

## سنجش رابطه فرم بسته برای برازش جنبش نیرومند زمین در میدان نزدیک گسل

مونا نجمیان<sup>۱</sup>، مهسا نوری<sup>۲</sup>، افشین مشکوه الدینی<sup>۳\*</sup>، پیمان همایی<sup>۴</sup>

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۱۰

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۱۶

### چکیده

جنبش‌های نیرومند زمین در حوزه نزدیک به مکانیزم گسیختگی گسل؛ به علت حضور پالس‌های بزرگ و پرنرژی در تاریخچه زمانی مربوطه، قادر به ایجاد رفتار لرزه ای موج گونه در محیط پیوسته ساختگاه بوده و دامنه تغییرات پارامترهای پاسخ سازه ها را نیز به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهند. این روند به گونه‌ای است که احتمال ایجاد خسارات گسترده سازه ای و وقوع وضعیت ناپایداری دینامیکی، قابل توجه خواهد بود. بدین لحاظ، برآورد و ارزیابی عملکرد لرزه ای سازه ها تحت این گونه جنبش‌های نیرومند زمین، بسیار پیچیده بوده و عوامل زیادی در آن دخالت دارند. بر اساس شناخت و ارزیابی ویژگی‌های خاص رکوردهای حوزه نزدیک، تشخیص بازه های زمانی پالس و اسپایک‌های وابسته و نیز بررسی باند فرکانس‌های پرنرژی مربوطه، می‌توان نگرش‌های مصنوعی و هم پایه را با روش برازش فرم بسته تعیین نمود. کاربرد این گونه نگرش‌های مصنوعی برازشی در موضوع تحلیل رفتاری و ارزیابی عملکرد لرزه ای سازه ها نسبت به باند تواتری خاص از یک رکورد نیرومند حوزه نزدیک می‌باشد. در این مطالعه با استفاده از چندین عبارت پارامتری ریاضی با قابلیت برازش شکل پالس سرعت و شتاب، اقدام به مدل‌سازی و برازش ساختارهای موجی شکل موجود در تاریخچه زمانی رکوردهای حوزه نزدیک صورت گرفته است. روند شبیه‌سازی و برازش‌های فرم بسته به گونه‌ای انجام شده که علاوه بر تطبیق پالس‌های موجود در تاریخچه زمانی سرعت و رکورد شتاب، نمودار تغییرات تجمعی انرژی جنبشی مربوطه نیز دارای شباهت هر چه بیشتر با رکورد واقعی باشد. افزون بر مدل‌سازی پالس‌های سرعت، نمودار تغییرات تجمعی آزاد شدن انرژی تحت نگرش مصنوعی و رکورد واقعی نیز محاسبه و مقایسه شده اند. نتایج این مطالعه، توصیف کننده ویژگی‌ها و قابلیت‌های کاربردی برای مدل فرم بسته در انجام شبیه سازی و تطبیق محاسباتی بر روی رکوردهای نیرومند زلزله است. ملاحظات تحلیلی و آورده‌های محاسباتی، نشان‌دهنده بازه

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی زلزله، دانشگاه خوارزمی، تهران

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی زلزله، دانشگاه خوارزمی، تهران

۳. دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران؛ meshkat@khu.ac.ir

۴. دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران

\* مسئول مکاتبات

نتایج در محدوده‌های عددی بسیار نزدیک نسبت به پارامترهای رکورد زلزله تا حوزه تغییراتی بزرگ است. اندرکنش غیرخطی میان پارامترهای تاثیرگذار در روند برازش تحلیلی و سپس پردازش محاسباتی هر دو گروه پاسخ‌های تاریخچه زمانی و طیفی مورد نظر برای ارزیابی‌های صورت گرفته بر روی مدل فرم بسته، عامل پدیدار شدن دامنه‌های مختلف همگرایی است.

**کلید واژه‌ها:** رکورد زلزله، حوزه نزدیک گسل، ساختار گسل، پالس سرعت، برازش فرم بسته، طیف پاسخ.

## ۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر به ویژه پس از رخداد‌های لرزه‌ای نیرومند مانند زلزله‌های لندرز ۱۹۹۲ (Landers 1992) و نورتریج ۱۹۹۴ (Northridge 1994) در کالیفرنیا، کوبه ۱۹۹۵ (Kobe 1995) و توهوکو ۲۰۱۱ (Tohoku 2011) در ژاپن، چی چی ۱۹۹۹ (Chi Chi 1999) در تایوان، ماتزه ۲۰۱۳ (Matese 2013) در جنوب ایتالیا، طبس ۱۹۷۸، منجیل ۱۹۹۰ و بم ۲۰۰۳ در ایران، توجه ویژه‌ای به زمین لرزه‌های حوزه نزدیک گسل و خسارات وارده به سازه‌های طراحی شده بر اساس آیین‌نامه، صورت گرفته است. خصوصیات جنبش‌های نیرومند و پرنرژی زمین در حوزه نزدیک گسل‌های فعال، وابسته به مشخصات چشمه لرزه زا، جهت گسیختگی گسل نسبت به سایت و نیز جهت عمومی لغزش گسل می‌باشد، (Singh 1985, Mollaioli et al 2006, Trifunac et al 2012, 2013).

نکته دیگر آن که رکورد‌های حوزه نزدیک دارای ساختار طیفی و مشخصات فیزیکی متفاوت نسبت به رکورد‌های حوزه دور هستند. نمود این مشخصات در وجود اثرات نیرومند جهت‌داری (Forward Directivity) در هر دو مولفه موازی با راستای گسیختگی در مکانیزم گسل (مولفه LN) و مولفه عمود بر راستای مذکور (مولفه TR) پدیدار می‌شود. همچنین مشخص شده که نمود فرایند پرقدرت جهت‌داری می‌تواند همراه با اثرات گام پرتابی (Fling Step) در مولفه موازی با راستای گسلش نیز همراه باشد، (Rodriguez-Marek et al., 2006, Bradley et al., 2017). یکی از مهم‌ترین خصوصیات متمایزکننده جنبش‌های حوزه نزدیک تحت اثرات فرایند جهت‌داری، ایجاد پالس‌های با دامنه بزرگ و پیروید بلند در تاریخچه زمانی سرعت و نیز اسپایک‌های

پرانرژی و کوتاه مدت در تاریخچه زمانی شتاب زمین است، (Kalkan et al., 2006, Dabaghi et al., 2018). شرایط محلی سایت می‌تواند تاثیرات قابل توجه‌ای بر جنبش‌های زمین در حوزه نزدیک گسل داشته باشد. به عنوان مثال، تاریخچه زمانی سرعت با پیروید بلند در سایت خاکی نسبت به سایت سنگی با بزرگای کمتر از ۷ رخ می‌دهد. این تفاوت با افزایش بزرگای کاهش می‌یابد. بنابراین برای رویدادهای با بزرگای حدود ۷/۵، پیروید پالس در سایت‌های خاکی و سنگی، کم و بیش یکسان است، (Bray et al., 2004).

پیدایش اثرات نیرومند جهت‌داری، در شرایطی است که سرعت و راستای انتشار امواج برشی، برابر یا نزدیک به سرعت شکست ساختار زمین باشد. فرایند فوق منجر به پدیدار شدن مقدار قابل توجه انرژی، با ماهیت تجمع یافته در قالب یک ساختار پالس‌گونه در تاریخچه زمانی سرعت زمین می‌شود. شرایط جهت‌داری پیش‌رونده می‌تواند برای هر دو رویداد گسلش امتداد لغز و شیب لغز وجود داشته باشد. در رویدادهای امتداد لغز، شرایط جهت‌داری پیش‌رونده بطور معمول برای مکان‌های نزدیک به انتهای صفحه شکست گسل، زمانی که جبهه گسیختگی به سمت سایت حرکت می‌کند، دارای بزرگ‌ترین نمود است. در رویدادهای شیب لغز، شرایط جهت‌داری پیش‌رونده برای مکان‌های واقع در شیب بالا صفحه گسل رخ می‌دهد. الگوی تشعشی نابجایی برشی روی گسل باعث می‌شود که این پالس بزرگ حرکت در جهتی عمود بر صفحه گسل قرار گیرد، (Bray et al., 2004). نتایج مطالعات نشان می‌دهد که اعمال انرژی به سازه در یک مدت زمان کوتاه باعث تحمیل تقاضای لرزه‌ای بزرگ در اسکلت مقاوم خواهد شد، (Somerville et al., 1998 and

برازش تحلیلی پالس سرعت را دارا بوده و نیز به گونه‌ای مناسب قادر به توصیف ماهیت حرکات زمین تحت جنبش-های نیرومند در حوزه نزدیک گسل باشد. دیدگاه مربوطه برای روند تحلیلی یاد شده، در بیان تفاوت‌ها در دامنه‌های مختلف کم تا زیاد همگرایی، میان پاسخ‌های حاصله بر اساس رکورد واقعی زلزله و همچنین نگاشت فرم بسته، مطرح گردیده است.

## ۲. مبانی و معیارهای انتخاب رکورد زلزله

وجود مشخصات جنبش نیرومند زمین (ثبت شده) در میدان نزدیک صفحه شکست گسل تا فاصله کمتر از ۲۰ کیلومتر و قابلیت نمایش اثرات نیرومند جهت‌داری، به عنوان نخستین معیار برای انتخاب رکوردهای زلزله در این پژوهش در نظر گرفته شده است. همچنین در گام دوم، وجود پالس (یا پالس‌های) پر دامنه با پیوند بلند در تاریخچه زمانی سرعت مورد نظر بوده است. شایان ذکر است که در ساختار فیزیکی بیشتر رکوردهای نیرومند زلزله، مولفه عمود بر راستای شکست گسل (مولفه TR) دارای محتوای انرژی بیشتر و قابلیت ایجاد پالس سرعت بزرگ‌تر می‌باشد. بدین لحاظ، تمرکز مطالعاتی در این پژوهش، تنها بر روی مولفه مذکور است. ویژگی‌های اصلی و مشخصات لرزه‌شناسی رکوردهای انتخابی در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

(2003, Loh et al., 2000). شایان ذکر است که از دیدگاه برآورد نیازهای لرزه‌ای سازه‌ها لازم است که به ایجاد یک طبقه‌بندی هماهنگ در شناخت و تعریف جنبش‌های پالس-گونه و نیز دیگر ارتعاشات حوزه نزدیک گسل‌های لرزه‌زا توجه شود. بدیهی است که پرهیز از نگرش به این موضوع می‌تواند باعث برآورد بیش از حد دامنه پاسخ سازه تحت تحریکات غیرپالس‌گونه و نیز کاهش ناهمگون در بازه تغییرات نسبی پارامترهای رفتاری سازه تحت جنبش‌های پالس‌گونه بشود، (Li et al., 2024, Cao 2025).

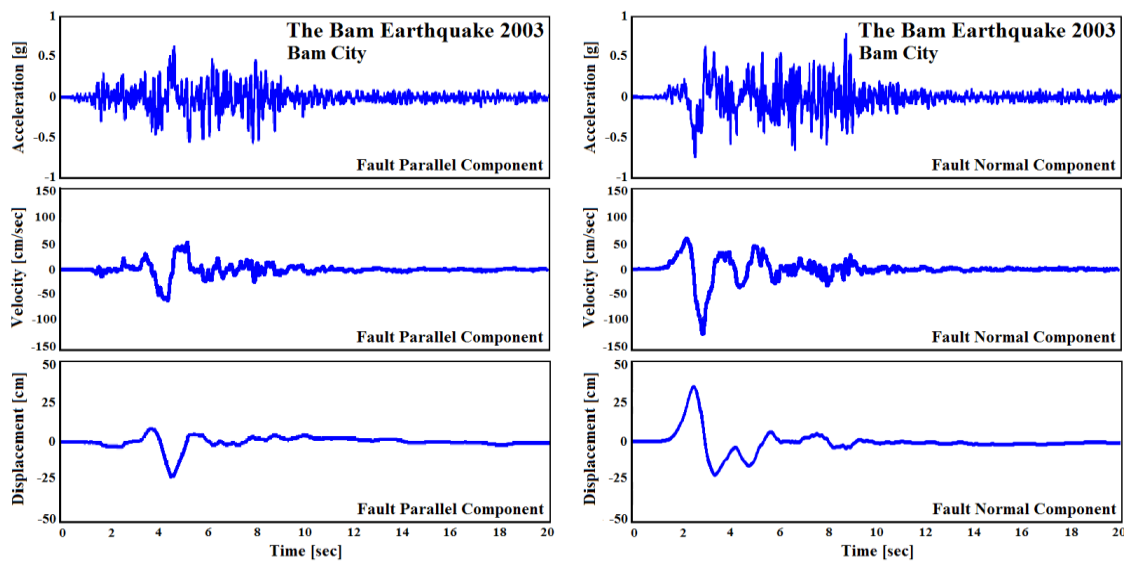
شایان ذکر است که انرژی جنبشی نیز به عنوان یک معیار در پتانسیل ایجاد خسارت ناشی از جنبش شدید زمین در نظر گرفته می‌شود، (Vaseghi Amiri et al., 2008, Puglia et al., 2018). با توجه به تحقیقات (Alavi et al., Makris et al., 2000, Hayden et al., 2014, Mavroeidis et al., 2003, al., 2001, ساختارها و روندهای تحلیلی گوناگونی برای برازش و مدل-سازی بخش پالس‌گونه رکوردهای حوزه نزدیک ارائه شده است. همچنین در حرکات پالس‌گونه، بیشترین مقادیر انرژی جنبشی در پالس‌های سرعتی که بطور معمول در فاز مدت زمان قابل توجه ظاهر می‌شوند، وجود دارد (Yi et al., 2024, Nadim et al., 2025). هدف از این مطالعه، تدوین یک نگرش تحلیلی در موضوع شبیه‌سازی پالس‌های ترکیبی و پیوسته سرعت با استفاده از روابط چند جمله‌ای توانی فرم بسته است. تلاش گردیده که روند تدوین شده، توانایی

جدول ۱. مشخصات لرزه‌شناسی رکوردهای انتخابی

Earth movement	Component	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)	Earthquake magnitude (Mw)
<b>Bam 2003</b> Bam City (BAM) - 1.0km	LN	۰/۶۳۱	۵۹/۶۱	۲۰/۷۰	۶/۶
	TR	۰/۷۹۳	۱۲۳/۷	۳۷/۴۰	
<b>Erzincan 1992</b> Erzincan (ERZ) - 2.0km	LN	۰/۴۹۵	۶۴/۳۷	۲۲/۸۹	۶/۷
	TR	۰/۵۱۵	۸۳/۳۶	۲۷/۱۵	
<b>Northridge 1994</b> New Hall (WPI) - 7.1km	LN	۰/۳۲۱	۶۷/۴۱	۱۶/۰۶	۶/۷
	TR	۰/۴۵۲	۹۲/۷۴	۵۶/۵۰	
<b>Imperial Valley 1979</b> Array 7 (E07) - 0.6km	LN	۰/۳۳۱	۴۷/۳۲	۲۳/۱۱	۶/۵
	TR	۰/۴۶۱	۱۱۰/۶	۵۰/۴۵	

راستای گسلش است. بر اساس شکل ۱، متناظر با هر دو پالس بزرگ سرعت فوق نیز دو ساختار پیوسته چند موجکی در تاریخچه زمانی تغییر مکان زمین دیده می‌شود. همچنین شکل ۲ نمایش‌گر تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و تغییر مکان رکورد اصلی زلزله Imperial Valley 1979 (E07) است. این رکورد نیز حاوی اثرات جهت داری پیشرونده در حوزه نزدیک گسل است. مطابق شکل ۲ در تاریخچه زمانی سرعت مولفه موازی با راستای گسلش رکورد اصلی زلزله E07 (مولفه LN) در میان دو محور زمانی ۴ تا نزدیک ۱۰ ثانیه، یک پالس پیوسته سرعت حاوی چندین موجک با دامنه بلند دیده می‌شود. همچنین در تاریخچه زمانی مولفه عمود بر راستای گسلش (مولفه TR) نیز پالس بزرگ شبه سینوسی حاوی موجک پردامنه با پریرود به نسبت بلند در میان دو محور زمانی ۳/۵ تا نزدیک ۱۰ ثانیه دیده می‌شود. دامنه پالس پیوسته سرعت موجود در تاریخچه زمانی مولفه TR بیشتر از مولفه LN است.

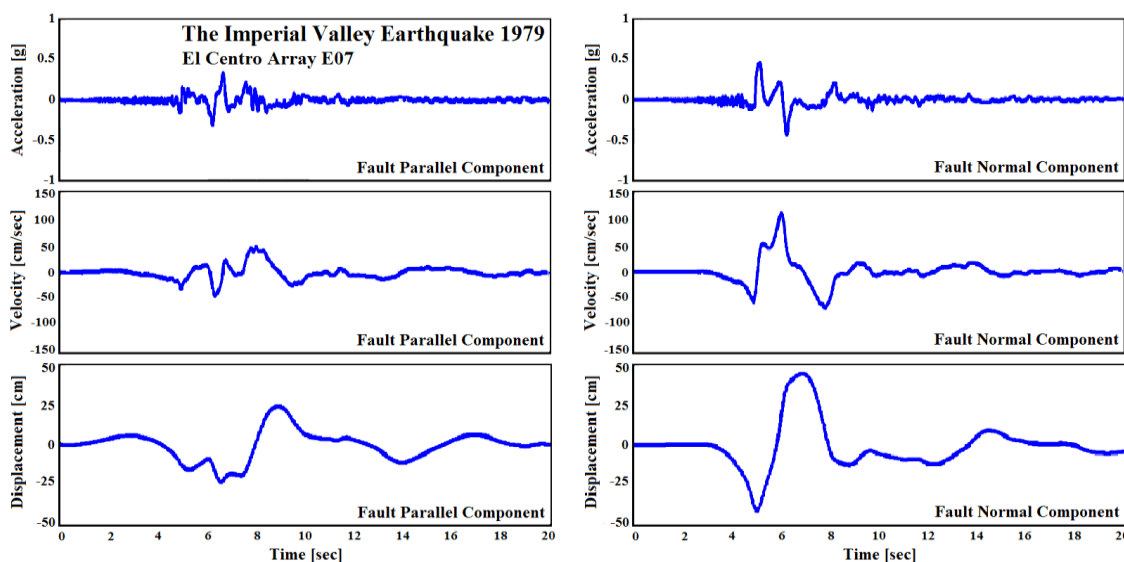
شکل ۱ تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و تغییر مکان رکورد اصلی زلزله BAM را نمایش می‌دهد. این رکورد به عنوان یک جنبش حوزه نزدیک گسل و حاوی اثرات نیرومند جهت‌داری پیش‌رونده، دارای ویژگی‌های برجسته‌ای است. مطابق با شکل ۱ در بازه ابتدایی تاریخچه زمانی سرعت رکورد اصلی زلزله BAM تا پیش از محور ۶ ثانیه، دو پالس پیوسته پریرود بلند وجود دارد. توضیح آن که در تاریخچه مولفه موازی با راستای گسلش (مولفه LN)، یک پالس شبه‌سینوس با پریرود به نسبت بالا و دامنه بلند در میان دو محور زمانی ۳ تا ۶ ثانیه ملاحظه می‌شود. همچنین، در تاریخچه مولفه عمود بر راستای گسلش (مولفه TR) نیز یک پالس مشخص پیوسته حاوی چندین موجک دامنه بلند در میان دو محور زمانی ۱/۷ تا ۶/۵ ثانیه وجود دارد. نکته دیگر آن که موجک‌های واقع در ادامه پالس اصلی سرعت در مولفه TR، دامنه به نسبت بیشتری در مقایسه با مولفه LN دارند. موارد ذکر شده فوق درباره پالس‌ها و اسپایک‌های سرعت، بیان‌گر انرژی بیشتر مولفه عمود بر



شکل ۱. تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و تغییر مکان زمین در رکورد اصلی زلزله BAM متناظر با هر دو مولفه موازی با راستای عمومی صفحه شکست گسل (مولفه LN) و نیز عمود بر راستای مذکور (مولفه TR) حاوی پالس‌های مشخص سرعت و جابه‌جایی

زمین متاثر از فرایند جهت‌داری پیش‌رونده نیز متناظر با یک باند فرکانسی نه چندان پهن در طیف فوریه است. پالس‌های بزرگ و پر دامنه سرعت به طور مشخص در بازه زمانی هم‌تراز با روند شدید آزاد شدن انرژی جنبش‌های نیرومند زمین، در تاریخچه زمانی رکورد زلزله پدیدار می‌شوند.

شایان ذکر است که برای زلزله‌های متوسط تا نیرومند حوزه نزدیک، بیشینه دامنه ساختارهای موجی شکل شتاب، سرعت و تغییر مکان زمین می‌تواند به نسبت بزرگ باشد. به طور کلی دامنه و پریود پالس در تاریخچه سرعت متناظر با دو مولفه LN و TR، پارامترهایی هستند که اندازه تقاضای لرزه‌ای را تعیین می‌کنند. همچنین، بیشتر انرژی آزاد شده در حرکات



شکل ۲. تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و تغییر مکان زمین در رکورد اصلی زلزله Imperial Valley 1979 (E07) متناظر با هر دو مولفه موازی با راستای عمومی صفحه شکست گسل (مولفه LN) و نیز عمود بر راستای مذکور (مولفه TR) حاوی پالس‌های مشخص سرعت و جابه‌جایی

### ۳. مدل‌های فرم بسته برازش رکورد

تحقیقات (Agrawal, 2002, Makris et al., 2003) بر پایه تحقیقات (Mavroeidis et al., 2004) ملاحظه نمود. بر پایه تحقیقات آگراوال (Agrawal, 2002) مدل ساده‌ای برای شبیه‌سازی پالس سرعت پیشنهاد گردید که در آن یک پارامتر میرایی با اثر کاهنده بر دامنه جنبش لحاظ شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که این مدل دارای قابلیت خوبی برای برازش و شبیه‌سازی رکوردهای حاوی اثرات جهت‌داری پیش‌رونده است. روابط ۱ تا ۳ بیان‌گر مدل پیشنهادی آگراوال (Agrawal, 2002) می‌باشند:

پژوهش‌ها و مطالعات فراوانی بر روی رابطه‌سازی و ساخت فرم بسته رکوردهای پالس‌گونه، بر پایه روش‌های تحلیلی-آماري صورت گرفته است. در این زمینه می‌توان به ساختار ساده پالس‌های یک طرفه مستطیلی، مثلثی و پلکانی برای ارزیابی پاسخ دینامیکی الاستیک و غیرالاستیک سیستم یک درجه آزادی اشاره نمود. نتایج مطالعات این مورد نشان می‌دهد که برای هر شکل پالس سرعت، دو پارامتر دامنه و پریود از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشند، (Rupakhety et al., 2011, Kohrangi et al., 2019). همچنین، مدل‌های فرم بسته شاخص‌تر و با قابلیت بیشتر را می‌توان در نتایج

$$\dot{u}_g(t) = v_p \sin(\omega_p t) \quad (9)$$

$$u_g(t) = \frac{v_p}{\omega_p} - \frac{v_p}{\omega_p} \cos(\omega_p t) \quad (10)$$

پارامتر  $v_p$  دامنه پالس سرعت و  $\omega_p = 2\pi/T_p$  فرکانس زاویه‌ای (متناظر با پریود پالس) و  $T_p$  پریود پالس سرعت می‌باشد. این مقادیر باید با دقت مناسبی انتخاب شوند تا نتیجه قابل قبول برای نگاهت برآزش شده، بدست آید. همچنین ماورویدیس (Mavroeidis et al., 2004) با بررسی تعداد زیادی از رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک، یک گروه روابط و عبارات فرم بسته ریاضی را تدوین نمود که توانایی برآزش شکل پالس‌های پر دامنه و پریود بلند سرعت را بخوبی دارا می‌باشند. پارامترهای مورد بررسی در این مدل ریاضی شامل پریود پالس، دامنه پالس و تعداد و فاز نیم سیکل‌های برآزشی است. این مدل ریاضی فرم بسته، توانایی توصیف اثرات جهت‌داری پیش‌رونده و همچنین گام پرتابی زمین را دارا می‌باشد. نکته مهم آن است که شناخت هر چه دقیق‌تر و جامع‌تر مشخصات لرزه‌شناسی و طیفی رکوردهای نیرومند زلزله، تاثیر مستقیم بر روند پردازش تحلیلی و ارزیابی کامل‌تر نگاهت‌ها و تاریخچه زمانی‌های مربوطه دارد، (Yaghmaei- Sabegh, 2020, Khansefid, 2020, Rahnama et al., 2021)

#### ۴. ساختار و مدل فرم بسته در پژوهش حاضر

مدل تحلیلی و روش برآزش مطرح شده در این پژوهش، علاوه بر سادگی مفهومی، از دقت به نسبت خوبی نیز برخوردار است. در این مدل به جای توابع سینوسی و کسینوسی، از توابع چند جمله‌ای برای ساخت پالس‌های سرعت استفاده شده است. همچنین، با بهره‌گیری از نرم افزار متلب (MATLAB 2009) توابع چند جمله‌ای از درجه تحلیلی یک تا سه در بازه‌های مختلف تاریخچه زمانی پالس سرعت، برآزش داده شده‌اند. تدوین تحلیلی این روش بصورت کاربرد گام‌های سعی و خطا و چرخه‌های محاسباتی مربوطه می‌باشد. بررسی دقت محاسباتی روند برآزش نیز بر اساس ارزیابی ویژگی‌های تحلیلی و طیفی پالس مصنوعی

$$\dot{u}_g = v_p e^{-\xi_p \omega_p t} \times \sin\left(\omega_p \sqrt{(1 - \xi_p^2)} t\right) \quad (1)$$

$$\ddot{u}_g = v_p e^{at} [a \sin(bt) + b \cos(bt)] \quad (2)$$

$$u_g = [v_p e^{at} (a \sin(bt) - b \cos(bt)) + v_p b] / \omega_p^2 \quad (3)$$

پارامترهای  $a$  و  $b$  در رابطه ۴ داده شده و همچنین  $\xi_p$  ضریب میرایی،  $\omega_p$  فرکانس زاویه‌ای و  $v_p$  دامنه پالس اصلی و پیوسته سرعت می‌باشد.

$$a = -\xi_p \omega_p ;$$

$$b = \omega_p \sqrt{(1 - \xi_p^2)} \quad (4)$$

بر اساس مطالعات ماکریس و همکاران (Makris et al., 2003)، مدل پالس A به صورت یک پالس شبه سینوس شتاب برای برآزش رکوردهای نیرومند حاوی اثرات ترکیبی جهت‌داری پیش‌رونده و گام پرتابی، رابطه‌سازی شده است. همچنین، مدل پالس B نیز به صورت یک ساختار موجی شبه‌کسینوس شتاب برای برآزش رکوردهای حاوی اثرات نیرومند جهت‌داری پیش‌رونده و جنبش موج گونه زمین، تدوین گردیده است. قابلیت برآزشی پالس B برای شبیه‌سازی رکوردهای به نسبت نیرومند حاوی اثرات جهت‌داری پس‌رونده نیز برقرار است. روابط ۵ تا ۱۰ بیان‌گر ساختار پارامتری مدل‌های پیشنهادی Makris می‌باشند:

#### مدل پالس A :

$$\ddot{u}_g(t) = \omega_p \frac{v_p}{2} \sin(\omega_p t) \quad (5)$$

$$\dot{u}_g(t) = \frac{v_p}{2} - \frac{v_p}{2} \cos(\omega_p t) \quad (6)$$

$$u_g(t) = \frac{v_p}{2} t - \frac{v_p}{2\omega_p} \sin(\omega_p t) \quad (7)$$

پیاده سازی روابط فوق و برآزش تحلیلی در بازه زمانی پالس سرعت ( $0 \leq t \leq T_p$ ) صورت می‌گیرد.

#### مدل پالس B :

$$\ddot{u}_g(t) = \omega_p v_p \cos(\omega_p t) \quad (8)$$

ضرایب برازشی در بازه زمانی  $2.4\text{sec} \leq t \leq 2.75\text{sec}$ :

$$\begin{aligned} a &= 1605, b = -11607, \\ c &= 27456, d = 21192 \end{aligned} \quad (14)$$

همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده، بازه‌های زمانی و نیز درجه تحلیلی توابع برازشی با توجه به شکل پالس (یا پالس‌های) موجود در رکورد اصلی و چند موجک پس از آن، انتخاب می‌شوند. نتایج برازش‌های تحلیلی در این مطالعه بیان‌گر آن است که تدوین عبارات ریاضی با توانایی تطابق با شکل پالس، تابع تغییرات پارامترهای طیفی نیز می‌باشد. پیرو دامنه پالس، تعداد و ساختار تحلیلی موجک‌های در نظر گرفته شده نیز در گروه مشخصات تاثیرگذار هستند.

انجام می‌گیرد. برخی از آرایش‌های پارامتری بکار برده شده در روند برازش تاریخچه زمانی رکوردهای انتخابی زلزله (جدول ۱) به صورت زیر می‌باشند. توابع مذکور برای رکورد زلزله بم (در بازه زمانی ۱ ثانیه تا ۲/۷۵ ثانیه) بدست آمده است.

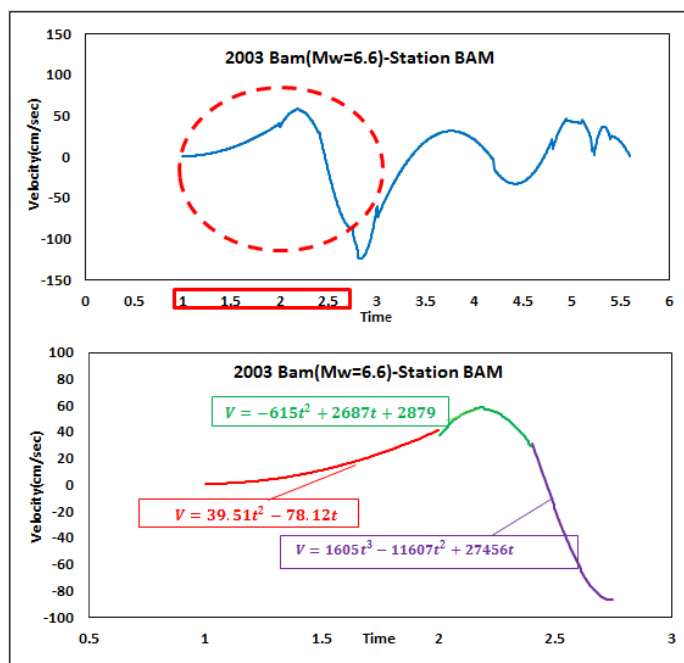
$$V = a t^3 + b t^2 + c t + d \quad (11)$$

نتایج تحلیلی برای ضرایب برازشی پالس سرعت در بازه زمانی  $1\text{sec} \leq t \leq 2\text{sec}$ :

$$\begin{aligned} a &= 0, b = 39.5161, \\ c &= -78.1218, d = 39.292 \end{aligned} \quad (12)$$

نتایج محاسباتی در بازه زمانی  $2\text{sec} \leq t \leq 2.4\text{sec}$ :

$$\begin{aligned} a &= 0, b = -615, \\ c &= 2687.8, d = 2879.5 \end{aligned} \quad (13)$$



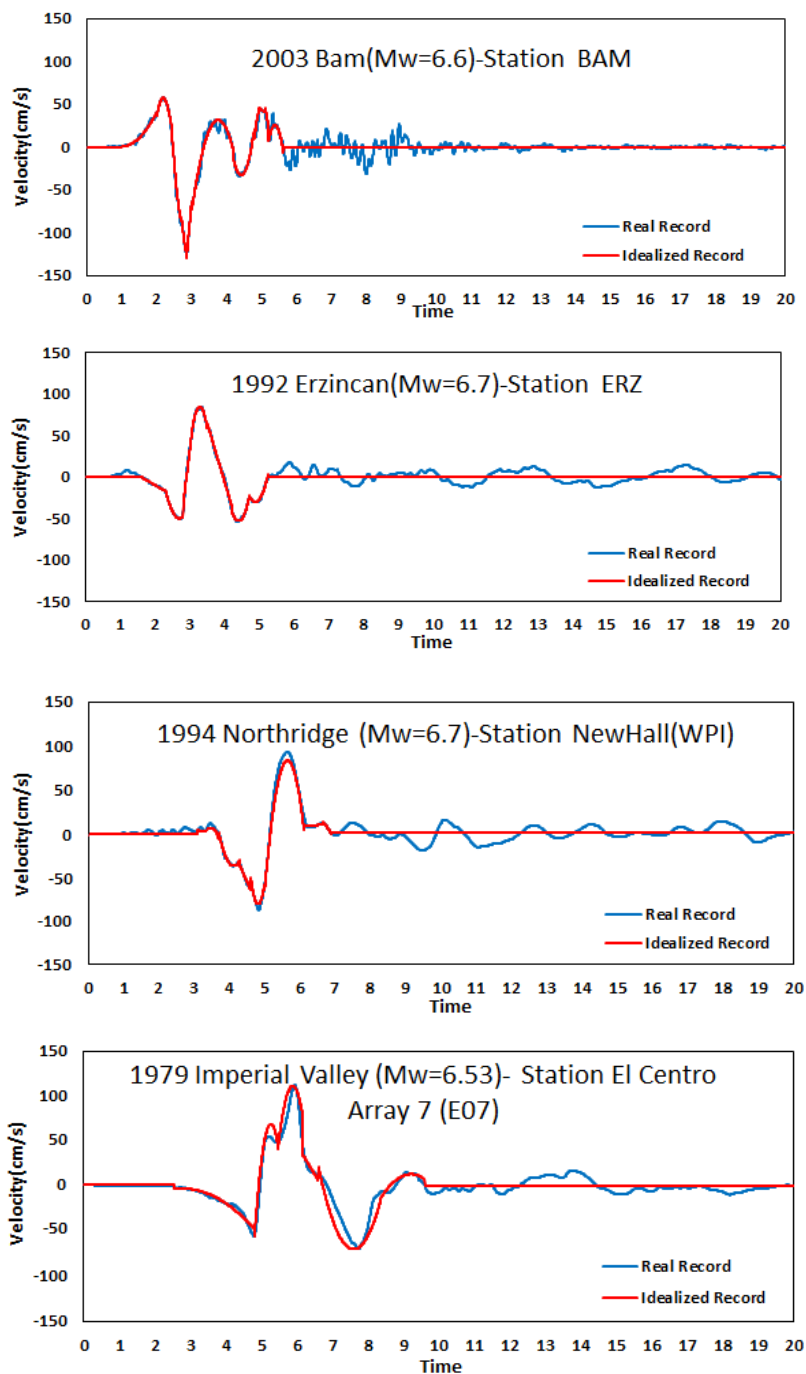
شکل ۳. برازش توابع چندجمله‌ای بر روی تاریخچه زمانی سرعت مولفه TR از رکورد BAM (شکل ۱)

در بازه زمانی موجک اصلی پالس و میان ۱ ثانیه تا ۲/۷۵ ثانیه (بخش پایینی)

داشت که نگاشت‌های فرم‌بسته ساخته شده دارای دقت مناسب بوده و ویژگی‌های تحلیلی و طیفی آن‌ها شباهت بیشتری به پارامترهای متناظر رکورد واقعی داشته باشند. نکته دیگر آن که ممکن است یک تفاوت نسبی در نمودار متناظر با سایر پارامترهای طیفی، در صورت عدم لحاظ نمودن اثرات

توضیح آن که در روند برازش رکوردهای انتخابی زلزله، تلاش شده که بهترین توابع و آرایش چندجمله‌ای‌ها در نظر گرفته شود. همچنین، در ساختار محاسباتی روش تحلیلی این پژوهش، امکان شبیه‌سازی اسپایک‌های پس از پالس اصلی سرعت نیز لحاظ گردیده است. بر این اساس، می‌توان انتظار

موجک‌های پس از بازه زمانی پالس سرعت اصلی نسبت به حالت ترکیبی پالس و اسپایک‌های بعد از آن، نمود پیدا نماید.



شکل ۴. نمود انطباق پالس‌های سرعت برآزش شده (رنگ قرمز) بر روی تاریخچه زمانی سرعت رکورد واقعی (رنگ آبی)،

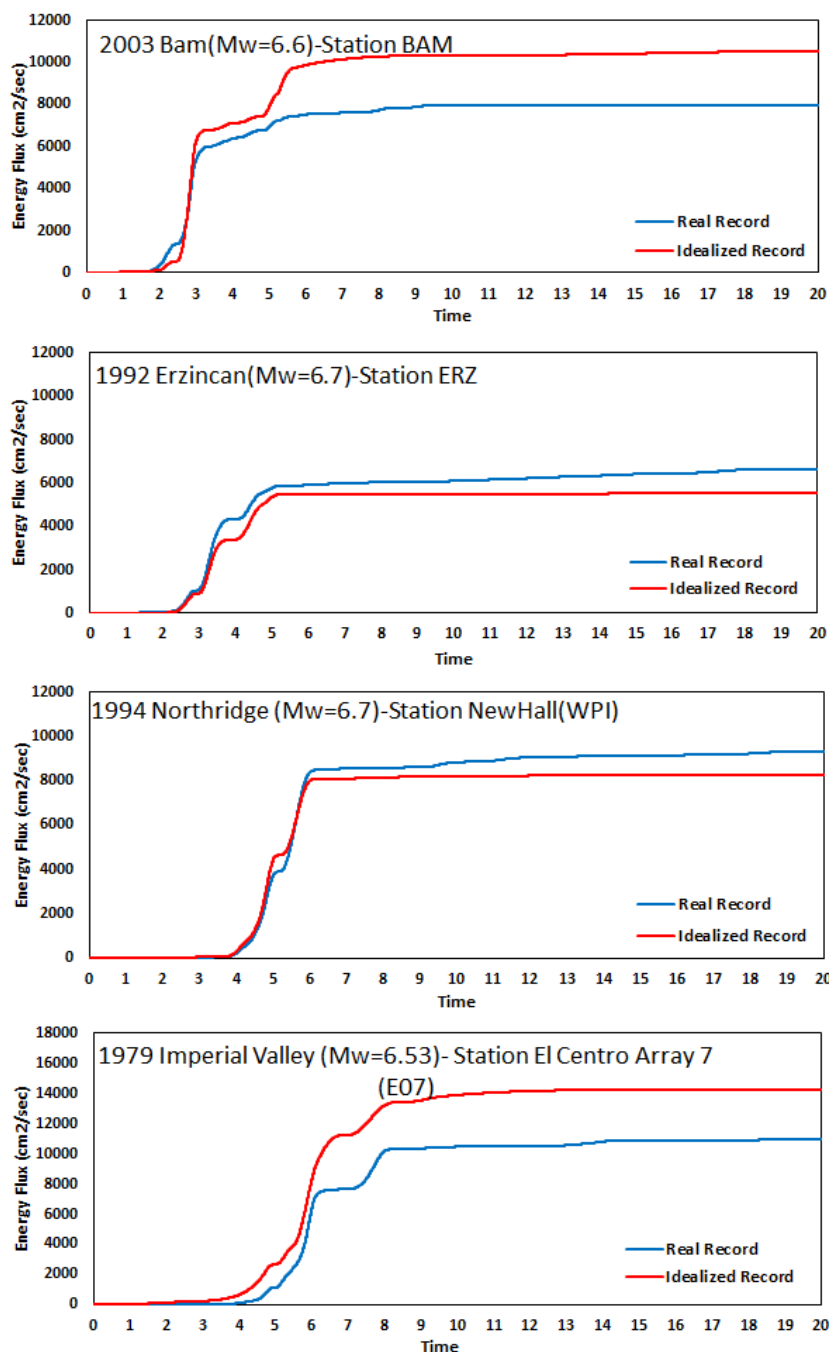
(مؤلفه TR رکوردهای جدول ۱)

شکل مشاهده می‌شود که برخلاف دیگر مدل‌های فرم بسته ریاضی که تنها یک شکل کلی از پالس سرعت را می‌سازند،

در شکل ۴ ساختارهای فرم بسته پالس سرعت بدست آمده از روش برآزش تحلیلی این پژوهش نشان داده شده اند. در این

که با توجه به خصوصیات ویژه جنبش‌های نیرومند حوزه نزدیک، نمی‌توان تنها با کاربرد مدل‌های فرم بسته ساده، به یک ارزیابی مناسب در این خصوص دست یافت. روند برازش تحلیلی بر روی موجک‌های پالس اصلی و اسپایک-های پردامنه پیش و پس از آن نیز باید در نظر گرفته شود.

ساختار برازشی تدوین شده و نمود تحلیلی آن برای رکوردهای نیرومند انتخابی (جدول ۱) دارای حداکثر تطابق ممکن می‌باشد. همچنین در این موضوع نیز روابطی برای موجک‌ها و اسپایک‌های با دامنه کوچک‌تر که در پیش و پس از پالس اصلی دیده می‌شوند، ارائه شده است. تاکید می‌شود



شکل ۵. نمودارهای روند تجمعی آزاد شدن انرژی متناظر با رکوردهای واقعی (رنگ آبی) و نگاهت‌های برازش شده (رنگ قرمز)،

(مؤلفه TR رکوردهای جدول ۱)

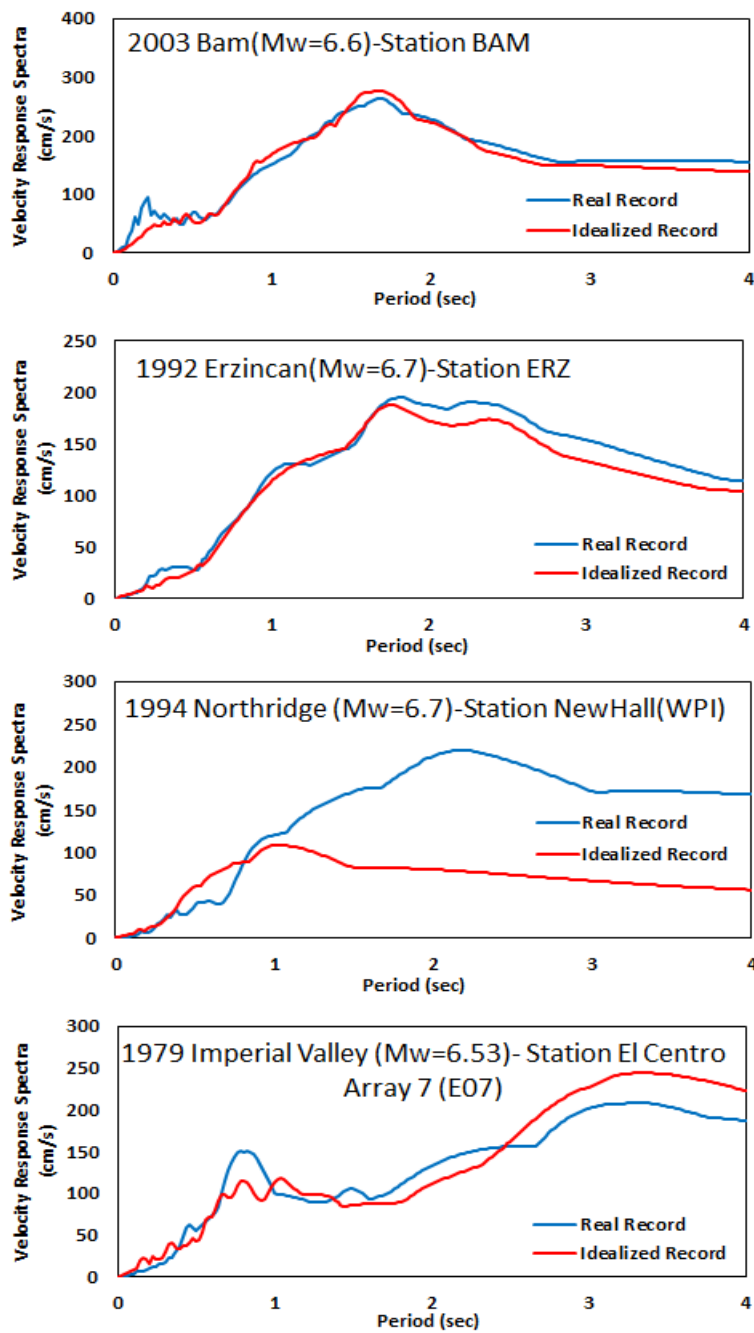
### ۵. پیاده‌سازی روابط برازشی و مقایسه نتایج

به منظور بررسی نتایج حاصل از مدل‌سازی فرم بسته پالس سرعت، ابتدا به مقایسه نمودارهای روند تجمعی آزاد شدن انرژی رکوردها پرداخته شده است. شکل ۵ نمایش‌گر نمودارهای روند تجمعی آزاد شدن انرژی رکوردهای واقعی و همچنین نگاشت‌های فرم بسته برازشی می‌باشد. در همین موضوع نیز با چشم‌پوشی از یک تعداد اسپایک که درست پس از بازه زمانی پالس اصلی سرعت واقع می‌شوند، یک دامنه نسبی تفاوت میان اندازه انرژی رکورد واقعی و نگاشت مصنوعی وجود خواهد داشت. بیشترین خطای محاسباتی مربوط به نمودار روند تجمعی آزاد شدن انرژی نیز برای رکورد BAM (زلزله بم ۲۰۰۳) ملاحظه می‌شود. بررسی شکل تاریخیچه زمانی سرعت رکورد واقعی BAM نشان دهنده وجود تعداد فراوان اسپایک‌های به نسبت پر دامنه، بلافاصله پس از پالس اصلی می‌باشد. حوزه جهش در روند آزاد شدن انرژی جنبشی در شکل ۵، متناظر با بازه زمانی پالس اصلی سرعت رکورد حوزه نزدیک است. همچنین یک بخش نمودار نیز با شیب ملایم و متناظر با اسپایک‌های پس از پالس اصلی سرعت وجود دارد.

مطابق شکل ۵ حوزه جهش مشابهی در نمودار روند تجمعی آزاد شدن انرژی مربوط به نگاشت‌های برازش شده، ملاحظه می‌شود. نمود عمومی متناظر با اسپایک‌های سرعت در حوزه با شیب ملایم نیز بستگی مستقیم به روند برازش صورت

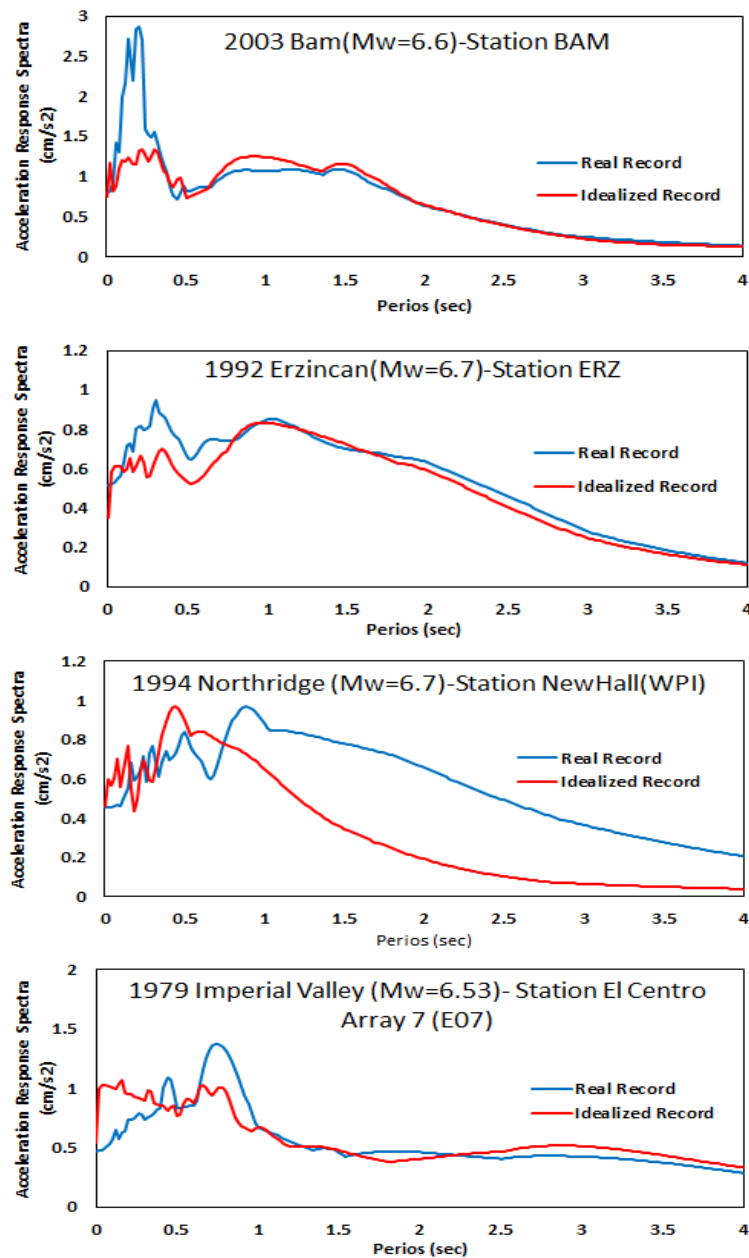
گرفته بر روی ساختار پیچیده و پیوسته تاریخیچه زمانی مربوطه دارد. در نظر گرفتن تعداد بیشتر اسپایک‌های کم دامنه و با پیوند کوچک بعد از پالس اصلی سرعت، سبب جامع‌تر شدن مدل فرم بسته خواهد شد. یکی دیگر از پارامترهای قابل بررسی و مقایسه در نتایج مقایسه ای میان نگاشت‌های برازش شده و رکوردهای واقعی، طیف های پاسخ سرعت و پاسخ شتاب است.

بر این اساس، در شکل ۶ طیف پاسخ سرعت و در شکل ۷ نیز طیف پاسخ شتاب برای رکورد واقعی و نگاشت برازشی نشان داده شده است. مطابق با شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود که ساختار طیفی حاصله برای نگاشت‌های برازشی و نیز رکوردهای واقعی، مقادیر متناظر و نزدیک را برای پاسخ سرعت و شتاب نتیجه داده و تطابق به نسبت خوبی در میان هر دو نمودار متناظر برقرار می‌باشد. همگرایی مذکور برای رکورد WPI چندان برقرار نیست. شایان ذکر است که در پیوندهای بالا و به خصوص در بازه ۱ تا ۲/۵ ثانیه، هر دو نمودار مذکور نیز بیشترین همگرایی را دارند. در این مورد می‌توان به پیوند پالس‌های سرعت اشاره کرد. با مراجعه به شکل ۴، ملاحظه می‌شود که پیوند پالس‌های مدل‌سازی شده (در نگاشت برازشی) در این بازه زمانی قرار دارند. همچنین ملاحظه می‌شود که بیشترین مقادیر پاسخ نیز در همین بازه پیوندیک اتفاق می‌افتد.



شکل ۶. نمودار طیف پاسخ سرعت متناظر با رکوردهای واقعی (رنگ آبی) و نگاهت‌های برازش شده (رنگ قرمز)،

(مؤلفه TR رکوردهای جدول ۱)



شکل ۷. نمودار طیف پاسخ شتاب متناظر با رکوردهای واقعی (رنگ آبی) و نگاشت‌های برازش شده (رنگ قرمز)،

(مؤلفه TR رکوردهای جدول ۱)

در تاریخچه زمانی سرعت متناظر با رکورد WPI چند موجک با دامنه کم و پررود به نسبت زیاد، پس از پالس اصلی سرعت وجود دارند. مشارکت محاسباتی ساختارهای موجی شکل دارای دامنه‌های کوچک نیز در روند برازش تاثیرگذار هستند. بدین لحاظ، می‌توان در توجیه عدم تطابق به نسبت مناسب برای هر دو طیف پاسخ سرعت و شتاب مربوط به نگاشت

همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، در پریودهای پایین (کمتر از ۰/۵ ثانیه) نمودارهای پاسخ طیفی دارای تطابق کمتری هستند. این موضوع، یک نمود تحلیل برای عدم شبیه سازی اسپایک‌های سرعت و نیز موجک‌های کوچک پس از پالس اصلی در تاریخچه زمانی سرعت است. تاثیرگذاری روند برازش اسپایک‌های سرعت، بویژه برای رکورد BAM نمود بزرگ‌تری دارد. با توجه به شکل ۴ ملاحظه می‌شود که

برازشی این رکورد (شکل‌های ۶ و ۷)، به این موضوع اشاره کرد.

## ۶. نتیجه‌گیری

نتایج حاصل‌شده در این مقاله به شرح زیر مطرح می‌شوند:

۱- پالس‌های پیوسته و پر دامنه سرعت، حاوی بخش بسیار بزرگی از انرژی رکورد زلزله بوده و بیشترین تأثیر را روی اسکلت مقاوم سازه دارند. بدین لحاظ، در روند برازش نگاشت‌های مصنوعی زلزله، تمرکز تحلیلی بر روی شبیه‌سازی این پالس‌ها می‌باشد.

۲- یک نکته مهم در ساخت و تقریب سازی نگاشت‌های مصنوعی زلزله، توجه به پالس پیوسته سرعت و آرایش زمانی اسپایک‌های پراثرژی واقع در دو سوی موجک اصلی پالس مذکور در تاریخچه زمانی رکورد نیرومند حوزه نزدیک است. پوشش محاسباتی بر روی یک تعداد اسپایک‌های پر دامنه سبب افزایش دقت نگاشت فرم بسته خواهد شد.

## منابع

- Agrawal, A.K., 2002. A closed-form approximation of near-fault ground motion pulses for flexible structures, 15th ASCE Engineering Mechanics Conference, Columbia University, New York, NY.
- Alavi, B., Krawinkler, H., 2001. Effects of near-fault ground motions on frame structures, The John A. Blume earthquake engineering center, Department of civil and environmental engineering Stanford University; Report No.138.
- Bradley, B.A., Pettinga, D., Baker, J.W., Fraser, J., 2017. Guidance on the utilization of earthquake-induced ground motion simulations in engineering practice, Earthquake Spectra (EERI), 33(3), <https://doi.org/10.1193/120216EQS219EP>.
- Bray, J.D., Rodriguez-Marek, A., 2004. Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 24, 815–828.
- Cao, V.V., 2025. Characterizing effects of near-fault earthquakes in context of response spectra, IJE Transactions B: Applications, 38(2), 262-272, doi:10.5829/ije.2025.38.02b.01
- Dabaghi, M., Kiureghian, A., 2018. Simulation of orthogonal horizontal components of near-fault ground motion for specified earthquake source and site characteristics, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 47(6), 1369-1393.
- Hayden, C.P., Bray, J.D., Abrahamson, N.A., 2014. Selection of near-fault pulse motions, Journal of Geotechnical and Geo-Environmental Engineering (ASCE), 140(7), doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001129.
- Kalkan, E., Kunnath, S.K., 2006. Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings, Earthquake Spectra (EERI), 22(2), 367-390.

۳- محاسبات و تقریب سازی صورت گرفته در روش تحلیلی این پژوهش، بر اساس انتخاب بازه‌های زمانی و تخمین مشخصات پالس‌های سرعت همراه با کاربرد فرایند سعی و خطا است. همچنین با مدل‌سازی چند اسپایک پر دامنه در دو سوی پالس پیوسته سرعت، می‌توان به نگاشت دقیق‌تری از رکورد زلزله دست یافت.

۴- مدل‌سازی و برازش کامل مجموعه اسپایک‌هایی که بویژه پس از موجک اصلی پالس سرعت وجود دارند، با تقریب نسبی حاصل می‌شود و بروز درصدی از خطا نیز بدیهی است. تقریب سازی در روند برازش رکورد BAM به علت وجود همین اسپایک‌های مشخص، دارای خطای محاسباتی بیشتری نسبت به دو رکورد دیگر است.

۵- انتخاب بازه زمانی مربوط به محدوده پالس اصلی سرعت و اسپایک‌های دو سوی آن، جهت ایجاد تطابق‌های طیفی میان نگاشت‌های برازشی شتاب و سرعت، بسیار حایز اهمیت است. حصول برخی ناهمگرایی‌های محاسباتی نیز می‌تواند به دلیل انتخاب تعداد کمتر اسپایک‌های پر دامنه و با پیوند حدودی ۰/۱ تا ۰/۵ ثانیه باشد.

- Khansefid, A., 2020. Pulse-like ground motions statistical characteristics, and GMPE development for the Iranian plateau, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 134, doi:<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106164>.
- Kohrangi, M., Vamvatsikos, D., Bazzurro, P., 2019. Pulse-like versus non pulse-like ground motion records: Spectral shape comparisons and record selection strategies, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 48(1), 46-64.
- Li, C., Meng K., Guo Y., 2024. An efficient algorithm to identify strong pulse-like ground motions based on the smoothed significant velocity half-cycles, *Journal of Earthquake Engineering*, <https://doi.org/10.1080/13632469.2024.2319102>.
- Loh, C.H., Lee, Z.K., Wu, T.S., Peng, S.Y., 2000. Ground motion characteristics of the Chi-Chi earthquake of 21 September 1999, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 29, 867-897.
- Makris, N., Chang, S., 2000. Response of damped oscillators to cycloidal pulses, *Journal of Engineering Mechanics*, 26, 123-131.
- Makris, N., Cameron, B., 2003. Dimensional analysis of inelastic structures subjected to near-fault ground motions, *Earthquake Engineering Research Center*, Report No: EERC 2003-05.
- Mavroeidis, G.P., Papageorgiou, A., 2003. Mathematical representation of near-fault ground motions, *Bulletin of the Seismological Society of America (BSSA)*, 93(3), 1099-1131.
- Mavroeidis, G.P., Dong, G., Papageorgiou, A.S., 2004. Near-fault ground motions, and the response of elastic and inelastic single degree of freedom (SDOF) systems, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 33, 1023-1049.
- MATLAB Software, <https://www.mathworks.com/>, 2009.
- Mollaioli, F., Bruno, S., Decanini, L.D., Panza, G.F., 2006. Characterization of the dynamic response of structures to damaging pulse-type near-fault ground motions, *Meccanica*, 41, 23-46.
- Nadim, A., Meshkat-Dini, A., 2025. Analytical synthesis of pulse-like strong near-fault ground motions through a parametric closed-form approach, *Journal of Theoretical and Applied Vibration and Acoustics*, doi: 10.22064/tava.2025.2028274.1239
- Puglia, R., Russo, E., Luzi, L., D'Amico, M., Felicetta, C., Pacor, F., Lanzano, G., 2018, Strong motion processing service: a tool to access and analyze earthquakes strong motion waveforms, *Bulletin of Earthquake Engineering (Springer)*, 16(7), 2641-2651, <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0299-z>.
- Rahnema, H., Mirassi, S., Dal Moro, G., 2021. Cavity effect on Rayleigh wave dispersion and P-wave refraction, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 20(1), doi: <https://doi.org/10.1007/s11803-021-2006-y>
- Rodriguez-Marek, A., Bray, J.D., 2006. Seismic site response for near-fault forward directivity ground motions, *Journal of Geotechnical and Geo-Environmental Engineering*, 132(12), 1611-1620.
- Rupakhety, R., Sigbjörnsson, R., 2011. Can simple pulses adequately represent near-fault ground motions?, *Journal of Earthquake Engineering*, 15, 1260-1272.
- Singh, P.G., 1985. Earthquake ground motions: Implications for designing structures and reconciling structural damage, *Earthquake Spectra*, 1(2), 239-270.
- Somerville, P.G., 1998. 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.
- Somerville, P.G., 2003. Magnitude scaling of the near fault rupture directivity pulse, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 137(1), 201-212.
- Trifunac, M.D., Todorova, M.I., 2012. Duration of strong ground motion during Northridge, California, earthquake of January 17 1994, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 38, 119-127.
- Trifunac, M.D., Todorova, M.I., 2013. A note on the power of strong ground motion during the January 17, 1994 earthquake in Northridge, California, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 52, 13-26.
- Vaseghi Amiri, J., Davoodi, M.R., Sahafi, A., 2008. Simulation of near-fault ground motion with equivalent pulses and compare their effects on MRF structures, 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, Beijing, China.
- Yaghmaei- Sabegh, S., 2020. Frequency content parameters of the ground motions from the 2017 Mw 7.3 Ezgeleh earthquake in Iran, *Natural Hazards*, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03876-2>.
- Yi, J., Tsang, H., 2024. Characteristics of earthquake ground motions requiring extended dynamic analysis, *Australian Journal of Structural Engineering*, 25(1), 20-33.