



Havzaların Sismik Tepkisinin Modifiye Ricker Dalgacığı ile Nümerik Analizi

Hidayet Kemal UYAR^{1*}, Sadık ÖZTOPRAK¹

¹İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 18/05/2025
Revision: 01/06/2025
Accepted: 02/06/2025

Keywords

Basin effect
Spectral aggravation
Two-dimensional site
response
Ricker wavelet
Finite difference method

Makale Bilgisi

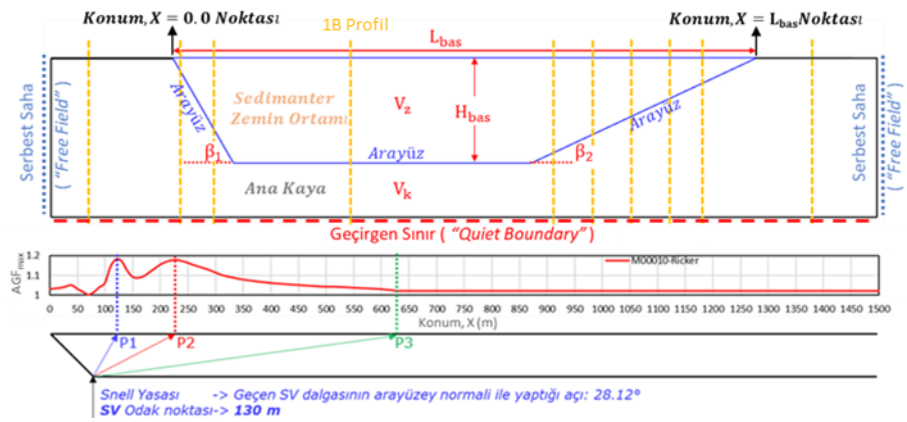
Araştırma makalesi
Başvuru: 18/05/2025
Düzeltilme: 01/06/2025
Kabul: 02/06/2025

Anahtar Kelimeler

Havza etkisi
Spektral şiddetlendirme
İki boyutlu zemin tepkisi
Ricker dalgacığı
Sonlu farklar yöntemi

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Sonlu farklar yöntemi ile bir ve iki boyutlu modellerde gerçekleştirilen analizler sonucunda tepki spektrumundaki havza etkisi, havza yüzeyi boyunca tespit edilmiştir. Sonuçlara göre, havza etkisini yüzey boyunca kenar için üç farklı noktadaki şiddetlendirme katsayısı (AGF) ile idealize etmek mümkündür. / As a result of analyses conducted using the finite difference method in one- and two-dimensional models, the basin effect in the response spectrum was identified along the basin surface. According to the results, it is possible to idealize the basin effect along the surface by the aggravation factors (AGF) at three different points per basin edge.



Şekil A: Şiddetlendirmenin tespit edilmesi /Figure A: Determination of the aggravation factor

Önemli noktalar (Highlights)

- İlk analizler için sentetik dalga formlarının kullanımı son derece pratik ve isabetlidir. / The use of synthetic waveforms for preliminary analyses is highly practical and accurate.
- Havza etkisini yüzey boyunca her kenar için üçer nokta ile basitleştirmek mümkündür. / It is possible to simplify the basin effect along the surface by using three points for each edge.
- Düşük periyotlardaki şiddetlendirme havza kenarında baskınken, yüksek periyotlarda havza ortasında etkisini göstermektedir. / While aggravation at low periods is dominant at the basin edges, it's more effective in the basin center at higher periods.

Amaç (Aim): Bu çalışmanın amacı havza yapılarının yüzeyindeki sahalarda, tepki spektrumunun havza etkisinden kaynaklı değişiminin incelenmesidir. / The aim of this study is to investigate the change in the response spectrum caused by the basin effect in the surface sites of basin structures.

Özgünlük (Originality): Hakim frekansa sahip olmayan Ricker dalgacığının doğrusal elastik havza analizlerinde gerçek depremler yerine kullanılabileceği, zamandan ve işlem hacminden tasarruf edilebileceği ortaya konmuştur. / It has been demonstrated that a Ricker wavelet with no dominant frequency can be used instead of real earthquakes in linear elastic basin analyses, thereby saving time and computational effort.

Bulgular (Results): Kısa periyotlarda kenar etkisinin baskın olduğu, daha uzun periyotlardaki şiddetlendirmenin ise havzanın orta bölgelerine yayıldığı, en yüksek şiddetlendirmenin tespit edildiği iki boyutlu salınım periyodunun ise bir boyutlu salınım periyodu ile ilişki olduğu tespit edilmiştir. / It was determined that edge effects dominate at short periods, while amplification at longer periods spreads toward the central areas of the basin. Additionally, the two-dimensional fundamental period, at which the highest amplification is observed, is related to the one-dimensional fundamental period.

Sonuç (Conclusion): Kullanılan yöntem, havza etkisinin anlaşılmasında ve bu etkilerin tasarım spektrumlarına yansıtılmasında daha ileri analizler için bir çerçeve oluşturmuştur. / The method used has established a framework for better understanding the basin effect and reflecting these effects in design spectra for further analyses.



Havzaların Sismik Tepkisinin Modifiye Ricker Dalgacı ile Nümerik Analizi

Hidayet Kemal UYAR^{1*} , Sadık ÖZTOPRAK¹

¹ İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 18/05/2025
Düzeltilme: 01/06/2025
Kabul: 02/06/2025

Anahtar Kelimeler

Havza etkisi
Spektral şiddetlendirme
İki boyutlu zemin tepkisi
Ricker dalgacı
Sonlu farklar yöntemi

Öz

Bu çalışma, sedimanter havzaların sismik tepkisinin doğrusal elastik koşullar altında parametrik olarak incelenmesini amaçlamaktadır. Bu amaçla, frekans içeriği kontrollü ve genlik spektrumu 0–10 Hz arasında yatay genliğe sahip modifiye bir Ricker dalgacı kullanılmıştır. Söz konusu dalga formu, farklı merkez frekansa ve genliğe sahip 18 adet Ricker bileşeninin süperpozisyonu ile oluşturulmuş, böylece periyot bağımlılığını minimize eden bir sentetik yer hareketi elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan tüm zeminler doğrusal elastik kabul edilerek, şiddetlendirme faktörünün değişimindeki etkenler hem daha yalın şekilde tespit edilmiş hem de doğrusal olmayan davranışın sebep olabileceği muhtemel aşırı sönümler bertaraf edilmiştir. 29 adet ölçeklenmiş gerçek deprem kaydının referans model üzerinde uygulanmasıyla modifiye Ricker dalgası ile gözlemlenen şiddetlendirme davranışı karşılaştırılmış, doğrusal elastik dinamik analizlerde depremin ivme genliğinin, şiddetlendirme üzerinde etkili olmadığı, sentetik dalga formu girdisinin ise son derece kullanışlı bir araç olduğu gözlemlenmiştir. FLAC sonlu farklar yazılımında gerçekleştirilen parametrik çalışmalar sonucunda, havza genişliği, kenar eğimi, zemin rijitliği ve derinlik gibi parametrelerin şiddetlendirme üzerindeki etkisi ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Özellikle kısa periyotlarda kenar etkisinin baskın olduğu, daha uzun periyotlardaki şiddetlendirimin ise havzanın orta bölgelerine yayıldığı, en yüksek şiddetlendirimin tespit edildiği iki boyutlu salınım periyodunun ise bir boyutlu salınım periyodu ile ilişki olduğu ortaya koyulmuştur. Çalışmada kullanılan yöntem ve analizler belirli bir sahanın sismik tepkisini doğru şekilde simüle etmek adına ilksel bir yaklaşım sunmakla birlikte havzaların sismik tepkisinin anlaşılmasında ve bu etkilerin tasarım spektrumlarına yansıtılmasında daha ileri analizler için bir çerçeve oluşturmuştur.

Numerical Analysis of the Seismic Response of Basins Using a Modified Ricker Wavelet

Article Info

Research article
Received: 18/05/2025
Revision: 01/06/2025
Accepted: 02/06/2025

Keywords

Basin effect
Spectral aggravation
Two-dimensional site response
Ricker wavelet
Finite difference method

Abstract

This study aims to investigate the seismic response of sedimentary basins under linear elastic conditions through a parametric approach. For this purpose, a modified Ricker wavelet with controlled frequency content and a flat amplitude spectrum in the 0–10 Hz range is used. The proposed wavelet is constructed by superimposing 18 Ricker components with varying central frequencies and amplitudes, resulting in a synthetic ground motion that minimizes period dependency. All soils used in the study are assumed to behave linearly elastic, which not only allows for a more straightforward identification of the factors influencing the aggravation factor but also eliminates possible over-damping effects that may arise from nonlinear behavior. The aggravation behavior observed with the modified Ricker wavelet is compared against that produced by applying 29 scaled earthquake records to a reference model. It is observed that, in linear elastic dynamic analyses, the amplitude of the input earthquake does not significantly influence the aggravation, whereas the synthetic wavelet serves as a highly useful input form. As a result of the parametric studies performed using the FLAC finite difference software, the effects of parameters such as basin width, rock interface slope, soil stiffness, and depth on aggravation have been individually evaluated. It has been revealed that edge effects dominate in short periods, while aggravation at longer periods tends to spread toward the central regions of the basin. The two-dimensional oscillation period at which maximum aggravation is observed has been shown to correlate with the one-dimensional resonance period. While the methods and analyses presented in this study offer a preliminary framework for accurately simulating the seismic response of a given site, they also provide a foundation for more advanced studies aimed at understanding basin effects and reflecting them in design spectra.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Zemin koşullarının kuvvetli yer hareketi üzerindeki etkileri, deprem mühendisliğinde sıklıkla zemin tepkisi olarak isimlendirilen ve hakkındaki çalışmaların uzun süredir devam ettiği bir araştırma konusudur. Özel durumlar dışındaki pratik uygulamalarda ve küresel ölçekte geçerliliği bulunan deprem yönetmeliklerinde zemin tepkisinin çoğunlukla bir boyutlu (1B) olarak dikkate alınmasına karşın özellikle sedimanter havzalar gibi yatay ve düşey düzensizliğe sahip heterojen ortamlarda 1B yaklaşımların yetersizliği çok sayıda çalışma ile gösterilmiştir.

Sedimanter havzalar, düşük kayma dalgası hızına sahip tortul zeminlerin jeolojik süreç içerisinde yer kabuğundaki çöküntü alanlarına birikmesiyle oluşan geniş yer şekilleridir. Çoğunlukla tektonik sebeplerle meydana gelen bu yapılarda özellikle normal faylanma durumunda çok keskin kayma dalgası hızı geçişleri ve empedans kontrastı gözlemlenebilmektedir. Bu karmaşık jeolojik yapılanma, deprem esnasında zemin-kaya arayüzeyinin geometrisi ve malzeme özelliklerinin de etkisiyle sismik dalgalarda hem frekans içeriği hem de genlik bakımından 1B yaklaşımlar ile açıklanamayan, günümüzde basen (havza) etkisi olarak isimlendirilen başkalaşımlara sebep olmaktadır. Bard ve Bouchon [1], havza etkisinin erken kuramsal açıklamalarından birini sunarak, iki boyutlu rezonansın önemini ortaya koymuşlar, ardından gelen çalışmalar sedimanter havzalarda oluşan yer hareketlerinin hem şiddetinin hem de süresinin önemli ölçüde arttığını göstermiştir [2][3].

Havza etkisinin kuvvetli yer hareketi üzerindeki sonuçlarını eğimli kaya-zemin arayüzeyinin sebep olduğu cisim dalgalarının odaklanması (kenar etkisi) ve yüzey dalgalarının üretilmesi olarak başlıca iki olguya dayandırmak mümkündür. Kenar etkisi, düşey veya açılı bir şekilde gelen dalgaların havzanın arayüzeyinde yansyarak yüzeydeki bazı noktalarda odaklanmasına olarak açıklanırken [2], yüzey dalgaları ise sedimanter havzanın içinde üretildiklerinde uzun süreli ve düşük frekanslı büyütmelemlere neden olabilmektedir. Komatitsch & Tromp [4] ve Moschetti vd. [5], bu dalgaların özellikle geniş ve yumuşak zeminli havzalarda etkili olduğunu vurgulamış, Zhang & Papageorgiou [6] ve Kawase [7] Kobe depremi esnasında yıkımın yoğun olduğu bölgelerde oluşan hasarı havza ortasına doğru yatay ilerleyen yüzey dalgaları ile cisim dalgalarının girişime uğraması sonucunda yüzey hareketinin şiddetinin artması ile açıklamıştır.

Havza etkisinin ilk olarak çalışılmaya başladığı 1980’li yılların ardından araştırmalar artmaya devam etmiş, yazılım ve bilgisayar teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte çeşitli 2B ve 3B nümerik modeller, konunun anlaşılabilmesi için şüphesiz çok değerli “dijital laboratuvar” ortamı sunmaya başlamışlardır. Hasal & Iyisan [8] 1B analizler ile kıyasla 2B analizlerin, havza kenarlarının etkilerini, dalga yansıma ve kırılmalarını, rezonans bölgelerini daha gerçekçi şekilde yansıttığını göstermişler, Amini vd. [9] Kanada’daki Kitimat vadisinde 2B analizlerin saha verileriyle büyük ölçüde örtüştüğünü bildirmiş, Makra vd. [10] Samos Adası’nda meydana gelen depremde Bornova havzasındaki büyütme etkilerini nümerik modelleme ile doğrulamış, Rodriguez Plata & Özcebe [11], Norcia Havzası’nda 2B modellerin 1B analizlere kıyasla daha büyük büyütmelemleri ve farklı frekans davranışlarını ortaya koyduğunu raporlamıştır. [5] tarafından yapılan çalışmalarda, 3B dalga yayılımı analizleri ile derin alüvönel dolgularda yüzey dalgası enerjisinin yoğunlaştığı ve 1B tahminlere göre oldukça yüksek büyütmelemler gözlemlendiğini bildirilmiştir.

Nümerik simülasyonların isabetinin, oluşturulan modelin gerçeğe yakınlığıyla doğru orantılı olduğuna şüphe olmamasına karşın model bileşenlerindeki rassal ve/veya aleotorik bilinmezler çoğu zaman havza gibi çok geniş ölçekli bir yapıyı tam isabetle modellemeye izin vermemektedir. Bunun yanında, basitleştirilmiş-idealize edilmiş dahi olsa 2B ve 3B yaklaşımların günümüzde pratiğe ve yönetmeliklere dahil edilmesi hususunda çoğu araştırmacı hemfikir olmaktadır. Makra vd. [12] Euroseistest isimli araştırma sahasında gözlemsel veriler ve nümerik analizler ile gerçekleştirdiği çalışmada 2B modellemedeki zemin tabakalanması, arayüzey dışındaki kayaç özelliği, arayüzey geometrisi gibi değişkenlerin analiz üzerindeki etkilerini değerlendirmiş ve yüzeye yakın zemin tabakalanması ile yanal kayaç eğiminin etkisine dikkat çekmiş; basitleştirilmiş 2B nümerik analizlerin gerçek davranışı anlamada kullanışlı bir araç olduğunu ortaya koymuştur. Simülasyona dayalı çalışmaların birçoğunda zemin davranışı doğrusal olarak ele alınmış olsa da günümüzde doğrusal olmayan davranışın dikkate alındığı havza etkisi analizlerinin sayısı çoğalmaya devam etmektedir. Bonilla vd. [13] Grenoble Havzası’nda hem 1B hem de 2B doğrusal olmayan analizleri karşılaştırmış ve zeminde modül azalımının yüzey büyütmesini azalttığını, ayrıca rezonans frekanslarında kaymalara neden olduğunu belirtmiş, Zhang & Zhao [14], doğrusal olmayan zemin davranışının spektral büyütmelemleri azalttığını

belirtmiş, Khanbabazadeh et al. [15] ve Ozaslan & Iyisan [16] 2B doğrusal olmayan analizlerde, zemin rijitliğinin azalmasının rezonans frekansını düşürdüğünü ve büyütme sınırladığını raporlamış, [11] büyütme analizlerinde doğrusal olmayan davranışın ihmal edilmesinin, 2B rezonans etkilerinin olduğundan fazla tahmin edilmesine neden olabileceğini, dolayısıyla malzeme davranışlarının titizlikle kalibre edilmesi gerektiğini vurgulamış, Chen vd. [17] 3B analizlerde doğrusal olmayan malzeme davranışının özellikle düşük frekanslı yer hareketlerinde büyütme sınırlayıcı rol oynadığını ortaya koymuştur.

Depreme dayanıklı yapı tasarımı amacı ile gerçekleştirilen dinamik analizlerde girdisi yapılan sismik dalgalar, analizlerin doğruluğunu ve uygulanabilirliğini doğrudan etkilemektedir. Özellikle doğrusal olmayan zemin davranışı ile birlikte değerlendirildiğinde deprem dalgalarının niteliği, davranışı çok çeşitli şekilde değiştirebilmektedir. Kullanılan kayıtlar genel olarak gerçek deprem kayıtları ve sentetik dalga formları olarak ikiye ayrılmaktadır. Gerçek deprem kayıtları, özellikle sismotektonik ve jeolojik şartları bilinen belirli bir saha üzerinde yapılacak tasarıma yönelik çalışmalarda kullanışlıdır. Gabor Darbesi ve Ricker Dalgacı gibi sentetik dalga formları ise kontrol edilebilir frekans içeriği ve genlik gibi parametrelere sahip olması bakımından parametrik çalışmalar için idealdir. Güncel yönetmeliklere havza etkisinin dahil edilmesi gerektiğini savunan araştırmacılardan Riga vd. [18] çeşitli geometrilere sahip havzaların tepkisini Gabor Darbesi kullanarak elastik davranış çerçevesinde değerlendirmiş, bu analizlerden elde edilen büyütme fonksiyonlarını gerçek deprem kayıtlarını evriltirmek (yüzeye transfer etmek) amacıyla kullanmıştır. [16] ise TBDY’de ZD ve ZE olarak nitelendirilen sembolik zemin ortamları için 11 depremden oluşan 2 adet gerçek ivme kayıt seti ile çalışmış, setlerden birini 0.2 g diğerini ise 0.4 g PGA değerine ölçekleyerek daha dar kapsamlı ancak bu kapsamı daha isabetli simüle etmeye yönelik doğrusal olmayan analizler gerçekleştirmiştir.

Bu çalışmada, havza etkisinin çok boyutlu nümerik analizlerle parametrik olarak incelenmesi amacıyla 0-10 Hz arasında yatay Fourier genlik spektrumuna sahip Ricker Dalgacı Modifiye elde edilmiş, ardından 2B sonlu farklar yöntemi ile doğrusal elastik şartlar altında nümerik analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen dalga sayesinde analizlerde girdisi yapılan dinamik yüklemenin hakim frekansının sonuçlara etkisinin ortadan kaldırılması hedeflenmiş, sonuçlar gerçek deprem kayıtlarının kullanılması durumu ile kıyaslanmıştır.

Daha sonra elde edilen sentetik dalga formu kullanılarak benzer şartlar altında çeşitli geometri ve parametrik özelliklere sahip modeller üzerinde havza genişliği, arayüz eğimi, havza içerisindeki sedimanter zeminin kayma dalgası hızı ve hakim salınım periyodu gibi değişkenlerin havza yüzeyindeki tepki spektrumlarına olan etkileri ve bu etkilerin mekansal değişimi incelenmiştir.

2. RICKER DALGACIĞI (RICKER WAVELET)

İlk olarak Ricker [19] tarafından tanıtılan Ricker Dalgacı (Meksika şapkası) jeofiziksel yer titreşimlerini modellemek için yaygın olarak kullanılan, sıfır fazlı ve bant sınırlı sentetik bir dalga formudur. Deprem mühendisliği dışında da bir çok kullanım alanı bulan bu ivme dalgası matematiksel olarak Gauss fonksiyonunun ikinci dereceden türevi olarak aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$a(t) = (1 - 2\pi^2 f_0^2 t^2) e^{-\pi^2 f_0^2 t^2} \quad (2.1)$$

Burada; f_0 hakim frekans, t mevcut zamanı, $a(t)$ ise t anındaki belirtmektedir. Orijinal Ricker denklemi, zaman ortamında en büyük genlik değerini $t=0$ anında alan, simetrik tepe merkezli bir darbeyi temsil etmektedir [20]. Frekans spektrumu, hakim frekans parametresine bağlı olarak değiştiğinden, zemin ortamlarının farklı frekans içeriğine sahip dalgalara verdiği tepkiyi değerlendirmede kullanışlıdır. Bu çalışmada ise orijinal denklem, tercih edilen bir merkezi t_0 anında, tercih edilen en büyük genliği sağlayacak şekilde aşağıdaki gibi modifiye edilmiştir.

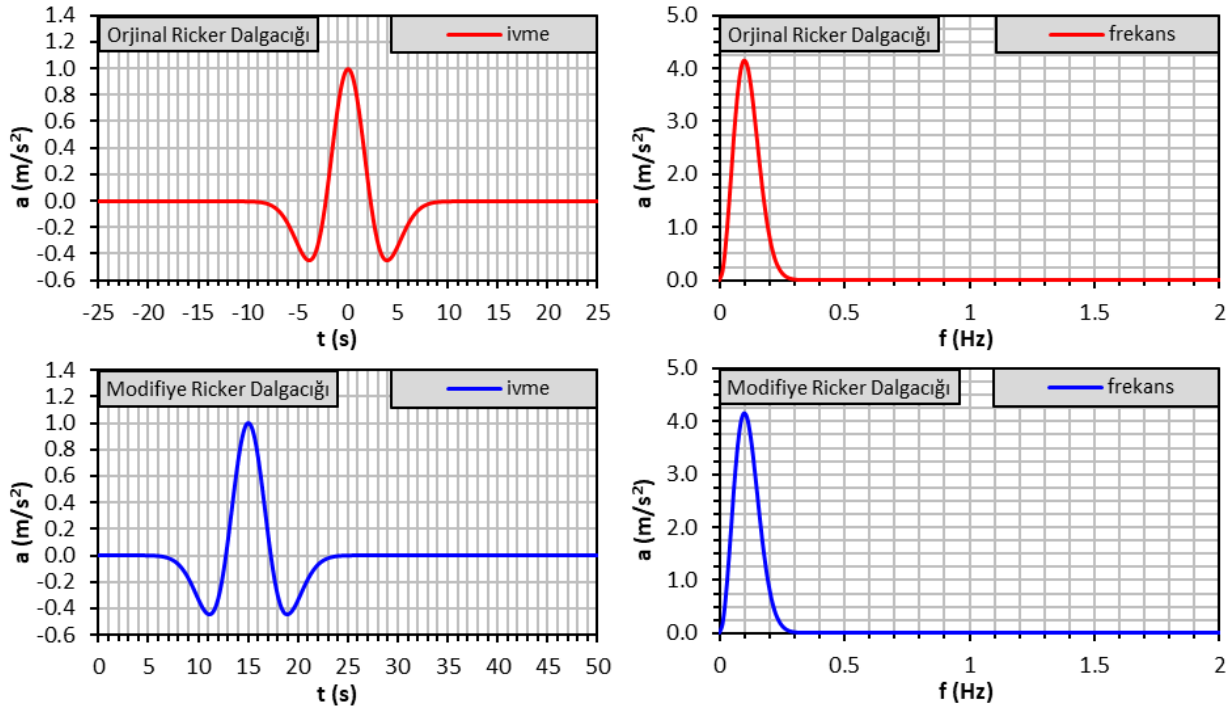
$$a(t) = A_0 (1 - 2\pi^2 f_0^2 (t - t_0)^2) e^{-\pi^2 f_0^2 (t - t_0)^2} \quad (2.2)$$

Burada; A_0 tercih edilen en büyük genlik, t_0 merkezi zamanı ifade etmektedir. Genişletilen denklem aracılığıyla dalga formu üzerindeki hakimiyet arttırılmış, doğrudan analiz girdisi olarak kullanılması kolaylaştırılmıştır. 0.1 Hz hakim frekans değerine sahip Ricker dalgacı ve 15 s merkezi süre eklenmiş asimetrik Ricker dalgacığına ait ivme ve frekans içeriği Şekil 1’de paylaşılmıştır. Bu kullanım esnasında dikkat edilmesi gereken husus, dalganın en az iki adet hakim periyot süresince etki ettirilmesi, havza analizlerinde ise yüzey ve cisim dalgalarının yayılımını ve yansımaları gözlemleyebilmek adına bu sürenin daha da uzatılmasıdır. Her iki şekilde de dalga formlarının Fourier genlik spektrumu aşağıdaki fonksiyon ile hesaplanır;

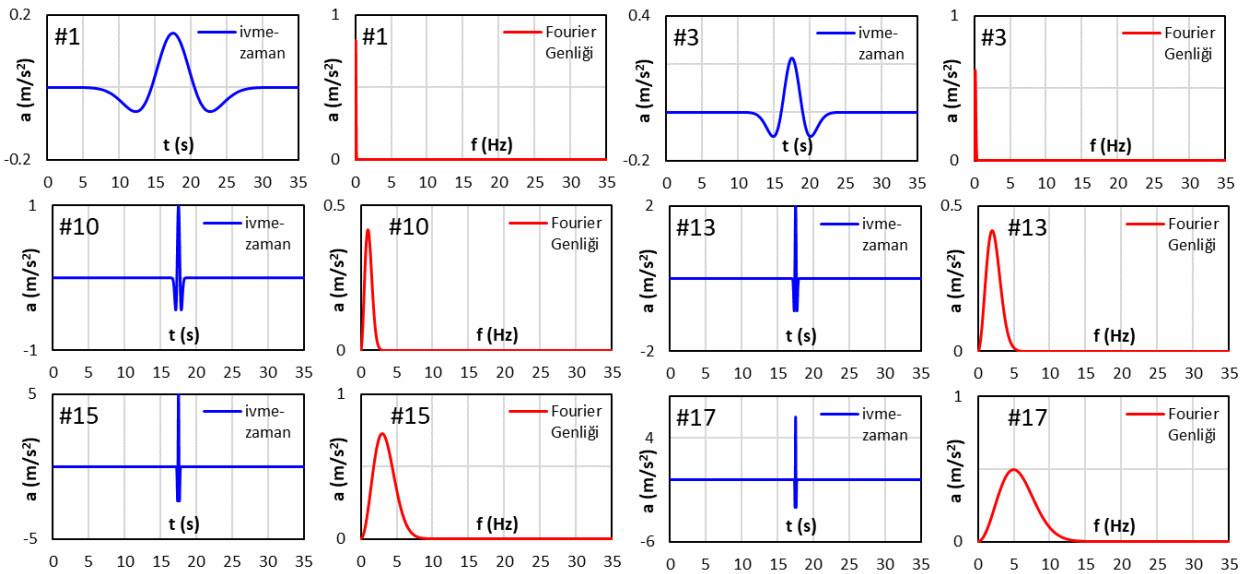
$$|A(f)| = A_0 \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \frac{f^2}{f_0^2} \cdot e^{-\frac{f^2}{f_0^2}} \quad (2.3)$$

Burada; A_0 orijinal denklemde 1 değerini almakla birlikte tercih edilen en büyük genlik, f ise spektrum frekansını ifade etmektedir. Şekil 1'de görüleceği üzere, ricker dalgacığının genlik spektrumu f_0 frekansında yumuşak geçişli bir pik değere ulaşmaktayken, bu çalışmada ilaveten elde edilmek istenen dalga formu yatay bir spektruma sahip olmalıdır. Bu amaçla 18 adet farklı f_0 ve A_0 çifti iteratif bir deneme yöntemiyle tespit edilmiş ve ilgili değerlere sahip modifiye ricker dalgacıları süperpoze edilmiştir. Bu işlem esnasında, fourier dönüşümü karmaşık sayı ürettiğinden, önce yatay

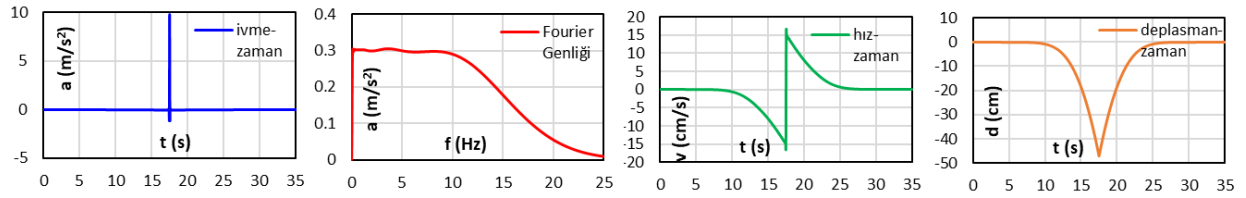
fourier spektrumunu elde edilip ardından bu spektrumu, kendisini oluşturan ivme bileşenlerine ayırmak mümkün olmamış, bunun yerine ivme değerleri süperpoze edilmiş, ardından oluşan girişim dalgasının fourier genlik spektrumunun istenilen değerlere uygunluğu kontrol edilmiştir. Girişim sonrası elde edilen dalga ise $1g$ (9.81 m/s^2) PGA değerine sahip olacak şekilde ölçeklendirilmiş ve nihai dalga formu elde edilmiştir. Kullanılan parametre takımlarının listesi Tablo 1'de, bileşen olarak kullanılan ivme kayıtlarının bazıları Şekil 2'de, oluşturulan nihai dalga formuna ait zaman serileri ve frekans içeriği Şekil 3'te görülmektedir.



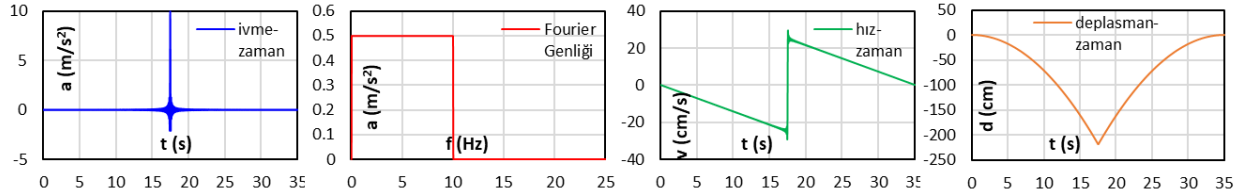
Şekil 1. Orijinal ve modifiye Ricker dalgacı ivme kayıtları ve Fourier genlik spektrumları (Original and modified Ricker wavelet acceleration records and Fourier amplitude spectra)



Şekil 2. Nihai dalga formunu oluşturan bileşenlerin bazılarına ait ivme ve frekans grafikleri (Acceleration and frequency plots of certain components that compose the final waveform)



Şekil 3. Analizlerde kullanılmak üzere oluşturulan nihai modifiye ricker dalgacığına ait ivme, frekans, hız ve deplasman grafikleri (Acceleration, frequency, velocity, and displacement graphs of the final modified Ricker wavelet generated for use in the analyses)



Şekil 4. Elde edilen nihai Ricker dalgacığı yerine kullanılabilecek bant sınırlı delta fonksiyonu (Band-limited delta function that can be used instead of the generated final Ricker wavelet)

Table 1. Kullanılan Ricker dalgacığı parametreleri (Parameters of the Ricker wavelets used)

#	f_0 (Hz)	A_0 (-)	t_0 (s)
1	0.075	0.15	17.5
2	0.1	0.15	17.5
3	0.15	0.225	17.5
4	0.2	0.2	17.5
5	0.25	0.25	17.5
6	0.3	0.3	17.5
7	0.4	0.4	17.5
8	0.5	0.75	17.5
9	0.75	1.25	17.5
10	1	1	17.5
11	1.25	1.25	17.5
12	1.5	1.5	17.5
13	2	2	17.5
14	2.5	1.25	17.5
15	3	5.25	17.5
16	4	4	17.5
17	5	6	17.5
18	10	55	17.5

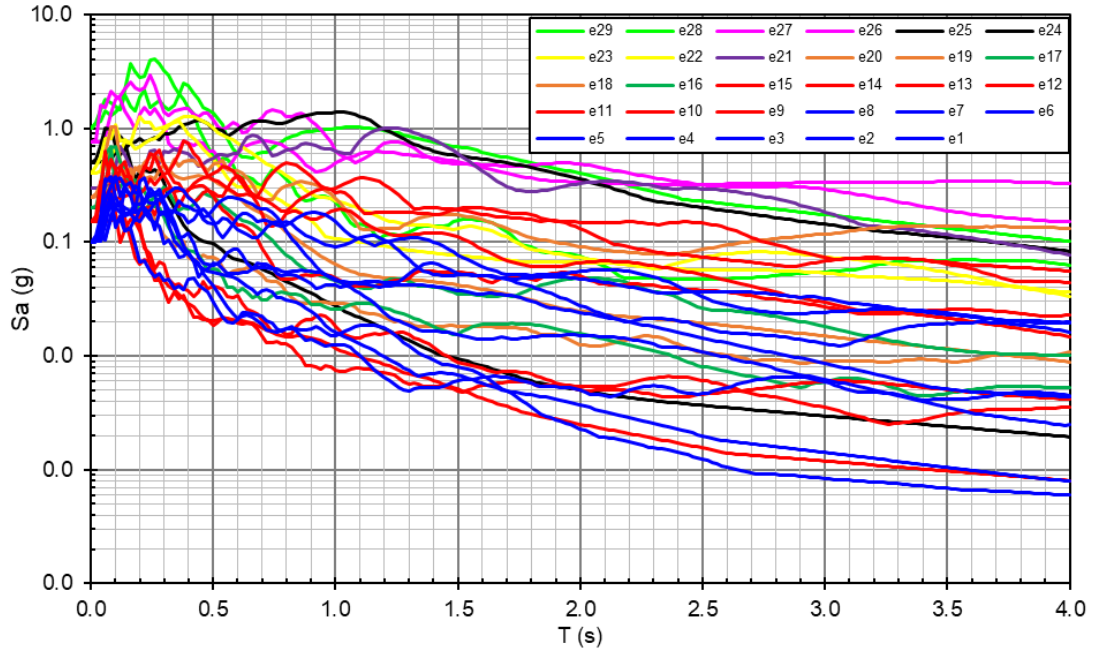
0-10 Hz arasında yatay fourier genlik spektrumuna sahip olan ve 18 farklı ricker bileşeninden oluşan nihai dalga formu, frekans, ivme genliği ve kullanım amacı olarak bant limitli Delta Fonksiyonu'na son derece benzemektedir. Fakat delta fonksiyonu teorik olarak sonsuz frekans içeriğine, genliğe ve süreye sahip bir fonksiyondur ve herhangi bir analizde kullanılması mümkün değildir. Bant limitli delta fonksiyonu ise frekans bakımından, analizlerde kullanılmak istenilen ideal içeriğe sahip olmasına karşın fiziksel dünyada karşılaşılabilecek mümkün olmayan teorik bir fonksiyondur ve frekans odağının dışında gerçekçi zemin hareketini simüle etme niteliği yoktur (Şekil

4). Daha gerçekçi ve doğada rastlanması mümkün olan ricker içeriklerinden oluşan modifiye ricker dalgacığı ise dilendiğinde kendisini oluşturan gerçekçi bileşenlerine ayrılıp hakim salınım frekansının zemin ve havza tepkisi üzerindeki etkisinin araştırılmasına müsaade etmektedir.

3.DEPREM KAYITLARI (EARTHQUAKE RECORDS)

Bu çalışma kapsamında havzaların sismik tepkisini hızlı ve kontrollü biçimde inceleyebilmek amacıyla üretilen, farklı ricker dalgacığı bileşenlerinin süperpozisyonu ile elde edilen modifiye ricker dalga formunun performansının değerlendirilmesi amacıyla havza analizlerinde kullanılmak üzere 29 adet gerçek deprem kaydı seçilmiş ve ölçeklendirilmiştir. Yapılacak olan analizler belirli bir konumu veya saha koşulunu temsil etmeyeceği, geniş ölçekli parametrik çalışmaların bir kapsamı olacağından, deprem seçimi esnasında çeşitliliğe önem verilmiş, mühendislik kayası ($V_{s30} > 760$ m/s) şartlarında kaydedilmiş, en küçük ölçek katsayısı ile kullanılabilecek kayıtlara yer verilmiştir.

Seçilen kayıtlar, ölçeklendirilmeden önce kendilerine en yakın olan 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5, 0.75, 1.0 olmak üzere 9 farklı PGA değerine ölçeklendirilmiş, bu sayede mümkün olduğunca gerçekçi ve çeşitli deprem senaryoları elde edilmiştir (Tablo 2). Basit ölçeklendirme yöntemi tercih edildiğinden, kayıtların frekans içeriği değiştirilmemiş ve aynı PGA değerine sahip olsalar dahi spektral ivme değerlerinde mümkün olduğunca saçılıma izin verilmiş, hakim frekans etkisi minimize edilmeye çalışılmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. Ölçeklendirilen deprem kayıtlarının %5 sönüm oranlı tepki spektrumları (5% damped response spectra of the scaled earthquake records)

Tablo 2. Seçilen deprem kayıtları ve ölçeklendirildikten sonraki PGA değerleri (Selected earthquake records and PGA values after scaling)

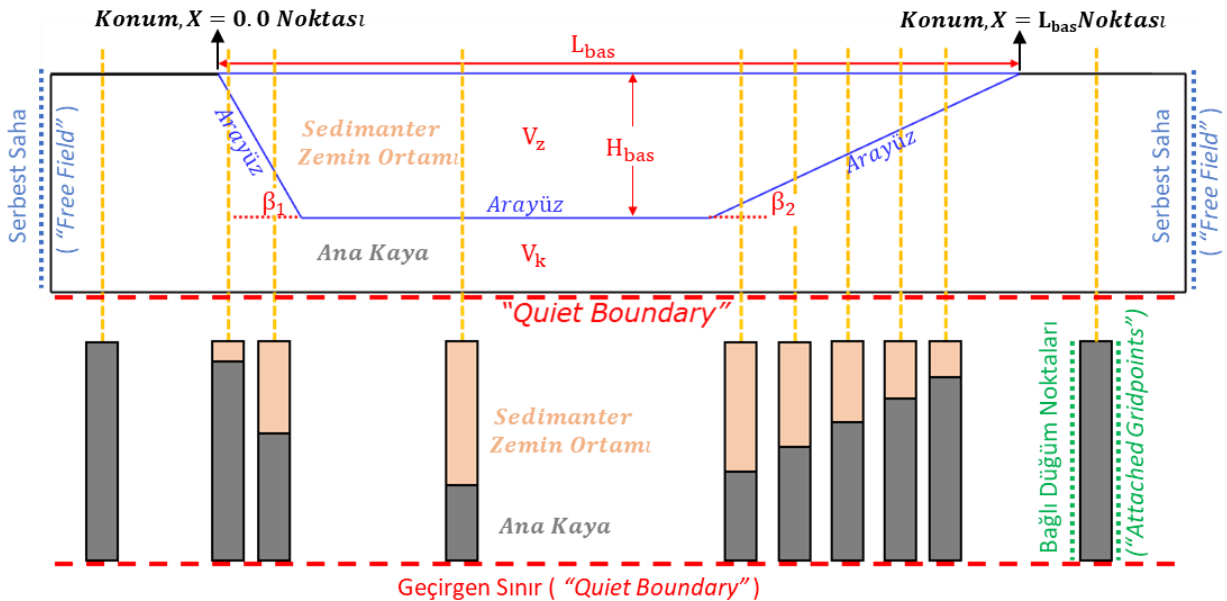
Kod	rsn (#)	İsim	Yıl	Rjb (km)	Büyükölç	Mekanizma	Ölçek	PGA (g)
e1	23	"San Francisco"	1957	9.7	5.28	Ters	1.166	0.1
e2	146	"Coyote Lake"	1979	21.5	6.61	Ters	1.063	
e3	680	"Whittier Narrows-01"	1987	1.8	7.35	Ters	0.895	
e4	797	"Loma Prieta"	1989	6.8	5.99	Ters Oblik	1.268	
e5	1011	"Northridge-01"	1994	8.8	6.93	Ters Oblik	0.968	
e6	1347	"Chi-Chi_ Taiwan"	1999	74.0	6.93	Ters Oblik	1.057	
e7	1649	"Sierra Madre"	1991	2.2	7.28	Doğrultu Atım	1.021	
e8	5655	"Iwate_ Japan"	2008	4.9	6.69	Ters	0.841	
e9	1091	"Northridge-01"	1994	23.1	6.69	Ters	0.993	
e10	1165	"Kocaeli_ Turkey"	1999	0.9	6.90	Doğrultu Atım	0.908	0.15
e11	1257	"Chi-Chi_ Taiwan"	1999	7.6	7.51	Doğrultu Atım	1.089	
e12	3954	"Tottori_ Japan"	2000	3.6	7.51	Doğrultu Atım	0.946	
e13	4167	"Niigata_ Japan"	2004	53.3	7.62	Ters Oblik	1.048	
e14	5650	"Iwate_ Japan"	2008	57.7	7.62	Ters Oblik	1.111	
e15	8171	"Anza-02"	2001	37.6	5.61	Ters	0.996	0.2
e16	3925	"Tottori_ Japan"	2000	3.2	6.93	Ters Oblik	1.083	
e17	5685	"Iwate_ Japan"	2008	15.2	6.61	Doğrultu Atım	1.084	0.25
e18	1161	"Kocaeli_ Turkey"	1999	15.6	6.61	Doğrultu Atım	0.959	
e19	4083	"Parkfield-02_ CA"	2004	4.7	6.00	Doğrultu Atım	1.019	0.3
e20	5680	"Iwate_ Japan"	2008	37.5	6.90	Ters	1.099	
e21	1108	"Kobe_ Japan"	1995	16.3	6.90	Ters	1.088	0.4
e22	765	"Loma Prieta"	1989	99.0	6.90	Ters	0.963	
e23	1050	"Northridge-01"	1994	64.3	6.90	Ters	0.962	0.5
e24	3548	"Loma Prieta"	1989	68.0	6.90	Ters	1.129	
e25	9071	"14151344"	2005	82.9	6.90	Ters	1.023	0.75
e26	143	"Tabas_ Iran"	1978	40.4	6.90	Ters	0.878	
e27	879	"Landers"	1992	57.2	6.90	Ters	1.034	1
e28	77	"San Fernando"	1971	4.2	7.14	Doğrultu Atım	0.820	
e29	8165	"Duzce_ Turkey"	1999	12.8	5.20	Doğrultu Atım	0.970	

4. ANALİZ MODELİ VE YÖNTEMİ (ANALYSIS MODEL AND METHODOLOGY)

Havza yapıları, kuvvetli yer hareketi üzerinde genlik, frekans içeriği, süre gibi temel unsurların tamamında etkiye sebep olur. Depreme dayanıklı yapı tasarımında ise bu etkileri doğru tanımlayacak tasarım parametresinin seçimi hem güvenlik hem verimlilik açısından önemlidir. Bu çalışmada, yüzeyde 2B analiz ile elde edilen spektral ivmenin ($S_a, 2B$) 1B analiz ile elde edilen spektral ivmeye ($S_a, 1B$) oranı ile ifade edilen şiddetlendirme (aggravation) faktörü AGF üzerinde araştırmalar gerçekleştirilmiştir. AGF, ilk olarak ortaya koyulduğu [3] çalışmasında olduğu gibi herhangi bir periyotta elde edilen maksimum şiddetlendirme olarak tanımlanmasının yanında periyoda bağlı da sıkça ifade edilmiştir [5][18]. Bu çalışmada, dünya çapında geçerli yönetmelik spektrumlarında sıkça referans olarak kullanılan 0.2 s ve 1.0 s periyotlarındaki şiddetlendirme faktörleri AGF(0.2) ve AGF(1.0) üzerinde özellikle durulmuştur; bu sayede idealize tasarım spektrumlarının yalnızca bu iki katsayı kullanılarak güncellenmesi mümkün olabilecektir.

Dinamik analizler FLAC v8.1 [21] sonlu farklar yazılımında gerçekleştirilmiştir. Yazılımın kendi programlama dili olan FISH aracılığı ile esnek değişken girdisine imkan tanıyan, çoklu parametrik analiz için kolaylaştırıcı bir kod hazırlanmıştır. Bu çalışmaya konu olan model değişkenleri Şekil 6'da görselleştirilmiştir. Burada; L_{bas} havzanın yüzey genişliğini, H_{bas} havza derinliğini, β_1 ve β_2 kaya arayüzey eğimlerini, V_z sedimanter zeminin kayma

dalgası hızını, V_k ise anakayanın kayma dalgası hızını ifade etmektedir. 2B modellerin düşey sınırlarında Cundall vd. [22] tarafından geliştirilen serbest saha ("free field") sönümleyici elemanlar kullanılırken 1B modellerdeki düğüm noktaları kendilerine karşılık gelen kenardaki düğüm noktaları ile "attach" komutu ile bağlanmış, bu sayede 1B yaklaşıma uygun bir zemin kolonu oluşturulmuştur. Yatay sınırlarda ise Lysmer & Kuhlemeyer [23] tarafından geliştirilen geçişgen ("quiet") sönümleyici elemanlar kullanılmıştır. Yine aynı çalışmada önerilen düğüm noktaları arası izin verilebilir mesafelere dikkat edilerek sonlu farklar ağı hazırlanmış, buna göre her tabaka için dalga boyu içerisine 10 adet düğüm noktası yerleştirilmiştir (f: 25 Hz, V_s : 250 m/s çifti için 1.0 m aralığa denk gelmektedir). 2B modellerin yüzeylerinde her 10 m aralıklarla okuma alınırken, her okuma noktasına ait 1B model hazırlanmış ve analiz tekrar edilmiştir. Analizlerde yalnızca trapez kesitli havza geometrisinden kaynaklı havza etkisini yalın bir şekilde tespit edebilmek, plastisite ve aşırı sönümden kaynaklı etkileri gözardı edebilmek amacıyla homojen 2 farklı jeolojik birim (zemin ve kaya) kullanılmış, bünye modeli olarak doğrusal elastik model tercih edilmiştir. Daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi doğrusal olmayan davranışın havza etkisi üzerindeki çoğunlukla azaltıcı etkisi bu sayede ihmal edilmiş, sönümsüz ortamda havza etkilerinin üst limit değerlerinin elde edilmesi hedeflenmiştir; bundan kaynaklı muhtemel aşırı büyütme 1B ve 2B modellerin ikisinde de olacağından AGF(T) değerlendirmelerinde bir engel oluşturması beklenmemektedir.

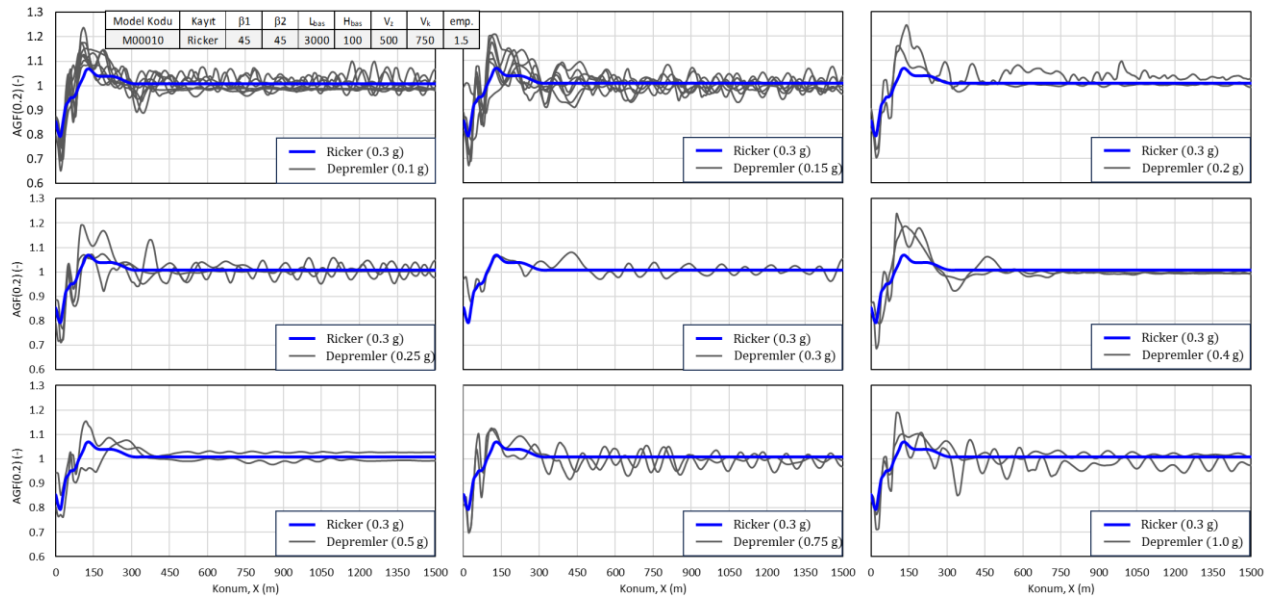


Şekil 6. Trapez kesitli sedimanter bir havzada 2B (üst) ve 1B (alt) modellerin şematik tanıtımı (Schematic representation of 2D (top) and 1D (bottom) models in a trapezoidal cross-section sedimentary basin)

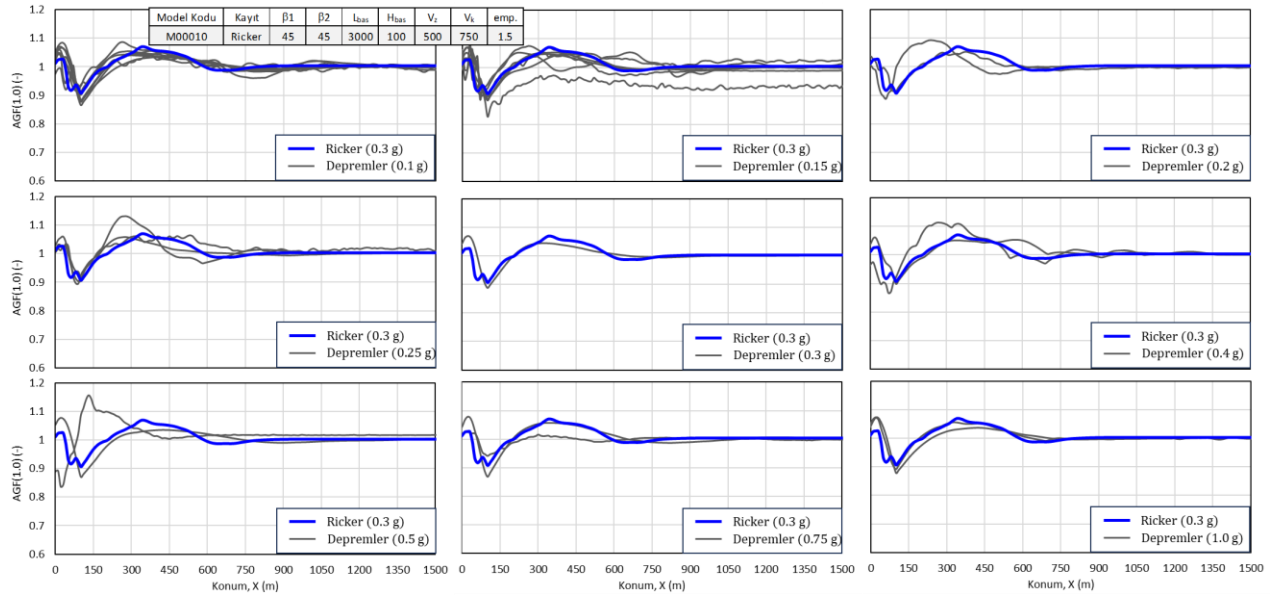
5. NÜMERİK ANALİZLER (NUMERICAL ANALYSES)

Kullanılan modifiye ricker dalgacığının AGF(T) bakımından yeterliliğini tespit etmek amacıyla detayları Şekil 6'da paylaşılan model üzerinde hem gerçek kayıtlarla hem de Türkiye'de sıkça tasarım ivmesi olarak kullanılan temsili 0.3 g değerine ölçeklenmiş sentetik dalga formu ile doğrusal elastik dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre AGF(0.2) (Şekil 7) ve AGF(1.0) (Şekil 8) değerlerinin havza yüzeyindeki mekansal değişimi her PGA değeri için gerçek deprem kayıtları ve sentetik kayıt için son derece benzer

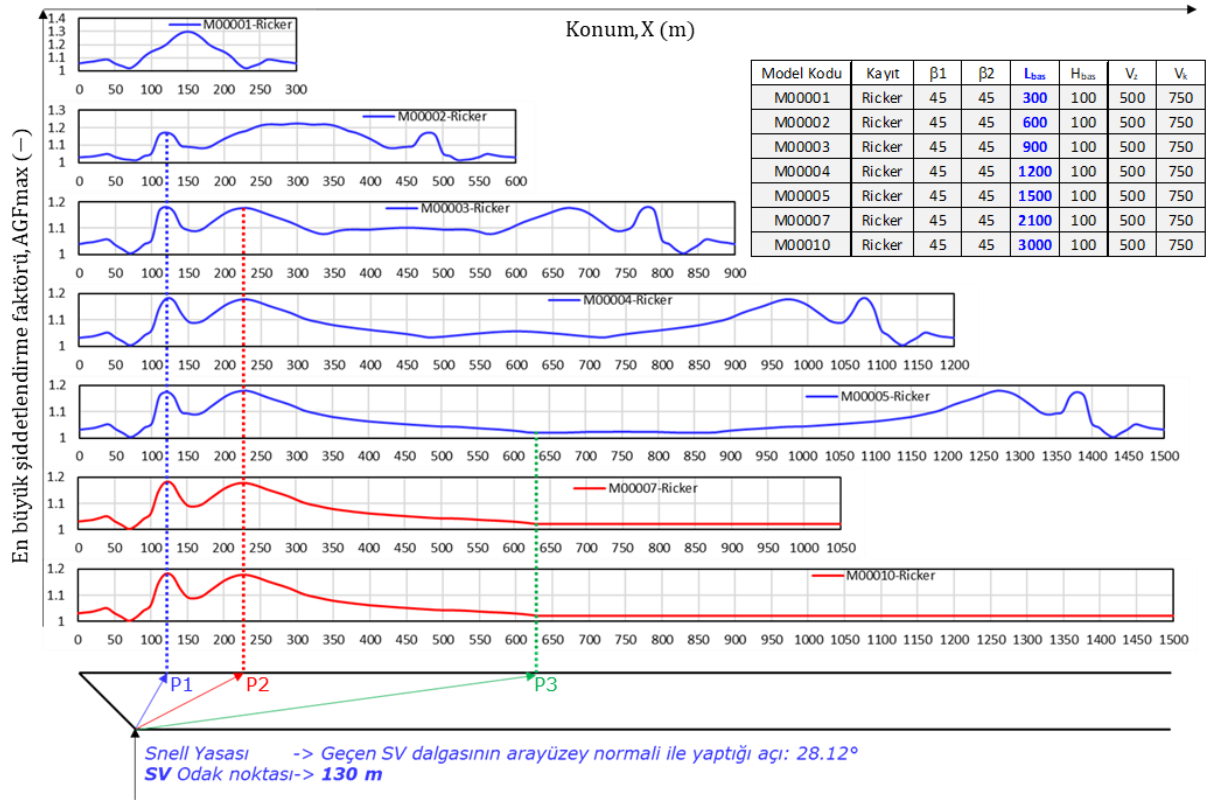
olduğu anlaşılmıştır. Bu, doğrusal elastik şartlar altında ivme kaydının, frekans içeriğinin ve genlik şiddetinin AGF(T) değerleri üzerinde kritik bir rol oynamadığını, bu şartlar altında yapılacak olan nümerik çalışmalarda verimliliği arttırmak amacıyla bu çalışmada olduğu gibi temsili bir PGA değerine ölçeklendirilmiş ve geniş frekans aralığında yatay genliğe sahip sentetik dalga formlarının kullanılmasının, AGF(T) değerlerinin genel dağılımını ve şiddetini tespit etmek amacıyla kullanışlı bir araç olduğunu göstermektedir.



Şekil 7. Modifiye Ricker dalgacığı ve gerçek deprem kayıtları ile elde edilen AGF(0.2) dağılımı
(Distribution of AGF(0.2) obtained with the modified Ricker wavelet and real earthquake records)



Şekil 8. Modifiye Ricker dalgacığı ve gerçek deprem kayıtları ile elde edilen AGF(1.0) dağılımı
(Distribution of AGF(1.0) obtained with the modified Ricker wavelet and real earthquake records)



Şekil 9. Farklı genişlikteki havzalarda elde edilen AGFmax dağılımı (Distribution of AGFmax obtained in basins of different widths)

Modifiye ricker dalgacığının doğrusal elastik analizlerde havza tepkisini AGF(T) kapsamında yeterli şekilde ifade edebildiğinin anlaşılmasının ardından AGF(T) üzerinde daha kapsamlı analizler yapılmıştır. Şekil 9’ da havza yüzeyi uzunluğu L_{bas} , değişimi ile birlikte, bütün periyotlar içerisinde elde edilen AGF(T)’lerin zarfı olarak en büyük AGF’yi ifade eden AGFmax dağılımında gözlemlenen değişim özetlenmiştir. Burada, M00007 ve M00010 modelleri havza ortasına kadar, diğer modeller tam ölçekte olarak gösterilmiş, bütün modeller tam ölçekte analiz edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, havzanın her iki kenarında Snell Yasası ile açıklanan kırılımdan kaynaklı olarak P1 ve P2 noktalarında cisim dalgalarının odaklanması açık şekilde gözlemlenmiştir. Bunun yanında yine her iki kenar için de kenar etkisinin sönümlendiği, bu model için 650 m değerini alan bir P3 noktası mevcuttur. $2 \times P3=1300$ değerinden daha düşük genişliğe sahip olan modellerde, karşılıklı iki kenar etkisinin girişimi sonucu havza ortasında AGmax değeri gözlemlenirken, 1260’ dan daha geniş havzalarda P3’ten sonra bir AG değeri gözlemlenmemiştir.

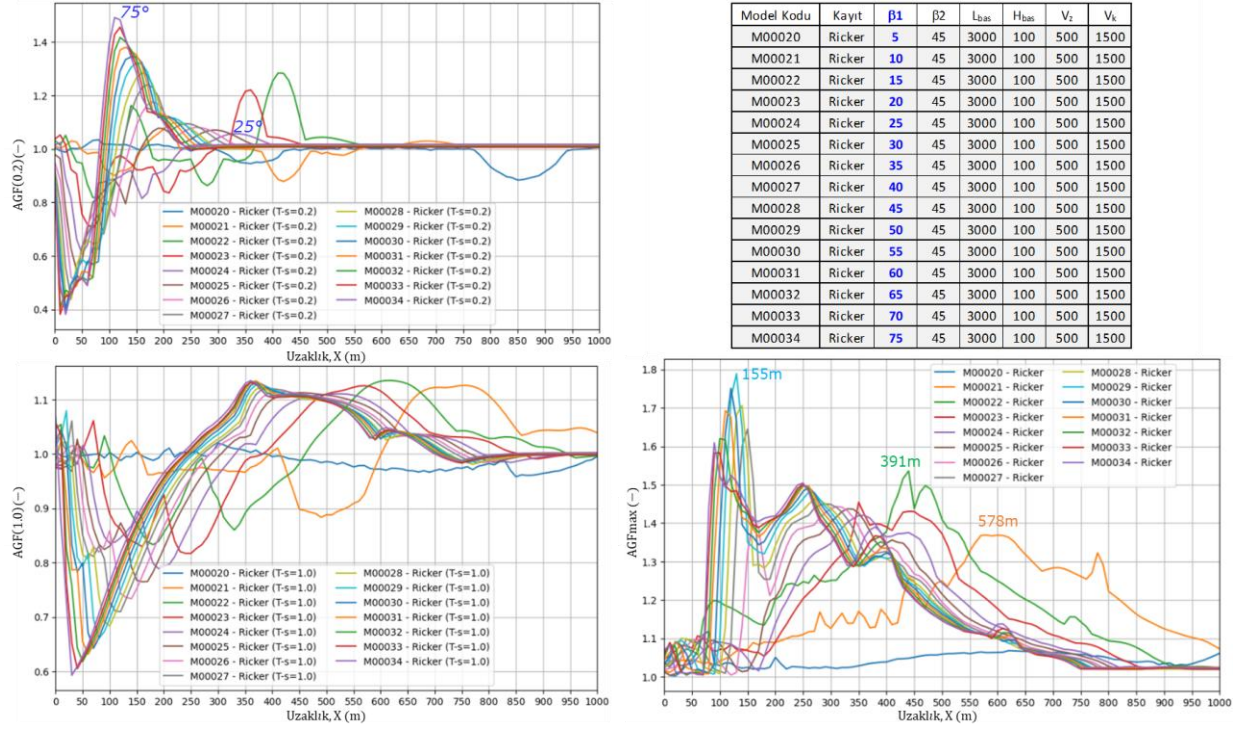
Şekil 10’ da AGF(0.2), AGF(1.0) ve AGFmax değerlerinin arayüzey açısı β_1 ’e bağlı olarak yüzeydeki dağılımı özetlenmiştir. Buna göre, AGF(0.2) yüksek eğimde en büyük değeri almakta, 20° eğime kadar düzenli olarak değeri azalmakta ve

etki alanı genişlemektedir. Burada etki alanı arayüzey genişliğinden dolayı artmaktayken, P1 noktası için çizilen açının değeri küçülmektedir; yani açı yataya yaklaştıkça daha az ilave alan etkilenebilmektedir. Benzer patern AGF(1.0) için de sözkonusudur. Model için hesaplanan $i_c=20^\circ$ ye denk gelen eğim her iki AGF(T) için de öneme sahip görülmektedir. AGF(0.2) değerinde gözlemlenen patern bu eğimden daha yatay eğimler için geçerli olmazken, AGF(1.0) için ise bu eğimden daha yatay eğimlerde etki alanı artışı artmaktadır. AGFmax panelinde bazı eğim değerleri için Snell yasası ile hesaplanan kırılma açısının havzanın alt köşesinden yüzeye uzatılması ile analiz öncesinde tahmin edilen P1 odak noktası değerleri grafik alanında işlenmiştir. Buna göre hesaplanan ve öngörülen değerler 50° için 25m, 15° derece için 50m farklı, 10° için ise analiz sonucuyla aynı değerde tespit edilmiştir.

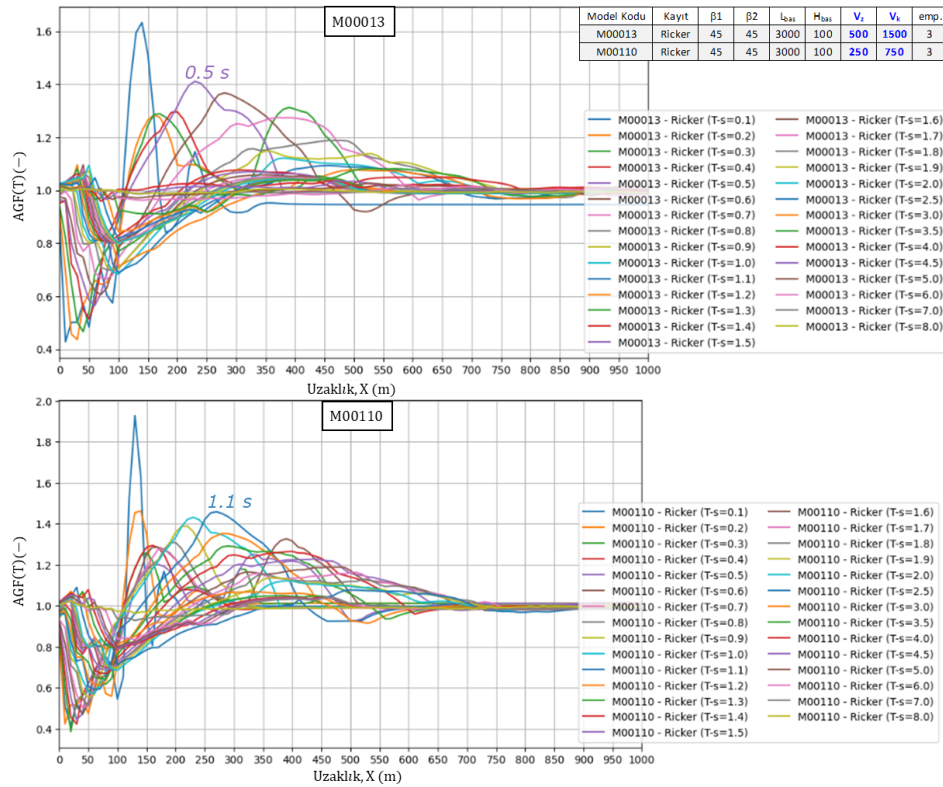
Şekil 11’de zemin-kaya empedansı 3 olan, havza içi sedimanın kayma dalgası hızının ise 500 m/s ve 250 m/s olarak farklılık gösterdiği iki model üzerinde 0.1 s ve 8.0 saniye arasındaki periyotlarda gözlemlenen AGF(T) değerlerinin yüzeydeki dağılımları sunulmuştur. M00013 modelinde zeminin 1B hakim salınım periyodu 0.8 s, M00110 modelinde ise 1.6 s’dır. Buna karşın, çoğunlukla en büyük AGF(T)’nin saptandığı kısa periyot değerleri hariç en büyük şiddetlendirmenin tespit edildiği

değerler sırasıyla 0.5 s ve 1.1 s olarak elde edilmiştir. Bu durum, 2B salınım periyodunun etkisini açığa çıkarmakta ve 1B salınım periyodu ile ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır. 1B salınım periyodu büyüdükçe 2B şiddetlendirme periyodu da

büyümüş, geometrik şartlar aynı olmasına rağmen bu çalışmada P2 noktası olarak isimlendirilen uzun periyotlardaki şiddetlendirmenin en büyük olduğu okuma noktası ise büyüyen periyot ile birlikte havza kenarından uzaklaşmıştır.



Şekil 10. Kaya arayüzeyi açısının AGF(0.2), AGF(1.0) ve AGFmax üzerindeki etkisi (The effect of bedrock interface angle on AGF(0.2), AGF(1.0), and AGFmax)



Şekil 11. Farklı 1B hakim periyoda sahip sedimanter zeminler için AGF(T) dağılımı (Distribution of AGF(T) for sedimentary soils with different dominant 1D periods)

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışma kapsamında, sedimanter havzaların çok boyutlu sismik tepkisinin parametrik olarak incelenebilmesi amacıyla, düzenlenmiş bir modifiye Ricker dalgacığı üretilmiş ve bu dalga formu doğrusal elastik analizlerde gerçek deprem kayıtlarıyla karşılaştırmalı olarak kullanılmıştır. 0–10 Hz arasında yatay Fourier genlik spektrumuna sahip olup, çoklu bileşenlerin süperpozisyonu ile oluşturulmuş ve frekans içeriği bakımından sahada karşılaşılabilecek baskın periyodu olmayan bir yer hareketini temsil edebilecek şekilde tasarlanmıştır. Gerçek deprem kayıtları ile kıyaslamalar sonucunda bu dalga formunun, havzaların periyoda bağlı şiddetlendirme faktörü AGF(T) dağılımını anlamada kullanışlı bir araç olduğu sonucuna varılmıştır. Bu şekilde gerçekleştirilen analizlerin, belirli bir sahanın özellikle yüksek genliğe sahip yer hareketi etkisi altında doğrusal olmayan zemin davranışını isabetle simüle edebilmesi mümkün olmamasına karşın, havzaların genel davranışının incelenmesi ve tasarım spektrumlarına etkisinin ifade edilmesi kapsamında yapılacak olan ilksel analizler için son derece yeterli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Yapılan parametrik analizler sonucunda, havza genişliği (L), arayüzey eğimi (β), zemin rijitliği (V_s) ve rezonans periyodu gibi parametrelerin şiddetlendirme üzerindeki etkileri detaylı biçimde ortaya konmuştur. Snell yasası ile yaklaşık olarak öngörülebilir uzaklıktaki bir P1 noktasında kısa periyotlarda (0.0-0.2) şiddetlendirmenin bir lokal maksimuma ulaştığı, ardından daha uzun periyotların sebep olduğu daha uzaktaki bir P2 noktasında ikincil bir lokal maksimumun oluştuğu tespit edilmiştir. Yeterince geniş havzalarda ise bir P3 noktasında şiddetlendirme 1.0 değerine ulaşmaktadır. Bu durum, trapez kesitli havza yüzeyindeki şiddetlendirmenin, her kenar için 3 farklı kırılma noktasına sahip çok kırıklı bir eğri ile idealize edilmesinin mümkün olduğu fikrini ortaya çıkarmaktadır.

Elde edilen sonuçlar trapez kesitli havzalarda zemin-kaya arayüzeyi eğiminin, yüzeyde tespit edilen şiddetlendirme üzerinde son derece etkili olduğunu göstermiştir. Eğim yataylaştıkça AGF(0.2) değeri küçülmüş, etki alanı genişlemiştir; dik bir arayüzey eğimine sahip havzalarda kenar etkisinin daha belirgin noktalarda daha yoğun odaklandığı anlaşılmıştır. Uzun periyot (1.0 s) bölgesindeki şiddetlendirme ise arayüzey eğiminden mertebe olarak etkilenmemesine karşın etkili olduğu bölge arayüzey eğiminin

yataylaşmasıyla birlikte havza ortalarına doğru ilerlemiştir.

Sonuç olarak, modifiye Ricker dalgacığıyla gerçekleştirilen bu parametrik çalışmanın bulguları, tasarım spektrumlarına dahil edilmesi gereken 2B düzeltme katsayılarının belirlenmesinde kullanışlı bir yöntem önermektedir. Gerçek deprem kayıtlarının karmaşık frekans içeriklerinden arındırılmış bu tür kontrollü analizlerin, şiddetlendirme faktörlerinin fiziksel kökenlerini ayırt edebilme kapasitesi açısından literatüre önemli katkı sunduğu değerlendirilmektedir. Ayrıca, bu çalışma, gelecekte yapılacak doğrusal olmayan analizler için de referans niteliğinde bir çerçeve sunmaktadır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Çalışma boyunca TÜBİTAK 121M760 numaralı proje kapsamında sağlanan desteklerinden dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na teşekkürlerimizi sunarız.

We would like to express our gratitude to The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TÜBİTAK) for the support provided throughout the study under project number 121M760.

ETİK STANDARTLARI BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Yazarlar çalışmaya eşit oranda katkı sağlamıştır.

The authors contributed equally to this study.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] P. Y. Bard, M. Bouchon, The two-dimensional resonance of sediment-filled valleys. Bulletin of the Seismological Society of America, 75: 2 (1985) 519–541.
- [2] A. S. Papageorgiou, J. Kim, Oblique incidence of SV-waves on sediment-filled valleys:

- Implications for seismic zonation. In Proceedings of the Fourth International Conference on Seismic Zonation (Vol. 3), Stanford, CA (1991) 545–552.
- [3] F. J. Chávez-García, E. Faccioli, Complex site effects and building codes: Making the leap. *Journal of Seismology*, 4: 1 (2000) 23–40.
- [4] D. Komatitsch, Q. Liu, J. Tromp, P. Süß, C. Stidham, J. H. Shaw, Simulations of ground motion in the Los Angeles basin based upon the spectral-element method. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94: 1 (2004) 187–206.
- [5] M. P. Moschetti, D. Churchwell, E. M. Thompson, J. M. Rekoske, E. Wolin, O. S. Boyd, Seismic wave propagation and basin amplification in the Wasatch Front, Utah. *Seismological Research Letters*, 92: 6 (2021) 3626–3641.
- [6] B. Zhang, A. S. Papageorgiou, Simulation of the response of the Marina District Basin, San Francisco, California, to the 1989 Loma Prieta earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86: 5 (1996) 1382–1400.
- [7] H. Kawase, 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 (1996) 25–34.
- [8] M. E. Hasal, R. Iyisan, A numerical study on comparison of 1D and 2D seismic responses of a basin in Turkey. *American Journal of Civil Engineering*, 2: 5 (2014) 123–133.
- [9] Amini, D., Maghoul, P., Perret, D., & Gatmiri, B. (2022). Two-dimensional basin-scale seismic site effects in the Kitimat Valley, British Columbia, Canada: A practical example of using a fast hybrid FE/BE method. *Engineering Geology*, 311, 106872.
- [10] Makra, K., Rovithis, E., Riga, E., Raptakis, D., & Pitilakis, K. (2021). Amplification features and observed damages in İzmir (Turkey) due to 2020 Samos (Aegean Sea) earthquake: identifying basin effects and design requirements. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19(12), 4773–4804.
- [11] R. Rodriguez-Plata, A. G. Özcebe, C. Smerzini, C. G. Lai, Aggravation factors for 2D site effects in sedimentary basins: The case of Norcia, central Italy. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 149 (2021) 106854.
- [12] K. Makra, F. J. Chávez-García, D. Raptakis, K. Pitilakis, 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 (2005) 303–315.
- [13] L. F. Bonilla, R. J. Archuleta, D. Lavallée, Hysteretic and dilatant behavior of cohesionless soils and their effects on nonlinear site response: Field data observations and modeling. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95: 6 (2005) 2373–2395.
- [14] J. Zhang, C. Zhao, Response spectral amplification ratios from 1-D and 2-D nonlinear soil site models. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28: 10 (2008) 728–740.
- [15] H. Khanbabazadeh, R. Iyisan, A numerical study on the 2D behavior of single and layered clayey basins. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12: 4 (2016) 1515–1539.
- [16] B. Ozaslan, R. Iyisan, Gemlik Havzası'nda 2B doğrusal olmayan analizlerle tasarım spektrumunun değerlendirilmesi. *Proceedings of the 2022 Türkiye Deprem Mühendisliği Konferansı* (2022).
- [17] Chen, W., Liu, Y., & Zhang, J. (2023). Nonlinear seismic response and amplification effect of 3D sedimentary basin based on bounding surface constitutive model. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 158, 107292.
- [18] E. Riga, K. Makra, K. Pitilakis, Aggravation factors for seismic response of sedimentary basins: A code-oriented parametric study. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 90 (2016) 242–264.
- [19] N. Ricker, The form and laws of propagation of seismic wavelets. *Geophysics*, 18: 1 (1953) 10–40.
- [20] Aki, K., & Richards, P. G. (2002). *Quantitative Seismology* (2nd ed.). University Science Books.
- [21] Itasca Consulting Group, Inc. (2019). *FLAC — Fast Lagrangian Analysis of Continua*, Version 8.1. Minneapolis, MN: Itasca.
- [22] Cundall, P. A., Hart, R. D., & Lemos, J. V. (1980). NESSI: A continuum code for nonlinear geomechanical modeling. In *Proceedings of the International Symposium on Numerical Models in Geomechanics (NUMOG)* (pp. 163–172). Zurich, Switzerland.
- [23] J. Lysmer, R. L. Kuhlemeyer, Finite dynamic model for infinite media. *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, 95: EM4 (1969) 859–877.