

شبیه‌سازی زمین‌لرزه‌ی شبه‌پالس با استفاده از تبدیل هیلبرت بر پایه‌ی موجک

علی روشن میاوقی (دانشجوی دکتری)

آزاد یزدانی* (استاد)

محمدرشد سلیمی (استادیار)

گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۴۰۰ (دوره ۲ - ۳۷، شماره ۱/۴، ص. ۶۹-۷۹، پژوهشی)

در نوشتار حاضر، روشی برای شبیه‌سازی زمین‌لرزه‌ی نزدیک گسل شبه‌پالس با استفاده از مدل‌سازی مشخصات آنی پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی بر اساس فرایند زمان - بسامد است، که برای در نظر گرفتن مشخصات نامانای زمین‌لرزه ضروری است. در مطالعه‌ی حاضر، به منظور حفظ مشخصات نامانای زمین‌لرزه از تبدیلات هیلبرت و موجک مانا استفاده شده است. از تبدیل موجک مانا به منظور تجزیه‌ی سیگنال زلزله‌ی اصلی به یک سری زیرباندهای بسامدی و از تبدیل هیلبرت جهت استخراج مشخصات آنی زمین‌لرزه‌ها استفاده شده است. به منظور تولید داده‌های تصادفی جهت شبیه‌سازی زلزله‌ها از توزیع‌ها و توابع مناسب برازش شده روی مشخصات آنی و ضرایب تقریب به دست آمده از آخرین مرحله‌ی تبدیل موجک مانا استفاده شده است. در مطالعه‌ی حاضر، از چند زمین‌لرزه‌ی پالس‌دار برای بررسی کارآمد بودن روش پیشنهادی استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد روش پیشنهادی به خوبی مشخصات اصلی زلزله‌ی ثبت شده را در بر می‌گیرد و همچنین آثار پالس زمین‌لرزه را نیز به خوبی حفظ می‌کند.

واژگان کلیدی: زمین‌لرزه‌ی شبه‌پالس، تبدیل موجک، تبدیل هیلبرت، مشخصات آنی، توزیع گوسین.

۱. مقدمه

و معایب روش‌های مختلف شبیه‌سازی زمین‌لرزه بحث کردند و روش‌های مختلفی مانند مدل‌های بر پایه‌ی فیزیک زلزله، روش‌های تصادفی و روش‌های ترکیب شده از دو روش اخیر را معرفی کردند.

روش شبیه‌سازی تصادفی، روشی ساده و مفید برای شبیه‌سازی زمین‌لرزه‌های قوی است، که جامعه‌ی مهندسی به آن توجه داشته است. همچنین روش شبیه‌سازی تصادفی می‌تواند خصوصیات پیچیده‌ی فیزیکی زلزله‌ها را در فرم‌های توابع ساده بیان کند.^[۵] توسعه‌ی مهندسی زلزله بر اساس عملکرد در سال‌های اخیر، ضرورت استفاده از مدل‌های تصادفی زمین‌لرزه را، که بیان‌کننده‌ی مشخصات واقعی زمین‌لرزه هستند، بیشتر کرده است.^[۶] اگر چه مطالعات زیادی برای شبیه‌سازی زمین‌لرزه با استفاده از مدل‌های مانا انجام شده است، اما روش‌های شبیه‌سازی قادر به تولید زمین‌لرزه‌هایی قابل قبول با دامنه و بسامد متغیر با زمان نیستند. زمین‌لرزه‌ها به دلیل نحوه‌ی انتشار امواج در بین لایه‌های مختلف زمین، همواره دامنه‌ی متغیر با زمان و بسامد وابسته به زمان دارند، که ویژگی‌های اخیر باعث ایجاد تغییرات در محتوای بسامدی و محتوای دامنه‌ی زمین‌لرزه‌ها خواهند شد. بدین منظور برای آنالیز دقیق پاسخ سازه‌ها در مقابل تحریک‌های زمین‌لرزه، تخمین یک مدل، که مشخصه‌های زمان و بسامد را به خوبی نشان دهد، ضروری است.^[۷]

نامانا بودن محتوای بسامدی و محتوای دامنه، اثرهای بسیاری در پاسخ سازه‌ها

امروزه با پیشرفت قدرت محاسبات رایانه‌ی، تحلیل دینامیکی سازه‌ها با هزاران درجه‌ی آزادی به منظور استفاده در ارزیابی عملکرد سازه‌ها آسان شده است.^[۱] در تحلیل دینامیکی سازه‌ها، به منظور تعیین پاسخ سازه، به مجموعه‌ی از رکوردهای زمین‌لرزه نیاز است. در مکان‌هایی که در نزدیکی گسل فعال قرار دارند، زمین‌لرزه‌ها معمولاً یک پالس بزرگ در تاریخچه‌ی زمانی سرعت از خود نشان می‌دهند. زمین‌لرزه‌های نزدیک گسل شبه‌پالس، احتمال خرابی سازه‌ها را بالا می‌برند و آسیب‌های زیادی به سازه‌ها وارد می‌کنند.^[۲]

با توجه به محدود بودن تعداد زمین‌لرزه‌های شبه‌پالس ثبت شده، برای تحلیل سازه‌ها در یک منطقه‌ی مشخص، مجموعه‌ی کوچکی از سناریوهای محتمل زمین‌لرزه‌ی شبه‌پالس وجود دارد. به این منظور برای جبران کمبود تعداد زمین‌لرزه‌های ذکر شده، روش‌های مختلفی توسط پژوهشگران ارائه شده است، که بیشتر آنها بر اساس دو رویکرد مقیاس کردن و شبیه‌سازی زمین‌لرزه‌ها هستند. در این راستا، لوکو و بازورو^[۳] (۲۰۰۷)، نشان دادند که مقیاس کردن زمین‌لرزه‌ها می‌تواند باعث یک انحراف در میانگین پاسخ سازه‌ها شود. همچنین داگلاس و آچی^[۴] (۲۰۰۸)، روی مزیت‌ها

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۱/۱۱/۱۳۹۹، اصلاحیه ۲۸/۱/۱۴۰۰، پذیرش ۲۳/۳/۱۴۰۰.

DOI:10.24200/J30.2021.57546.2915

ali.roshan.ur@gmail.com
a.yazdani@uok.ac.ir
mr.salimi@uok.ac.ir

خصوصاً در نواحی غیرخطی پاسخ‌ها می‌گذارد. روش‌های شبه‌سازی که توانایی در نظر گرفتن خصوصیات نامانایی در بسامد و دامنه را ندارند، موجب انحراف و نقص در ارائه‌ی اطلاعات از تحریک‌های ورودی سازه‌ها خواهند شد.^[۸] در برخی از مطالعات پیشین در شبه‌سازی زمین‌لرزه، به منظور راحتی کاربرد روابط ریاضی، نامانایی در بسامد در نظر گرفته نمی‌شد، ولی مطالعات اخیر نشان داده شده است که تغییرات مؤلفه‌ی بسامد می‌تواند پاسخ غیرخطی سازه را به صورت عمده‌ی تحت تأثیر قرار دهد.^[۹-۱۱]

با توجه به اهمیت حفظ مشخصات دامنه و بسامد متغیر با زمان، روش‌های شبه‌سازی داده‌ی مبتنی بر زمین‌لرزه‌ی ثبت شده، که قادر به حفظ تغییرات موضعی دامنه و بسامد زمین‌لرزه‌ی ثبت شده باشند، راهکاری مناسب برای تولید زمین‌لرزه‌های مصنوعی هستند. یکی از روش‌های معروف استخراج بسامد، تبدیل فوریه است. ولی تبدیل فوریه برخلاف حوزه‌ی بسامد، که دقت بالایی دارد، در حوزه‌ی زمان فاقد دقت است و پاسخگوی سیاری از نیازهای پژوهشگران در حوزه‌ی بسامد مطالعاتی نیست. راهکار بهتری که برای آنالیز یک سیگنال با طیف بسامدی متغیر با زمان وجود دارد، استفاده از تبدیل موجک است. تبدیل موجک هم در حوزه‌ی زمان و هم در حوزه‌ی بسامد، دقت بالایی دارد.^[۱۲، ۱۳] بانجاده^۳ و همکاران (۲۰۱۹)،^[۱۴] با استفاده از تبدیل موجک پیوسته، روشی برای نویز جدایی شتاب‌نگاشت زمین‌لرزه معرفی کرده‌اند. خسرو برگی و همکاران (۲۰۱۲)،^[۱۵] نیز با استفاده از ترکیب شبکه‌ی عصبی و موجک‌ها، به تولید شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی پرداخته‌اند. همچنین یزدانی و تاکادا^۴ (۲۰۰۹)،^[۱۶] با استفاده از تبدیل‌های موجک، زمین‌لرزه‌ی سازگار با طیف انرژی تولید کردند. همان‌طور که اشاره شد، ویژگی‌های آنی زمین‌لرزه‌ها، مانند بسامد و دامنه‌ی آنی از مشخصات مهم زلزله بوده و استخراج و بررسی مشخصات مذکور از موضوعات مورد توجه در جامعه‌ی مهندسی زلزله هستند. وانگ^۵ و همکارانش (۲۰۱۴)،^[۱۷] با مدل‌سازی بسامد آنی استخراج شده و استفاده از سایر مشخصات زلزله‌ی ثبت شده به شبه‌سازی زمین‌لرزه‌ی دور از گسل پرداخته‌اند. برای استخراج مشخصات آنی زمین‌لرزه‌ها روش‌های مختلفی معرفی شده‌اند، که یکی از آنها، تبدیل هیلبرت - هوانگ^۶ است.^[۱۸] در روش اخیر، ابتدا به کمک تجزیه‌ی مود تجربی، سیگنال زمین‌لرزه به سیگنال‌های تک‌جزئی تبدیل و سپس با اعمال تبدیل هیلبرت روی هر یک از سیگنال‌های تک‌جزئی، مشخصات آنی زمین‌لرزه استخراج می‌شوند. ون و گو^۷ (۲۰۰۴)،^[۱۹] با استفاده از روش هیلبرت - هوانگ، یک فرایند نامانای را از طریق انتقال فازهای با توزیع یکتواخت شبه‌سازی کردند. بورستی^۸ و همکاران (۲۰۰۴)،^[۲۰] نیز در مطالعه‌ی، اهمیت بسامد آنی را بررسی و روشی برای تحلیل نوسان‌های سرعت ارائه کردند. ایشان در مطالعه‌ی خود از ترکیب تبدیل‌های موجک و هیلبرت برای استخراج مشخصات آنی استفاده کردند و نشان دادند در مقایسه با روش هیلبرت - هوانگ، در روش اخیر تداخل کمتری بین باندهای بسامدی مجاور وجود دارد.

تاکنون مطالعات زیادی روی زمین‌لرزه‌های دور از گسل صورت گرفته است. اگرچه زمین‌لرزه‌های دور از گسل می‌توانند خسارت‌های قابل توجهی بر تسهیلات مهندسی برجا بگذارند، اما ارزیابی سازه‌ها تحت اثر زمین‌لرزه‌های نزدیک گسل برای مناطقی که در مجاورت گسل‌های فعال هستند، اهمیت بسیار بیشتری دارند. معمولاً زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک در فواصلی کمتر از ۲۵ کیلومتر از محل گسیختگی و کانون زلزله اتفاق می‌افتند.^[۲۱-۲۳] رکوردهای زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک به شدت به مکانیزم و جهت گسلش وابسته هستند. بنابراین در مطالعه‌ی حاضر و بر اساس تعاریف جدید علم لرزه‌شناسی، نزدیک گسل بودن زمین‌لرزه‌ها به معنی پالس‌دار بودن زمین‌لرزه‌ها تعبیر می‌شود. زمین‌لرزه‌های نزدیک گسل، ویژگی‌هایی مانند دامنه‌ی ارتعاشی بزرگ و زمان تناوب بلند در نگاشت سرعت، شکل طیف پاسخ غیرعادی و

وجود قسمت عمده‌ی انرژی در پالس هستند، که ورود یک‌باره انرژی مذکور به سازه منجر به ایجاد تغییرشکل‌های بزرگی در سازه‌ها می‌شود.^[۲۴] زمین‌لرزه‌های نزدیک گسل شبه‌پالس، احتمال خرابی سازه‌ها را بالا می‌برند و آسیب‌های زیادی به سازه‌ها وارد می‌کنند.^[۲۵] با توجه به کمبود تعداد تاریخچه‌ی زمانی زمین‌لرزه‌های نزدیک گسل شبه‌پالس، روش‌های شبه‌سازی زمین‌لرزه‌های شبه‌پالس و مدل‌سازی پالس زمین‌لرزه‌های نزدیک گسل شبه‌پالس، مورد توجه پژوهشگران در دهه‌ی اخیر شده است.^[۲۶-۲۹] بنابراین ارائه‌ی روش‌های مؤثر برای شبه‌سازی زمین‌لرزه‌های شبه‌پالس، به طوری که امکان حفظ آثار پالس زمین‌لرزه را در فرایند شبه‌سازی داشته باشد، اهمیت بسیاری دارند.

در این راستا، لانگو^۹ (۲۰۱۴)،^[۳۰] در پژوهشی جامع روش‌های مختلف شبه‌سازی زمین‌لرزه را بررسی و ارزیابی کرده و در نهایت با استفاده از تبدیل موجک، روشی جهت شبه‌سازی زمین‌لرزه‌ی شبه‌پالس ارائه کرده است. اساس کار روش پیشنهادی لانگو، تجزیه‌ی زمین‌لرزه به زیرباندهای بسامدی و تفکیک آنها به دو قسمت بسامدهای پایین و بالا با استفاده از تبدیل موجک بوده است. در روش ایشان، به منظور شبه‌سازی زمین‌لرزه‌ی شبه‌پالس از طیف توان و پوش متغیر با زمان برای هر یک از زیرباندهای بسامدی جهت مدل‌سازی مشخصه‌های زمین‌لرزه استفاده شده و در نهایت، به کمک معکوس تبدیل بولوت و با برهم‌نهی دو قسمت شبه‌سازی‌شده‌ی مربوط به زیرباندهای بسامدی بالا و پایین، زمین‌لرزه‌ی شبه‌پالس شبه‌سازی شده است.

در مطالعه‌ی حاضر، روشی برای شبه‌سازی زمین‌لرزه‌ی شبه‌پالس با در نظر گرفتن مشخصات دامنه و بسامد متغیر با زمان و پالس زمین‌لرزه‌ی ثبت شده پیشنهاد شده است. در مطالعات پیشین، برای شبه‌سازی زمین‌لرزه‌ها معمولاً یکی از مشخصات زمین‌لرزه، مدل‌سازی و مابقی مشخصات بدون هیچ تغییری از زمین‌لرزه‌ی اصلی در فرایند شبه‌سازی استفاده شده است.^[۱۷، ۲۸] از آنجا که مشخصات آنی زمین‌لرزه نقش زیادی در پاسخ سازه به زمین‌لرزه‌ی ورودی دارد، در مطالعه‌ی حاضر، به منظور تخمین زمین‌لرزه‌ی شبه‌پالس، تمامی مشخصات زمین‌لرزه شامل بسامد و دامنه‌ی آنی و ضرایب تقریب تخمین زده شده‌اند. به این منظور در ابتدا با استفاده از تبدیل هیلبرت بر پایه‌ی موجک، مشخصات آنی زمین‌لرزه‌ها استخراج و سپس مشخصات آنی زمین‌لرزه‌ها به کمک روش‌های آماری تخمین زده شده‌اند. همچنین ضرایب تقریب به دست آمده از آخرین مرحله‌ی تبدیل موجک نیز با استفاده از یک تابع مناسب برازش شده و در نهایت با استفاده از معکوس تبدیلات هیلبرت و موجک و با استفاده از داده‌های تصادفی تولید شده برای بسامد آنی و داده‌های حاصل از برازش دامنه‌ی آنی و ضرایب تقریب، فرایند شبه‌سازی زمین‌لرزه انجام شده است. در مطالعه‌ی حاضر، برای افزایش دقت شبه‌سازی زمین‌لرزه‌ی شبه‌پالس و در نظر گرفتن جزئیات بیشتری از مشخصات زمین‌لرزه و آثار پالس زمین‌لرزه در هر دو طیف پاسخ سرعت و شتاب، زمین‌لرزه‌ها به ۷ زیرباند بسامدی تجزیه شده‌اند. برای بررسی کارآمد بودن روش پیشنهادی، از ۴ رکورد شبه‌پالس ثبت شده در زلزله‌های امپریال ولی (۱۹۷۹) و نورث‌ریج (۱۹۹۴) استفاده و در نهایت با استفاده از معیارهای مختلف، نتایج شبه‌سازی ارزیابی شده است.

۲. تخمین مشخصه‌های نامانای زمین‌لرزه بر اساس تبدیل

هیلبرت بر پایه‌ی موجک

روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی مشخصات آنی و نامانای زمین‌لرزه‌ها، مانند

$$F\{\hat{x}(t)\} = -i \operatorname{sgn}(f) F\{x(t)\}$$

$$\operatorname{sgn}(f) = \begin{cases} 1, & f > 0 \\ 0, & f = 0 \\ -1, & f < 0 \end{cases} \quad (2)$$

که در آن، $F\{\hat{x}(t)\}$ تبدیل فوری تبدیل هیلبرت سیگنال $x(t)$ و f بسامد سیگنال $x(t)$ است.

سیگنال تحلیلی $z(t)$ به منظور استخراج مشخصه‌های آنی سیگنال از ترکیب سیگنال اصلی $x(t)$ و تبدیل هیلبرت $\hat{x}(t)$ به صورت رابطه ۳ به دست می‌آید:

$$z(t) = x(t) + i\hat{x}(t) = a(t)e^{i\theta(t)} \quad (3)$$

که در آن، $a(t)$ دامنه‌ی آنی و $\theta(t)$ فاز آنی هستند و مطابق رابطه ۴ محاسبه می‌شوند:

$$a(t) = \sqrt{x^2(t) + \hat{x}^2(t)}$$

$$\theta(t) = \arctan\left(\frac{\hat{x}(t)}{x(t)}\right) \quad (4)$$

بسامد آنی نیز از مشتقات متوالی فاز آنی یعنی از تفاضل داده‌های متوالی فاز آنی تقسیم بر گام زمانی تعیین می‌شود. از آنجا که تبدیل هیلبرت مستقیماً نمی‌تواند روی سیگنال‌هایی با مؤلفه‌ی چندبسامدی اعمال شود، بنابراین سیگنال‌های مذکور پیش از اعمال تبدیل هیلبرت باید به سیگنال‌هایی با مؤلفه‌های تک بسامدی تبدیل شوند.^[۲۰] هوانگ^{۱۴} و همکارانش (۱۹۹۸)،^[۲۱] روش تجزیه‌ی مد تجربی را برای تجزیه‌ی سیگنال به تعدادی توابع مد ذاتی، که سیگنال‌هایی تک مؤلفه‌ی هستند، معرفی کردند. با این روش تبدیل هیلبرت می‌تواند روی هر یک از توابع مدهای ذاتی برای استخراج مشخصه‌های آنی سیگنال اعمال شود. روش کارآمد دیگر برای اعمال تبدیل هیلبرت به منظور استخراج مشخصه‌های آنی، تبدیل موجک ماناست. در روش موجک مانا، در ابتدا با استفاده از تبدیل موجک، سیگنال زلزله به یک سری زیرباندهای بسامدی تجزیه و سپس تبدیل هیلبرت روی هر یک از زیرباندهای بسامدی مذکور اعمال و مشخصات آنی زلزله استخراج می‌شود. روش اخیر، تبدیل هیلبرت بر پایه‌ی موجک نامیده می‌شود. اولهد و والدن^{۱۵} (۲۰۰۴)،^[۲۲] تبدیل هیلبرت بر پایه‌ی موجک را بررسی کردند و نشان دادند که استفاده از تبدیل موجک، نتایج بهتری نسبت به روش تجزیه‌ی مد تجربی ارائه می‌دهد. آنها همچنین نشان دادند که تبدیل هیلبرت بر پایه‌ی موجک باندهای بسامدی با وضوح بهتر و با تداخل کمتری با باندهای بسامدی مجاور نتیجه می‌دهد. در مطالعه‌ی دیگری، بورستی^{۱۶} و همکاران (۲۰۰۴)،^[۲۳] روش تبدیل هیلبرت بر پایه‌ی موجک را بررسی کردند و نشان دادند این روش حساسیت کمتری نسبت به مشکلات احتمالی مانند تداخل بین مؤلفه‌های مجاور دارد و این روش را نسبت به روش تجزیه‌ی مد تجربی، روشی همیشه‌تر و منعطف‌تر معرفی کردند.

در مطالعه‌ی حاضر، به منظور اعمال تبدیل هیلبرت، در ابتدا تبدیل موجک مانا برای تجزیه‌ی سیگنال به یک سری از سیگنال‌های تک مؤلفه‌ی بسامدی استفاده شده است. برای مثال، یکی از رکوردهای ثبت شده در زلزله‌ی نورتریج (۱۹۹۴) مربوط به ایستگاه Jensen Filter Plant Generator توسط تبدیل موجک مانا به باندهای بسامدی مختلفی تجزیه شده است. برای افزایش دقت شبیه‌سازی زمین لرزه‌ی شبه پالس و در نظر گرفتن جزئیات بیشتری از مشخصات آنی زلزله و آثار پالس زمین لرزه، در مطالعه‌ی حاضر، زمین لرزه به ۷ زیرباند بسامدی تجزیه شده است. هر یک از باندهای بسامدی مذکور معرف ضرایب جزئیات حاصل از تبدیل

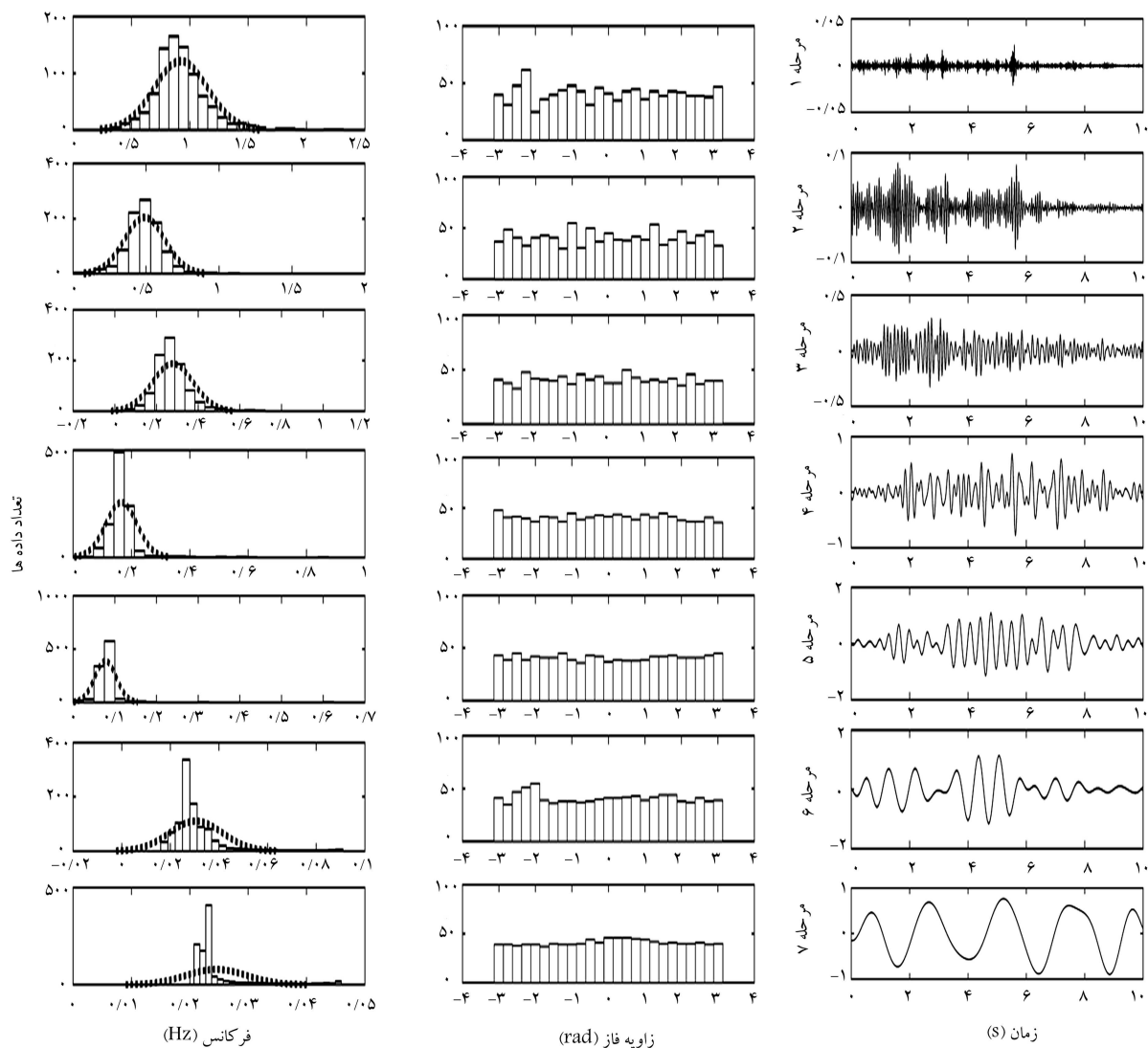
بسامد و دامنه‌ی آنی ارائه شده است. یک دیدگاه ساده‌اندیشانه برای شبیه‌سازی زمین لرزه‌ها، ترکیب طیف دامنه با یک طیف تصادفی فاز است.^[۵] طیف دامنه، یک مشخصه‌ی مهم در روش ساده‌ی تصادفی ذکر شده است و فاز به صورت متغیر تصادفی با توزیع یکنواخت فرض می‌شود. در این راستا، اوساکی^{۱۰} (۱۹۷۹)^[۲۱] و نگام^{۱۱} (۱۹۸۲)،^[۲۲] هر یک به صورت جداگانه، فاز زمین لرزه را بررسی کرده و به اهمیت اختلاف فاز پی برده‌اند. آنها نشان دادند توزیع اختلاف فاز برخلاف توزیع فاز، که توزیعی یکنواخت دارد، به صورت نرمال و یا شبه نرمال است. تیلوین^{۱۲} و همکارانش (۲۰۰۰)،^[۲۳] مدل‌های مختلف توزیع فاز از جمله مدل یکنواخت فاز و مدل مشتقات فاز را معرفی و اثر هر یک از توزیع‌های زاویه‌ی فاز را در شبیه‌سازی زمین لرزه‌ها مقایسه و بررسی کردند. بسامد آنی، مشتق زمانی فاز و تبدیل فوری، یکی از مشهورترین ابزارها برای استخراج محتوای فازی هستند.^[۲۴] تبدیل فوری می‌تواند مشخصات نامانایی را فقط در یکی از مختصات زمان یا بسامد ارائه کند. بنابراین، تبدیل فوری برای سیگنال‌های نامانای با تغییرات محلی مناسب نیست.^[۲۵] در مطالعه‌ی دیگری با استفاده از تبدیل فوری زمان کوتاه، یک الگوریتم با پنجره‌ی متحرک با زمان برای تعیین محتوای فازی در مقطع‌های مختلف سیگنال ارائه شده است.^[۲۶]

محدودیت‌های تبدیل فوری زمان کوتاه و همچنین مشکلات بازسازی مجدد یک تاریخچه‌ی زمانی با استفاده از تبدیل فوری زمان کوتاه معکوس، باعث ایجاد یک روش قدرتمند به نام تبدیل موجک شده است. برخلاف تبدیل فوری، تبدیل موجک یک تبدیل زمان - بسامد است. یعنی بیان می‌کند که هر مؤلفه‌ی بسامدی در چه محدوده‌ی زمانی رخ داده است و یا بالعکس؛ و وضوح بهینه‌تری را در دو مختصات زمان و بسامد ارائه می‌کند.^[۱۶] تبدیل موجک به این صورت عمل می‌کند که یک موجک مادر در طول سیگنال، مقیاس و انتقال داده می‌شود و سپس در هر مرحله از تجزیه با استفاده از یک فیلتر بالا - پایین گذر، بسامدهای بالا و پایین از هم جدا می‌شوند، که این بسامدهای بالا یا پایین به ترتیب ضرایب جزئیات و تقریب نامیده می‌شوند. تبدیل موجک معمولاً به دو دسته تبدیل موجک پیوسته و گسسته تقسیم می‌شود.^[۲۷] استفاده از تبدیل موجک پیوسته منجر به افزایش حجم محاسباتی می‌شود، در حالی که تبدیل موجک گسسته با استفاده از کاهش نمونه، داده‌های مازادی برای سیگنال ایجاد نمی‌کند. تبدیل موجک مانا شاخه‌ی از تبدیل موجک گسسته است، که توسط ناسون و سیلورمن^{۱۳} (۱۹۹۵)،^[۲۸] به منظور حذف بعضی کمبودهای موجود در تبدیل موجک گسسته معرفی شد. در واقع در تبدیل موجک مانا، ضرایب جزئیات و تقریب، هم اندازه‌ی سیگنال اصلی هستند و تبدیل موجک مانا از لحاظ حجم داده‌ها مابین تبدیل موجک پیوسته و گسسته قرار می‌گیرد.

یکی دیگر از تبدیلات کاربردی در حوزه‌ی پردازش سیگنال، تبدیل هیلبرت است. تبدیل هیلبرت، روشی مؤثر برای استخراج مشخصه‌های آنی زمین لرزه است و در فرم کلی برای سیگنال $x(t)$ به صورت رابطه ۱ بیان می‌شود:

$$\hat{x}(t) = x(t) * (\sqrt{\pi}t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (1)$$

که در آن، P معرف اصل کوشی و علامت ستاره، معرف عملگر کانولوشن است. تبدیل هیلبرت مانند یک فیلتر، فاز هر مؤلفه‌ی بسامد سیگنال ورودی را بسته به علامت بسامدها به اندازه‌ی $\frac{\pi}{2}$ تغییر می‌دهد و مؤلفه‌های بسامد منفی را بدون تغییر در دامنه‌ی مؤلفه حذف می‌کند.^[۲۹]



الف) توابع جزئیات به دست آمده از تحلیل موجک مانا در هفت مرحله؛
 ب) هیستوگرام فاز آنی به دست آمده از تبدیل هیلبرت؛
 ج) هیستوگرام فرکانس آنی در باندهای فرکانسی مختلف. خطوط نقطه چین نمایانگر توزیع نرمال برازش شده روی هیستوگرام فرکانس آنی می باشند.

شکل ۱. اطلاعات استخراج شده با استفاده از تبدیلات ویولت و هیلبرت زلزله‌ی شبه‌پالس نورث‌ریج (۱۹۹۴) ثبت شده در ایستگاه Jensen Filter Plant Generator.

مطالعه‌ی حاضر، از توابع گوسین مرتبه‌ی سوم برای تقریب دامنه‌ی آنی هیلبرت و ضرایب تقریب حاصل از آخرین مرحله‌ی تبدیل موجک استفاده شده است. برازش منحنی‌های گوسین با استفاده از روش کمیته‌ی مربعات غیرخطی و با استفاده از نرم‌افزار متلب^{۱۷} انجام شده است. همان‌طور که در شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود، توابع گوسین می‌توانند به عنوان مدلی مناسب برای برازش دامنه‌ی آنی و ضرایب تقریب زلزله استفاده شوند. دامنه و فاز آنی از پارامترهای مهم در شبیه‌سازی عددی فرایندهای تصادفی نامانا هستند. از آنجا که هیستوگرام فاز آنی به دست آمده از ضرایب موجک، توزیع یکنواخت دارد و امکان ارائه‌ی اطلاعات کافی جهت شبیه‌سازی را ندارد، لذا در مطالعه‌ی حاضر از هیستوگرام بسامد آنی به دست آمده از فاز آنی که توزیعی شبه‌نرمال دارد، برای شبیه‌سازی استفاده می‌شود. مشخصه‌های آماری متغیر با زمان

موجک هستند (شکل ۱ - الف). مشخصات آنی زمین‌لرزه شامل فاز و دامنه‌ی آنی با اعمال تبدیل هیلبرت روی هر یک از زیرباندهای بسامدی به دست آمده است. همان‌طور که در شکل ۱ - ب مشاهده می‌شود، هیستوگرام فاز آنی در هر باند بسامدی به صورت یک توزیع یکنواخت بوده است. برخلاف توزیع یکنواخت زاویه‌ی فاز، اختلاف زاویه‌ی فاز، که همان بسامد آنی نامیده می‌شود و با استفاده از مشتق زمانی فاز آنی به دست می‌آید، هیستوگرامی با توزیع نرمال در هر باند بسامدی دارد، که در شکل ۱ - ج مشاهده می‌شود. در فرایند تجزیه‌ی زمین‌لرزه به زیرباندهای بسامدی توسط تبدیل موجک، علاوه بر ضرایب جزئیات، در آخرین مرحله‌ی تبدیل موجک، ضرایب تقریب نیز حاصل شده است (شکل ۲). با اعمال تبدیل هیلبرت روی هر یک از زیرباندهای بسامدی به دست آمده از تبدیل موجک، دامنه‌ی آنی در هر یک از زیرباندهای بسامدی استخراج شده است (شکل ۳). در

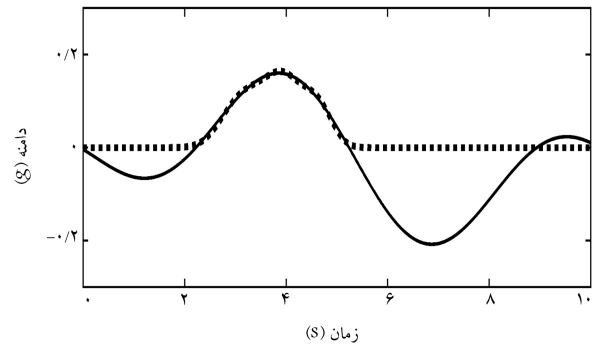
مانند میانگین و انحراف معیار از جمله مشخصه‌هایی هستند که بیان‌کننده‌ی نامانایی زمین‌لرزه هستند. بدین منظور در روش پیشنهادی برای استخراج مشخصات آنی زمین‌لرزه از تبدیل موجک که تبدیلی در حوزه‌ی زمان - بسامد است، به جای تبدیل فوریه استفاده شده است، تا زمین‌لرزه‌ی اصلی به چند زیرباند بسامدی تقسیم و مشخصات آنی در هر زیرباند بسامدی به صورت جداگانه استخراج و با مشخصه‌های آماری متمایز مدل شوند. یکی از موضوعات مهم در تبدیل موجک برای تجزیه‌ی یک سیگنال، انتخاب موجک مادر مناسب است. فشرده‌سازی خوب و انطباق مناسب موجک مادر دایبچز با سیگنال‌های طبیعی مانند زلزله، دلیل اصلی استفاده از موجک مذکور در مطالعه‌ی حاضر است و از آن‌جا که موجک‌های با رده‌ی بالاتر برای بازسازی سیگنال در عملیات تبدیل معکوس موجک مناسب‌ترند، بنابراین موجک دایبچز ۲^۰ به عنوان موجک مادر مناسب برای تجزیه‌ی سیگنال در مطالعه‌ی حاضر انتخاب شده است.

۳. شبیه‌سازی زمین‌لرزه‌ی نزدیک گسل شبه‌پالس

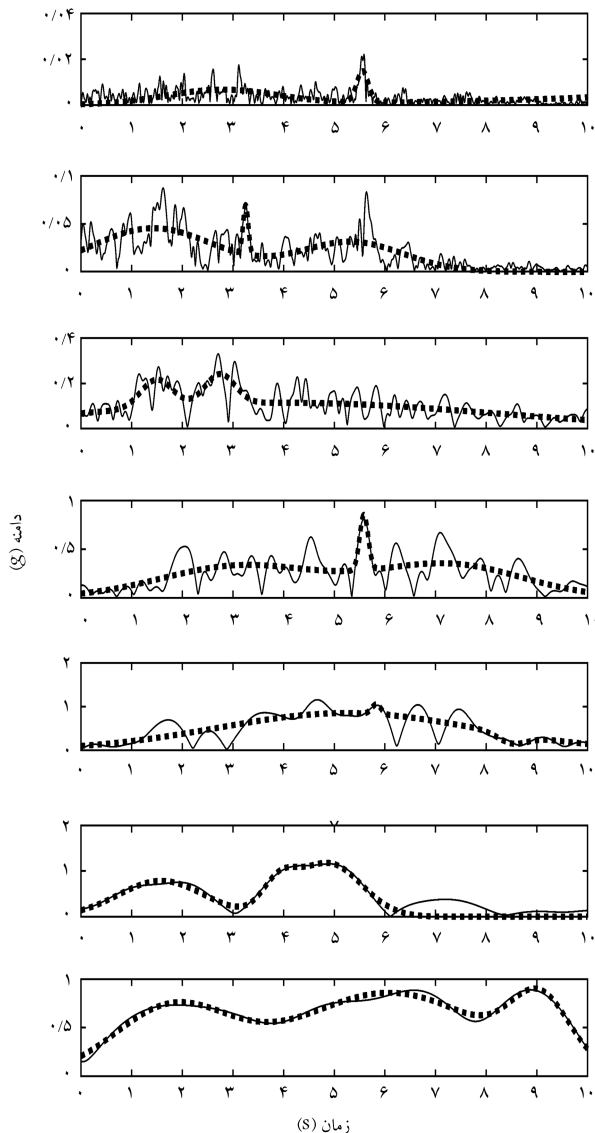
خرابی‌های حاصل از زمین‌لرزه‌های نزدیک به گسل در سال‌های اخیر، اهمیت مطالعه‌ی اثر این دسته از زمین‌لرزه‌ها بر روی سازه‌ها را زیاد می‌کند.^[۲۳ و ۲۴] مقدار بیشینه‌ی سرعت زمین (PGA) در زمین‌لرزه‌های نزدیک به گسل به طور قابل ملاحظه‌ی بزرگ‌تر از بیشینه‌ی سرعت زمین در زمین‌لرزه‌های دور از گسل قوی است و همچنین زمین‌لرزه‌های مذکور در تاریخچه‌ی زمانی سرعت خود معمولاً پالسی با دوره‌ی تناوب نسبتاً طولانی دارند، که این ویژگی‌ها، زمین‌لرزه‌های نزدیک گسل شبه‌پالس را کاملاً متمایز از زمین‌لرزه‌های دور از گسل قوی می‌کند. اثرهای جهت‌داری^{۱۹} یکی از حالت‌هایی است که سبب احتمال رویداد زمین‌لرزه‌ی با پالس سرعت می‌شود و زمانی روی می‌دهد که گسیختگی گسل به سمت ساخت‌گاه مورد نظر و سرعت گسیختگی نزدیک به سرعت موج برشی است.^[۲۱] در زمین‌لرزه‌های نزدیک گسل، بیشتر انرژی لرزه‌ی در زمان کوتاهی اتفاق می‌افتد و اگر این مسئله به طور مناسب در نظر گرفته نشود، ممکن است سازه‌های مهندسی را که در مناطق نزدیک گسل ساخته شده‌اند، به صورت جدی به خطر بیندازد. بنابراین چنین سازه‌هایی باید تحت توجه ویژه‌ی از نظر طراحی قرار گیرند.^[۲۵ و ۲۶]

بیکر با استفاده از تبدیل موجک، روشی جهت تشخیص زمین‌لرزه‌ی شبه‌پالس معرفی کرده است،^[۲۷] که در آن بزرگ‌ترین پالس سرعت در تاریخچه‌ی زمانی سرعت استخراج و یک معیار کمی بین پالس استخراج شده و زمین‌لرزه‌ی اصلی معرفی و به کمک آن زمین‌لرزه‌های پالس‌دار و غیرپالس‌دار دسته‌بندی می‌شوند. به این ترتیب، علاوه بر معرفی روشی برای تشخیص زمین‌لرزه‌ی شبه‌پالس، زلزله‌های شبه‌پالس را به دو قسمت پالس و زلزله‌ی باقیمانده تجزیه کرد. با استفاده از همین تفکر، امیری و همکارانش (۲۰۱۴)،^[۲۸] برای شبیه‌سازی زلزله‌ی شبه‌پالس در ابتدا پالس را از رکورد اصلی استخراج کرده و بعد از شبیه‌سازی زلزله‌ی باقیمانده، با برهم‌نهی دو قسمت پالس استخراج شده و زلزله‌ی باقیمانده‌ی شبیه‌سازی شده، زمین‌لرزه‌ی شبه‌پالس را تولید کردند و در ادامه، با استفاده از تبدیل ویولت و روش تکرار، طیف انرژی زمین‌لرزه‌ی شبیه‌سازی شده را با طیف انرژی زمین‌لرزه‌ی اصلی سازگار کردند.

در شبیه‌سازی فرایندهای تصادفی، تعیین یک مدل ریاضی برای پدیده‌های فیزیکی، مانند زمین‌لرزه، کار آسانی نیست و پذیرفتن تقریب در شبیه‌سازی پدیده‌ی ضروری به نظر می‌رسد. علی‌رغم مرسوم بودن روش مدل‌سازی ریاضی، تخمین پارامترها در روش اخیر بر اساس فرایندهای رخ داده معمولاً منجر به انحراف‌های جدی



شکل ۲. ضرایب تقریب حاصل از آخرین مرحله‌ی تبدیل موجک رکورد ثبت شده در ایستگاه Jensen Filter Plant Generator در زمین‌لرزه‌ی نورث ریج (۱۹۹۴) (نقطه‌چین نمایانگر تابع گوسین مرتبه‌ی سوم برازش شده روی ضرایب تقریب است).



شکل ۳. دامنه‌ی آنی حاصل از تجزیه‌ی موجک رکورد ثبت شده در ایستگاه Jensen Filter Plant Generator زلزله‌ی نورث ریج (۱۹۹۴) (خطوط نقطه‌چین نمایانگر تابع گوسین مرتبه‌ی سوم برازش شده هستند).

از فرایند می‌شود. لذا در مطالعه‌ی حاضر، با تولید داده‌های تصادفی با استفاده از پارامترهای به دست آمده از توزیع های گوسین برآزش شده روی هیستوگرام بسامد و دامنه‌ی آنی، می‌توان بدون هیچ فرض و یا تقریب دیگری با به کارگیری معکوس تبدیلات هیلبرت و موجک مانا، یک فرایند تصادفی را در حوزه‌ی زمان - بسامد شبیه‌سازی کرد. روند شبیه‌سازی پیشنهاد شده در مطالعه‌ی حاضر، در ۵ مرحله خلاصه شده است:

الف) تجزیه‌ی زمین‌لرزه‌ی شبه‌پالس ثبت شده به ضرایب جزئیات و ضرایب تقریب با استفاده از تبدیل موجک مانا؛

ب) اعمال تبدیل هیلبرت روی هر یک از ضرایب جزئیات به منظور استخراج دامنه و فاز آنی؛

ج) استخراج بسامد آنی با استفاده از مشتق‌های زمانی متوالی فاز آنی استخراج شده در مرحله‌ی قبل؛

د) برآزش توزیع گوسین مرتبه‌ی اول روی هیستوگرام بسامد آنی و توزیع گوسین مرتبه‌ی سوم روی دامنه‌های آنی و ضرایب تقریب؛

ه) تولید داده‌های تصادفی به کمک پارامترهای به دست آمده از مرحله‌ی قبل؛

و) اعمال معکوس تبدیلات هیلبرت و موجک برای به دست آوردن زلزله‌ی شبه‌پالس.

۴. بررسی نتایج شبیه‌سازی

در مطالعه‌ی حاضر برای بررسی کارآمد بودن روش شبیه‌سازی پیشنهادی، از ۴ رکورد ثبت شده‌ی مربوط به زمین‌لرزه‌های امپریال‌ولی (۱۹۷۹) و نورث‌ریج (۱۹۹۴) در ایستگاه‌هایی به شرح جدول ۱ استفاده شده و در ادامه، با استفاده از معیارهای متفاوت، زلزله‌های شبیه‌سازی شده با رکوردهای ثبت شده مقایسه شده‌اند. از دیدگاه مهندسی زلزله، یکی از شاخص‌های بیان‌کننده‌ی شدت زمین‌لرزه‌ها، بیشینه‌ی شتاب افقی زمین است.

که به دلیل سادگی کاربرد شاخص بیشینه‌ی شتاب افقی زمین و همچنین مشخص شدن آن در تاریخچه‌ی زمانی شتاب، به عنوان یک معیار در بررسی کارآمد بودن روش‌های شبیه‌سازی زمین‌لرزه استفاده می‌شود. در شکل ۴، مقایسه‌ی بین تاریخچه‌ی زمانی رکوردهای ثبت شده و شبیه‌سازی شده با استفاده از الگوریتم پیشنهادی مشاهده می‌شود، که مطابق آن، بیشینه‌ی شتاب رکوردهای ثبت شده و شبیه‌سازی شده هماهنگی زیادی با هم دارند و روش پیشنهادی به خوبی توانسته است پارامتر مهم مذکور را حفظ کند. با توجه به این‌که در مطالعه‌ی حاضر، مشخصه‌های آنی زمین‌لرزه با استفاده از توابع و توزیع‌های مناسب تخمین زده شده‌اند، بنابراین ممکن است طی فرایند مدل‌سازی مشخصات آنی زمین‌لرزه، تعدادی از داده‌های تصادفی به علت تقریب حذف و یا اضافه شوند و داده‌هایی

با مدل آماری یکسان ولی متفاوت تولید شوند، که این امر منجر به عدم تطابق کامل تاریخچه‌ی زمانی رکوردها و به تبع آن، مقادیر بیشینه‌ی شتاب رکوردهای ثبت شده و شبیه‌سازی شده خواهد شد. به طوری که اختلاف بیشینه‌ی شتاب زمین‌لرزه‌های ثبت شده و شبیه‌سازی شده برای زلزله‌های ۱ الی ۴ به ترتیب برابر با ۵/۵، ۲/۷، ۸ و ۲۲ درصد بوده است، که مقادیر اخیر نشان‌دهنده‌ی کارایی روش پیشنهادی در حفظ کردن پارامتر مهم ذکر شده است. هر چند شباهت‌های ظاهری بین زلزله‌های ثبت شده و زلزله‌های شبیه‌سازی شده می‌تواند نشانی از مؤثر بودن الگوریتم شبیه‌سازی باشد، ولی به تنهایی کافی نیست و باید معیارهای دیگری جهت اثبات و تأیید کارآمدی روش شبیه‌سازی ارائه شده در پژوهش حاضر بررسی شود.

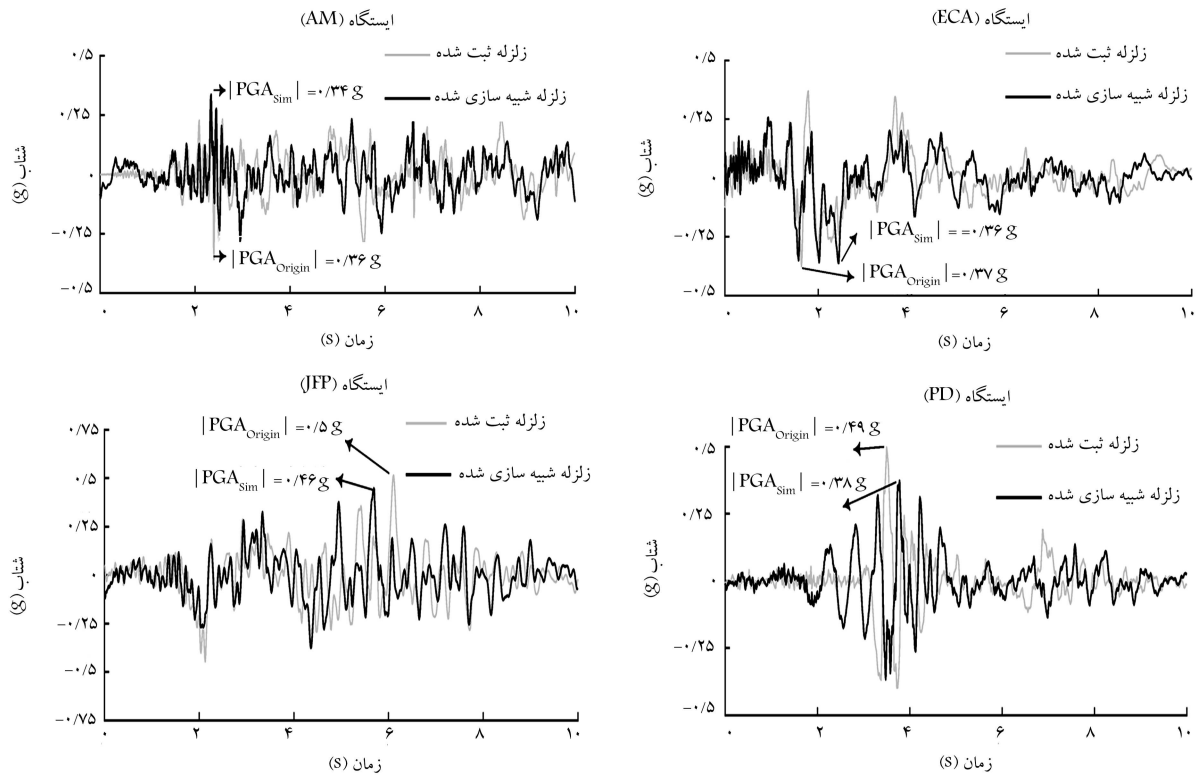
از آن‌جا که مشخصات نامانای زمین‌لرزه‌ها برای تحلیل رفتار واقعی سازه‌ها مهم و تأثیرگذار هستند، لذا بررسی معیارهای مرتبط با پاسخ سازه‌ها، حائز اهمیت هستند. برای این منظور، یکی دیگر از معیارهای مناسب جهت بررسی کارآمد بودن روش شبیه‌سازی، مقایسه‌ی طیف پاسخ شتاب و سرعت زمین‌لرزه‌های شبیه‌سازی شده با رکوردهای واقعی است. در شکل ۵، مقایسه‌ی صورت گرفته بین طیف‌های پاسخ شتاب زلزله‌های ثبت شده و شبیه‌سازی شده با در نظر گرفتن میرایی ۵/۵ مشاهده می‌شود، که مطابق آن طیف‌پاسخ شتاب زلزله‌های شبیه‌سازی شده با زلزله‌های ثبت شده در تمام دوره‌ی بازگشت‌های در نظر گرفته شده، مطابقت خوبی دارد.

از آن‌جا که زلزله‌های شبه‌پالس به دلیل داشتن یک پالس در تاریخچه‌ی زمانی سرعت با زلزله‌های معمولی متفاوت هستند، بنابراین بررسی و مقایسه‌ی طیف پاسخ سرعت در روش پیشنهادی ذکر شده، حائز اهمیت است. در شکل ۶، طیف پاسخ سرعت زلزله‌های ثبت شده و زلزله‌های شبیه‌سازی شده با استفاده از روش پیشنهادی با هم مقایسه شده‌اند، که مطابق آن، طیف پاسخ سرعت زلزله‌های شبیه‌سازی شده با روش پیشنهادی اخیر نیز تطابق قابل قبولی با طیف پاسخ سرعت زلزله‌های ثبت شده دارند.

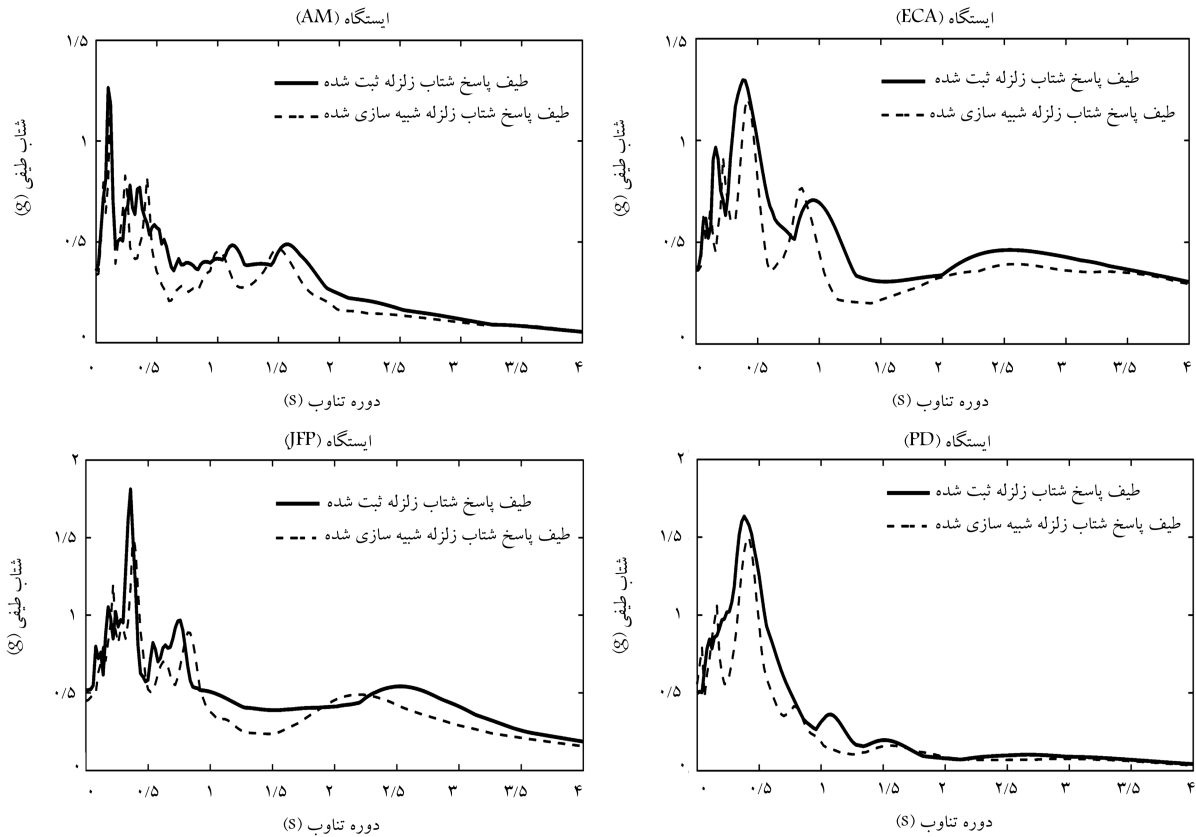
از دیگر معیارهای بررسی کارآمد بودن روش‌های شبیه‌سازی، ارزیابی منحنی‌های اریاس است. منحنی اریاس در واقع نشان‌دهنده‌ی توزیع انرژی در حوزه‌ی زمان و یکی از معیارهای مهم شدت زمین‌لرزه است، که در مطالعه‌ی حاضر از معیار منحنی اریاس برای بررسی کارآمد بودن روش پیشنهادی استفاده شده است. در شکل ۷، منحنی اریاس مربوط به زلزله‌های شبیه‌سازی شده با زلزله‌های ثبت شده مقایسه شده است. از آن‌جا که در روش پیشنهادی شبیه‌سازی زمین‌لرزه‌ی شبه‌پالس، تخمین مشخصه‌های آنی زمین‌لرزه منجر به تغییرات کلی در محتوای بسامدی و یا دامنه‌ی زلزله نخواهد شد، بنابراین انتظار تغییرات عمده‌ی در انرژی زلزله نمی‌رود و منجر به حفظ سطح انرژی زمین‌لرزه‌ی ثبت شده خواهد شد. بنابراین، منحنی اریاس زمین‌لرزه‌ی شبیه‌سازی شده نیز دچار تغییرات زیادی نخواهد شد و مطابقت بیشتری با منحنی اریاس زمین‌لرزه‌ی ثبت شده خواهد داشت. مطابق شکل اخیر،

جدول ۱. مشخصات رکوردهای در نظر گرفته شده مربوط به زلزله‌های امپریال‌ولی (۱۹۷۹) و نورث‌ریج (۱۹۹۴).

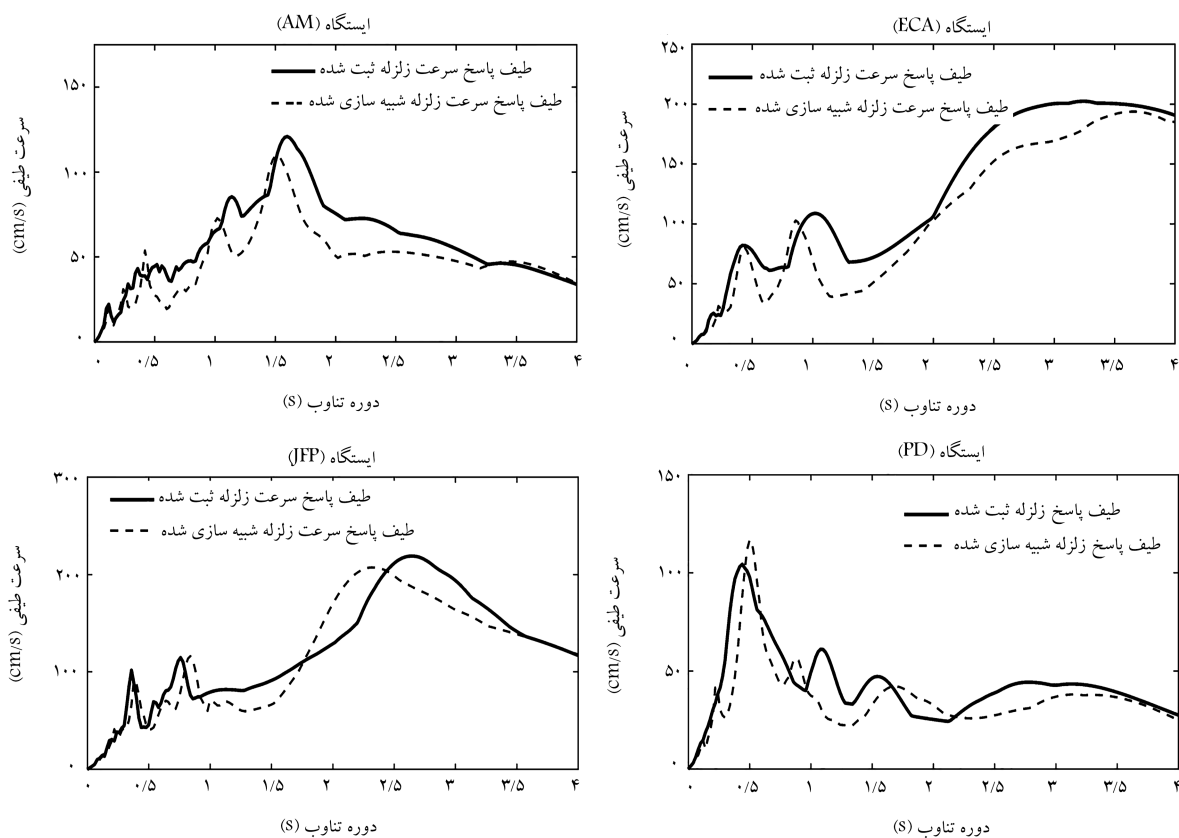
ردیف	زلزله	ایستگاه	PGV (cm/s)	بزرگا	نزدیک‌ترین فاصله (km)
۱	امپریال‌ولی	Aeropuerto Mexicali (AM)	۴۴/۳	۶/۵	۰/۳
۲	امپریال‌ولی	El Centro Array #۵ (ECA)	۹۱/۵	۶/۵	۴
۳	نورث‌ریج	Jensen Filter Plant Generator (JEP)	۶۷/۴	۶/۷	۵/۴
۴	نورث‌ریج	Pacoima Dam-downstr (PD)	۵۰/۴	۶/۷	۷



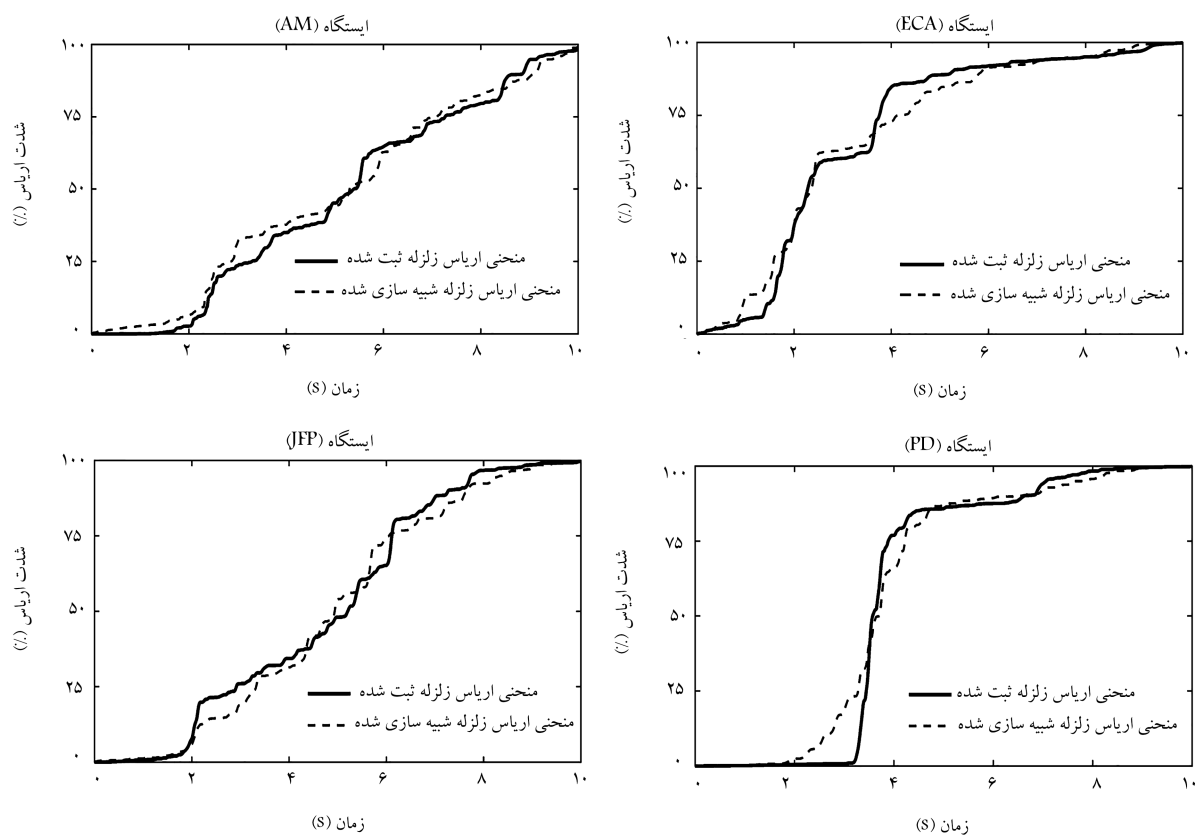
شکل ۴. تاریخچه‌ی زمانی شتاب زلزله‌های شبه‌پالس ثبت شده و شبیه‌سازی شده برای چهار ایستگاه مختلف در زلزله‌های امپریال‌ولی (۱۹۷۹) و نورث‌ریج (۱۹۹۴).



شکل ۵. مقایسه‌ی بین طیف شتاب رکوردهای ثبت شده و شبیه‌سازی شده در ایستگاه‌های مختلف مربوط به زلزله‌های امپریال‌ولی (۱۹۷۹) و نورث‌ریج (۱۹۹۴).



شکل ۶. مقایسه‌ی بین طیف سرعت رکوردهای ثبت شده و شبیه‌سازی شده در ایستگاه‌های مختلف مربوط به زلزله‌های امپریال‌ولی (۱۹۷۹) و نورث‌ریج (۱۹۹۴).



شکل ۷. مقایسه‌ی منحنی شدت اریاس رکوردهای ثبت شده و شبیه‌سازی شده در ایستگاه‌های مختلف مربوط به زلزله‌های امپریال‌ولی (۱۹۷۹) و نورث‌ریج (۱۹۹۴).

روش پیشنهادی، حفظ محتوای بسامدی و دامنه در زلزله‌ی شبیه‌سازی شده است. در مطالعه‌ی حاضر، به منظور ارزیابی کارآمد بودن روش پیشنهادی، چهار زمین‌لرزه‌ی شبه‌پالس ثبت شده در زلزله‌های امپریال‌ولی (۱۹۷۹) و نورث‌ریج (۱۹۹۴) بررسی شده است. با توجه به اینکه در فرایند مدل‌سازی مشخصات آنی زمین‌لرزه، ممکن است تعدادی از داده‌های تصادفی در حین برازش و یا به علت تقریب حذف و یا اضافه شوند و داده‌هایی با مدل آماری یکسان ولی متفاوت تولید شوند، لذا این امر منجر به عدم تطابق کامل تاریخچه‌ی زمانی و همچنین سایر معیارهای دیگر زمین‌لرزه‌های شبیه‌سازی شده و ثبت شده خواهد شد، که این موضوع در روش‌های شبیه‌سازی تا حدود زیادی واقع‌بینانه است. با وجود این، براساس نتایج به دست آمده، زلزله‌های شبیه‌سازی شده از نظر تاریخچه‌ی زمانی شتاب و سرعت، طیف پاسخ و منحني اریاس، که از مشخصات مهم زمین‌لرزه هستند، تطابق خوبی با زلزله‌های شبه‌پالس ثبت شده دارد. همچنین زلزله‌های شبیه‌سازی شده، مشخصه‌های مهمی از زلزله‌های ثبت شده را مانند بیشینه‌ی شتاب و سرعت زمین حفظ می‌کنند.

نتایج منحنی اریاس برای زلزله‌ی شبیه‌سازی شده و زلزله‌ی ثبت شده، تطابق خوبی دارند.

۵. نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی حاضر، روندی برای شبیه‌سازی تاریخچه‌ی زمانی زمین‌لرزه‌ی شبه‌پالس با استفاده از مدل‌سازی مشخصات آنی زمین‌لرزه‌ی ثبت شده پیشنهاد شده است. در روش ذکر شده، برای استخراج مشخصات آنی زمین‌لرزه‌های ثبت شده شامل دامنه و بسامد آنی از تبدیل هیلبرت بر پایه‌ی موجک استفاده شده است. زلزله‌ی شبه‌پالس با استفاده از داده‌های تصادفی تولید شده بر اساس توزیع‌ها و توابع برازش شده روی مشخصات آنی و ضرایب تقریب به دست آمده از آخرین مرحله‌ی تبدیل موجک مانا و به کارگیری تبدیلات معکوس ویولت و هیلبرت به دست می‌آید. از مزیت‌های مهم

پانویس‌ها

1. Luco & Bazzurro
2. Douglas & Aochi
3. Banjade
4. Yazdani & Takada
5. Wang
6. Hilbert-Huang
7. Wen & Gu
8. Buresti
9. Lungu
10. Ohsaki
11. Nigam
12. Tiliouine
13. Nason & Silverman
14. Huang
15. Olhede & Walden
16. Buresti
17. MATLAB
18. peak ground acceleration
19. forward directivity

منابع (References)

4. Douglas, J. and Aochi, H. "A survey of techniques for predicting earthquake ground motions for engineering purposes", *Surv. Geophys.*, **29**(3), pp. 187-220 (2008).
5. Boore, D.M. "Simulation of ground motion using the stochastic method", *Pure Appl. Geophys.*, **160**(3-4), pp. 635-676 (2003).
6. Rezaeian, S. and Der Kiureghian, A. "A stochastic ground motion model with separable temporal and spectral nonstationarities", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **37**(13), pp. 1565-1584 (2008).
7. Conte, J.P. and Peng, B.F. "Fully nonstationary analytical earthquake ground-motion model", *J. Eng. Mech.*, **123**(1), pp. 15-24 (1997).
8. Spanos, P.D., Giaralis, A., Politis, N.P. and et al. "Numerical treatment of seismic accelerograms and of inelastic seismic structural responses using harmonic wavelets", *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.*, **22**(4), pp. 254-264 (2007).
9. Kashani, M.M., Ge, X., Dietz, M.S. and et al. "Significance of non-stationary characteristics of ground-motion on structural damage: shaking table study", *Bull. Earthq. Eng.*, **17**(9), pp. 4885-4907 (2019).
10. Hong, H.P. and Cui, X.Z. "Time-frequency spectral representation models to simulate nonstationary processes and their use to generate ground motions", *J. Eng. Mech.*, **146**(9), 04020106, pp.1-16 (2020).
11. Wang, J., Fan, L., Qian, S. and et al. "Simulations of non-stationary frequency content and its importance to seismic assessment of structures", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **31**(4), pp. 993-1005 (2002).
12. Heidari, A. and Majidi, N. "Investigation of the natural frequency of the structure and earthquake frequencies in the frequency domain using a discrete wavelet", *Sharif J. Civ. Eng.*, **36.2**(2.2), pp. 105-113 (2020).
1. Xu, J. and Feng, D.-C. "Stochastic dynamic response analysis and reliability assessment of non-linear structures under fully non-stationary ground motions", *Struct. Saf.*, **79**, pp. 94-106 (2019).
2. Yamamoto, Y. and Baker, J.W. "Stochastic model for earthquake ground motion using wavelet packets", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **103**(6), pp. 3044-3056 (2013).
3. Luco, N. and Bazzurro, P. "Does amplitude scaling of ground motion records result in biased nonlinear structural drift responses", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **36**(13), pp. 1813-1835 (2007).

13. Liang, J., Chaudhuri, S.R. and Shinozuka, M. "Simulation of nonstationary stochastic processes by spectral representation", *J. Eng. Mech.*, **133**(6), pp. 616-627 (2007).
14. Banjade, T.P., Yu, S., and Ma, J. "Earthquake accelerogram denoising by wavelet-based variational mode decomposition", *J. Seismol.*, **23**(4), pp. 649-663 (2019).
15. Bargi, K., Kave, A., Lucas, C. and Rahami, H., "Generation of artificial earthquake accelerograms using wavelet and neural networks", *Sharif Journal Civ. Eng*, **28.2**(3), pp. 79-88 (2012).
16. Yazdani, A. and Takada, T. "Wavelet-based generation of energy- and spectrum-compatible earthquake time histories", *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.*, **24**(8), pp. 623-630 (2009).
17. Wang, L., McCullough, M. and Kareem, A. "Modeling and simulation of nonstationary processes utilizing wavelet and hilbert transforms", *J. Eng. Mech.*, **140**(2), pp. 345-360 (2014).
18. Zhang, R.R., Ma, S., Safak, E. and et al. "Hilbert-Huang transform analysis of dynamic and earthquake motion recordings", *J. Eng. Mech.*, **129**(8), pp. 861-875 (2003).
19. Wen, Y.K. and Gu, P. "Description and simulation of nonstationary processes based on Hilbert spectra", *J. Eng. Mech.*, **130**(8), pp. 942-951 (2004).
20. Buresti, G., Lombardi, G. and Bellazzini, J. "On the analysis of fluctuating velocity signals through methods based on the wavelet and Hilbert transforms", *Chaos, Solitons & Fractals*, **20**(1), pp. 149-158 (2004).
21. Ambraseys, N.N. and Douglas, J. "Near-field horizontal and vertical earthquake ground motions", *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **23**(1), pp. 1-18 (2003).
22. Bray, J.D. and Rodriguez-Marek, A. "Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region", *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **24**(11), pp. 815-828 (2004).
23. Moustafa, A. and Takewaki, I. "Characterization and modeling of near-fault pulse-like strong ground motion via damage-based critical excitation method", *Struct. Eng. Mech.*, **34**(6), pp. 755 (2010).
24. Chopra, A.K. and Chintanapakdee, C. "Comparing response of SDF systems to near-fault and far-fault earthquake motions in the context of spectral regions", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **30**(12), pp. 1769-1789 (2001).
25. Ji, K., Ren, Y., Wen, R. and et al. "Near-field velocity pulse-like ground motions on February 6, 2018 MW6. 4 Hualien, Taiwan earthquake and structural damage implications", *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **126**, 105784, pp.1-14 (2019).
26. Luo, Q., Dai, F., Liu, Y. and et al. "Numerical modelling of the near-field velocity pulse-like ground motions of the Northridge earthquake", *Acta Geophys.*, **68**(4), pp. 993-1006 (2020).
27. Dabaghi, M. and Der Kiureghian, A. "Stochastic model for simulation of near-fault ground motions", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **46**(6), pp. 963-984 (2017).
28. Amiri, G.G., Rad, A.A. and Hazaveh, N.K. "Wavelet-based method for generating nonstationary artificial pulse-like near-fault ground motions", *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.*, **29**(10), pp. 758-770 (2014).
29. HV, S.R., GAi, G., S, M.K. Nr, H. and et al. "Prevalent pulse modeling for near-fault records during 1978 tabas and 2003 bam earthquakes", *Sharif J. Civ. Eng.*, **30.2**(1.2), pp. 107-116 (2014).
30. Lungu, A. "Wavelet-based characterization and stochastic modelling of pulse-like ground motions on the time-frequency plane", *City University London* (2014).
31. Ohsaki, Y. "On the significance of phase content in earthquake ground motions", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **7**(5), pp. 427-439 (1979).
32. Nigam, N.C. "Phase properties of a class of random processes", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **10**(5), pp. 711-717 (1982).
33. Tiliouine, B., Hammoutene, M. and Bard, P.Y. "Phase angle properties of earthquake strong motions: a critical look", *12th World Conf. Earthq. Eng* (2000).
34. Thráinsson, H. and Kiremidjian, A.S. "Simulation of digital earthquake accelerograms using the inverse discrete Fourier transform", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **31**(12), pp. 2023-2048 (2002).
35. Huang, L., Kemao, Q., Pan, B. and et al. "Comparison of Fourier transform, windowed Fourier transform, and wavelet transform methods for phase extraction from a single fringe pattern in fringe projection profilometry", *Opt. Lasers Eng.*, **48**(2), pp. 141-148 (2010).
36. Brito, N.S.D., de Souza, B.A., dos Santos, W.C. and et al. "Analysis of the influence of the window used in the short-time fourier transform for high impedance fault detection", *17th Int. Conf. Harmon. Qual. Power*, pp. 350-355 (2016).
37. Zhang, D. "Wavelet transform", *Fundamentals of Image Data Mining*, Springer, pp. 35-44 (2019).
38. Nason, G.P. and Silverman, B.W. "The stationary wavelet transform and some statistical applications", *Wavelets and Statistics*, Springer, pp. 281-299 (1995).
39. Valluraiah, P. and Biswal, B. "ECG signal analysis using Hilbert transform", *IEEE Power, Commun. Inf. Technol. Conf.*, pp. 465-469 (2015).
40. Kijewski-Correa, T. and Kareem, A. "Nonlinear signal analysis: time-frequency perspectives", *J. Eng. Mech.*, **133**(2), pp. 238-245 (2007).
41. Huang, N.E., Shen, Z., Long, S.R. and et al. "The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis", *Proc. R. Soc. London. Ser. A Math. Phys. Eng. Sci.*, **454**(1971), pp. 903-995 (1998).
42. Olhede, S. and Walden, A.T. "The Hilbert spectrum via wavelet projections", *Proc. R. Soc. London. Ser. A Math. Phys. Eng. Sci.*, **460**(2044), pp. 955-975 (2004).
43. Simos, N.; Manos, G.C. and Kozikopoulos, E. "Near- and far-field earthquake damage study of the Konitsa stone arch bridge", *Eng. Struct.*, **177**, pp. 256-267 (2018).
44. Yazdannejad, K. and Yazdani, A. "Bayesian updating of the Park-Ang damage index for RC frame buildings under near-fault ground motions", *Sci. Iran. Trans. A, Civ. Eng.*, **25**(2), pp. 606-616 (2018).

45. Abbasi, S., Ardakani, A., and Yn, M. "An investigation on the effect of near-field pulse-like ground motions on the seismic response of a soil-pile-structure system", *Sharif J. Civ. Eng.*, **33.2**(2.1), pp. 115-125 (2017).
46. Yazdani, A., Nicknam, A., Eftekhari, S.N. and et al. "Sensitivity of near-fault PSHA results to input variables based on information theory", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **106**(4), pp. 1858-1866 (2016).
47. Baker, J.W. "Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **97**(5), pp. 1486-1501 (2007).