gilroy Array #1	90	6,9	28,6	33,6	40	0,48
E3	Kobe, Japan 1995	Nishi-Akashi	0	6,9	8,7	19,9	41	0,48
E4	Umbria Marche, Italy 1997	Nocera Umbra	0	6,0	11,0	12,5	20	0,47
E5	Parkfield-02, CA 2004	Gold Hill 3W	360	6,0	4,8	9,4	21	0,43
E6	Duzce, Turkey 1999	IRIGM 496	EW	7,1	24,3	28,1	26	0,75
E7	Parkfield-02, CA 2004	Cholame 2E	360	6,0	12,1	14,5	21	0,51
E8	Parkfield-02, CA 2004	Gold Hill 3W	90	6,0	4,8	9,4	21	0,79
E9	L'Aquila, Italy 2009	V.Aterno-Colle Grilli	NS	6,3	4,5	10,3	38	0,52
E10	San Simeon, CA 2003	Templeton	360	6,5	36,6	37,6	47	0,48
E11	Bam, Iran 2003	Abaragh	L	6,6	57,4	57,7	44	0,17
E12	Duzce, Turkey 1999	IRIGM 496	NS	7,1	24,3	28,1	26	1,03
E13	San Fernando, 1971	Pacoima Dam	164	6,6	11,9	17,6	42	1,22
E14	San Fernando, 1971	Pacoima Dam	254	6,6	11,9	17,6	42	1,24
E15	Tabas, Iran 1978	Tabas	L	7,4	55,2	55,5	33	0,85
E16	Tabas, Iran 1978	Tabas	T	7,4	55,2	55,5	33	0,86
E17	Loma Prieta, 1989	Gilroy Array #1	0	6,9	28,6	33,6	40	0,42
E18	Northridge, 1994	Pacoima Dam	194	6,7	20,4	26,9	40	1,29
E19	Parkfield-02, CA 2004	Gold Hill 3W	360	6,0	4,8	9,4	21	0,43
E20	Parkfield-02, CA 2004	Fault Zone 11	90	6,0	9,3	12,3	21	0,60
E21	L'Aquila, Italy 2009	V.Aterno-Colle Grilli	EW	6,3	4,5	10,3	40	0,48
E22	Landers, 1992	Lucerne	260	7,3	44,0	44,6	48	0,73



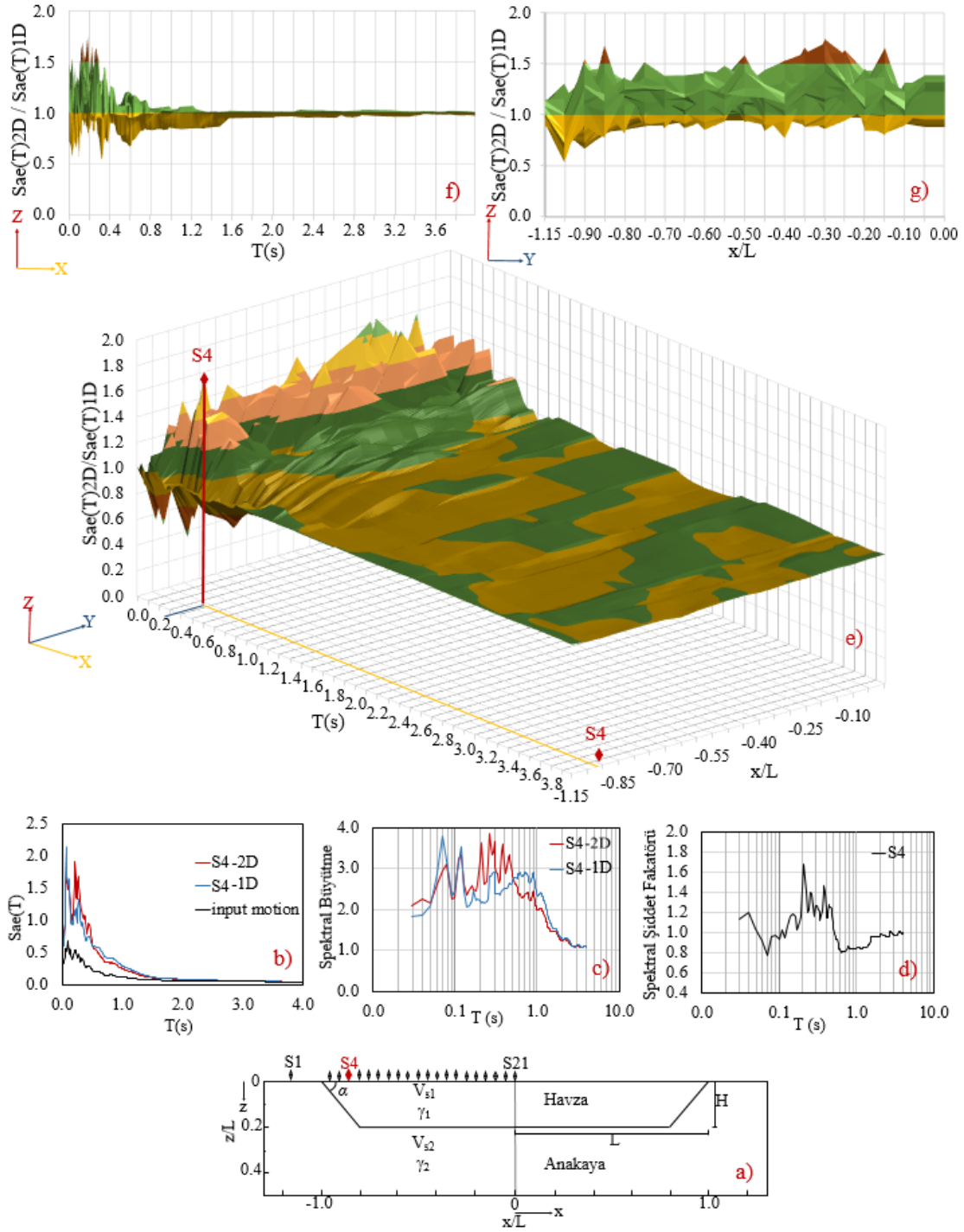
**Şekil 5.** 0,2 g ve 0,4 g değerlerine spektral eşleştirme ile seçilen depremlerin ivme spektrumları ( $\xi=5\%$ )  
(Acceleration spectra of earthquakes selected by spectral matching to 0.2 g and 0.4 g ( $\xi = 5\%$ ))

frekanslarındaki farklılıklar ve kenar etkisinin hakim olduğu eğimli geçiş bölgesinde yüzeye ilerlerken kırılan dalgaların havza merkezi yönünde ötelenmesiyle açıklanmaktadır.

### 3. SONLU FARKLAR YÖNTEMİYLE YAPILAN SAYISAL DİNAMİK ANALİZLER (NUMERICAL DYNAMIC ANALYSIS BY FINITE DIFFERENCE METHOD)

Sayısal analizlerde, havza boyunca yerleştirilen bütün yapay sismografların izdüşümünde yapılan 1D analizlerde tek

boyutlu zemin kolonunda SH dalgalarının zemin yüzeyine ulaştığında serbest yüzeyde oluşturduğu ivmelerin hareket süreci boyunca kaydı alınmaktadır. Oluşturulan 2D modellerde ise yine aynı noktalardaki kayıtçılarla, yanlarda anakaya eğimi ile sınırlandırılmış yumuşak veya gevşek zeminde ilerleyen SV dalgalarının kırılması ve yansmasıyla oluşan P dalgası dönüşümleri ve genlik süperpozisyonları incelenmektedir. Analiz sonuçlarının her bir sismografta alınan ivme kayıtlarının spektrumları deprem giriş hareketinin ivme spektrumlarına oranlanarak ilgili noktadaki transfer fonksiyonları belirlenmiş, yüzey boyunca eşit



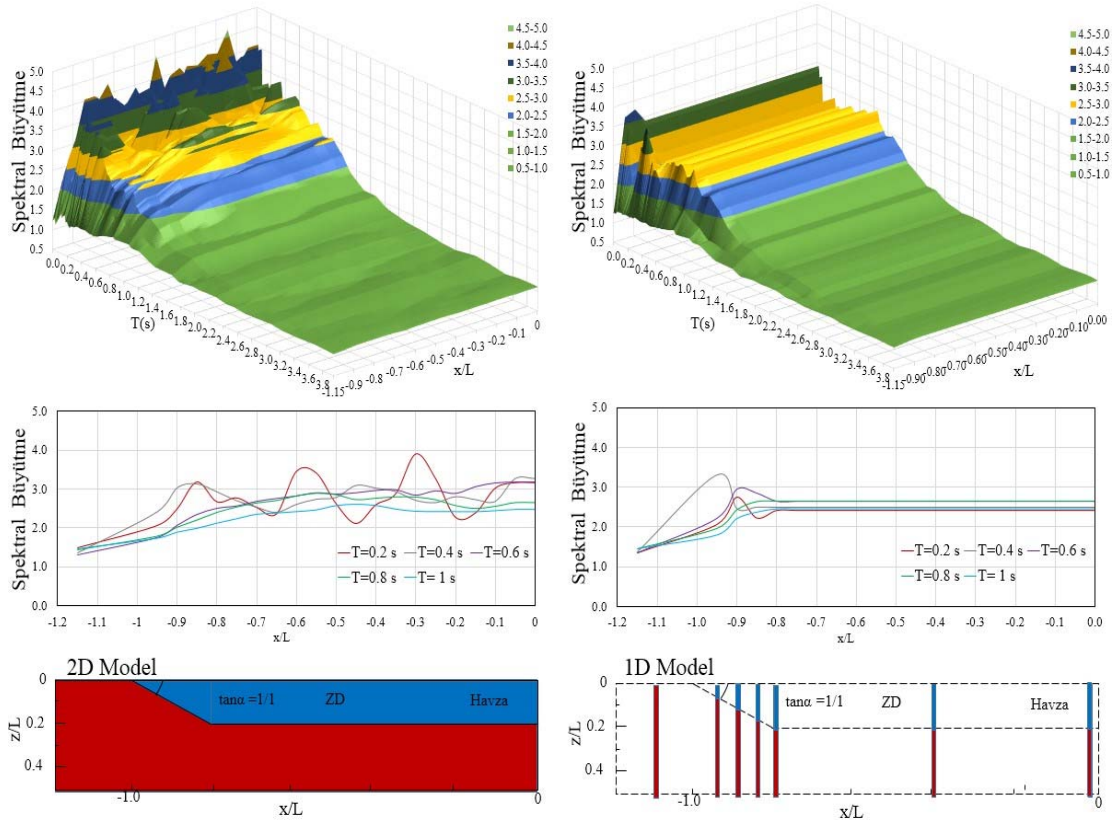
**Şekil 6.** ZD zemin sınıfında  $\tan\alpha=1/1$  kenar eğiminde bir deprem (E1) için dinamik analizle spektral şiddet faktörünün hesaplanması süreci

(The process of calculating the spectral intensity factor by dynamic analysis for an earthquake (E1) in site class ZD with bedrock inclination  $\tan\alpha = 1/1$ )

aralıklarla yerleştirilen tüm yapay kayıtlarda tekrarlanan bu işlemle havza yüzeyindeki boyutsuz konumu ifade eden  $x/L$  ekseninde büyütme mesafeye bağlı değişimi gösterilmiştir. Şekil 7'de ZD zemin sınıfı, Şekil 8'de ise ZE zemin sınıfı modellerinde Loma Prieta, 1989 depremi uygulandığında kenarda anakaya eğiminin  $\tan\alpha = 1/1$  ( $45^\circ$ ) olduğu havzalarda gerçekleşen spektral büyütme periyoda

ve konuma bağlı olarak solda 2D, sağda 1D analizler için verilmiştir. Spektral büyütme incelendiğinde 2D saha modelinde ZD zemin sınıfında yapılan analizlerde 4,5-4,8 değerlerine ulaşan en büyük değerlerin, 1D analizlerde 3,5-3,8 değerlerinde kaldığı görülmektedir. Ayrıca havza yüzeyi boyunca maksimum zemin büyütmesinin gerçekleştiği noktanın konumu farklı frekanslardaki deprem dalgalarının





Şekil 7. ZD zemin sınıfında anakaya eğimi  $\tan\alpha = 1/1$ , E1 (0,2 g) depreminde 2D ve 1D saha tepki analizleri (2D and 1D site response analysis in E1 with a maximum acceleration of 0.2 g in ZD site class and bedrock slope  $\tan\alpha = 1/1$ )

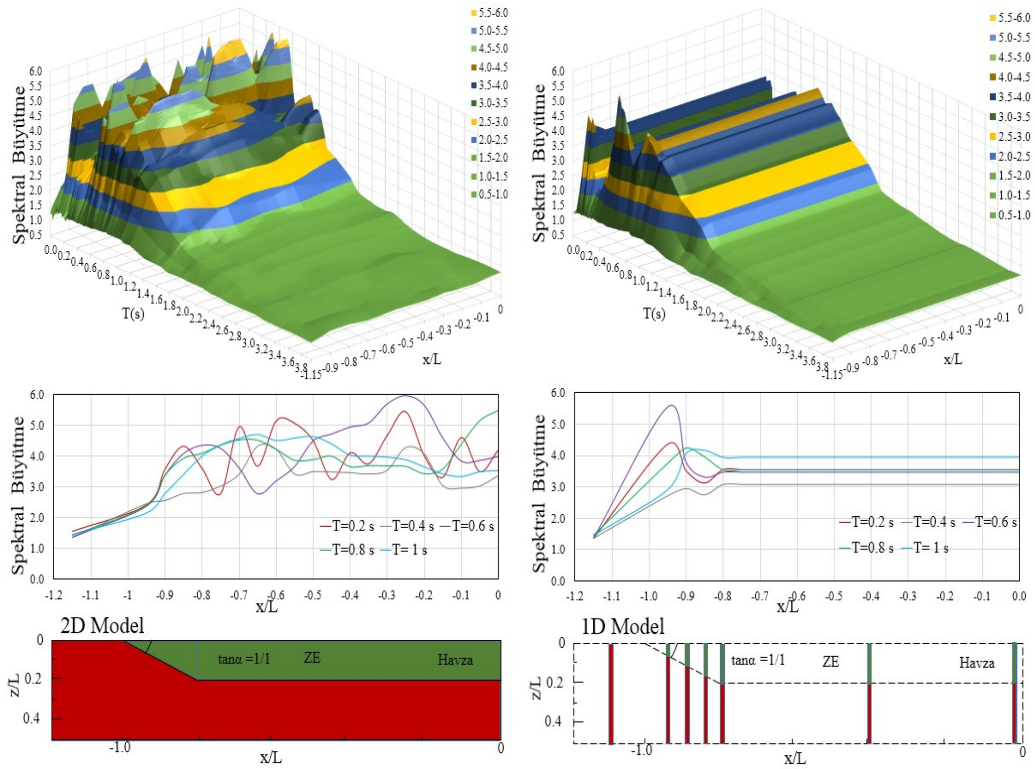
rezonans durumuna bağlı olarak kenardaki herhangi bir 1D zemin kolonunun periyoduna bağlı olarak eğimli bölgelere doğru kaymaktadır. Diğer yandan, 2D modelde ortamda yayılan dalgaların eğimli kenarda farklı rijitlikteki ortama girerken yüzey normaline yaptığı açılara bağlı olarak, yüzey normaline dik olmaması sebebiyle uğradığı kırılma, yansıma etkisinde üst üste düşerek odaklanması veya birden fazla kırılma yansıma etkisinde ortamda ötelenerek yüzeye ulaşması daha büyük yüzey ivmelerine farklı bölgelerde ulaşabileceğini göstermektedir. Ayrıca ZE zemin sınıfına ait analiz sonuçlarında görüldüğü üzere aynı deprem etkisinde ve aynı kenar eğimine sahip modellerde zeminin daha yumuşak veya gevşek olması durumunda spektral büyüme değerlerinin 2D analizde 5,5-6,0 değerlerine kadar ulaşmakta en büyük büyüme değerlerinin oluştuğu periyot ve konum özelliklerinin değiştiği görülmektedir.

Yüzey kayıtlarının tamamının ivme spektrumları incelendiğinde de eğimli tabaka yapısının serbest saha davranışını ihmal edilemez ölçüde etkilediği Şekil 9'da açıkça görülmektedir. Şekil 9a'da Loma Prieta, 1989 depreminin ZD zemin sınıfında spektral ivmelerinin 2D modelde S18 numaralı noktada 2,7 değerine ulaştığı, ancak 1D analizlerde en büyük değerlerin 2,2 değerlerinde S4 numaralı kenar bölgedeki bir noktada ölçüldüğü anlaşılmaktadır. Şekil 9b'de ise aynı depremin ZE zemin sınıfında spektral ivmelerinin 2D modelde S10 numaralı noktada 3 değerini aştığı ancak 1D analizlerde en büyük

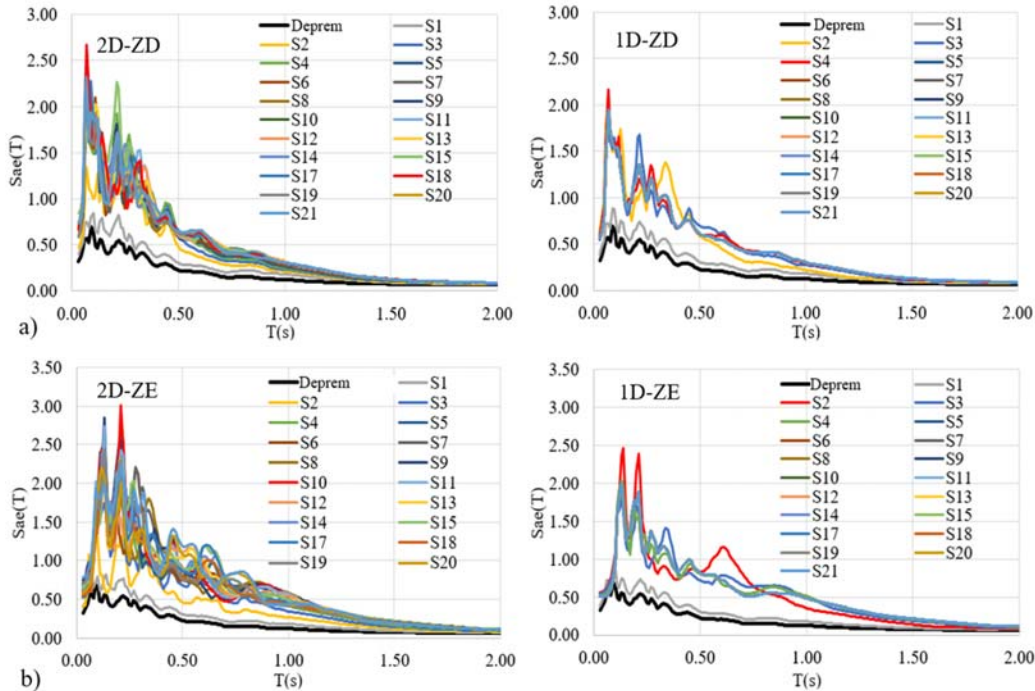
değerin S2 numaralı kenar bölgede 2,5 değerini geçmediği anlaşılmaktadır. ZE zemin sınıfı modellerde eğimli tabaka modelinde elde edilen sonuçlar en büyük ivmelerdeki farklılığın ve yerlerinin değişimine ek olarak ortamın rijitliğindeki azalmaya bağlı maksimum spektral ivmenin meydana geldiği periyotlarında farklılık gösterdiği görülmektedir.

### 3.1. Spektral Şiddet Faktörlerinin Değerlendirilmesi (Evaluation of Spectral Aggravation Factor)

İlgilenilen sahasının zemin sınıfı, yüzeye ulaşan kuvvetli yer hareketi ve dolayısıyla yapıların tepkisi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Daha uzun titreşim periyotlarında, daha yumuşak zemin özelliğine sahip tabakaların, altta yatan ana kayadan yüzeye ilerleyen dalgaların genlik ve sürelerini artırdığı bilinmektedir. Zemin büyümesi olarak tanımlanan bu davranış bütün periyotlarda gerçekleşmediği gibi yer hareketinin yüksek genlikte ve düşük periyotlarda meydana gelmesi durumunda zayıf zeminde oluşan akmalar nedeniyle dalga genlikleri azalabilmektedir. Bunun bir sonucu olarak deprem yönetmelikleri ve sismik kodlar incelendiğinde, farklı zemin sınıfları için 0,2 ve 1,0 saniye periyotlarında spektral ivmelerdeki büyütme ön plana çıkarılarak etkilerin yorumlandığı görülmektedir [31]. Bu nedenle, tepki spektrumları belirtilen periyotlarda, sönümlenme ve periyodun bir fonksiyonu olarak tanımlanmış şiddet faktörleri  $AGF_{2D/1D}$ , değişen havza modellerinde farklı



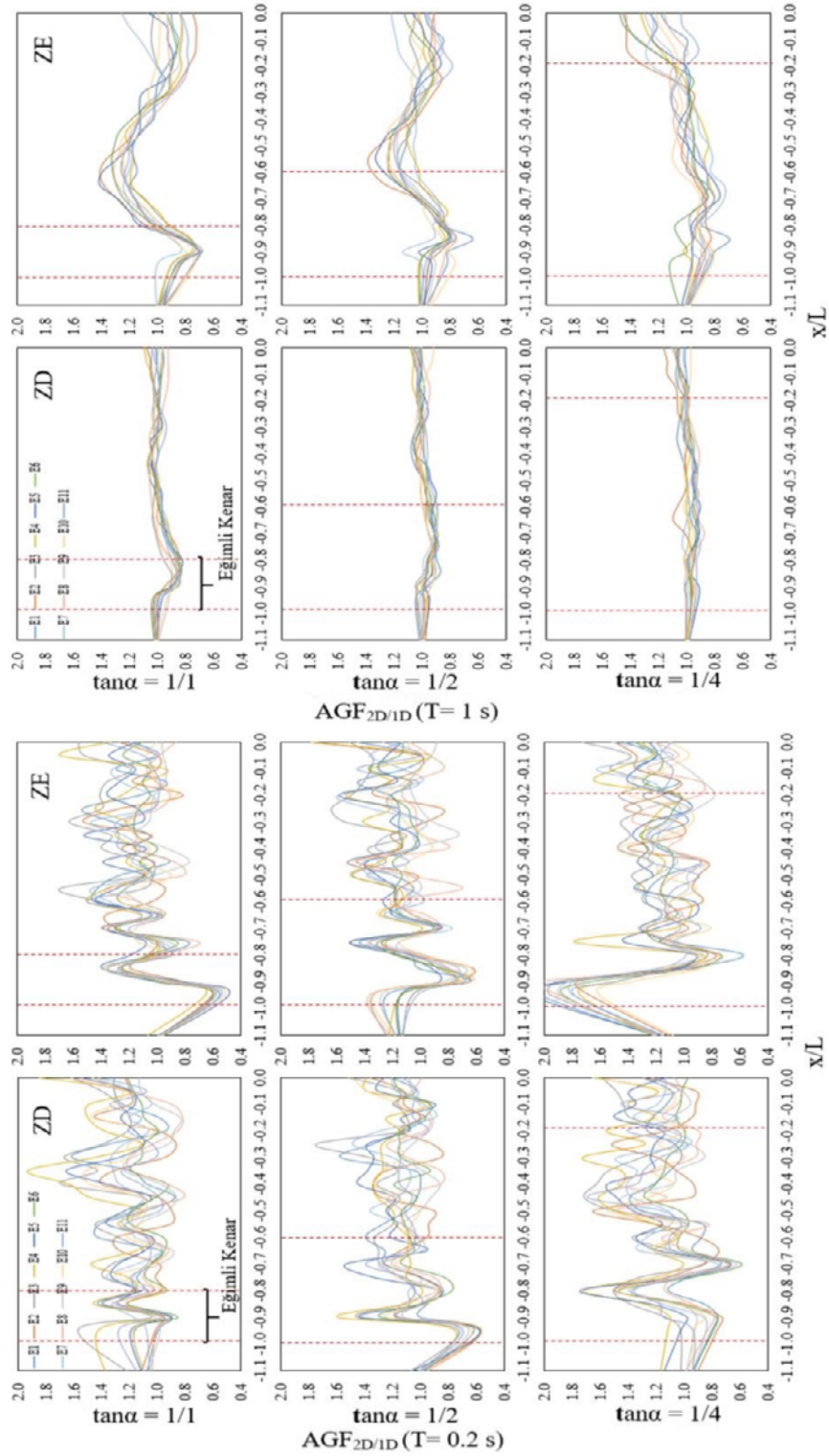
**Şekil 8.** ZE zemin sınıfında anakaya eğimi  $\tan\alpha = 1/1$ , E1 (0,2 g) depreminde 2D ve 1D saha tepki analizleri (2D and 1D site response analysis in E1 with a maximum acceleration of 0.2 g in ZE site class and bedrock slope  $\tan\alpha = 1/1$ )



**Şekil 9.** Model yüzeyi boyunca ivme spektrumlarının değerlendirilmesi 0,2 g maksimum ivme değerine sahip Loma Prieta, 1989 depremi, a) ZD zemin sınıfı, b) ZE zemin sınıfı (Evaluation of acceleration spectra along the model surface Loma Prieta, 1989 earthquake with a maximum acceleration value of 0.2 g, a) soil class D, b) soil class E)

zemin sınıfı ve 0,2 g ve 0,4 g gibi iki farklı kuvvetli yer hareketi seviyelerinde, kenardaki anakaya eğimine bağlı olarak ayrı ayrı Şekil 10 ve Şekil 11'de sunulmuştur.

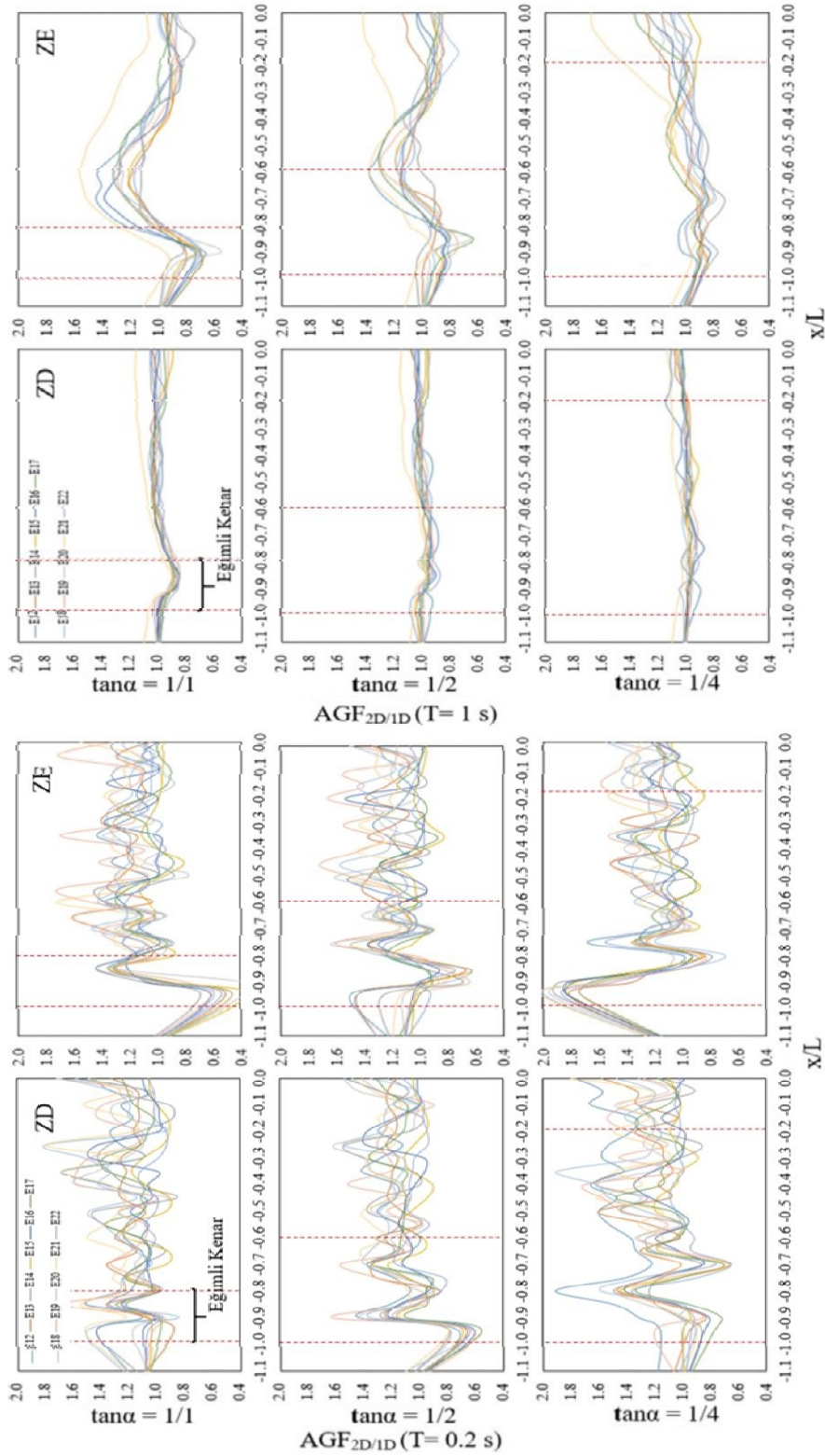
Analizler sonucunda özellikle saha yerel zemin sınıfı ZE olan modellerde 2D analizde, 1 saniye periyodunda şiddet faktörü değerinin  $\tan\alpha = 1/1$  eğimli modelde belirgin şekilde



**Şekil 10.** Solda spektral  $AGF_{2D/1D}(T=0.2\text{ s})$  ve sağda  $AGF_{2D/1D}(T=1\text{ s})$ , zemin sınıfı ZD-ZE,  $\tan\alpha=1/1, 1/2, 1/4$ , yer ivmesi seviyesi 0,2 g (Spectral  $AGF_{2D/1D}(T=0.2\text{ s})$  on the left and  $AGF_{2D/1D}(T=1\text{ s})$  on the right for site class D-E,  $\tan\alpha=1/1, 1/2, 1/4$ , level of excitation 0.2 g)

1,4 değerine yükseldiği ve eğimli bölgenin hemen yanında  $x/L$  değerlerinin 0,6 ve 0,7 olduğu bir bölgede toplandığı görülmektedir. ZE sınıfı en az eğime sahip modellerde 0,2 saniye periyodundaki tepkilerin  $x/L = -0,95$  değerinde şiddet

faktörünün 2 değerine yükseldiği, yüksek frekanslı dalgaların kenara oldukça yakın bir bölgede toplandığı anlaşılmıştır. Özellikle havzanın başlangıcında, şiddet faktörünün 1 değerinin altında değerler alabildiği verilen



**Şekil 11.** Solda spektral  $AGF_{2D/1D}(T=0.2\text{ s})$  ve sağda  $AGF_{2D/1D}(T=1\text{ s})$ , zemin sınıfı ZD-ZE,  $\tan\alpha=1/1, 1/2, 1/4$ , yer ivmesi seviyesi 0,4 g

(Spectral  $AGF_{2D/1D}(T=0.2\text{ s})$  on the left and  $AGF_{2D/1D}(T=1\text{ s})$  on the right for site class D-E,  $\tan\alpha=1/1, 1/2, 1/4$ , level of excitation 0.4 g)

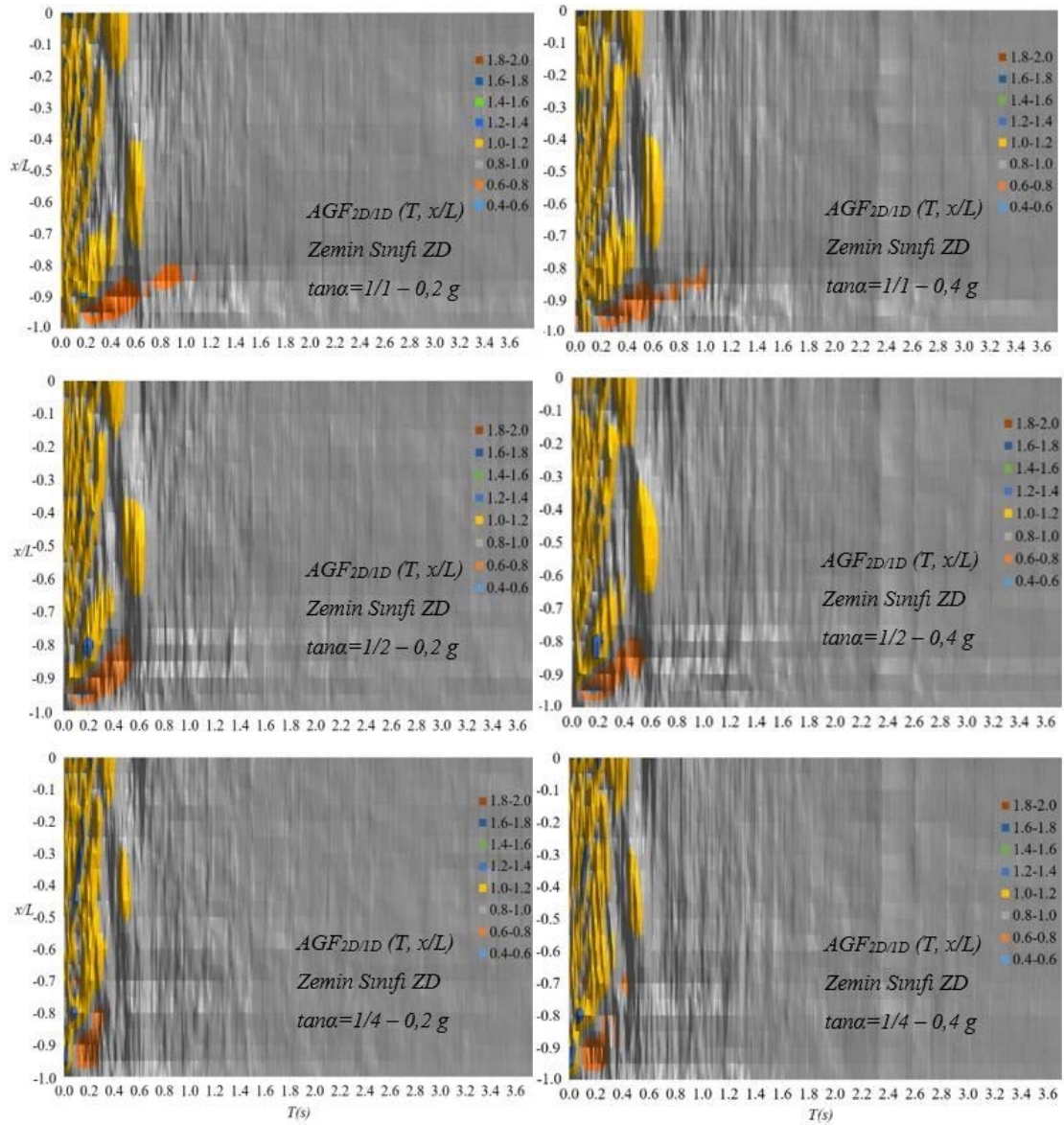
şekillerde görülebilmektedir. Kenar etkisinde bu odaklanma, 0,4 g seviyesindeki ikinci yer hareketi setiyle yapılan

analizlerde, en büyük ivmelerin daha yüksek frekanslara sahip olması nedeniyle Şekil 11’de görüldüğü gibi  $\tan\alpha = 1/1$

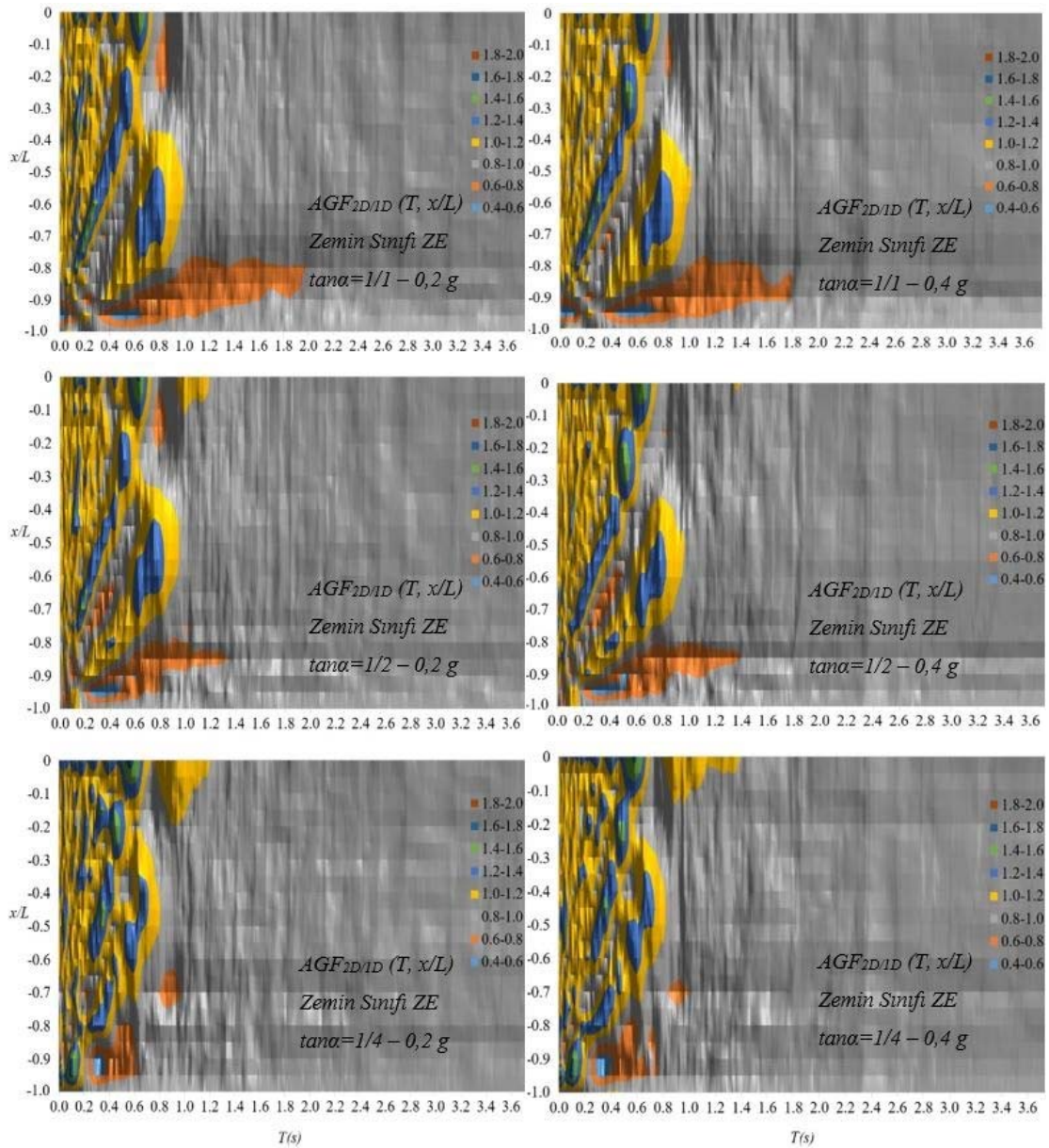
ve  $\tan\alpha = 1/2$  olan modellerin sonuçlarında kenara yaklaşmaktadır. Eğim azaldıkça artan eğimli bölgenin genişliği, kama etkisi yaratarak dalgaların birden çok kırılma ve yansımaya uğramasıyla kenardan daha içerideki bölgelerde yüzeye ulaşmasına neden olmaktadır. Ancak 1 saniye periyodunda geniş havzaların aksine, dar havzalarda çarpıcı şekilde cisim dalgalarının odaklanması ve her iki kenardan merkeze yönelen yüzey dalgalarının  $\tan\alpha = 1/4$  kenar eğimine sahip modellerde havzanın merkezindeki şiddetlenmeyi artırdığı görülmektedir. Ayrıca, 0,2 saniye periyodunda tepki spektrumları karşılaştırıldığında, nispeten yüksek kenar eğimli havzalarda, yer hareketinin havza boyunca 1,4-1,6 arasında bir değer bandında yayıldığı görülmektedir. Diğer yandan Şekil 12 ve Şekil 13'te yer alan ZD ve ZE sınıfının şiddet faktörü grafiklerinde, havza merkezinde ( $x/L=0$ ) verilerin 1,2, 1,4 ve 1,6 değerlerine

ulaşan bir bantta toplandığı sarı, mavi ve yeşil renklerde görülmektedir.

Eğimli kenar etkisinin geniş havzalarda incelendiği önceki çalışmalarda, fiziksel dalga yayılma ve kırılma kurallarına uygun olarak sayısal denklemlerle tanımlanan yakın kenar ve kenar kavramlarının, geniş havzaların davranışının anlaşılmasına katkı sağladığı bilinmekle birlikte bu araştırma kapsamında olan dar havzalarda serbest saha davranışının kırılan, yansıyan, dönüşen ve yüzeyde süperpoze olan dalgalar nedeniyle daha karmaşık bir yapıda olduğu görülmektedir. Zeminlerin homojen olmayan, anizotrop yapısı ve farklı tabakalaşmanın olduğu karmaşık tabakalaşma nedeniyle ortam rijitliklerinin değişimi, havza davranışının idealize edilmiş iki veya üç boyutlu zemin kesitlerinde tabaka eğimlerinin dahil edildiği zemin



Şekil 12. Zemin sınıfı ZD ve anakaya eğimi  $\tan\alpha(1/1, 1/2, 1/4)$  için  $AGF_{2D/1D}(T, x/L)$  ( $AGF_{2D/1D}(T, x/L)$  for site class D with different  $\tan\alpha(1/1, 1/2, 1/4)$ )



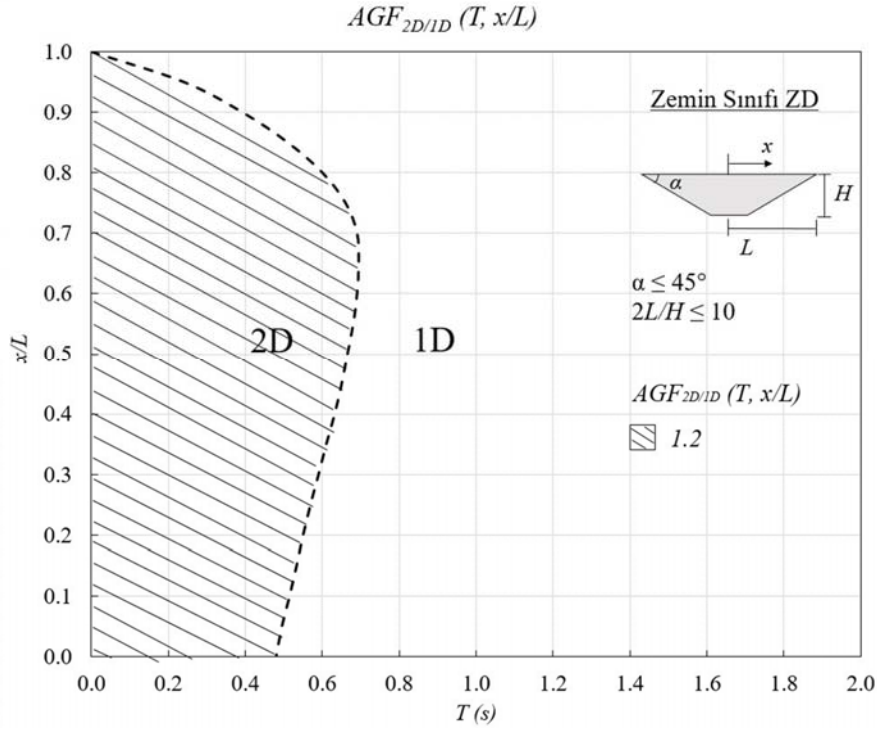
Şekil 13. Zemin sınıfı ZE ve anakaya eğimi  $\tan\alpha(1/1, 1/2, 1/4)$  için  $AGF_{2D/1D}(T, x/L)$  ( $AGF_{2D/1D}(T, x/L)$  for site class E with different  $\tan\alpha(1/1, 1/2, 1/4)$ )

modelleriyle incelenmesini zorunlu kılmaktadır. Bununla birlikte sahada sayısız durumu yansıtan değişkenlere göre incelenen bu modellerde elde edilen bulguların ancak genel yorumlarla uygulamaya kazandırılması mümkün olacaktır. Bu sebeple inceleme konusu dar havzalarda depremlerde oluşacak 2. ve 3. boyut etkilerinin, genel yaklaşımda yaygın yer bulan 1D dinamik analiz sonuçlarına çalışma sonunda Şekil 14 ve Şekil 15 ile önerilen şiddet faktörü tablolarındaki çarpanlar yardımıyla hesaplara dahil edilebileceği düşünülmektedir.

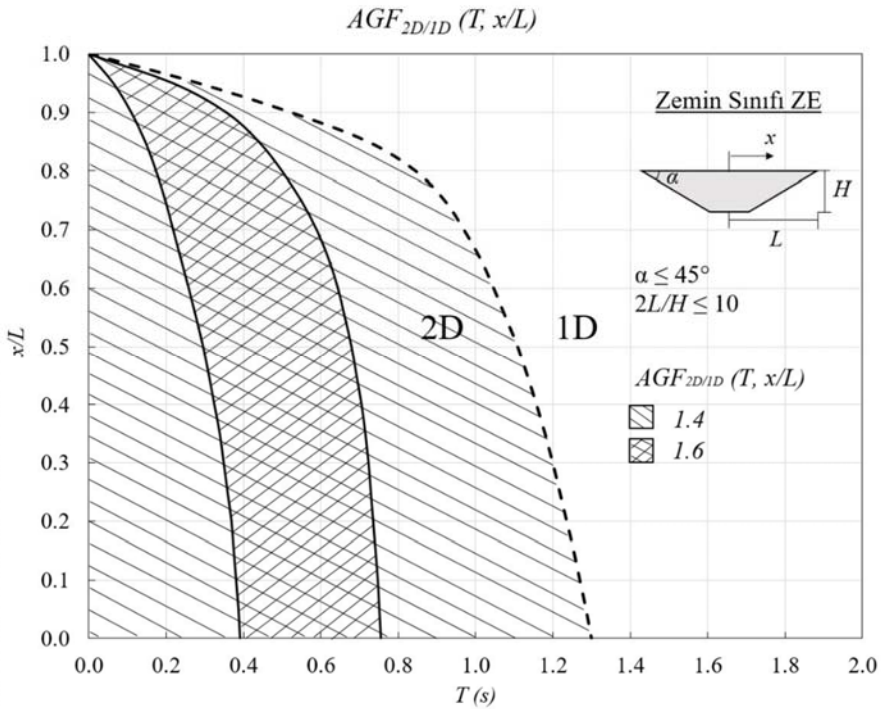
#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Havza yapısındaki sahalarda havza yüzeyindeki deprem yer hareketi, eğimli ana kaya ile üstünde yer alan daha yumuşak

zemine geçiş bölgelerinde sismik basınç ve kayma dalgalarının dönüşümü, yansımaları, belirli bölgelere odaklanması ve üst üste binmesi nedeniyle daha karmaşık bir yapıdadır. Bu nedenle zeminlerin homojen olmayan, anizotropik yapısı derinlikle artan jeolojik yük etkisinde rijitlikte meydana gelen değişim ve farklı tabakalar arasındaki eğimlerin neden olduğu karmaşık tabakalaşma, güvenilir sonuçlar almak için saha tepki analizlerinde dikkate alınmalıdır. Ayrıca sahadaki farklı durumları incelemek için çalışmada yapılan sayısal analizler, etkiyi oluşturan temel değişkenlere göre incelenen bu modellerde elde edilen bulguların ancak genel yaklaşımlarla uygulamaya kazandırılabilceğini göstermiştir. Yapılan saha tepki analizlerinde, ZD ve ZE olmak üzere iki farklı görece yumuşak zemin sınıfından oluşan havza yapısında dar ve



Şekil 14. ZD zemin sınıfı havzalarda Spektral Şiddet Faktörü (The Spectral Aggravation charts in narrow basins with site class D)



Şekil 15. ZE zemin sınıfı havzalarda Spektral Şiddet Faktörü (The Spectral Aggravation charts in narrow basins with site class E)

simetrik modeller incelenmiş ve zaman alanında yapılan analiz sonuçları karşılaştırılarak sunulmuştur. Yüzeyle oluşacak yer hareketinin havza içindeki alüvyon zemin tabakalarının dinamik özellikleri ile ilgili parametrelere duyarlılığını araştırmak için modeller doğrusal olmayan

zemin davranışı altında incelenmiştir. Havza modelleri üstüne eşit aralıklarla yerleştirilmiş yapay kayıtçılar ile tüm havza boyunca yüzey hareketlerinin zaman geçmişleri kaydedilmiştir. Tabakaların süreksizlikleri nedeniyle oluşan etkiler, alınan ivme zaman kayıtlarından elde edilen konuma

ve periyoda bağlı spektral şiddet faktörleriyle  $AGF_{2D/1D}(T, x/L)$  sunulmuştur. Yapılan analizlerden elde edilen verilerin değerlendirilmesinden;

- İki boyutlu modellerde oluşan yüzey hareketlerinin bir boyutlu modellerden hareket süresi, hakim periyot ve hareket genliği yönünden oldukça farklılık gösterdiği,
- Analizler sonucunda özellikle zemin yerel sınıfı ZE olan modellerde 2D analizde, 1 saniye periyodunda şiddet faktörü, kenardaki eğimin en fazla olduğu modelde belirgin şekilde arttığı, eğimli bölgenin hemen yanında  $x/L$  değerlerinin yaklaşık 0,6 ve 0,7 olduğu bir bölgede toplandığı,
- ZE sınıfı en az eğime sahip modellerde  $x/L = -0,95$  değerinde şiddet faktörünün 2 değerine yükseldiği, yüksek frekanslı dalgaların kenara oldukça yakın bir bölgede yoğunlaştığı, özellikle havzanın başlangıcında, şiddet faktörünün 1'den küçük değerler alabildiği,
- Kenar etkisine uygun olarak, en büyük ivmelerin daha yüksek frekanslara sahip olması nedeniyle eğimi fazla olan modellerde ( $\tan\alpha = 1/1$  ve  $\tan\alpha = 1/2$ ) kenarlarda şiddet faktörünün artış gösterdiği,
- Eğim azaldıkça artan eğimli bölgenin genişliği, kama etkisi yaratarak dalgaların birden çok kırılma ve yansımaya uğramasıyla kenardan içerideki bölgelerde yüzeye ulaşmasına neden olduğu, kama etkisinin 0,2 saniye periyodunda belirginleştiği,
- Geniş olanların aksine dar havzalarda 1 saniye periyodunda çarpıcı şekilde cisim dalgalarının odaklanması ve her iki kenardan merkeze yönelen yüzey dalgalarının  $\tan\alpha = 1/4$  kenar eğimine sahip modellerde havzanın merkezindeki şiddeti artırdığı,
- 0,2 saniye periyodunda tepki spektrumları karşılaştırıldığında, nispeten yüksek kenar eğimli havzalarda, yer hareketinin havza boyunca 1,4-1,6 arasında bir değer bandında yayıldığı, sonuçlarına ulaşılmıştır.

Böylelikle, havza etkilerinin en çok ortaya çıktığı bölgelerin ve periyotların sayısal olarak tanımlandığı nicel çalışmalar, ortaya çıkan yer hareketlerinin güvenilir tahminine ilişkin belirsizliklerin ortadan kaldırılmasına, deprem haritalarının geliştirilmesine ve güvenli yapılaşmaya büyük katkı sağlayacaktır.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Çalışma boyunca TÜBİTAK 218M959 numaralı proje kapsamında sağlanan desteklerinden dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na teşekkürlerimizi sunarız.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Aki K., Larner K., Surface motion of a layered medium having an irregular interface due to incident plane SH waves, *Journal of Geophysical Research*, 75, 933-954, 1970.

2. King J. L., Tucker B. E., Observed variations of earthquake motion across a sediment-filled basin, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 74 (1), 137-151, 1984.
3. Bard P.-Y., Bouchon M., The two-dimensional resonance of sediment-filled basins, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 75 (2), 519-541, 1985.
4. Trifunac M.D., How to model amplification of strong earthquake motions by local soil and geologic site conditions, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 19 (6), 833-846, 1990.
5. Zhang B., Papageorgiou A. S., Simulation of the Response of the Marina District Basin, San Francisco, California, to the 1989 Loma Prieta Earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, 1382-1400, 1996.
6. Kawase H., The cause of the damage belt in Kobe: 'the basin-edge effect', constructive interference of the direct S wave with the basin-induced diffracted/Rayleigh waves, *Seismological Research Letters*, 67 (5), 25-35, 1996.
7. Makra K., Chávez-García F. C., 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), 1177-94, 2016.
8. Gelagoti F., Kourkoulis R. and Anastasopoulos I., Seismic wave propagation in a very soft alluvial valley: sensitivity to ground-motion details and soil nonlinearity, and generation of a parasitic vertical component. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100, 3035-54, 2010.
9. İyisan R. and Haşal M. E., Ova kenarındaki anakaya eğiminin dinamik davranışa etkisi: Dinar Ovası, *İMO Teknik Dergi*, 2011, 5559-5578.
10. Khanbabazadeh H. and İyisan R., A Numerical Study on the 2D Behavior of the Single and Layered Clayey Basins, *Bulletin of Earthquake Engineering* 12, 1515-36, 2014.
11. Chen G., Jin D., Zhu J., Shi J. and Li X., Nonlinear analysis on seismic site response of Fuzhou Basin, China. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2016.
12. Abraham J. R., Smerzini C., Paolucci R. Lai, C. G., Numerical study on basin-edge effects in the seismic response of the Gubbio Valley, Central Italy. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2016.
13. Makra K., Chávez-García F. J., Raptakis D. and Ptilakis K., Parametric Analysis of the Seismic Response of a 2D Sedimentary Valley: Implications for Code Implementations of Complex Site Effects. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25 (4), 303-15, 2005.
14. Asimaki D. and Mohammadi K., On the complexity of seismic waves trapped in irregular topographies. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 114, 424-37, 2018.
15. Khanbabazadeh H., İyisan R., Ansal A. and Hasal M. E., 2D Non-Linear Seismic Response of the Dinar Basin, TURKEY. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 89, 5-11, 2016.



16. Riga E., Makra K. and Pitilakis K., Aggravation Factors for Seismic Response of Sedimentary Basins: A Code-Oriented Parametric Study, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 91 (December), 116–32, 2016.
17. Kristek J., Moczo P., Bard P. Y., Hollender F., Stripajová S., Computation of amplification factor of earthquake ground motion for a local sedimentary structure. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2018.
18. Subasi O., Hasal M.E., Ozaslan B., Iyisan I., Yamanaka H. and Chimoto K., Bir Boyutlu Dinamik Analiz ve Mikrotremor Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması, *Teknik Dergi*, 30 (5), 9459–81, 2019.
19. Zhu C., Thambiratnam D., Gallage C., Statistical analysis of the additional amplification in deep basins relative to the 1D approach, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 104 (Jan.), 296–306, 2018.
20. Ozaslan B., Hasal M.E., Subasi O., Iyisan I., Yamanaka H. and Chimoto K., Determination of Local Site Soil Conditions by Microtremor Measurements for Sustainable Buildings. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 6, 2018.
21. Özaslan B., Hasal M. E., Khanbabazadeh H., Akbas M. and Iyisan R., Dynamic Response Analysis of Trapezoidal Basins on Numerical Models, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 960 (4), 2020.
22. Khanbabazadeh H., Hasal M. E. and Iyisan R., 2D Seismic Response of the Duzce Basin, Turkey. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019.
23. Itasca Consulting Group, *FLAC3D, Fast Lagrangian Analysis of Continua in Three-Dimensions*, 2017.
24. Zhu C., Riga E., Pitilakis K., Zhang J. and Thambiratnam D., Seismic Aggravation in Shallow Basins in Addition to One-Dimensional Site Amplification. *Journal of Earthquake Engineering*, 2018.
25. Lysmer J., Kuhlemeyer R. L., Finite dynamic model for infinite media, *Journal of Engineering Mechanics*, 95 (EM4), 859–77, 1969.
26. White W., Unified boundary for finite dynamic models, *J. Eng. Mech. Div., ASCE* 103, 949-64, 1997.
27. Kunar R. R., Rodriguez-Ovejero L., A Model with non-reflecting boundaries for use in explicit soil-structure interaction analyses, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 8 (4), 361–74, 1980.
28. Cundall P., Hansteen A. H., Lacasse S., Selnes P. B., NESSI – Soil Structure Interaction Program for Dynamic and Static Problems, Norwegian Geotechnical Institute, Report 51508-9, 1980.
29. Ishibashi I., Zhang X., Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay, *Soils and Foundations*, 33 (1), 182–191, 1193.
30. Federal Emergency Management Agency, NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures-Volume I: Part 1 Provisions, Part 2 Commentary-FEMA P.1050-1, Washington, D.C., 2015.
31. Federal Emergency Management Agency, NEHRP Recommended Seismic Provisions: Design Examples, Report No. FEMA P-1051, Washington, D.C., 2016.
32. Akbaş S.O., Sönmezer Y.B., Işık N.S., Assessment of the peak acceleration, amplification ratio and fundamental period properties for the Kırıkkale province settlement area, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 30 (4), 711-721, 2015.

