



2023 Kahramanmaraş depremi artçısı için 3B sismik dalga yayılımının ve uzun-periyot yer hareketlerinin modellenmesi

Modeling of 3D seismic wave propagation and long-period ground motions for the 2023 Kahramanmaraş earthquake aftershock

Bilal Özasan^{1,*}

^{1*} Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 40100, Kırşehir, Türkiye

Öz

Güneydoğu Türkiye’de 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinde ölçülen yer hareketleri, meydana gelen hasarın büyüklüğü ve kaydedilen can kayıpları, karmaşık jeolojiye sahip yoğun nüfuslu bölgelerde güvenilir yer hareketi değerlendirmesine duyulan gereksinimi hatırlatmıştır. Deprem dizisi, Güneydoğu Türkiye’deki yapısal olarak karmaşık sedimanter havzalarda uzun periyot yer hareketi özelliklerini inceleme imkanı sağlayan çok sayıda orta büyüklükte artçı üretmiştir. Bu çalışmada, fizik tabanlı üç boyutlu (3B) sonlu farklar yöntemiyle gerçekleştirilen deprem simülasyonları ile kaynaktan istasyonlara dalga yayılımı modellenmiş ve uzun periyot ($T \geq 2$ s) yer hareketlerinde derin ve sığ tabaka yapılarının etkileri araştırılmıştır. Aynı bölge için oluşturulan üç farklı derin yapı modeli; (i) düzenli tabakalı basit model, (ii) eğimli derin-yapı modeli ve (iii) yüzeyde sedimanter tabakaları içeren eğimli derin-yapı modeli karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, tabaka geometrisi ve sığ sedimanter birimlerin uzun periyot genliklerini artırdığını, sarsıntı süresini uzattığını ve dalga biçimlerini karmaşıktırdığını göstermektedir. Bu bulgular, 3B bölgesel modellerin derin sedimanter sahalarda performansa dayalı sismik tasarım için kritik öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Üç boyutlu sismik dalga yayılımı, Uzun periyot yer hareketleri, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri, Fizik tabanlı deprem simülasyonları

1 Giriş

Deprem yer hareketlerinin, sedimanter yüzey tabakalarının altında bulunan daha rijit tabakalarla olan empedans farklılıkları, düzensiz ara yüzey etkileri, havza yapılarının deprem dalgalarına etkileri, yüzey dalgalarının girişimleri ve sismik enerjinin bölgesel odaklanması sonucunda şekillendiği iyi bilinmektedir. Temel kuramsal literatür, özellikle düzensiz ara yüzeyler ile vadi/havza geometrilerinin varlığında bir boyutlu varsayımlarla yakalanamayacak karmaşık yüzey hareketleri üretebildiğini ortaya koymuştur [1-4]. Bu nedenle fizik tabanlı simülasyonlarda, dalga yayılımında kaynak özelliklerinin etkileri ve kaynak yolu olarak tanımlanan üç boyutlu yapı

Abstract

On 6 February 2023, the Kahramanmaraş earthquakes in southeastern Türkiye produced severe ground shaking, widespread structural damage, and significant loss of life, underscoring the need for reliable ground-motion assessment in densely populated regions with complex geology. The aftershock sequence provides a unique dataset to investigate long-period ground-motion characteristics in structurally complex sedimentary basins. This study presents physics-based three-dimensional (3D) simulations developed for southeastern Türkiye, taking advantage of recent advances in high-performance computing. Seismic wave propagation is modeled using a finite-difference framework to examine source-to-site wave evolution and the influence of deep and shallow structural features on long-period ($T \geq 2$ s) ground motions. Simulations are conducted for a selected moderate-magnitude aftershock using three alternative structural models: (i) a flat layered model, (ii) an inclined deep-structure model, and (iii) an inclined deep-structure model including near-surface sedimentary layers. Results demonstrate that layer geometry and shallow sediments play a dominant role in amplifying long-period motions and increasing shaking duration, highlighting the necessity of realistic 3D regional representations for performance-based seismic design.

Keywords: Three-dimensional seismic wave propagation, Long-period ground motion, February 6, 2023 Kahramanmaraş earthquakes, Physics-based earthquake simulations

uzayda enerjinin yayılımı mühendislik modellerle incelenmiştir. Özellikle sonlu farklar (FD) şemaları, üç boyutlu elastik ortamlarda dalga yayılımını modellemek için yaygın biçimde benimsenmiş ve birçok modern fizik tabanlı yer hareketi çalışmasının omurgasını oluşturmuştur [5-7]. Bu çalışmalar, derin sedimanter yapılar ve eğimli ara yüzeyler gibi büyük ölçekli heterojenliklerin dalgaların genlik-frekans özelliklerini, hareket sürelerini ve dolayısıyla spektral özelliklerini kontrol ettiğini göstermiştir.

Önceki çalışmaların büyük bir kısmı, doğrudan cisim dalgaları ile sedimanter yapılar içinde üretilen dalgalar arasındaki girişimin, özellikle havza kenarları yakınında hasarı yerelleştirebildiğini ve uzun periyotları belirgin

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: bilal.ozasan@ahievran.edu.tr (B. Özasan)

Geliş / Received: 23.02.2026 Kabul / Accepted: 21.06.2026 Yayınlanma / Published: 30.09.2026

doi: 10.28948/ngumuh.1895739

biçimde artırabildiğini göstermiştir [8,9]. Daha yakın tarihli çalışmalar, tabaka geometrisi, derinlik, tabaka kayma dalgası hızlarındaki değişimler gibi sınırlı sayıda kilit yapısal parametrenin, iki ve üç boyutlu sedimanter yapılarda yer hareketlerinin şiddetini ve frekans içeriğini sistematik olarak değiştirdiği sonucuna ulaşmıştır [10-14]. Ayrıca basitleştirilmiş bir ve iki boyutlu modeller ve bölgesel üç boyutlu yapısal temsiller arasındaki karşılaştırmalar, dalga alanının karmaşık üç boyutlu geometri ile etkileştiği durumlarda basit modellerin kullanılmasının büyütme ve süre tahminlerinde yanlı sonuçlara yol açabileceğini göstermiştir [15-18].

6 Şubat 2023 Türkiye deprem dizisi, bu mekanizmaları Güneydoğu Türkiye’de incelemek için benzersiz biçimde veri açısından zengin bir ortam sağlamıştır. Kuvvetli yer hareketi gözlemleri, bölgede yer hareketi niteliklerinde belirgin mekansal değişkenlikleri ortaya koymuştur [19,20]. Doğu Anadolu Fay Zonu’nun bölgesel sismotektonik özellikleri hem bölgesel kabuk yapısını hem de mühendislik ölçeğindeki sedimanter yapıları temsil edebilecek fizik tabanlı simülasyonlara duyulan gereksinimi daha da öne çıkarmaktadır [21]. 2023 yer hareketlerine ilişkin daha yakın tarihli mühendislik odaklı değerlendirmeler de kayıtlar arası değişkenliğin yalnızca büyüklük ve uzaklık gibi parametrelerin ötesinde fiziksel kontrol mekanizmalarının da açıkça dikkate alınarak yorumlanmasının önemini vurgulamıştır. Özellikle Kaliforniya Bölgesi için üretilen ve global ölçekte başı çeken çalışmalar, bölgesel ölçekli faydan yapıya (fault-to-structure) simülasyon çalışmalarının pratik iş akışlarına entegre edilmesine yönelik önemli adımlar atmışlardır [5, 6, 20].

Bu kapsamda, çalışmada elastik ortamda dördüncü mertebe kademeli zonlu (staggered-grid) sonlu farklar yöntemi ve noktasal kaynak (double-couple) özelliklerini kullanarak 2023 deprem dizisi ile ilişkili artçı etkinliğe yönelik üç boyutlu fizik tabanlı simülasyonlar gerçekleştirilmiştir [22]. Seçilen orta büyüklükte depremler, karmaşık kırılma süreçlerinin oluşturduğu kaynak özelliklerinin baskın etkilerini azaltarak ve büyük deformasyonlarda doğrusal olmayan sığ-yüzey zemin davranışının etkilerini azaltarak yüzeye ulaşan dalgalarda tabaka yapısı etkilerinin daha net izlenmesi amacıyla özellikle seçilmiştir. Önceki çalışmamızda [22], geliştirilen bölgesel 3B hız modeli iki orta büyüklükteki olay kullanılarak dalga biçimi ve nicel doğrulama ölçütleri açısından değerlendirilmiştir. Mevcut çalışma ise bu genel doğrulama çerçevesinden farklı olarak, tek bir artçı deprem ve sabit kaynak koşulları altında üç alternatif yapısal modeli sistematik biçimde karşılaştırmakta; derin yapı geometrisi ile sığ düşük hızlı sedimanların uzun periyotlu dalga alanına görelî katkısını incelemeyi amaçlamaktadır.

Sonuç olarak çalışmanın temel amacı, hem derin kabuk hız yapısındaki değişimleri hem de düşük hızlı sığ sedimanter tabakaları, bölgesel ölçekli bir model içinde birleştirerek alternatif yapısal temsilleri açık biçimde incelemektir. Bu karşılaştırmaların temel araştırma sorusu, derin yapı geometrisi ile sığ düşük hızlı sedimanter birimlerin uzun periyotlu yer hareketlerinin genlik, süre ve dalga biçimi üzerindeki görelî katkılarının ne ölçüde

ayrıştırılabildiğidir. Bu amaçla kaynak ve sayısal çözüm parametreleri sabit tutularak üç alternatif yapısal model karşılaştırılmıştır. Fizik tabanlı üç boyutlu simülasyonlarla üretilen yer hareketleri, dalga biçimi benzerlikleri, hareket süresi ve dalga genlikleri, dalga yayılımının anlık görüntüleri ve hız-zaman verileri üzerinde kapsamlı şekilde karşılaştırılmıştır. Güneydoğu Türkiye bölgesi ve Doğu Anadolu Fay Zonunda 3B fizik tabanlı bölgesel simülasyonlarının öncülerinden olan araştırmalarımızın bir bölümünü kapsayan çalışmanın, mühendislik uygulamalarına uygunluğu gösterilebilir fizik tabanlı simülasyon deprem veri setleri üretmeye yönelik eğilimlere katkı sağlaması amaçlanmaktadır [23-25].

2 Materyal ve metod

2.1 Çalışma alanının jeolojik ve sismik özellikleri

2.1.1 Bölgesel model ve depremsellik

Kahramanmaraş bölgesi, Anadolu, Arap ve Afrika levhalarının etkileştiği Doğu Akdeniz’in tektonik açıdan en karmaşık kuşaklarından birinde yer almaktadır. Bölgede sismisiteyi kontrol eden baskın tektonik unsur, Anadolu levhasının batıya doğru kaçışını (ekstrüzyonunu) karşılayan büyük bir sol yanal doğrultu atımlı fay sistemi olan Doğu Anadolu Fay Zonu’dur (DAFZ). DAFZ, kuzeydoğuda Karlıova üçlü ekleminden güneybatıda Ölü Deniz Fay Sistemi’ne bağlanarak Güneydoğu Türkiye’de kritik bir sismotektonik sınır oluşturmaktadır. 6 Şubat 2023 deprem dizisi, Pazarcık ve Amanos segmentleri dahil olmak üzere bu sistem içindeki çoklu fay segmentlerini etkilemiş ve karmaşık kırılma düzlemleri ile kademeli fay etkileşimleri oluşturmuştur.

Kahramanmaraş ve çevresi, DAFZ ve ikincil fayları ile ilişkili yüksek hızlı kristalen ve metamorfik temel kayalarla sınırlanan sedimanter bir çöküntüdür. Havza dolgusu ağırlıklı olarak Kuvaterner ve Neojen sedimanlardan oluşur ve çevredeki anakayaya kıyasla görece düşük kayma dalgası hızlarına sahiptir. Jeofizik araştırmalar, sediman kalınlığının yanal olarak değiştiğini ve havzanın merkez ve güney kesimlerine doğru arttığını, bunun da eğimli ara yüzeylere sahip asimetrik bir havza geometrisi ürettiğini göstermektedir.

Bu jeolojik ve tektonik çerçeve, bu çalışmada incelenen üç boyutlu sayısal simülasyonların temelini oluşturmaktadır. Hem sığ havza geometrisini hem de derin kabuk yapısını içeren modeller, 2023 Kahramanmaraş artçıları ile ilişkili uzun periyot yer hareketi davranışının fiziksel olarak tutarlı bir biçimde incelenmesini mümkün kılmaktadır. Şekil 1’de, 6 Şubat 2023 deprem dizisine ait iki ana şokun (solda) ve incelenen artçı depremin (sağda) episantr konumları gösterilmektedir. Buna ek olarak, bölgedeki ana fay segmentleri, AFAD kuvvetli yer hareketi ağına ait istasyonların dağılımı ve Kahramanmaraş Havzası’nın coğrafi sınırları görsel olarak sunulmaktadır.

2.1.2 Tabaka özellikleri ve sayısal ayrıklaştırma

Oluşturulan modellerde sığ tabakalar, Kahramanmaraş kent merkezi ve çevresi altında düşey-yanal olarak değişen sediman kalınlığını ve eğimli tabakalanmayı kapsayacak şekilde tanımlanmıştır. Üç boyutlu hesaplama alanı, ana artçı

kaynak bölgesini ve çevredeki sığ sedimanter yapıları kapsayacak biçimde, yaklaşık 80 km × 80 km yatay boyutlarda ve bölgesel Moho derinliğine (30 km) kadar modellenmiştir. Bu konfigürasyon hem sığ havza etkilerinin hem de dalga yayılımı üzerindeki daha derin yer kabuğu etkilerinin yeterli düzeyde temsil edilmesini sağlar. Üç boyutlu zemin tabakalarına ait hız modeli, bölgesel sismik tomografi, mikrotremor tabanlı saha araştırmaları, sondaj bilgileri ve hem ulusal (AFAD) hem de küresel (USGS) derlemelerden elde edilen Vs30 haritaları dahil olmak üzere bölge için gerçekleştirilmiş deneysel verilerin bütünleştirilmesi ile oluşturulmuş, Tablo 1 ile sunulmuştur [22, 26-29].

Tablo 1. Üç boyutlu yapısal modelde tanımlanan sığ sedimanter tabakaları (0–2 km) ve derin tabaka (30 km’ye kadar) özellikleri

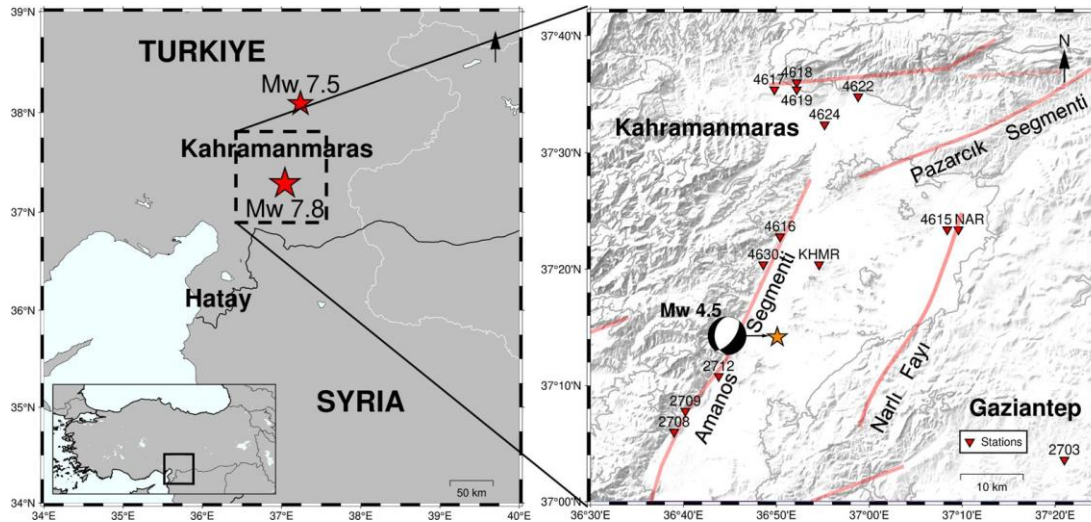
Tabaka No	H (km)	ρ (kg/m ³)	V _p (km/s)	V _s (km/s)	Q
1	0.6	1900	0.85	0.50	15
2	0.4	2000	2.04	1.20	49
3	2.0	2500	3.50	2.06	100
4	4.0	2600	4.60	2.70	143
5	5.0	2680	5.10	3.00	165
6	8.0	2720	6.00	3.53	205
7	10.0	2900	6.80	3.99	241

Hız modeli, her biri yoğunluk, P-dalga hızı (V_p), S-dalga hızı (V_s) ve kalite faktörü (Q) değerleri ile tanımlanan yedi ana tabakadan oluşmaktadır. Sönümlenme parametreleri, Campbell [30] tarafından önerilen yaklaşımla bölgesel ölçekli simülasyonlarda yaygın olarak kullanılan ampirik ilişkiler izlenerek frekanstan bağımsız Q değerleri aracılığıyla modele dahil edilmiştir. Çalışmada kullanılan üç boyutlu yapısal modele ait tabaka konfigürasyonu ve hız dağılımları Tablo 1’de sunulmuş, yüzeyden itibaren 2 km derinliğe kadar uzanan sedimanter birimleri ve yaklaşık 30 km’ye kadar devam eden kabuk yapısını içermektedir. Model sınırlarında ise yapay dalga yansımalarını en aza

indirmek amacıyla yan ve alt sınırlarda soğurucu sınır koşulları uygulanmış, modelin üst sınırında ise serbest yüzey koşulu tanımlanmıştır.

FD grid, üç yönde de 200 m’lik üniform aralık ile ayrıklaştırılmış ve 400 × 400 × 150 düğümünden oluşan bir ağ elde edilmiştir. Bu ayrıklaştırma, modeldeki minimum kayma dalgası hızına bağlı olarak, $f_{\max} = V_{s\min}/5\Delta x$ koşulları dikkate alınarak 0.5 Hz’e kadar dalga yayılımını çözmek için sayısal kararlılık ve dispersiyon kriterlerini karşılamaktadır. $\Delta x = 200$ m grid aralığı için hedeflenen $T \geq 2$ s dalga alanının sayısal çözümü açısından yeterli olmakla birlikte, bu değer aynı zamanda modelin geometrik çözünürlüğünü sınırlamaktadır. Dolayısıyla 200 m’den daha küçük yatay/düşey ölçeklerde meydana gelen ani havza kenarı değişimleri, ince düşük hızlı tabakalar ve yerel heterojenlikler mevcut bölgesel modelde ayrıntılı biçimde çözülememektedir. Bu özellikler grid ölçeğinde temsil edildiğinden, çalışmanın sonuçları yerel ve yüksek frekanslı havza kenarı etkilerinden ziyade bölgesel uzun periyotlu dalga yayılımı açısından değerlendirilmelidir. Yine sayısal kararlılığı sağlamak amacıyla yaklaşık 0.015 s zaman adımı benimsenmiş ve dalga yayılımında düşük kayma dalgası hızlarına bağlı geciken fazların yakalanabilmesi için simülasyonlar toplam 100 saniye süreyle yürütülmüştür.

Model 3’te sığ sedimanter birim için kullanılan $V_s = 0.50$ km/s değeri, istasyonlara ait Vs30 değerlerini temsil etmemekte; bölgesel üç boyutlu modelde sığ tabakanın etkin kayma dalgası hızını ifade etmektedir. Bu alt hız sınırı aynı zamanda kullanılan $\Delta x = 200$ m hesaplama ağı ve $f_{\max} = 0.5$ Hz üst frekans sınırı ile ilişkilidir. Yaklaşık beş hesaplama noktası/minimum dalga boyu kriterine göre $V_{s\min} = 0.50$ km/s için minimum S-dalgası boyu 1.0 km olmakta ve mevcut grid ile beş hücre üzerinden temsil edilmektedir. Bu nedenle çok sığ alüvyon tabakalarında görülebilen 0.20–0.30 km/s mertebesindeki hızlar mevcut bölgesel ağda doğrudan modellenmemiştir. Bu tür düşük hızlı birimlerin güvenilir biçimde temsil edilmesi daha ince bir hesaplama ağı gerektirmektedir.



Şekil 1. 6 Şubat 2023 tarihinde ve devamında gerçekleşen iki ana depremin (solda) ve incelenen artçı depremin (sağda) episantlarını göstermektedir. Başlıca fay segmentlerinin dağılımını, AFAD kuvvetli yer hareketi istasyonlarını göstermektedir

2.2 Fizik tabanlı simülasyonlarda sayısal modelleme

2.2.1 Sayısal analiz yönteminin esasları

Kahramanmaraş bölgesindeki sismik dalga yayılımı, Graves [5] tarafından geliştirilen ve ardından birçok büyük ölçekli bölgesel yer hareketi simülasyonu çalışmasına kaynak teşkil eden hız-gerilme ağlarının ayrıştırılarak (staggered-grid) formüle edildiği üç boyutlu sonlu farklar (FD) şeması kullanılarak analiz edilmiştir. Bu formülasyon, zamanda ve uzayda ikinci mertebe doğruluk sağlarken, farklı tabaka hızlarına sahip heterojen elastik ortamlar için sayısal kararlılığı pek çok çalışmada test edilmiştir [9, 22].

FD yaklaşımı, karmaşık havza geometrileri, eğimli ara yüzeyler ve çok ölçekli hız yapısı farklılıklarının açık biçimde temsil edilmesine olanak verdiğinden, uzun periyot yer hareketlerinin araştırılması için özellikle uygundur. Bu çalışmada sayısal çerçeve, 2 s ve daha uzun periyotlara sahip dalgaların yayılımını çözebilecek kapasitede kullanılmıştır. Şekil 2’de adımları verilen, çalışma kapsamındaki üç boyutlu simülasyonlarda araştırılan frekans aralığı, yüksek ve sünek mühendislik yapılarının salınım periyotlarına bağlı olarak yer hareketi hakim periyotlarının özellikle incelenmesi gereken mertebelerdir.

2.2.2 Sismik kaynak parametrelerinin tanımlanması

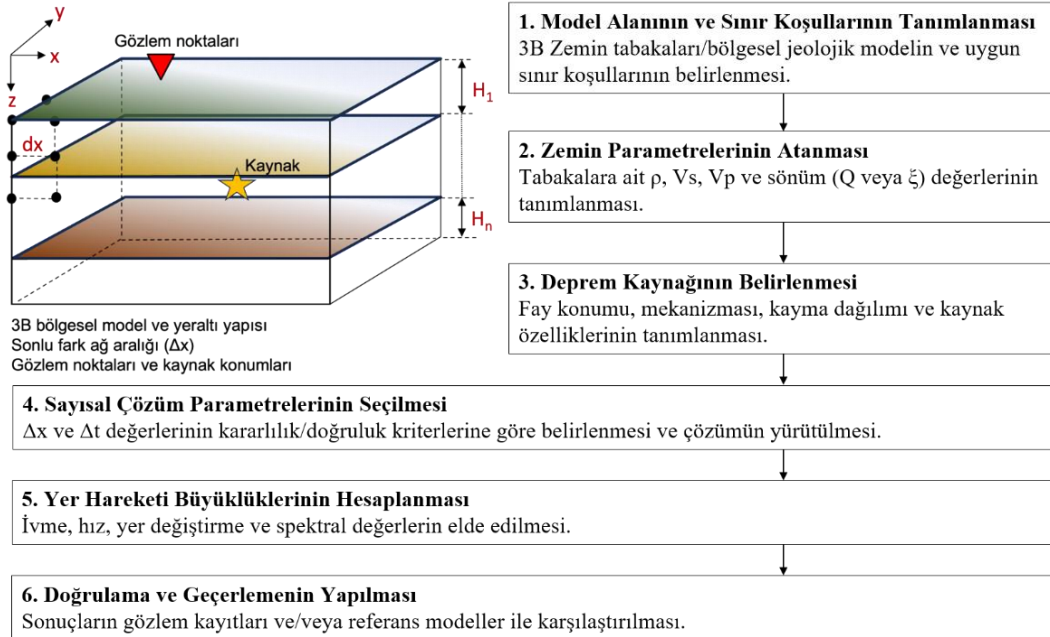
Yer hareketi simülasyonlarında sismik kaynağın gerçekçi biçimde tanımlanması, üretilen dalga alanının genliği ve frekans içeriği üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Özellikle fizik tabanlı ve kinematik kırılma modellerine dayalı yaklaşımlar, kaynak parametrelerinin doğru temsiline yüksek frekans içeriğinin çözümünde kritik olduğunu göstermiştir [31]. Ayrıca, dalga yayılımının doğruluğu; fay geometrisi, gerilme dağılımı ve bölgesel hız

yapısının ne ölçüde temsil edildiğine doğrudan bağlıdır. Bununla birlikte, büyük depremler için sonlu fay modellerinin ayrıntılı biçimde tanımlanması, geometrik karmaşıklıklar ve dinamik kırılma süreçleri nedeniyle önemli belirsizlikler içermektedir [32].

Bu çalışmada, modeldeki yapısal özelliklerin dalga yayılımı üzerindeki etkilerinin daha kontrollü bir çerçevede incelenmesi amacıyla 19 Şubat 2023 tarihinde, yerel saatle 04:07:40’da meydana gelen Mw 4.5 büyüklüğündeki artçı deprem kullanılmış, ana şoklar için dinamik kaynak modellerine bağlı etkilerin baskın olmasından kaçınılması amaçlanmıştır. Bölgesel deprem simülasyonlarına yönelik öncü çalışmalarda orta büyüklükteki depremlerin tercih edilmesi, kırılma sürecine ilişkin belirsizlikleri ve doğrusal olmayan zemin davranışının etkilerini sınırlayarak elastodinamik çözümün daha güvenilir biçimde test edilmesine olanak sağlamaktadır.

Sismik kaynak, moment tensör çözümlerine dayalı noktasal çift kuvvet (point double-couple) yaklaşımı ile temsil edilmiştir. Bu sadeleştirilmiş temsil, özellikle erken aşama bölgesel modelleme çalışmalarında yaygın olarak tercih edilmekte olup, hesaplama verimliliği sağlamasının yanı sıra kırılma yükselme süresinin (slip rise time) sabit kabul edilmesine imkan tanımaktadır. Kaynak kırılma süresinin yer hareketinin yüksek frekans içeriği üzerinde önemli etkisi bulunduğu bilinmektedir. İncelenen Nurdağı Mw 4.5 artçı depremi için episantr yaklaşık 37.236°K–36.835°D olup, kaynak modelinde AFAD moment tensör çözümüne dayalı 8.3 km odak derinliği ve doğrultu/eğim/rake, 316°/83°/–148° değerleri kullanılmıştır [22]. Mw = 4.5 için sismik moment, moment büyüklüğüne karşılık gelen ampirik bağıntılar kullanılarak (7.1×10^{15} Nm) olarak hesaplanmıştır.

Fizik Tabanlı 3B Deprem Yer Hareketi Simülasyonu: Sayısal Modelleme Akışı



Şekil 2. Fizik tabanlı üç boyutlu sonlu farklar yöntemi ile elastodinamik dalga yayılımının çözümü ve deprem yer hareketi simülasyonuna ilişkin sayısal hesaplama iş akışı

Kaynak, noktasal çift-kuvvet (point double-couple) yaklaşımıyla temsil edilmiş; kırılma hızı, yaygın kinematik modelleme yaklaşımıyla uyumlu olarak ortam kayma dalgası hızının %85'i (0.85Vs), yükselme süresi ise 1.0 s olarak kabul edilmiştir. Bu kabuller, orta büyüklükteki olay için kaynak karmaşıklığını sınırlandırarak yapısal model etkilerinin daha kontrollü biçimde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. [11].

3 Deprem simülasyonlarında yapısal model etkilerinin sistematik incelenmesi

3.1 Simülasyon stratejisi ve incelenen yapısal modeller

Üç boyutlu yarı uzayı temsil eden yeraltı yapısı modellerinde yer hareketi özellikleri üzerindeki etkileri sistematik biçimde değerlendirebilmek amacıyla üç farklı model tanımlanmış ve karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu yaklaşım, özellikle derin yapı geometrisi ile sığ sedimanter tabakaların sismik dalga yayılımı üzerindeki katkılarını karşılaştırmayı hedeflemektedir. Modellerin şematik gösterimi ve kayma dalgası hızı (Vs) dağılımları Şekil 3'te sunulmaktadır.

İlk model olan Model 1 (Düz Yapı), havza sedimanlarını içermeyen, tamamen yatay ve tabakalı bir hız yapısına sahip referans modeli temsil etmektedir. Bu modelde tüm ara yüzeyler yatay kabul edilmiş olup, yüzeye yakın düşük hızlı birimler dikkate alınmamıştır. Böylece dalga yayılımı üzerindeki etkiler, yalnızca tabakalı ancak geometrik olarak sade bir ortam için değerlendirilmektedir. Model 2 (Eğimli Derin Yapı), sığ düşük hızlı havza tabakalarını içermemekle birlikte, derin yapıda yanal yönde değişen eğimli ara yüzeyleri tanımlamaktadır. Bu model, derin yapı eğiminin ve yanal heterojenliğin dalga yayılımı üzerindeki etkisini izole etmek amacıyla oluşturulmuştur. Model 1 ile karşılaştırıldığında, yalnızca geometrik farklılıkların yer hareketi üzerindeki katkısı analiz edilmektedir.

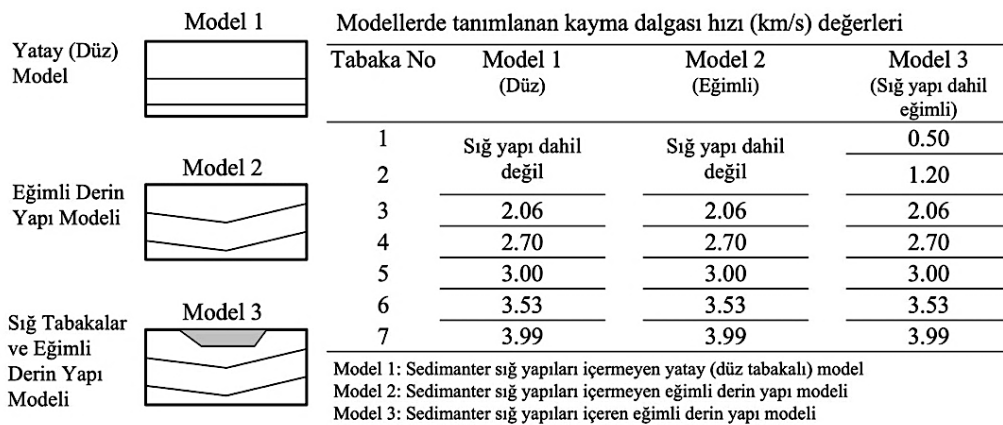
Model 3 (Sedimanter tabakaları içeren eğimli yapı) ise hem eğimli derin yapıyı hem de yüzeye yakın düşük hızlı sedimanter tabakaları birlikte içeren bütüncül modeli temsil etmektedir. Bu yapı, havza etkisi ile derin yapı geometrisinin birleşik etkilerini yansıtmaktadır. Özellikle düşük Vs değerlerine sahip sığ birimlerin varlığı, dalga yayılımı

sırasında enerji tuzaklanması ve genlik büyütmesi gibi mekanizmaların değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu nedenle Model 3, Kahramanmaraş Havzası altındaki yeraltı koşullarının daha gerçekçi bir temsilini sunmaktadır. Simülasyon stratejisi, yapısal parametrelerin göreceli etkilerini kontrollü bir biçimde ortaya koyacak şekilde tasarlanmıştır. Bu kapsamda tüm modellerde Mw 4.5 büyüklüğündeki aynı artçı deprem kaynak olarak kullanılmış, böylece kaynak parametrelerine bağlı epistemik belirsizlikler en aza indirilmiş ve dalga yayılımı ile saha etkileri ön plana çıkarılmıştır. Orta büyüklükteki bir olayın tercih edilmesi, kırılma karmaşıklığının ve doğrusal olmayan zemin davranışının etkilerini sınırlayarak elastodinamik çözümün daha güvenilir biçimde test edilmesine olanak sağlamaktadır. Tüm sayısal analizler, aynı kaynak parametreleri, aynı üç boyutlu sonlu fark ayrıklaştırması ve aynı sınır koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla elde edilen yer hareketi farklılıkları doğrudan tanımlanan üç yapısal model arasındaki geometrik ve hız yapısına ilişkin farklılıklara atfedilebilmektedir. Bu kontrollü karşılaştırma yaklaşımı, jeolojik karmaşıklığın uzun periyotlu yer hareketi özellikleri üzerindeki etkilerinin açık biçimde ortaya konulmasını sağlamaktadır.

3.2 Doğrulama için gözlemsel kuvvetli yer hareketi verileri ve istasyon ağı

Sayısal simülasyonların doğrulanması amacıyla, Kahramanmaraş ve çevresinde konumlanan seçili AFAD kuvvetli yer hareketi istasyonlarına ait ivme kayıtları kullanılmıştır. Analiz kapsamında; havza içi sedimanter alanlar, havza kenarı geçiş zonları ve havza dışındaki görece rijit zemin koşullarını temsil eden istasyonlar dikkate alınmıştır. Bu mekânsal dağılım, havza geometrisi ile hız kontrastlarının dalga biçimi karakteristikleri ve spektral içerik üzerindeki etkilerinin güvenilir ve karşılaştırmalı biçimde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

İstasyonların zemin özellikleri Vs₃₀ değerleri esas alınarak sınıflandırılmıştır. Yüksek Vs₃₀ değerlerine sahip istasyonlar kaya veya çok rijit zemin koşullarını temsil ederken, orta düzey Vs₃₀ değerleri rijit zeminler ya da ayrılmış kaya ortamlarını işaret etmektedir.



Şekil 3. İncelenen üç alternatif yapısal modele ait şematik geometri ve kayma dalgası hızı (Vs) profillerinin karşılaştırılması

Buna göre 4618 numaralı istasyon 715 m/s V_{S30} değeri ile görece rijit zemin koşullarını temsil ederken; 4617, 4619 ve 4622 numaralı istasyonlarda sırasıyla 574, 545 ve 440 m/s değerleri gözlenmektedir. En düşük V_{S30} değeri ise 280 m/s ile 4624 numaralı istasyona aittir ve daha yumuşak sedimanter zemin koşullarını temsil etmektedir. İstasyonların Kahramanmaraş Havzası'na göre göreceli konumları Şekil 1'de verilmiş olup, V_{S30} değerleri ile birlikte değerlendirilerek gözlem-simülasyon karşılaştırmalarının farklı zemin koşulları açısından yorumlanması amaçlanmıştır.

Seçilen istasyonlarda, kaynak depreme ait kayıtların zaman tanım alanındaki genlik özellikleri ile hesaplanan spektral büyüklükler birlikte değerlendirilmiş; böylece yapısal model etkilerinin farklı jeolojik ortamlardaki davranışı karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

4 Bulgular ve tartışma

4.1 Bölgesel dalga yayılımının değerlendirilmesi

Mw 4.5 artçı depremi için gerçekleştirilen 3B sonlu farklar simülasyonlarının bölgesel dalga yayılımı özelliklerini niteliksel olarak değerlendirmek amacıyla, yer hızı dalga alanının zamana bağlı anlık görüntüleri incelenmiştir. Şekil 4, M1 (düz/yatay tabakalı), M2 (eğimli derin yapı) ve M3 (eğimli yapı + düşük hızlı yüzey sedimanları) modelleri için farklı zaman adımlarında ($t = 3, 15, 21$ ve 27 s) kuzey-güney bileşenindeki yer hızı dağılımlarını göstermektedir. Bu karşılaştırma, dalga cephelerinin havza içerisine girişinden sonra dalga alanında meydana gelen genlik artışı, dalga biçimi bozulması ve geç fazların gelişimi gibi havza kaynaklı etkilerin model detayına bağlı olarak nasıl değiştiğini ortaya koymaktadır.

Şekil 4, Mw 4.5 büyüklüğündeki artçı deprem için üç farklı yapısal modelde (M1, M2 ve M3) elde edilen yatay kuzey-güney bileşenine ait yer hızı alanlarının kırılma başlangıcını izleyen ardışık zaman adımlarındaki anlık görüntülerini göstermektedir. Görseller, dalga alanının mekânsal evrimini ve sismik enerjinin üç boyutlu hız yapısı ile etkileşimini niteliksel olarak ortaya koymaktadır. Erken zaman adımlarında (ör. $t = 3$ s ve 15 s), tüm modellerde dalga alanı kaynak çevresinden radyal olarak yayılan, görece düzgün ve tutarlı cisim dalgası cepheleri ile karakterizedir. Bu evrede dalga yayılımı büyük ölçüde kaynak mekanizması ve bölgesel hız yapısının ortalama özellikleri tarafından kontrol edilmekte; modeller arasındaki farklar sınırlı düzeyde kalmaktadır. M1 modelinde (yatay ve havzasız yapı), dalga cepheleri daha düzenli ve simetrik bir geometri sergilemekte, hız alanı dağılımı görece homojen bir yayılım göstermektedir. Şekil 4'te renk ölçekleri her panelde gösterilen hız alanının görselleştirilmesine yönelik olarak verilmiştir; bu nedenle modeller arasındaki nicel genlik farkları yalnızca renk yoğunluğuna göre yorumlanmamış, karşılaştırma esas olarak dalga cephesi geometrisi, geç fazların gelişimi ve dalga alanı karmaşıklığı üzerinden yapılmıştır. İlgili bölgesel modelin kapsamlı nicel ve spektral doğrulaması ayrıca [22]'de sunulmuştur.

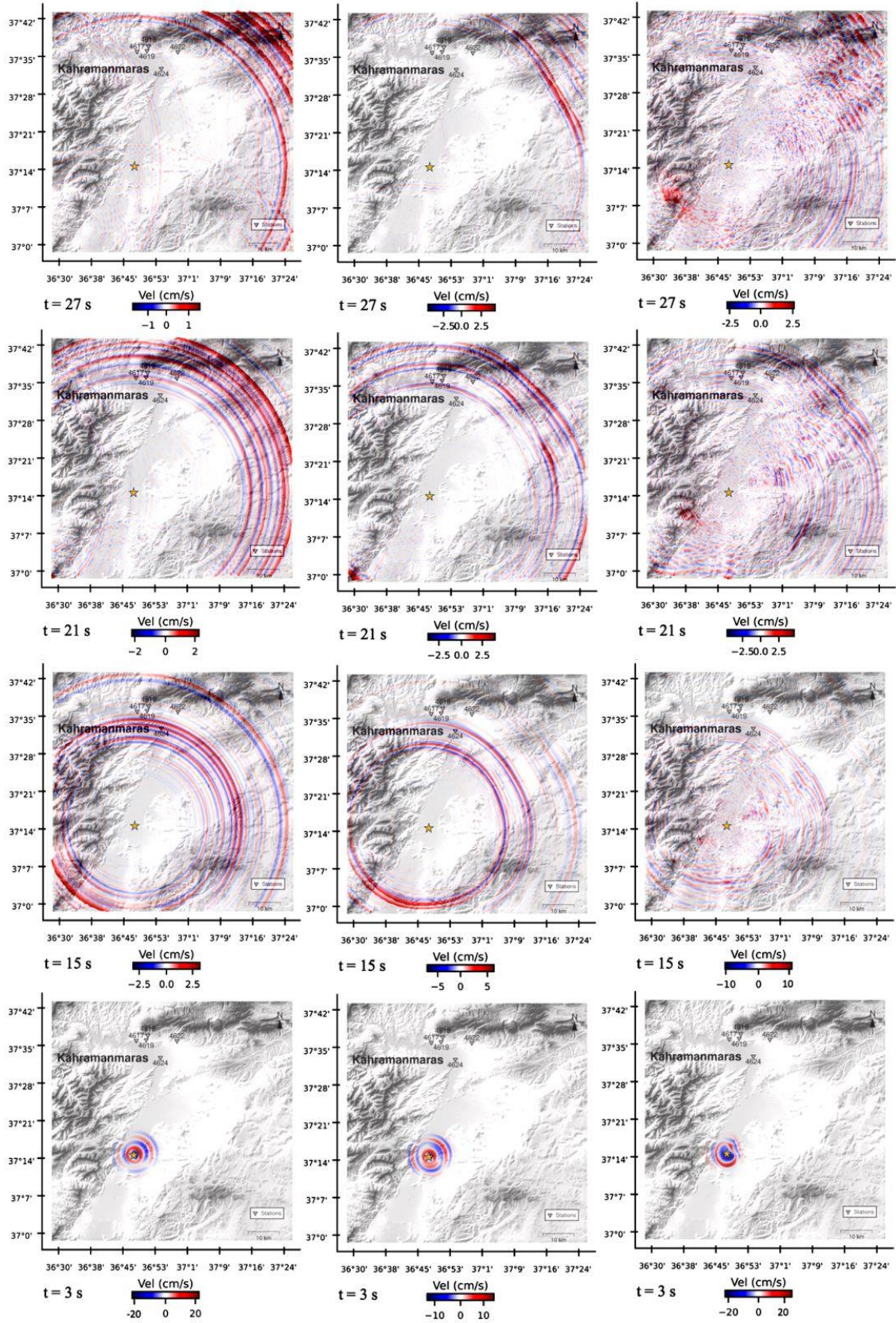
Dalga cepheleri havza bölgesine ulaştıkça ($t=21$ s ve 27 s), modeller arasındaki farklılıklar belirginleşmektedir. M2

modelinde, derin yapının eğimli olması nedeniyle dalga cephelerinde yönelme, kırılma ve sınırlı odaklanma etkileri gözlenmekte; ancak sığ düşük hızlı birimler bulunmadığından enerji dağılımı M1'e kıyasla daha karmaşık olmakla birlikte hâlen nispeten düzenlidir. Buna karşılık M3 modelinde, sığ düşük hızlı sedimanter tabakaların varlığı dalga alanının evrimini belirgin biçimde değiştirmektedir. Özellikle Kahramanmaraş Havzası içerisine giren sismik enerji, güçlü yanal hız zıtlıkları ve empedans kontrastları nedeniyle kırılmakta, yansımakta ve kısmen hapsolmektedir. Bu durum, havza içerisinde uzamış dalga trenleri, genlik büyümeleri ve mekânsal olarak daha karmaşık bir hız alanı ile kendini göstermektedir. Geç zaman adımlarında havza içindeki saçılmış enerji ve belirgin yüzey dalgası bileşenleri, M1 ve M2 modellerine kıyasla çok daha baskın hale gelmektedir.

M3 modelinde gözlenen bu davranış, düşük kayma dalgası hızlarına (0.5 km/s) sahip sığ sedimanter birimlerin dalga enerjisini yavaşlatarak çoklu iç yansımaları ve yüzey dalgası üretimine ortam sağlaması ile ilişkilidir. Bu tabakalar, daha yüksek hızlı birimler üzerinde yer almakta ve güçlü empedans zıtlıkları oluşturarak özellikle uzun periyot bileşenlerde büyütme etkisini artırmaktadır. Sığ havza tabakalarının ihmal edildiği M1 ve kısmen M2 modellerinde ise bu tür uzamış ve karmaşık dalga alanı özellikleri ya gözlenmemekte ya da belirgin ölçüde zayıflamaktadır.

Genel olarak Şekil 4'te sunulan anlık görüntüler, üç boyutlu hız modelinin dalga alanı evrimini fiziksel olarak tutarlı biçimde yeniden üretebildiğini göstermekte, ayrıca havza geometrisinin ve sığ düşük hızlı birimlerin bölgesel dalga yayılımı özelliklerini, özellikle geç zaman ve uzun periyot davranışı açısından, birinci derecede kontrol ettiğini ortaya koymaktadır. Erken zamanlarda dalga alanı, kaynak bölgesinden yayılan tutarlı, radyal olarak genişleyen cisim dalgası cepheleri tarafından domine edilmektedir. Dalga cepheleri dışı doğru ilerledikçe, özellikle sismik enerji Kahramanmaraş Havzası'na girdiğinde, giderek artan bir bozulma belirginleşmektedir. Bu bozulmaya, lokal genlik artışı ve mekansal olarak değişken dalga hızları eşlik etmektedir, bu durum, havza sedimanları ile çevredeki anakaya arasındaki güçlü yanal hız zıtlıklarını yansıtmaktadır.

Daha geç zamanlarda, havza içindeki dalga alanı saçılmış enerji ve uzamış dalga süreleri dahil olmak üzere belirgin bir karmaşıklık sergilemektedir. Bu özellikler, düşük hızlı havza yapısı içinde çoklu iç yansımalar ve yüzey dalgası üretimine işaret etmektedir. Bu davranış, sığ havza sedimanlarını ihmal eden simülasyonlarda yoktur veya önemli ölçüde azalmıştır, bu da havza geometrisinin uzun periyotlarda bölgesel dalga yayılımı özelliklerini kontrol etmede birinci derecede rol oynadığını göstermektedir. Genel olarak, dalga alanı anlık görüntüleri, sismik enerjinin sedimanter ortamdan geçişi sürecinde üç boyutlu hız yapısına bağlı model etkilerinin belirginleştiğini ve dalga yayılımını kontrol eden baskın bir mekanizma haline geldiğini doğrulamaktadır.



Şekil 4. Mw 4.5 depreminden kaynaklanan dalga alanının M1, M2 ve M3 modelleri için zamana bağlı yayılımı. Kırılma başlangıcını izleyen zaman adımlarında üretilen yatay (kuzey–güney) yer hızı anlık görüntüleri

Sonuç olarak, M1–M2–M3 arasındaki farklar, aynı kaynak ve sayısal çözüm koşulları altında yapısal modelin görelî etkisini göstermektedir. Bununla birlikte, gözlenen ve sentetik kayıtlar arasındaki mutlak uyumsuzluklar yalnızca hız modeline bağlanmamalıdır; kaynak temsili, sönüm modeli, çözülmemiş küçük ölçekli yol heterojenlikleri ve istasyon ölçeğindeki yerel zemin koşulları da sonuçları etkileyebilir.

4.2 Kayıtlar ile 3B simülasyonların üç bileşenli hız-zaman serilerinin karşılaştırılması

Kahramanmaraş şehir merkezinde ve yakın çevresinde konumlanan seçili AFAD istasyonları için Mw 4.5 büyüklüğündeki artçı depreme ait üç bileşenli (doğu–batı, kuzey–güney ve düşey) hız-zaman kayıtları, üç farklı yapısal modelden (M1, M2 ve M3) elde edilen simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Gözlenen (Obs) ve simüle edilen dalga biçimlerinin karşılaştırmalı sunumu Şekil 5’te verilmiştir. İstasyonların havza içi, havza kenarı ve görece rijit zemin koşullarını temsil edecek şekilde seçilmiş olması, eğimli anakaya geometrisinin ve sedimanter birimlerin yer hareketi üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Gözlenen ve sentetik kayıtlar aynı sinyal işleme prosedürüne tabi tutulmuştur. Öncelikle, sayısal modelin üst frekans çözünürlüğü ile uyumlu olarak 0.5 Hz kesim frekansına sahip dördüncü mertebe Butterworth düşük geçiren filtre uygulanmıştır. Ardından, zaman tanım alanındaki karşılaştırmalar için kayıtlar 2–10 s (0.1–0.5 Hz) periyot aralığını koruyan ikinci mertebe Butterworth bant geçiren filtre ile süzölmüştür. Filtreleme işlemleri tek yönlü olarak gerçekleştirilmiş olup sıfır-fazlı filtreleme uygulanmamıştır.

Zaman alanı karşılaştırmaları, erken gelen cisim dalgalarının yanı sıra geç gelen havza kaynaklı fazları da kapsayacak şekilde yeterli uzunlukta bir zaman penceresinde gerçekleştirilmiştir. Değerlendirme özellikle (i) geç faz genlikleri, (ii) sarsıntı süresi ve (iii) yatay ve düşey bileşenler arasındaki farklılıklar üzerine odaklanmıştır.

Tüm istasyonlarda ilk büyük fazların varış zamanları genel olarak üç model tarafından da makul düzeyde yeniden üretilmiştir. Bu durum, büyük ölçekli hız yapısının ortalama dalga yayılım hızlarını yeterli doğrulukta temsil ettiğini göstermektedir. Ancak kayıtların geç kısımlarında dalgaların süresi, genlik seviyesi ve karmaşıklık açısından belirgin farklılıklar ortaya çıkmaktadır.

Havza içi istasyonlarda Model 1 (düz yapı), dalga süresini sistematik olarak düşük tahmin etmekte ve gözlenen kayıtlarda belirgin olan geç fazları yeterince yeniden üretememektedir. Dalga alanı görece basit olup erken varan fazlar tarafından domine edilmektedir. Model 2 (eğimli derin yapı), varış zamanları ve dalga biçimi şekli açısından kısmi iyileşme sağlamaktadır. Bununla birlikte, özellikle yatay bileşenlerde geç faz genlikleri gözlemlere kıyasla düşük kalmakta ve sarsıntı süresi halen yetersiz temsil edilmektedir.

Buna karşılık Model 3 (sığ sedimanter tabakalar ve eğimli yapı), incelenen havza ve havza kenarı istasyonlarının

çoğunda gözlenen kayıtlarla genel olarak daha iyi uyum göstermiş; özellikle uzamış hareket süresi ve geç fazların temsilinde M1 ve M2’ye göre iyileşme sağlamıştır. Bu durum özellikle eğimli havza kenarlarına yakın istasyonlarda belirgindir. Güçlü empedans zıtlıkları yüzey dalgası üretimini ve yerel odaklanma etkilerini artırmaktadır.

Yapısal modeller arasındaki farklılıklar hareket bileşenleri arasında da değişkenlik göstermektedir. Yapısal karmaşıklığın artmasıyla birlikte yatay bileşenlerde genlik ve süre uyumu belirgin biçimde iyileşmektedir. Düşey bileşen ise sığ havza yapısına daha duyarlıdır. Model 3 çoğu istasyonda daha yüksek düşey genlikler ve daha uzun süreli salınımlar üretmektedir. Bu gözlem, havza kaynaklı dalga alanı karmaşıklığının yalnızca yatay polarize yüzey dalgalarını değil, mod dönüşümü ve eğimli ara yüzeylerle etkileşim yoluyla düşey hareketi de önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir.

Genel olarak, Şekil 5’te sunulan zaman alanı karşılaştırmaları, sığ sedimanter tabakaların ve üç boyutlu hız yapısının uzun periyotlu yer hareketi özelliklerini belirlemede kritik rol oynadığını ve yapısal model karmaşıklığının artmasıyla gözlemsel kayıtlarla uyumun belirgin biçimde iyileştiğini ortaya koymaktadır.

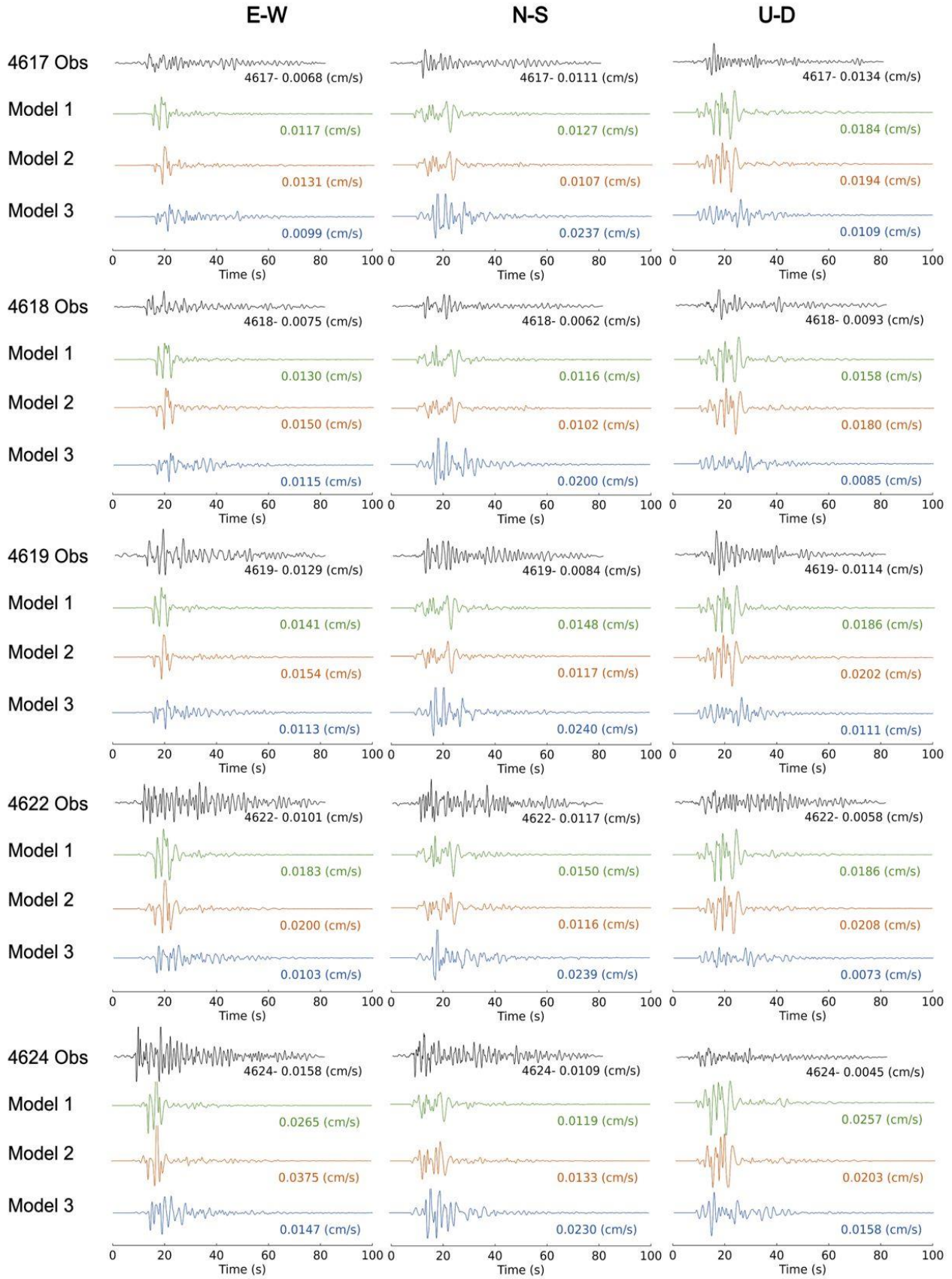
5 Sonuçlar

Üç boyutlu elastodinamik simülasyonlar kapsamında tanımlanan üç yapısal modelin zaman alanındaki karşılaştırmaları, büyük ölçekli hız yapısının ortalama dalga yayılım hızlarını yeterli doğrulukta temsil ettiğini göstermektedir. Nitekim tüm istasyonlarda ilk büyük fazların varış zamanları üç model tarafından benzer biçimde yeniden üretilmiştir. Buna karşılık, kayıtların geç evrelerinde dalga biçimi genliği, sarsıntı süresi ve karmaşıklığı açısından belirgin model farklılıkları ortaya çıkmıştır.

Model 1, incelenen istasyonlarda sarsıntı süresini sistematik olarak düşük tahmin etmiş ve gözlenen geç fazları yeniden üretememiştir. Dalga biçimlerinin erken varışlar tarafından domine edilmesi, sedimanter ortamda enerji hapsinin gerçekleşmediğini göstermektedir.

Model 2 varış zamanları ve bazı dalga biçimi özelliklerinde kısmi iyileşme sağlamış, ancak sığ düşük hızlı sedimanların bulunmaması nedeniyle geç faz genlikleri ve uzun periyotları ve hareket süreleri halen düşük tahmin edilmiştir.

En yüksek uyum Model 3’te elde edilmiştir. Bu model, kayıtları incelenen istasyonlarda uzamış sarsıntı sürelerini ve güçlenmiş geç fazları başarılı biçimde yeniden üretmiştir. Özellikle sedimanter sığ tabakaların bulunduğu bölgelerde güçlü hız ve empedans zıtlıklarına bağlı yüzey dalgası üretimi ve odaklanma etkileri belirginleşmiştir. Modellerde yapısal detayın artmasıyla yatay bileşenlerde genlik ve süre uyumu iyileşirken, düşey bileşenin havza yapısına daha duyarlı olduğu görölmüştür. Model 3’te gözlenen artmış düşey genlikler ve uzamış salınımlar, havza geometrisinin yalnızca yatay yüzey dalgalarını değil, mod dönüşümü ve eğimli ara yüzey etkileşimleri yoluyla düşey hareketi de etkilediğini göstermektedir.



Şekil 5. Seçili AFAD istasyonlarında gözlenen ve M1, M2 ve M3 modelleri ile simüle edilen üç bileşenli (E-W, N-S, U-D) hız zaman serilerinin karşılaştırılması (2–10 s periyot bandında filtrelenmiş)

Model 1'den Model 3'e doğru gözlenen sistematik iyileşme, uzun periyot yer hareketi özelliklerinin şekillenmesinde üç boyutlu havza geometrisinin belirleyici rolünü ortaya koymaktadır. Sığ düşük hızlı sediman kalınlığı uzun periyotların büyütmesinde önemli rol oynarken, derin yapı eğimi dalga alanının yönlenmesi, odaklanması ve saçılması gibi ikincil mekanizmaları düzenlemektedir. Bu çok ölçekli etkileşim, gerçekçi dalga biçimi karmaşıklığı ve süre özelliklerinin yeniden üretimi için gereklidir.

Elde edilen bulgular, sedimanter havza ortamlarında sismik tehlike değerlendirmelerinde üç boyutlu fizik tabanlı modellerin kullanımının oldukça önemli olduğunu göstermektedir. Basitleştirilmiş katmanlı yaklaşımlar ortalama genlik düzeylerini yaklaşık olarak tahmin edebilir de, yapı performansını doğrudan etkileyen uzun periyot büyütmesi, sarsıntı süresi ve oluşan dalga içeriğine bağlı taşınan enerji miktarı gibi kritik büyüklükleri yeterince temsil edememektedir. Ayrıca düşey yer hareketi bileşeninin havza yapısına duyarlılığı, tasarım ve performansa dayalı değerlendirmelerde bu bileşenin ihmal edilmemesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Araştırmanın mühendislik kapsamı değerlendirilirken kullanılan frekans aralığı da dikkate alınmalıdır. Mevcut modelin 0.5 Hz üst frekans sınırı nedeniyle sonuçlar $T \geq 2$ s uzun periyotlu yer hareketleriyle sınırlıdır ve hakim periyotları yaklaşık 0.2–1.0 s aralığında bulunan Türkiye'deki yaygın düşük ve orta katlı yapı stokunun sismik taleplerini doğrudan temsil etmemektedir. Bu nedenle mevcut sonuçlar öncelikle bölgesel uzun periyotlu dalga yayılımının ve sedimanter havza etkilerinin anlaşılması açısından değerlendirilmelidir. Daha kısa periyotlu mühendislik taleplerinin incelenebilmesi için gelecekte daha ince sayısal ağlar, daha ayrıntılı sığ hız modelleri ve daha geniş frekans bantlı fizik tabanlı simülasyonların geliştirilmesi gerekmektedir.

Çalışmanın sonuçları, tek bir Mw 4.5 artçı deprem, noktasal kaynak yaklaşımı, doğrusal-elastik ortam ve 0.5 Hz üst frekans sınırı kapsamında değerlendirilmelidir. Bu nedenle elde edilen bulguların daha büyük depremlere, doğrusal olmayan sığ zemin davranışına veya daha kısa periyotlu mühendislik taleplerine doğrudan genellenmesi uygun değildir. Bununla birlikte, incelenen uzun periyot bandında sığ sedimanter tabakaları ve eğimli derin yapıyı birlikte içeren Model 3'ün, gözlenen bazı dalga biçimi, genlik ve sarsıntı süresi özelliklerini diğer modellere göre daha iyi temsil ettiği görülmüştür. Gelecekte yapılacak çalışmalarda doğrusal olmayan zemin davranışının, daha yüksek frekans bileşenlerinin ve daha yüksek çözünürlüklü sığ tabaka modellerinin dikkate alınması, bölgeye özgü yer hareketi ve sismik tehlike değerlendirmelerinin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

CRedit yazarlık katkı beyanı

Bilal Özasan: Kavramsallaştırma, Veri düzenleme, Formal analiz, Fon sağlama, Araştırma, Yöntem, Proje yönetimi, Kaynak sağlama, Yazılım, Danışmanlık, Doğrulama, Görselleştirme, Yazma-ilk taslak, Yazma-inceleme ve düzenleme.

Teşekkür

Bu çalışma, yazar Bilal Özasan'ın Tokyo Teknoloji Enstitüsü'ndeki doktora sonrası geoteknik deprem mühendisliği araştırmalarını destekleyen TÜBİTAK 2219 Yurt Dışı Doktora Sonrası Araştırma Burs Programı kapsamında finanse edilmiştir. (53325897-115.02-381874)

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %10

Yazım sürecinde üretken yapay zekâ (YZ) ve YZ destekli teknolojilerin kullanımına ilişkin beyan

Yazarlar, bu çalışmanın hazırlanmasında herhangi bir yapay zekâ aracı kullanmamıştır.

Kaynaklar

- [1] K. Aki and K. Larner, "Surface motion of a layered medium having an irregular interface due to incident plane SH waves," *Journal of Geophysical Research*, 75, 933–954, 1970. <https://doi.org/10.1029/JB075i005p00933>
- [2] P. Y. Bard and M. Bouchon, "The seismic response of sediment-filled valleys. Part 1: The case of incident SH waves," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 70 (4), 1263–1286, 1980. <https://doi.org/10.1785/BSSA0700041263>
- [3] J. L. King and B. E. Tucker, "Observed variations of earthquake motion across a sediment-filled basin," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 74 (1), 137–151, 1984. <https://doi.org/10.1785/BSSA0740010137>
- [4] A. S. Papageorgiou and J. Kim, "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*, 81 (6), 2214–2233, 1991. <https://doi.org/10.1785/BSSA0810062214>
- [5] R. W. Graves, "Simulating seismic wave propagation in 3D elastic media using staggered-grid finite differences," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86 (4), 1091–1106, 1996. <https://doi.org/10.1785/BSSA0860041091>
- [6] A. Pitarka, "3D elastic finite-difference modeling of seismic motion using staggered grids with nonuniform spacing," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89, 54–68, 1999. <https://doi.org/10.1785/BSSA0890010054>
- [7] R. W. Graves and A. Pitarka, "Refinements to the Graves and Pitarka (2010) broadband ground-motion simulation method," *Seismological Research Letters*, 86 (1), 75–80, 2015. <https://doi.org/10.1785/0220140101>
- [8] 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 and Rayleigh waves," *Seismological Research Letters*, 67 (5), 25–35, 1996. <https://doi.org/10.1785/gssrl.67.5.25>

- [9] R. W. Graves, A. Pitarka and P. G. Somerville, "Ground-motion amplification in the Santa Monica area: Effects of shallow basin-edge structure," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88 (5), 1224–1242, 1998. <https://doi.org/10.1785/BSSA0880051224>
- [10] J. F. Semblat, M. Kham, E. Parara, P. Y. Bard, K. Pitilakis, K. Makra and D. Raptakis, "Seismic wave amplification: Basin geometry versus soil layering," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25 (7–10), 529–538, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2004.11.003>
- [11] K. Irikura and H. Miyake, "Recipe for predicting strong ground motion from crustal earthquake scenarios," *Pure and Applied Geophysics*, 168, 85–104, 2011. <https://doi.org/10.1007/s00024-010-0150-9>
- [12] P. Moczo, J. Kristek, P. Y. Bard et al., "Key structural parameters affecting earthquake ground motion in 2D and 3D sedimentary structures," *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16, 2421–2450, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0345-5>
- [13] C. Zhu, D. Thambiratnam and C. Gallage, "Statistical analysis of the additional amplification in deep basins relative to the 1D approach," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 104, 296–306, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.09.003>
- [14] B. Özaslan, R. İyisan, M. E. Haşal, H. Khanbabazadeh and H. Yamanaka, "Assessment of the Design Spectrum with Aggravation Factors by 2D Nonlinear Numerical Analyses: A Case Study in Gemlik Basin, Turkey," *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20, 1371–1395, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01296-6>
- [15] K. Makra and F. J. Chávez-García, "Site effects in 3D basins using 1D and 2D models: An evaluation of the differences based on simulations of the seismic response of Euroseistest," *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14 (4), 1177–1194, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10518-015-9862-7>
- [16] B. Özaslan, M. E. Haşal, H. Khanbabazadeh, M. Akbaş and R. İyisan, "Dynamic response analysis of trapezoidal basins on numerical models," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 960 (4), 042048, 2020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/960/4/042048>
- [17] B. Özaslan, M. Akbaş and R. İyisan, "2D Site Response in Alluvial Basins by Finite Difference-Based Numerical Method," WMCAUS 2021, *AIP Conference Proceedings*, 2574, 020001, 2022. <https://doi.org/10.1063/5.0106512>
- [18] H. Khanbabazadeh, R. İyisan and B. Özaslan, "Dynamic behavior of the shallow clayey basins subjected to obliquely incident wave," *Geomechanics and Engineering*, 31 (2), 183–195, 2022. <https://doi.org/10.12989/gae.2022.31.2.183>
- [19] Disaster and Emergency Management Authority (AFAD), "February 6, 2023 Pazarcık–Elbistan Kahramanmaraş earthquakes (Mw 7.7–Mw 7.6) report (in Turkish)," 2023. <https://deprem.afad.gov.tr/>
- [20] T. E. Buckreis, R. Pretell, M. A. Sandikkaya, Ö. Kale, A. Askan, S. J. Brandenburg and J. P. Stewart, "Engineering attributes of ground motions from February 2023 Türkiye earthquake sequence," *Earthquake Spectra*, 40 (4), 2268–2284, 2024. <https://doi.org/10.1177/8755293024125902>
- [21] T. Y. Duman, T. Çan, Ö. Emre, F. T. Kadirioğlu, N. Başarır Baştürk, T. Kılıç et al., "Seismotectonic database of Turkey," *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16, 3277–3316, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10518-016-9965-9>
- [22] B. Özaslan, H. Yamanaka, S. Tsuno and N. Yamada, "Physics-based simulations of the foreshock and aftershock of the February 6, 2023 Türkiye earthquakes and ground motion validation," *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2026. <https://doi.org/10.1007/s10518-025-02360-1>
- [23] R. Paolucci, C. Smerzini and M. Vanini, "BB-SPEEDset: A validated dataset of broadband near-source earthquake ground motions from 3D physics-based numerical simulations," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 111 (5), 2527–2545, 2021. <https://doi.org/10.1785/0120210089>
- [24] F. Petrone, N. Abrahamson, D. McCallen and M. Miah, "Validation of (not-historical) large-event near-fault ground-motion simulations for use in civil engineering applications," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 50 (1), 116–134, 2021. <https://doi.org/10.1002/eqe.3366>
- [25] D. McCallen, A. Petersson, A. Rodgers, A. Pitarka, M. Miah, F. Petrone, B. Sjogreen, N. Abrahamson and H. Tang, "EQSIM: A multidisciplinary framework for fault-to-structure earthquake simulations on exascale computers. Part I: Computational models and workflow," *Earthquake Spectra*, 37 (2), 707–735, 2021. <https://doi.org/10.1177/8755293020970982>
- [26] E. Zor, E. Sandvol, C. Gürbüz, N. Türkelli, D. Seber and M. Barazangi, "The crustal structure of the East Anatolian plateau (Turkey) from receiver functions," *Geophysical Research Letters*, 30 (24), 2003. <https://doi.org/10.1029/2003GL018192>
- [27] A. Maggi and K. Priestley, "Surface waveform tomography of the Turkish–Iranian plateau," *Geophysical Journal International*, 160 (3), 1068–1080, 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2005.02505.x>
- [28] T. Tezel, M. Erduran and Ö. Alptekin, "Crustal shear wave velocity structure of Turkey by surface wave dispersion analysis," *Annals of Geophysics*, 50 (2), 177–190, 2007.
- [29] H. Yamanaka, Ö. T. Özmen, K. Chimoto, M. A. Alkan, M. Tün, E. Pekkan et al., "Exploration of S-wave velocity profiles at strong motion stations in Eskişehir, Turkey, using microtremor phase velocity and S-wave amplification," *Journal of Seismology*, 22 (5), 1127–1137, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10950-018-9756-7>
- [30] K. W. Campbell, "Estimates of shear-wave Q and κ_0 for unconsolidated and semiconsolidated sediments in

- Eastern North America,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99 (4), 2365–2392, 2009. <https://doi.org/10.1785/012008011>
- [31] R. Graves and A. Pitarka, “Kinematic ground-motion simulations on rough faults including effects of 3D stochastic velocity perturbations,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106 (5), 2136–2153, 2016. <https://doi.org/10.1785/0120160088>
- [32] A. Bizzarri, “On the point-source approximation of earthquake dynamics,” *Annals of Geophysics*, 57 (3), 2014. <https://doi.org/10.4401/ag-6479>

