SEDİMANTER HAVZALARIN MODİFİYE RICKER GİRDİSİ İLE SPEKTRAL ŞİDDETLENDİRME ANALİZİ

SPECTRAL AGGRAVATION ANALYSIS OF SEDIMENTARY BASINS USING A MODIFIED RICKER WAVELET

Hidayet Kemal UYAR[1], Sadık ÖZTOPRAK[2]

ÖZET

Sedimanter havzaların iki boyutlu sismik tepkisinin parametrik olarak incelenmesinde, kullanılan giriş hareketinin frekans içeriği ve genlik özellikleri sonuçların yorumlanmasını güçleştirebilmektedir. Bu çalışmada, geniş ölçekli doğrusal elastik havza analizlerinde kontrollü ve tekrarlanabilir bir dinamik giriş olarak Modifiye Ricker dalgacığının kullanılabilirliği araştırılmıştır. Kullanılan sentetik hareket, farklı merkez frekanslarına ve genliklere sahip 18 Ricker bileşeninin süperpozisyonu ile oluşturulmuş ve 0–10 Hz aralığında yaklaşık sabit Fourier genlik spektrumuna sahip olacak şekilde düzenlenmiştir. Modifiye Ricker dalgacığının gerçek deprem kayıtlarını spektral şiddetlendirme faktörü AGF(T) bakımından temsil kabiliyeti, mühendislik kayası koşullarında kaydedilmiş 77 gerçek deprem kaydından oluşan genişletilmiş bir veri seti kullanılarak değerlendirilmiştir. Gerçek kayıtlar 0.25 g, 0.50 g ve 0.75 g PGA seviyelerine ölçeklenerek aynı referans havza modeli üzerinde analiz edilmiştir. Sonuçlar, farklı PGA seviyelerinde elde edilen AGF(T) eğrilerinin büyük ölçüde değişmediğini ve Modifiye Ricker dalgacığının gerçek deprem kayıtlarından elde edilen ortalama şiddetlendirme davranışını hem büyüklük hem de mekânsal dağılım bakımından başarıyla temsil ettiğini göstermiştir. Bu bulgular, doğrusal elastik parametrik havza analizlerinde çok sayıda gerçek kayıt yerine kontrollü geniş bantlı sentetik bir giriş hareketinin kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Sedimanter havza, spektral şiddetlendirme faktörü, Modifiye Ricker dalgacığı, doğrusal elastik analiz, sonlu farklar yöntemi*

ABSTRACT

In the parametric investigation of the two-dimensional seismic response of sedimentary basins, the frequency content and amplitude characteristics of the input motion may complicate the interpretation of the results. In this study, the applicability of a Modified Ricker wavelet as a controlled and repeatable dynamic input for large-scale linear elastic basin analyses is investigated. The synthetic motion was generated by superimposing 18 Ricker components with different central frequencies and amplitudes and was adjusted to provide an approximately constant Fourier amplitude spectrum over the 0–10 Hz frequency range. The capability of the Modified Ricker wavelet to represent real earthquake records in terms of the spectral aggravation factor, AGF(T), was evaluated using an extended dataset consisting of 77 real earthquake records obtained under engineering-rock site conditions. The records were scaled to PGA levels of 0.25 g, 0.50 g, and 0.75 g and applied to the same reference basin model. The results indicate that the AGF(T) curves obtained at different PGA levels remain essentially unchanged and that the Modified Ricker wavelet successfully represents the mean aggravation behavior obtained from the real earthquake records in terms of both magnitude and spatial distribution. These findings demonstrate that a controlled broadband synthetic input motion can be effectively used instead of a large number of real earthquake records in linear elastic parametric analyses of sedimentary basins.

Keywords: *Sedimentary basin, spectral aggravation factor, Modified Ricker wavelet, linear elastic analysis, finite difference method.*

[1] Dr., Zemin Etüd ve Tasarım A.Ş., hidayetkemal.uyar@zeminas.com.tr (Sorumlu yazar)
[2] Prof. Dr., İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, oztoprak@iuc.edu.tr

1. GİRİŞ

Yerel zemin koşulları, deprem dalgalarının genliği, frekans içeriği ve süresi üzerinde önemli değişikliklere yol açarak yüzeyde gözlenen kuvvetli yer hareketini doğrudan etkileyebilmektedir. Mühendislik uygulamalarında bu etki çoğunlukla, yatay tabakalı zemin ortamlarında düşey dalga yayılımını esas alan bir boyutlu (1B) zemin tepki analizleri ile değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, sedimanter havzalar gibi zemin-kaya arayüzünün yatay yönde belirgin geometrik değişimler gösterdiği ortamlarda yansıma, kırılma, odaklanma ve yüzey dalgası oluşumu gibi iki ve üç boyutlu mekanizmalar da yüzey hareketini kontrol etmektedir. Bard ve Bouchon (1985), Papageorgiou ve Kim (1991) ve Chávez-García ve Faccioli (2000) gibi erken çalışmalar havza geometrisinin yer hareketinin şiddeti ve frekans içeriği üzerindeki önemini ortaya koymuş; daha sonraki çalışmalar bu etkileri dalga odaklanması, kenar etkisi ve yüzey dalgası girişimi ile ilişkilendirmiştir (Zhang ve Papageorgiou, 1996; Kawase, 1996; Komatitsch ve diğ., 2004; Moschetti ve diğ., 2021).

Havza etkisinin incelenmesinde iki ve üç boyutlu nümerik modeller önemli bir araştırma aracı haline gelmiştir. Hasal ve İyisan (2014), Amini ve diğ. (2022), Makra ve diğ. (2021) ve Rodriguez-Plata ve diğ. (2021) gibi çalışmalar, çok boyutlu analizlerin havza kenarlarındaki dalga yansıması ve kırılması, rezonans bölgeleri ve yüzey boyunca değişen şiddetlendirme davranışını 1B analizlere kıyasla daha ayrıntılı biçimde temsil edebildiğini göstermektedir. Özellikle idealize havza geometrileri üzerinde gerçekleştirilen parametrik çalışmalar, farklı geometrik ve dinamik değişkenlerin etkilerinin birbirinden ayrıştırılması açısından önemli bir yaklaşım sunmaktadır (Makra ve diğ., 2005; Riga ve diğ., 2016). Havzanın oluşturduğu ilave etkinin nicel olarak ifade edilmesinde ise 2B analizlerden elde edilen spektral ivmelerin aynı konumdaki eşdeğer 1B zemin tepkisine oranlanmasına dayanan spektral şiddetlendirme faktörü, AGF(T), yaygın olarak kullanılmaktadır.

Parametrik analizlerde kullanılan giriş hareketi, model girdilerinden bağımsız ilave bir değişkenlik kaynağı oluşturmaktadır. Gerçek deprem kayıtları; genlik, süre, faz yapısı ve frekans içeriği bakımından önemli farklılıklar göstermekte, bu durum farklı model parametrelerinin etkilerinin karşılaştırılmasını güçleştirebilmektedir. Bu nedenle literatürde doğrusal elastik veya doğrusal viskoelastik modeller ile kontrollü sentetik giriş hareketlerinin birlikte kullanıldığı çalışmalara rastlanmaktadır. Doğrusal elastik idealizasyon, gerçek zemin davranışının tüm ayrıntılarını temsil etmekten ziyade, geometri ve dalga yayılımına bağlı mekanizmaların doğrusal olmayan malzeme davranışından ayrıştırılmasına olanak sağlamaktadır. Benzer biçimde, Gabor ve Ricker türü sentetik hareketler giriş frekans içeriğinin kontrol altında tutulmasını sağlayarak parametrik analizlerde karşılaştırılabilirliği artırmaktadır. Riga ve diğ. (2016) Gabor darbelerini parametrik havza analizlerinde kullanmış; Rodriguez-Plata ve diğ. (2021) ise Gabor ve Ricker tipi sentetik hareketleri gerçek deprem kayıtlarıyla birlikte değerlendirmiştir.

Bu yaklaşım doğrultusunda Uyar ve Öztoprak (2025) tarafından, farklı merkez frekanslarına ve genliklere sahip 18 Ricker bileşeninin süperpozisyonundan oluşan Modifiye Ricker dalgacığı geliştirilmiştir. Oluşturulan sentetik hareket, 0–10 Hz frekans aralığında yaklaşık sabit Fourier genlik spektrumuna sahip olacak şekilde düzenlenmiş ve böylece analiz sonuçlarının belirli bir baskın giriş frekansına bağımlılığının azaltılması amaçlanmıştır. İlk çalışmada Modifiye Ricker dalgacığının kullanılabilirliği 29 gerçek deprem kaydı ile karşılaştırılmış ve doğrusal elastik analizlerde spektral şiddetlendirme davranışını temsil etmede uygun bir giriş hareketi olduğu gösterilmiştir.

Bu çalışmada söz konusu doğrulama kapsamı genişletilmiş ve Modifiye Ricker dalgacığının spektral şiddetlendirme analizlerindeki temsil kabiliyeti daha geniş bir gerçek deprem veri seti üzerinden değerlendirilmiştir. Bu amaçla ESM ve PEER veri tabanlarından elde edilen toplam 77 gerçek deprem kaydı aynı referans havza modeli üzerinde analiz edilmiş ve tüm kayıtlar ayrı ayrı 0.25 g, 0.50 g ve 0.75 g PGA seviyelerine ölçeklendirilmiştir. Çalışmada, giriş hareketi genliğinin doğrusal elastik koşullarda AGF(T) üzerindeki etkisi ile Modifiye Ricker dalgacığının gerçek deprem kayıtlarından elde edilen ortalama şiddetlendirme davranışını ne ölçüde temsil edebildiği araştırılmıştır. Böylece, çok sayıda tekrarlı nümerik analiz gerektiren havza çalışmalarında kontrollü geniş bantlı tek bir sentetik giriş hareketinin kullanılabilirliği değerlendirilmiştir.

2. YÖNTEM

2.1. Modifiye Ricker Dalgacığı

Ricker dalgacığı, frekans içeriğinin merkez frekans parametresi üzerinden doğrudan kontrol edilebilmesi nedeniyle dalga yayılımı problemlerinde yaygın olarak kullanılan bant sınırlı sentetik bir hareket biçimidir (Ricker, 1953). Bununla birlikte tek bir Ricker dalgacığının Fourier genlik spektrumu belirli bir merkez frekans çevresinde yoğunlaştığından, geniş bir frekans aralığındaki havza tepkisinin tek analiz içerisinde değerlendirilmesinde giriş hareketinin baskın frekansına bağlılık oluşmaktadır.

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

Burada; f_0 hakim frekans, t mevcut zamanı, a(t) ise t anındaki ivmeyi ifade etmektedir. Orijinal Ricker denklemi, zaman ortamında en büyük genlik değerini t=0 anında alan, simetrik tepe merkezli bir darbeyi temsil etmektedir. Frekans spektrumu, hakim frekans parametresine bağlı olarak değiştiğinden, zemin ortamlarının farklı frekans içeriğine sahip dalgalara verdiği tepkiyi değerlendirmede kullanışlıdır. Uyar ve Öztoprak (2025) tarafından orijinal denklem, tercih edilen bir merkezi t_0 anında, tercih edilen en büyük genliği sağlayacak şekilde aşağıdaki gibi modifiye edilmiştir.

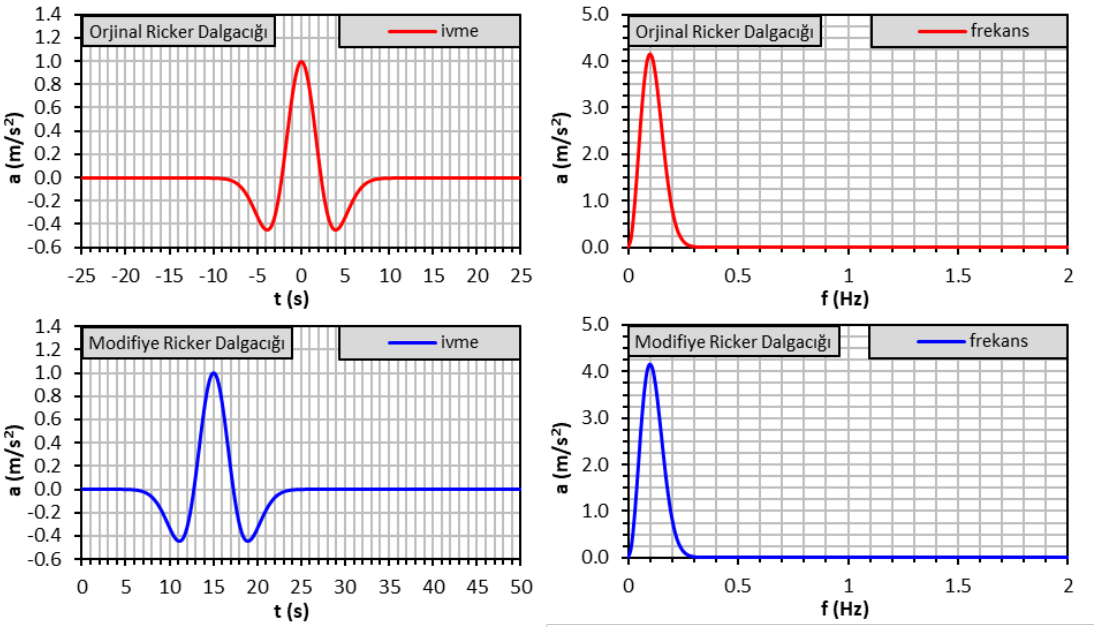
$$a(t) = A_0(1 - 2\pi^2 f_0^2 (t - t_0)^2)e^{-\pi^2 f_0^2 (t-t_0)^2} \quad (2)$$

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 merkez frekansına sahip orijinal Ricker dalgacığı ile merkezi zamanı $\boldsymbol{t_0 = 15}$ s olacak şekilde ötelenmiş Ricker dalgacığının ivme ve frekans içerikleri Şekil 1'de verilmiştir. 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 yansımasını gözlemleyebilmek adına bu sürenin daha da uzatılmasıdır. Her iki şekilde de dalga formlarının Fourier genlik spektrumu aşağıdaki fonksiyon ile hesaplanır:

$$|A(f)| = A_0 \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \frac{f^2}{f_0^2} \cdot e^{-\frac{f^2}{f_0^2}} \quad (3)$$

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

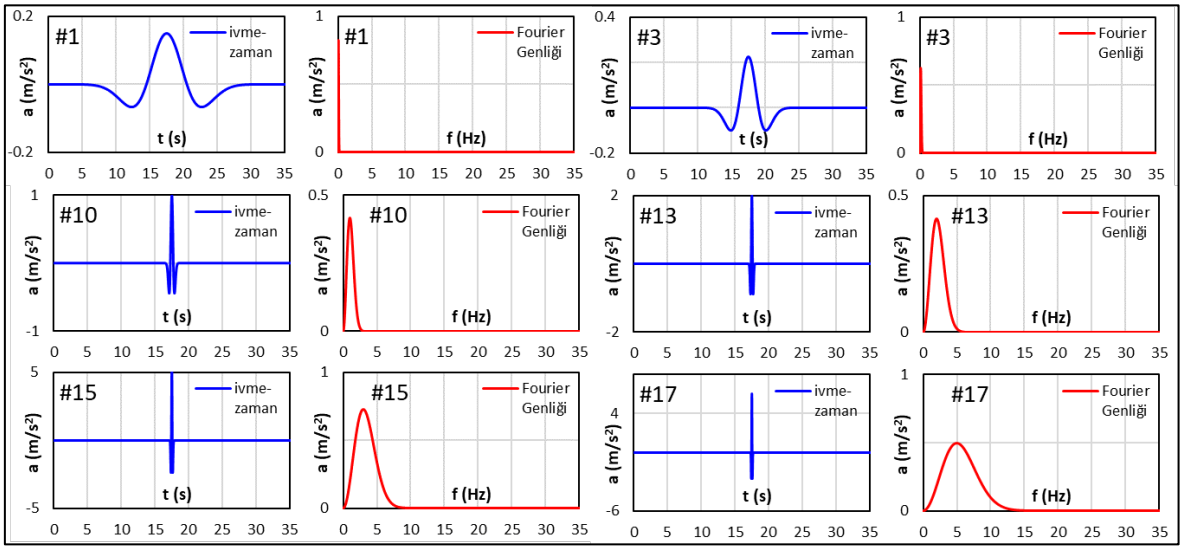
genlik spektrumu f_0 frekansında yumuşak geçişli bir pik değere ulaşmaktayken, bu çalışmada ilaveten elde edilmek istenen dalga formu yatay bir spektruma sahip olmalıdır. Bu amaçla 18 adet farklı f_0 ve A_0 çifti iteratif bir deneme yöntemiyle tespit edilmiş ve ilgili değerlere sahip Ricker dalgacıkları süperpoze edilmiştir. Bu işlem esnasında, Fourier dönüşümü karmaşık sayı ürettiğinden, önce yatay Fourier spektrumunun elde edilip ardından bu spektrumun kendisini oluşturan ivme bileşenlerine ayrılması mümkün olmadığından, bunun yerine ivme değerleri süperpoze edilmiş, ardından oluşan girişim dalgasının Fourier genlik spektrumunun istenilen değerlere uygunluğu kontrol edilmiştir. Girişim sonrası elde edilen dalga ise 1 g (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.



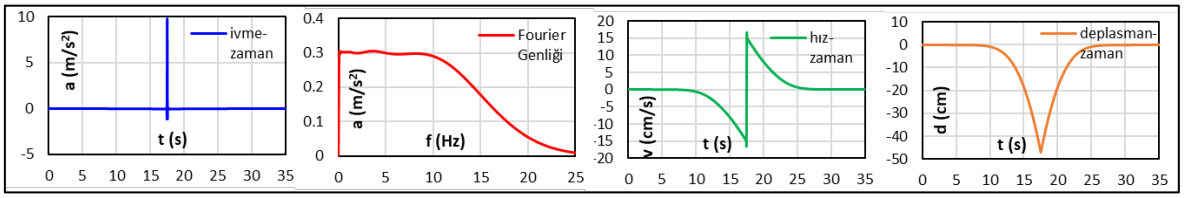
Şekil 1. Orijinal ve modifiye Ricker dalgacığı ivme kayıtları ve Fourier genlik spektrumları

Tablo 1. Kullanılan Ricker dalgacıklarına ait parametreler

#	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



Şekil 2. Nihai dalga formunu oluşturan bileşenlerin bazılarına ait ivme ve frekans grafikleri



Şekil 3. Analizlerde kullanılmak üzere oluşturulan nihai modifiye Ricker dalgacığına ait ivme, frekans, hız ve deplasman grafikleri

Bu yaklaşımın amacı, belirli bir gerçek deprem kaydının baskın frekans özelliklerinin $\boldsymbol{AGF(T)}$ sonuçlarına taşıdığı değişkenliği azaltmak ve geniş bir frekans aralığındaki havza tepkisini tek ve tekrarlanabilir bir giriş hareketi altında değerlendirebilmektir. Dalga formunun oluşturulmasına ilişkin bileşen parametreleri ve ilk doğrulama çalışması Uyar ve Öztoprak (2025) tarafından ayrıntılı olarak sunulmuştur. Bu çalışmada ise Modifiye Ricker dalgacığının genişletilmiş gerçek deprem veri seti karşısındaki temsil kabiliyetine odaklanılmıştır. Yöntemin daha geniş kapsamlı parametrik analizlerdeki uygulamaları ve analiz altyapısına ilişkin ayrıntılar Uyar (2026)'da sunulmuştur.

2.2. Genişletilmiş Deprem Kayıt Seti ve Doğrulama Modeli

Uyar ve Öztoprak (2025) tarafından gerçekleştirilen ilk değerlendirmede Modifiye Ricker dalgacığı, mühendislik kayası koşullarında kaydedilmiş 29 gerçek deprem kaydı kullanılarak sınanmıştır. Bu çalışmada ise giriş hareketine bağlı değişkenliğin daha kapsamlı biçimde incelenebilmesi amacıyla kayıt seçimindeki bazı kısıtlamalar gevşetilmiş ve veri seti 77 gerçek deprem kaydına genişletilmiştir. Genişletilmiş veri seti ESM veri tabanından 22 ve PEER veri tabanından 55 kayıt içermekte olup kayıtların V_{S30} değerleri 760–2016 m/s arasında değişmektedir.

Tüm gerçek deprem kayıtları, frekans içerikleri değiştirilmeden ayrı ayrı 0.25 g, 0.50 g ve 0.75 g PGA seviyelerine ölçeklendirilmiş ve aynı referans havza modeline uygulanmıştır. Böylece 77 kayıt için üç farklı genlik seviyesinde toplam 231 gerçek deprem giriş koşulu oluşturulmuştur. Bu düzenleme ile bir taraftan giriş hareketi genliğinin doğrusal elastik

koşullarda $AGF(T)$üzerindeki etkisi, diğer taraftan farklı frekans ve faz özelliklerine sahip gerçek kayıtların oluşturduğu saçılım değerlendirilmiştir.

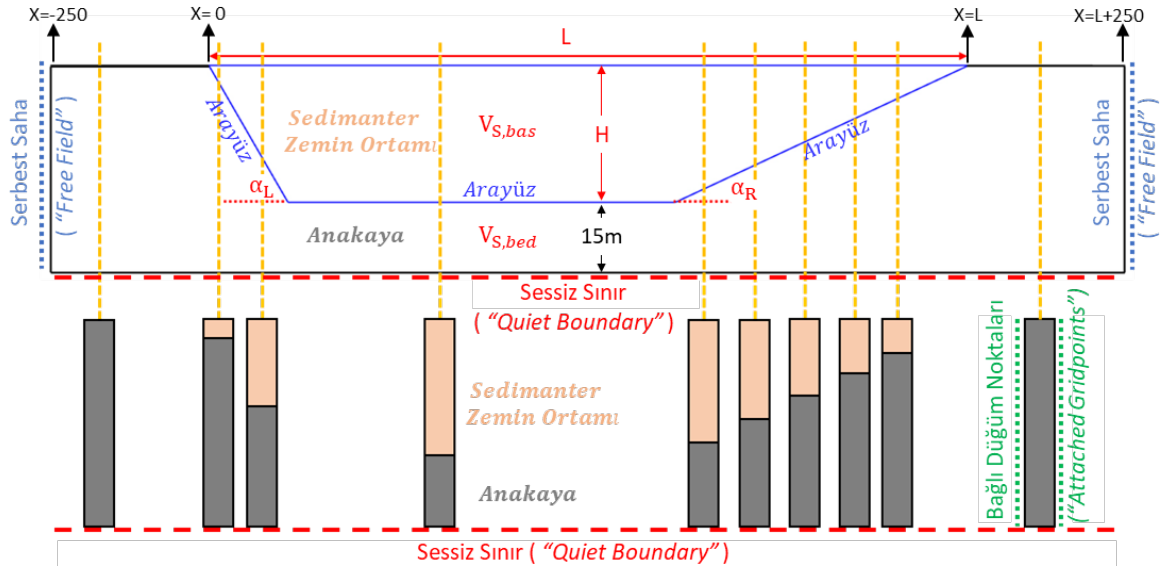
Gerçek deprem kayıtları ile Modifiye Ricker dalgacığının karşılaştırılmasında tek bir referans havza modeli kullanılmıştır (Tablo 2)

Tablo 2. Yapılan analizlerde kullanılan model girdileri

$\alpha_L=\alpha_R$ (°)	$V_{S,bas}$ (m/s)	$V_{S,bed}$ (m/s)	H (m)	L (m)
45	500	750	100	3000

2.3. Nümerik Model ve Konuma Bağlı Spektral Şiddetlendirme Faktörü

"Dinamik analizler, iki boyutlu sonlu farklar yöntemini kullanan FLAC2D v8.1 yazılımı (Itasca Consulting Group, Inc., 2019) ile gerçekleştirilmiştir. Sedimanter havzalar, yatay yüzeye ve doğrusal eğimli kenarlara sahip idealize trapez geometriler kullanılarak modellenmiştir. Model geometrisinde L, havza yüzey genişliğini, H maksimum havza derinliğini, α_L ve α_R sol ve sağ zemin-kaya arayüzlerinin eğimlerini, $V_{S,bas}$ sedimanter birimin, $V_{S,bed}$ ise anakayanın kayma dalgası hızını ifade etmektedir.



Şekil 4. Trapez kesitli sedimanter bir havzada 2B (üst) ve 1B (alt) modellerin şematik tanıtımı

İki boyutlu havza etkisinin klasik 1B zemin büyütmesinden ayrıştırılabilmesi amacıyla, model yüzeyindeki her kayıt noktasına karşılık gelen eşdeğer bir 1B zemin kolonu ayrıca analiz edilmiştir. Böylece herhangi bir x yüzey konumu ve T periyodu için spektral şiddetlendirme faktörü, Eşitlik (4)'teki gibi tanımlanmıştır.

$$AGF(T,x)=\frac{S_{a,2B}(T,x)}{S_{a,1B}(T,x)} \quad (4)$$

Burada; $S_{a,2B}(T,x)$, trapez havzanın 2B analizinden elde edilen spektral ivmeyi; $S_{a,1B}(T,x)$ ise aynı konumdaki yerel tabakalanmayı temsil eden eşdeğer 1B modelin spektral ivmesini ifade etmektedir. Benzer 2B/1B spektral oran tanımları önceki havza çalışmalarında da "aggravation factor" veya spektral şiddet faktörü biçiminde kullanılmıştır (Chávez-García

ve Faccioli, 2000; Riga ve diğ., 2016; Rodriguez-Plata ve diğ., 2021; Özaslan ve İyisan, 2022).

İki boyutlu modellerin yüzeyinde 10 m aralıklarla sentetik kayıtçılar tanımlanmış ve her kayıtçı konumu için karşılık gelen 1B profil otomatik olarak oluşturulmuştur. Böylece AGF(T,x) yalnızca seçilmiş kontrol noktalarında değil, havza yüzeyi boyunca mekânsal olarak belirlenebilmiştir. Bu işlem FLAC 2D yazılımı içerisinde FISH fonksiyonları kullanılarak otomatikleştirilmiş; 2B kayıt noktalarına karşılık gelen 1B kolonlar aynı analiz altyapısı içerisinde üretilmiştir.

2.4. Model Varsayımları ve Sınır Hassasiyet Analizleri

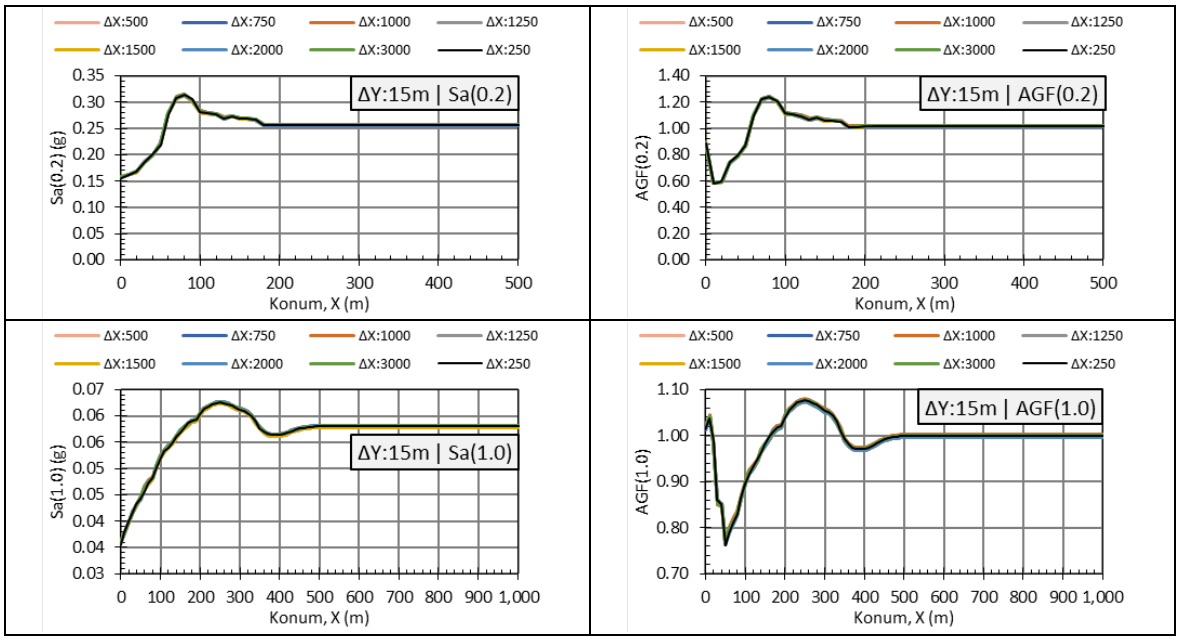
Modelin düşey yan sınırlarında serbest saha (*free-field*) sınır elemanları, tabanında ise sessiz (*quiet*) sınır koşulu kullanılmıştır. Sonlu farklar ağı, analizlerde dikkate alınan 10 Hz üst frekansa kadar dalga yayılımını yeterli çözünürlükte temsil edecek şekilde oluşturulmuştur. Yatay düğüm aralığı 2.5 m olarak alınmış, düşey düğüm aralığı ise ilgili tabakanın kayma dalgası hızına bağlı olarak belirlenmiştir.

Sönümleyici sınırların model sonuçları üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi amacıyla sınır hassasiyet analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde $\alpha_L = \alpha_R = 45°$, $V_{S,bas} = 300$m/s, $V_{S,bed} = 750$m/s, $H = 50$m ve $L = 3000$m özelliklerine sahip referans model kullanılmıştır. Yatay sınır uzaklığı ΔX ve taban sınırı uzaklığı ΔY farklılaştırılarak $T = 0.2$, 1.0 ve 3.0 s periyotlarında $S_a(T)$ve $AGF(T)$dağılımları karşılaştırılmıştır. Hassasiyet modelinde sediman ve anakaya yoğunlukları sırasıyla 1800 ve 2200 kg/m³ olarak kullanılmıştır.

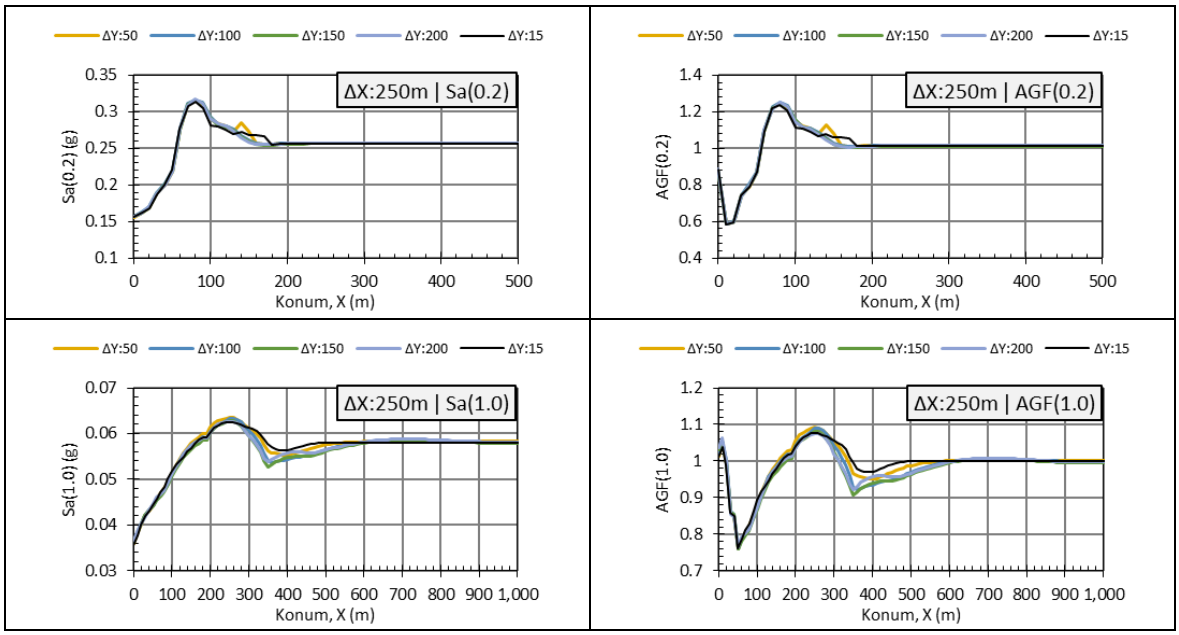
Hassasiyet analizi sonuçları, ΔXdeğerinin en az 250 m olması durumunda yan sınırların daha fazla uzaklaştırılmasının 0.2 ve 1.0 s periyotlarındaki spektral ivme ve şiddetlendirme sonuçlarında belirgin bir değişikliğe neden olmadığını göstermiştir. Taban sınırının derinleştirilmesiyle ortaya çıkan farklılıkların da çalışma amacı bakımından sınırlı kaldığı görülmüştür. Hesap maliyeti ve elde edilen sonuçlardaki değişim birlikte değerlendirilerek sonraki analizlerde $\Delta X = 250$m ve $\Delta Y = 15$m değerleri sabit olarak kullanılmıştır.

Tablo 3. Nümerik analizlerde kullanılan sabit özellikler ve ayarlar

1.Bünye modeli	:	Doğrusal elastik
2.Sönüm	:	Kullanılmamıştır
3.Yatay sınır elemanı	:	Sessiz sınır
4.Düşey sınır elemanı	:	2B analizlerde serbest saha, 1B analizlerde bağlı düğüm noktaları
5.Sınır uzaklıkları	:	ΔX=250 m, ΔY=15 m
6.Yatay düğüm aralığı	:	2.5 m
7.Düşey düğüm aralığı	:	Her tabaka için min((Vs/(10*f_{max}), 5 m) ; f_{max}=10 Hz
8.Zaman adımı	:	Dinamik çoklu zaman adımı
9.Kayıtçılar	:	Model yüzeyi boyunca 10 m aralıklarla
10.Bir boyutlu profil	:	Havza kenarında 10 m aralıklarla, havza ortasında ve havza dışında
11.Yoğunluk (ρ)	:	Bütün jeolojik birimlerde 2000 kg/m^3
12.Poisson oranı (ν)	:	Kayalar için 0.25, zeminler için 0.30
13.Kenar simetrisi	:	Simetrik havza kenarları kullanılmıştır ($a_L = a_R$)



Şekil 5. Kenar sınırının havzadan uzaklığının (ΔX) etkisi



Şekil 6. Taban sınırının havzadan olan derinliğinin (ΔY) etkisi

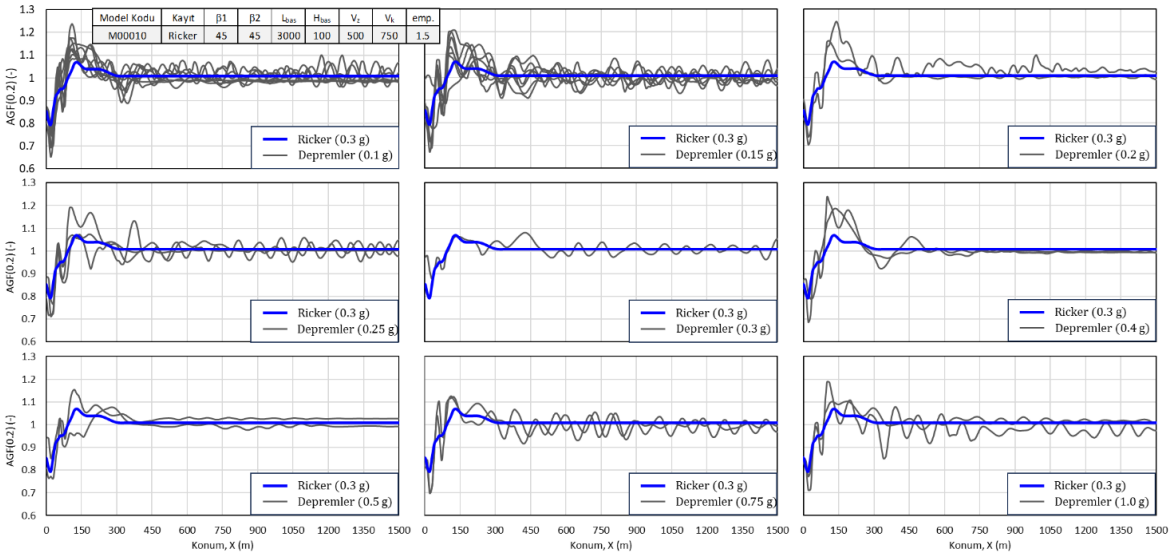
2.5. Analiz Sonuçlarının İşlenmesi

İki ve bir boyutlu dinamik analizlerden elde edilen ivme-zaman kayıtları analiz sonrasında Python ortamına aktarılmıştır. Verilerin işlenmesinde NumPy, SciPy ve Pandas kütüphanelerinden yararlanılmış; tepki spektrumları Newmark-$\boldsymbol{\beta}$ yöntemi (Newmark, 1959) kullanılarak $\boldsymbol{\beta = 0.25}$ ve $\boldsymbol{\gamma = 0.5}$ parametreleri ile hesaplanmıştır. Her yüzey konumunda aynı giriş hareketi için elde edilen 2B ve eşdeğer 1B spektral ivmeler Eşitlik (4) uyarınca oranlanarak $\boldsymbol{AGF(T,x)}$ dağılımları oluşturulmuştur. Gerçek deprem kayıtlarından elde edilen bireysel ve ortalama $\boldsymbol{AGF(T,x)}$ dağılımları daha sonra Modifiye Ricker dalgacığı ile gerçekleştirilen analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

3. ANALİZ BULGULARI VE DEĞERLENDİRMELER

Modifiye Ricker dalgacığının spektral şiddetlendirme davranışını temsil etme kabiliyeti Şekil 7 ve Şekil 8'de sırasıyla $T = 0.2$s ve $T = 1.0$s periyotları için gerçek deprem kayıtları ile karşılaştırılmıştır. Gerçek kayıtların farklı frekans ve faz özelliklerine bağlı olarak bireysel $AGF(T,x)$ eğrilerinde saçılım görülmesine karşın, havza yüzeyindeki temel şiddetlendirme bölgelerinin konumu ve genel dağılım karakteri Modifiye Ricker dalgacığı ile elde edilen sonuçlarla büyük ölçüde uyumludur.

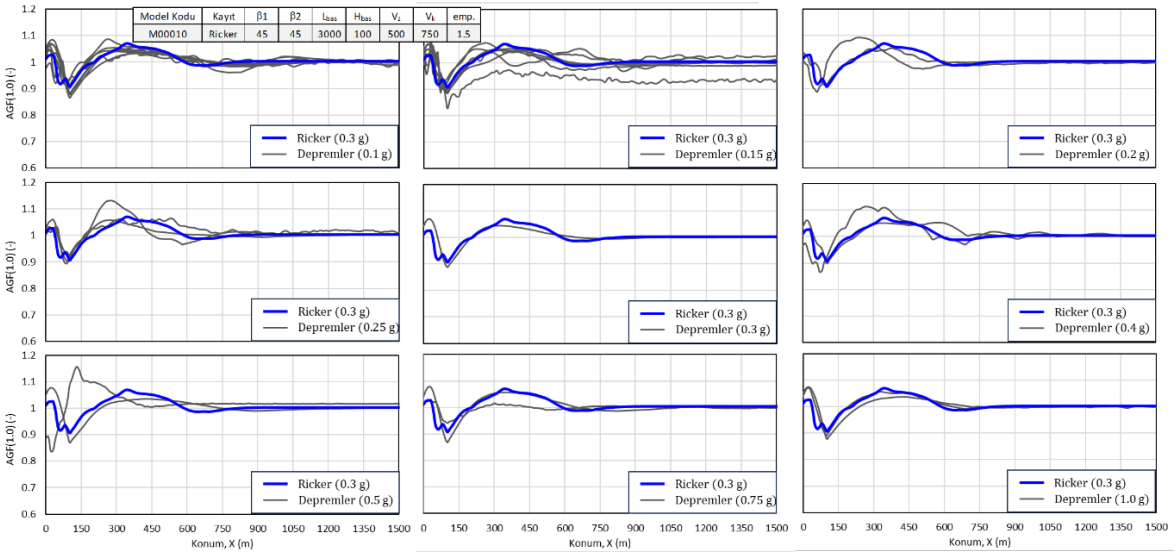
Doğrulama veri setinin 77 gerçek deprem kaydına genişletilmesiyle elde edilen ortalama $AGF(T,x)$ dağılımları Şekil 9'da Modifiye Ricker sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Hem $T = 0.2$s hem de $T = 1.0$s için sentetik hareketin gerçek kayıtların ortalama davranışını şiddetlendirme büyüklüğü ve havza yüzeyindeki mekânsal dağılım bakımından başarılı biçimde temsil ettiği görülmektedir. Kayıt ortalaması alındığında bireysel depremlere bağlı salınımların önemli ölçüde azaldığı ve ortalama davranışın Modifiye Ricker dalgacığı ile elde edilen dağılıma yaklaştığı belirlenmiştir.



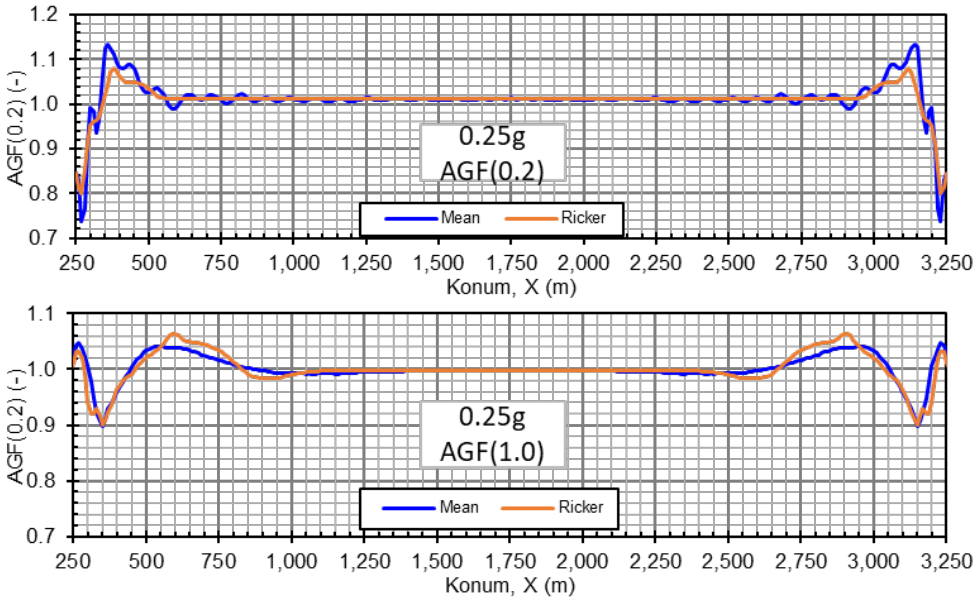
Şekil 7. Modifiye Ricker dalgacığı ve gerçek deprem kayıtları ile elde edilen AGF(0.2) dağılımı

Giriş hareketi genliğinin etkisini değerlendirmek amacıyla 77 gerçek kayıt ayrı ayrı 0.25 g, 0.50 g ve 0.75 g PGA seviyelerinde analiz edilmiştir. Şekil 10'da görsel sadeliğin korunması amacıyla yalnızca 0.50 g PGA seviyesinde elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Bununla birlikte 0.25 g ve 0.75 g seviyelerinde gerçekleştirilen analizlerde de aynı kayıtlar için elde edilen $AGF(T,x)$dağılımlarının 0.50 g sonuçlarıyla aynı olduğu belirlenmiştir. Doğrusal elastik koşullarda giriş hareketi genliğinin değiştirilmesi 2B ve eşdeğer 1B spektral tepkileri aynı oranda ölçeklediğinden, $S_{a,2B}/S_{a,1B}$ oranı değişmemektedir. Bu nedenle PGA seviyesi $AGF(T,x)$ dağılımının büyüklüğü veya konumu üzerinde etkili olmamıştır.

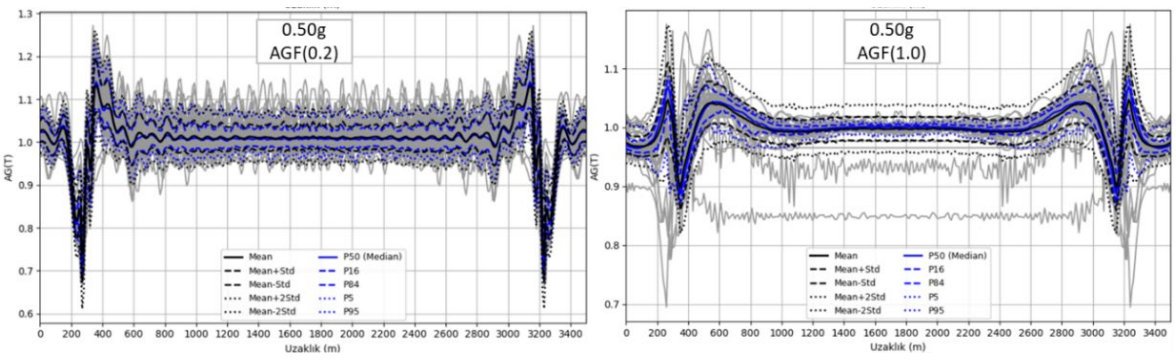
Sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, farklı gerçek deprem kayıtları arasında görülen kayıt-bağımlı saçılıma karşın, geniş bantlı Modifiye Ricker girdisinin çok sayıda gerçek deprem kaydından elde edilen ortalama spektral şiddetlendirme davranışını başarılı biçimde temsil edebildiği görülmektedir. Bu özellik, özellikle çok sayıda nümerik modelin karşılaştırıldığı doğrusal elastik parametrik analizlerde kontrollü ve tekrarlanabilir tek bir giriş hareketinin kullanılmasına olanak sağlamaktadır.



Şekil 8. Modifiye Ricker dalgacığı ve gerçek deprem kayıtları ile elde edilen AGF(1.0) dağılımı



Şekil 9. Genişletilmiş deprem kataloğu depremlerinin ortalaması ve modifiye Ricker karşılaştırması



Şekil 10. Genişletilmiş deprem kataloğu için 0.50 g PGA seviyesinde elde edilen analiz sonuçları

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada Modifiye Ricker dalgacığının sedimanter havzaların doğrusal elastik 2B spektral şiddetlendirme analizlerinde kontrollü bir giriş hareketi olarak kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Genişletilmiş 77 gerçek deprem kaydı ile yapılan karşılaştırmalar, sentetik hareketin gerçek kayıtların ortalama $AGF(T,x)$davranışını hem şiddetlendirme büyüklüğü hem de havza yüzeyindeki dağılım bakımından başarılı biçimde temsil ettiğini göstermiştir.

Gerçek kayıtların 0.25 g, 0.50 g ve 0.75 g PGA seviyelerine ölçeklenmesiyle gerçekleştirilen analizlerde $AGF(T,x)$ sonuçlarının PGA seviyesinden bağımsız olduğu belirlenmiştir. Bu davranış, doğrusal elastik koşullarda giriş genliğindeki değişimin 2B ve eşdeğer 1B spektral tepkileri aynı oranda ölçeklemesiyle açıklanmaktadır.

Sonuç olarak Modifiye Ricker dalgacığının, çok sayıda gerçek deprem kaydının ortalama spektral şiddetlendirme davranışını temsil eden kontrollü ve tekrarlanabilir bir giriş hareketi olarak kullanılabileceği görülmüştür. Bununla birlikte elde edilen sonuçlar doğrusal elastik malzeme davranışı ile sınırlıdır; doğrusal olmayan zemin davranışında kayıt genliği ve frekans içeriğinin etkilerinin ayrıca değerlendirilmesi gerekmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 121M760 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar, sağlanan destek için TÜBİTAK'a teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

Amini, D., Maghoul, P., Perret, D. ve 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*, Vol 311, 106872.

Bard, P.Y. ve Bouchon, M. (1985), "The Two-Dimensional Resonance of Sediment-Filled Valleys", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol 75(2), 519–541.

Chávez-García, F.J. ve Faccioli, E. (2000), "Complex Site Effects and Building Codes: Making the Leap", *Journal of Seismology*, Vol 4(1), 23–40.

Hasal, M.E. ve İyisan, R. (2014), "A Numerical Study on Comparison of 1D and 2D Seismic Responses of a Basin in Turkey", *American Journal of Civil Engineering*, Vol 2(5), 123–133.

Kawase, H. (1996), "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*, Vol 67(5), 25–34.

Komatitsch, D., Liu, Q., Tromp, J., Süss, P., Stidham, C. ve Shaw, J.H. (2004), "Simulations of Ground Motion in the Los Angeles Basin Based upon the Spectral-Element Method", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol 94(1), 187–206.

Itasca Consulting Group, Inc. (2019), *FLAC — Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 8.1*, Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis, Minnesota.

Makra, K., Chávez-García, F.J., Raptakis, D. ve Pitilakis, K. (2005), "Parametric Analysis of the Seismic Response of a 2D Sedimentary Valley: Implications for Code

Implementations of Complex Site Effects", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol 25(4), 303–315.

Makra, K., Rovithis, E., Riga, E., Raptakis, D. ve 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*, Vol 19(12), 4773–4804.

Moschetti, M.P., Churchwell, D.H., Thompson, E.M., Rekoske, J.M., Wolin, E. ve Boyd, O.S. (2021), "Seismic Wave Propagation and Basin Amplification in the Wasatch Front, Utah", *Seismological Research Letters*, Vol 92(6), 3626–3641.

Newmark, N.M. (1959), "A Method of Computation for Structural Dynamics", *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol 85(EM3), 67–94.

Özaslan, B. ve İyisan, R. (2022), "Alüvyon Havzalar İçin Spektral Şiddet Faktörlerinin Doğrusal Olmayan Sayısal Analizlerle Belirlenmesi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Vol 37(1), 247–263.

Papageorgiou, A.S. ve Kim, J. (1991), "Study of the Propagation and Amplification of Seismic Waves in Caracas Valley with Reference to the 29 July 1967 Earthquake: SH Waves", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol 81(6), 2214–2233.

Ricker, N. (1953), "The Form and Laws of Propagation of Seismic Wavelets", *Geophysics*, Vol 18(1), 10–40.

Riga, E., Makra, K. ve Pitilakis, K. (2016), "Aggravation Factors for Seismic Response of Sedimentary Basins: A Code-Oriented Parametric Study", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol 91, 116–132.

Rodriguez-Plata, R., Özcebe, A.G., Smerzini, C. ve Lai, C.G. (2021), "Aggravation Factors for 2D Site Effects in Sedimentary Basins: The Case of Norcia, Central Italy", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol 149, 106854.

Uyar, H.K. (2026), "Havzaların Sismik Tepkisinin Tasarım Spektrumlarına Etkisi: Havza Etki Faktörü", Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.

Uyar, H.K. ve Öztoprak, S. (2025), "Havzaların Sismik Tepkisinin Modifiye Ricker Dalgacığı ile Nümerik Analizi", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, Vol 13(2), 706–717.

Zhang, B. ve Papageorgiou, A.S. (1996), "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*, Vol 86(5), 1382–1400.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
$\boldsymbol{AGF(T,x)}$	Konuma ve periyoda bağlı spektral şiddetlendirme faktörü	$\boldsymbol{S_{a,2B}, S_{a,1B}}$	2B ve eşdeğer 1B spektral ivmeler
$\boldsymbol{f_0}$	Ricker dalgacığının merkez frekansı	$\boldsymbol{A_0}$	Ricker dalgacığının tanımlanan en büyük genliği
$\boldsymbol{t_0}$	Ricker dalgacığının merkezi zamanı	$\boldsymbol{x, T}$	Yüzey konumu ve titreşim periyodu
$\boldsymbol{V_{S,bas}, V_{S,bed}}$	Sediman ve anakaya kayma dalgası hızları	$\boldsymbol{\alpha_L, \alpha_R}$	Sol ve sağ havza kenar açıları
$\boldsymbol{H, L}$	Havza derinliği ve yüzey genişliği	$\boldsymbol{\Delta X, \Delta Y}$	Yan ve taban sınırı uzaklıkları