

# برازش و تعیین پارامترهای مدل فرم بسته برای جنبش شدید زمین تحت رگوردهای نیرومند زلزله در حوزه نزدیک گسل

علی قنبری استاد دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران ghanbari@khu.ac.ir	افشین مشکوه‌الدینی* استادیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران meshkat@khu.ac.ir	مهشاد جمعدار کارشناسی ارشد مهندسی زلزله دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران std_mahshadjamdar@khu.ac.ir
---	---	--

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۰۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۲۰

## چکیده

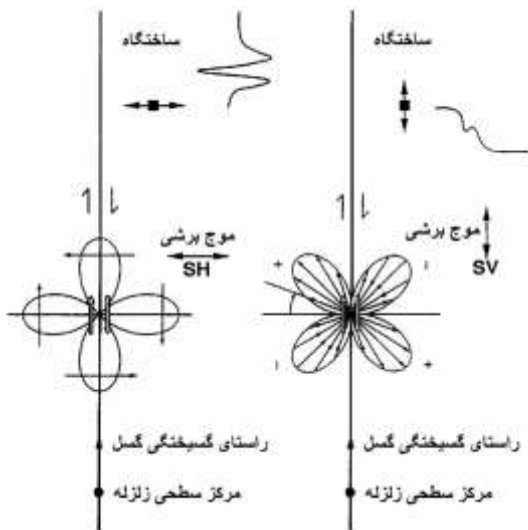
جنبش‌های نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل دارای مشخصات خاصی بوده و تاریخچه زمانی این فرایندها می‌تواند دارای پالس‌های بزرگ با پریود بلند سرعت و نیز موجک‌های تغییر مکان پایه با هر دو ماهیت استاتیکی و دینامیکی باشد. رگوردهای نیرومند ناشی از لرزش‌ها و ارتعاشات شدید زمین در حوزه نزدیک گسل‌های فعال، دارای قابلیت بالای آزادسازی انرژی و ایجاد جنبش‌های نیرومند ضربه‌ای و نیز توانایی شگرف در آشکارسازی پالس‌های بزرگ در تاریخچه زمانی هستند. بر این پایه، در جهت شناخت و مفهوم‌سازی جامع‌تر جنبش‌های نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل، می‌توان مدل‌های برازشی فرم بسته را با توجه به مشخصات ساختارهای موج‌گونه در تاریخچه زمانی، رابطه‌سازی نمود. در این مطالعه با تفسیر و کاربرد دو عبارت ترکیبی مثلثاتی، به موضوع مدل‌سازی ساختارهای موجی شکل موجود در تاریخچه زمانی رگوردهای حوزه نزدیک پرداخته شده است. عبارات مذکور، دارای قابلیت برازش شکل و ساختار پالس‌های سرعت و شتاب هستند. همچنین، روند شبیه‌سازی‌های فرم بسته به گونه‌ای انجام شده که علاوه بر برازش پالس‌های موجود در رکورد شتاب و تاریخچه زمانی سرعت زمین، ساختارهای حاصله نیز دارای شباهت هر چه بیشتر با رکورد واقعی باشد. در همین راستا، پس از مدل‌سازی پالس‌های مذکور، دامنه تغییرات انرژی جنبشی حمل شده توسط رکورد واقعی و نیز نگاشت مصنوعی، محاسبه و با هم مقایسه شده‌اند. نتایج این تحقیق، نشان‌گر قابلیت‌های خوب و مؤثر کاربردی برای مدل برازشی فرم بسته است.

**واژگان کلیدی:** زلزله حوزه نزدیک، تاریخچه زمانی، جنبش پالس‌گونه، مدل فرم بسته، انرژی جنبشی

## ۱. مقدمه

وقوع زمین‌لرزه‌ها در طول تاریخ، همواره به عنوان یک تهدید بزرگ طبیعی، تلقی شده و به همین دلیل انسان پیوسته در پی یافتن راه حلی برای کاهش خطرات احتمالی در مناطق مستعد زمین‌لرزه بوده است. ساختار و ماهیت فرایند زمین ساخت<sup>۱</sup> (تکتونیک) بسیار پیچیده است [۱]. در دهه‌های اخیر، به ویژه پس از رخدادهای لرزه‌ای نیرومند و ویران‌گر نظیر زلزله‌های لندرز<sup>۲</sup> ۱۹۹۲ و نورتریج<sup>۳</sup> ۱۹۹۴ و کالیفرنیا، کوبه<sup>۴</sup> ۱۹۹۵ و توهوکو<sup>۵</sup> ۲۰۱۱ ژاپن، چی چی<sup>۶</sup> ۱۹۹۹ تایوان، دارفیلد<sup>۷</sup> ۲۰۱۰ و کریسچرچ<sup>۸</sup> ۲۰۱۱ نیوزلند، بم<sup>۹</sup> ۲۰۰۳ و ازگله<sup>۱۰</sup> کرمانشاه ۲۰۱۷ ایران، توجه به زمین لرزه‌های حوزه نزدیک گسل و خسارات محتمل وارده به سازه‌های طراحی شده بر اساس آیین‌نامه، صورت ویژه‌ای به خود گرفته است. خصوصیات جنبش‌های حوزه نزدیک گسل‌های فعال، وابسته به مشخصات چشمه لرزه‌زا شامل جهت گسیختگی گسل نسبت به سایت و راستای عمومی لغزش گسل است [۲]. یکی از مشخص‌ترین خصوصیات بارز جنبش‌های حوزه نزدیک متأثر از فرایند جهت‌داری، تولید پالس‌های با دامنه بزرگ و پریود بلند در تاریخچه زمانی سرعت زمین و اسپایک‌های پرانرژی و به نسبت کوتاه مدت در رکورد شتاب زلزله است [۳]. ایجاد اثرات نیرومند جهت‌داری در شرایطی است که در فرایند شکل‌گیری و انتشار گسیختگی به سمت سایت، سرعت انتشار امواج برشی، برابر یا نزدیک به سرعت شکست ساختار زمین باشد. این فرایند نیز سبب ایجاد یک جنبش لرزه‌ای بسیار نیرومند و آزاد شدن مقادیر قابل توجه انرژی در قالب یک مؤلفه پالس‌گونه، به‌ویژه در بخش ابتدایی تاریخچه زمانی سرعت ارتعاشات زمین می‌گردد [۴ و ۵]. ساختار و الگوی تابشی جابه‌جایی برشی بر روی گسل باعث شکل‌گیری پالس‌های بزرگ تغییر مکان زمین خواهد شد. مطابق همین موضوع نیز برای هر رکورد زلزله، دو مؤلفه افقی نیرومند و یک مؤلفه قائم حاوی باند

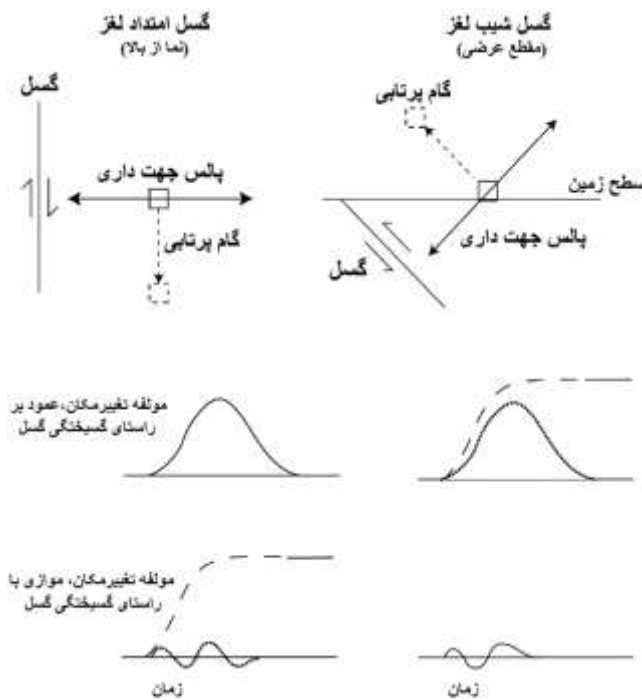
فرکانس‌های پرانرژی وجود خواهد داشت. مؤلفه افقی با راستای عمود بر صفحه شکست (یا گسیختگی) گسل<sup>۱۱</sup> (مؤلفه TR) دارای مشخصات طیفی بزرگ‌تر و سهم انرژی جنبشی بیشتر نسبت به مؤلفه افقی موازی با صفحه شکست گسل<sup>۱۲</sup> (مؤلفه LN) است. نکته دیگر آن که شرایط ایجاد فرایند جهت‌داری پیش‌رونده در گسل‌های امتداد لغز<sup>۱۳</sup>، زمانی اتفاق می‌افتد که ساختار هندسی انتشار امواج برشی SH با حداکثر انرژی در راستای جنبش نیرومند زمین بوده و همچنین ساختار فیزیکی شکست در صفحه گسل نیز به شکل یک سوپه یا دو سوپه در همان جهت انتشار گسیختگی باشد. بدین ترتیب، فرایند پخش و پراکندگی امواج برشی SV با حداقل انرژی در راستای انتشار گسیختگی گسل بوده و مجموعه‌ای از جنبش‌های دامنه کوچک دینامیکی به صورت موازی با راستای صفحه شکست ایجاد خواهد شد. اندازه این ساختارهای کوچک در مقایسه با پالس یک سوپه استاتیکی تغییر مکان<sup>۱۴</sup> (یا گام پرتابی) به نسبت کوچک است [۶].



شکل ۱. نمایش ساختار فیزیکی ارتعاشات حاصل از فعالیت گسل با مکانیزم امتداد لغز؛ شکل سمت چپ نمایش‌گر الگوی انتشار امواج برشی SH است و شکل سمت راست الگوی انتشار امواج برشی SV را نشان می‌دهد [۶].

شکل ۱ ساختار فیزیکی و چگونگی انتشار جنبش نیرومند زمین و روند جهت‌گیری امواج برشی زلزله در فرایند لرزش یک گسل امتداد لغز را نمایش می‌دهد. همچنین، شرایط جهت‌داری پیش‌رونده در یک گسل با مکانیزم شیب لغز، در هم‌زمانی جهت گسیختگی و جهت لغزش به سمت بالای صفحه عمومی گسیختگی اتفاق می‌افتد. بدین ترتیب، حرکت‌های دینامیکی بزرگ‌تر و تغییر مکان‌های احتمالی استاتیکی در راستای عمود بر صفحه گسیختگی گسل ایجاد می‌شوند. همچنین، اندازه و دامنه پالس‌های دو سویه دینامیکی در مقایسه با پالس تغییر مکان استاتیکی (یا گام

پرتابی)، می‌تواند قابل توجه باشد. شکل ۲ نمایشی از ساختار جابه‌جایی‌های استاتیکی و دینامیکی در دو فرایند گسلش امتداد لغز و شیب لغز است [۷]. زمینه‌های پژوهشی مرتبط با مدیریت بحران، پیشگیری و کاهش سوانح ناشی از زلزله، همچنین مقوله‌های طراحی مهندسی، نیازمند فرایند پردازش و تحلیل جامع اطلاعاتی جنبش‌های نیرومند زمین است. اهمیت این موضوع با توجه به وقوع احتمالی زلزله‌های بزرگ با دوره بازگشت طولانی و نیاز به تکمیل و سازمان‌دهی پایگاه‌های لرزه‌نگاری، نمود بیشتری پیدا می‌نماید.



شکل ۲. نمایش الگوی جهت‌گیری پالس‌های ایجاد‌کننده گسیختگی پیش‌رونده و جابه‌جایی زمین (بخش بالایی شکل ۲) برای گسل امتداد لغز (قسمت چپ) و برای گسل شیب لغز (قسمت راست)؛ نمایش الگوی تقسیم بندی پالس‌های پیوسته پیش‌رونده و جابه‌جایی زمین بین مؤلفه‌های موازی و عمود نسبت به صفحه شکست گسل (بخش پایینی شکل ۲)؛ قسمت موجی شکل حاصل از حرکت استاتیکی (یا گام پرتابی) زمین با خط چین نشان داده شده است [۷].

بدین لحاظ می‌توان با استفاده از مدل‌های فرم بسته محاسباتی و پردازش داده‌های لرزه‌نگاری موجود، شبیه‌سازی عددی و برازش تحلیلی نگاشت‌های مصنوعی هم‌پایه با رکوردهای نیرومند زلزله را انجام داد. بررسی‌ها و

ارزیابی‌های محاسباتی صورت گرفته توسط علوی و همکاران، [۸] ۲۰۰۱، ماورودیس و همکاران، [۹] ۲۰۰۳، حسینی واعظ و همکاران، [۱۰] ۲۰۱۳، میماگلو و همکاران، [۱۱] ۲۰۱۴، دباقی و همکاران، [۱۲] ۲۰۱۸، پولیا و

همکاران، ۲۰۱۸ [۱۳] از جمله پژوهش‌های برجسته این زمینه به شمار می‌آیند.

یک جنبه کاربرد این ساختارهای تحلیلی فرم بسته، در تقریب‌سازی و برازش بخش پراثری رکوردهای نیرومند زلزله و ساخت نگاشت‌های هم‌پایه متأثر از فرکانس‌های پراثری آنها است. نکته دیگر آن که می‌توان با توجه به تعداد و دامنه عددی فرکانس‌های موجود در ساختار طیفی پالس ترکیبی فرم بسته، و مشابهت و نزدیکی آنها با فرکانس ارتعاش طبیعی و نیز چند فرکانس متناظر با مودهای پایین‌تر سازه، موضوع اثرات انتشار امواج لرزه‌ای در اسکلت مقاوم و چگونگی تشکیل ساختارهای موضعی غیرخطی و ایجاد وضعیت احتمالی ناپایداری سازه را مطالعه نمود [۱۴ و ۱۵].

هدف از تحقیق حاضر، تدوین یک نگرش تحلیلی در موضوع شبیه‌سازی پالس‌های ترکیبی و پیوسته با استفاده از روابط فرم بسته مثلثاتی است. نکته مهم در این خصوص آن است که مدل‌های فرم بسته علاوه بر برازش ظاهری پالس‌های سرعت، به‌گونه‌ای مناسب قادر به توصیف ماهیت فیزیکی و طیفی حرکات نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل هستند.

## ۲. مدل فرم بسته برازشی پالس سرعت

روابط تحلیلی با ساختار پارامتری جبری و مثلثاتی برای برازش و شبیه‌سازی پالس پیوسته سرعت متشکل از یک موجک با فرکانس پایین، پدیدار شده در تاریخچه رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک ارائه شده است. در این زمینه ماکریز<sup>۱۵</sup> و همکاران [۱۶] روابط فرم بسته مثلثاتی را با سه ساختار پارامتر موجک‌های برازشی A، B و C برای توصیف پالس‌های سرعت با شکل‌های متفاوت ارائه نموده‌اند. روابط ریاضی پالس‌های سرعت فوق به صورت ساختارهای تک پیوند، برازش و هم‌پوشانی می‌شود. همچنین، ارزیابی تحلیلی توابع شتاب و جابه‌جایی زمین نیز

متناظر با این پالس‌های فرم بسته صورت می‌گیرد. پارامترهای ورودی برای توصیف مدل‌های برازشی A، B و C شامل پیوند پالس، دامنه پالس، زاویه فاز است. تابع تحلیلی پالس سرعت در مدل‌های برازشی فوق متناظر با شکل پالس‌ها به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\text{Pulse A} = \frac{Vp}{2} - \frac{Vp}{2} \cos(\omega t); \quad (1)$$

$$0 < t < T_p$$

$$\text{Pulse B} = Vp \sin(\omega t); \quad (2)$$

$$0 < t < T_p$$

$$\text{Pulse C} = Vp \cos(\omega t + \phi) - Vp \sin(\phi); \quad (3)$$

$$0 < t < T_p$$

پارامتر  $T_p$  در روابط فوق برابر با پیوند پالس،  $Vp$  برابر با مقدار بیشینه سرعت پالس و  $\phi$  زاویه فاز هستند. تعیین اعداد با تقریب مناسب برای پارامترهای یاد شده، مستلزم انجام چنین چرخه محاسبات جایگزین و برازش‌های تطبیقی است. مدل پیشنهادی منون<sup>۱۶</sup> و همکاران [۱۷] با پنج پارامتر، برای توصیف پالس‌های تک پیوندی در تاریخچه رکوردهای حوزه نزدیک بر پایه یک تحلیل رگرسیون غیرخطی بیان می‌شود. سرعت بیشینه پالس، پیوند پالس، زمان شروع پالس و ضرایب شکل پالس، پارامترهای مهم در این تحلیل برازشی است. این مدل فرم بسته، ترکیبی از توابع نمایی و مثلثاتی در برازش پالس سرعت ناشی از جنبش نیرومند زمین است. ساختار پارامتری این مدل فرم بسته به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Pulse M} = Vp \exp\left(-n_1 \left(\frac{3}{4} T_p - t + t_0\right)\right) \times \sin\left(\frac{2\pi}{T_p}(t - t_0)\right); \quad (4)$$

$$t_0 < t < t_0 + \frac{3}{4} T_p$$

$$\text{Pulse M} = V_p \exp\left(-n_2\left(t - t_0 + \frac{3}{4}T_p\right)\right) \times \sin\left(\frac{2\pi}{T_p}(t - t_0)\right); \quad (5)$$

$$t_0 + \frac{3}{4}T_p < t < t_0 + T_p$$

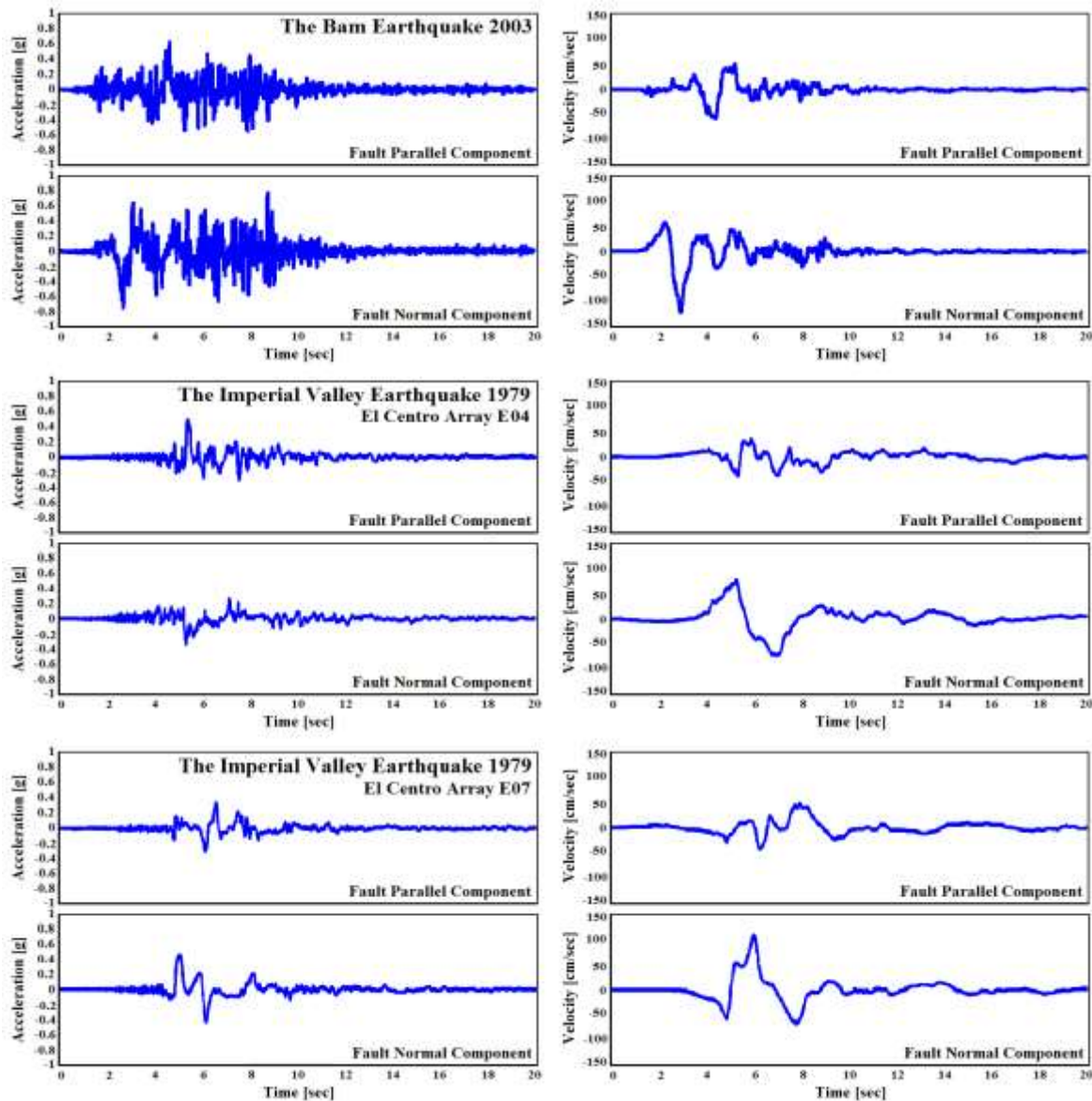
پارامترهای  $V_p$  و  $T_p$  به ترتیب برابر با بیشینه سرعت زمین و پریود پالس سرعت بوده و  $t_0$  زمان شروع پالس است. پارامترهای  $n_1$  و  $n_2$  نیز دو ضریب شکل برازشی هستند و براساس رگرسیون غیرخطی با در نظر گرفتن شکل پالس سرعت به دست می‌آیند.

### ۳. رکوردهای انتخابی در این پژوهش

مشخصه و معیار اساسی در انتخاب رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک، حضور پالس‌های پیوسته و پردامنه در تاریخچه تغییرات سرعت زمین است. ویژگی بارز این رکوردها نیز آزاد شدن مقدار زیاد انرژی در یک بازه زمانی به نسبت کوتاه است. خصوصیت مشترک رکوردهای انتخابی برپایه ساختگاه با خاک نوع II است. این نوع خاک

بیشتر از نوع سنگ‌های به نسبت سست بوده که شامل شن و ماسه متراکم، رس بسیار سخت با ضخامت بیشتر از ۳۰ متر بوده و مشخصات دینامیکی آن با افزایش عمق، دچار تغییرات نسبی و گرایش به ساختارهای فشرده پیوسته پیدا می‌نماید. سنگ‌های آذرین و رسوبی سست مانند توف و یا سنگ متورق و یا به‌طور کامل هوازده در این دسته جای می‌گیرند. متوسط سرعت موج برشی در لایه‌های مختلف خاک تا عمق ۳۰ متری بین ۳۷۵ تا ۷۵۰ متر بر ثانیه است [۱۸].

ساختار تحلیلی پالس‌های سرعت در تاریخچه زمانی هر سه رکورد نیرومند انتخابی، دارای خصوصیات فیزیکی و طیفی متفاوت می‌باشند. رکورد دو ایستگاه E04 و E07 از زلزله امپریال ولی<sup>۱۷</sup> حاوی مجموعه‌ای از پالس‌های کوچک و اسپایک‌های دامنه متوسط شتاب است که در شکل ۳ مشاهده می‌شود.



شکل ۳. نمودارهای تاریخچه زمانی شتاب (مؤلفه‌های افقی LN و TR) و سرعت زمین مربوط به سه رکورد نیرومند حوزه نزدیک انتخاب شده از دو زلزله بزرگ شهر بم ۲۰۰۳ ایران و حوزه دره امپریال ۱۹۷۹ کالیفرنیا، (جدول ۱).

زمانی کوتاه به‌ویژه در انتهای بازه زمانی هر دو پالس اصلی سرعت در تاریخچه دو مؤلفه LN و TR از رکورد BAM است که سبب ایجاد یک تعداد جهش‌های کوچک در روند آزاد شدن انرژی جنبشی پس از پالس اصلی می‌شود. ساختار پیوسته حاوی چند موجک پر دامنه و پریود بزرگ نیز برای پالس پیوسته سرعت مربوط به دو رکورد E04 و E07 دیده می‌شود. مشخصات لرزه‌شناسی رکوردهای انتخابی در جدول ۱ آورده شده است.

ساختار پیوسته و مشخص پالس‌های سرعت در هر دو مؤلفه LN و TR بیان‌گر ویژگی‌های جهت‌داری پیش‌رونده است و به عنوان یک معیار در سنجش تحلیلی مدل ریاضی تعمیم یافته در این تحقیق، مد نظر بوده است. مطابق شکل ۳ یک ویژگی مشخص رکورد BAM حضور تعداد بسیار زیاد اسپایک‌های به نسبت پر دامنه شتاب است و این مورد برای دو رکورد دیگر دارای ساختار به نسبت متفاوتی است. نکته دیگر نیز وجود چندین اسپایک با گام

شایان ذکر است که در این مطالعه طبق تعریف علوی و کراوینکلر، ۲۰۰۱، موقعیت ثبت رکوردها با فاصله کمتر از ۱۵ کیلومتر تا صفحه شکست گسل به عنوان معیار حوزه نزدیک انتخاب شده است. ساختار و ماهیت فیزیکی رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک با توجه به کوتاهی فاصله میان منبع لرزه‌زا تا ساختگاه، دارای نمود ناچیزی از اثرات کاهندگی بوده و بخش بزرگی از محتوای فرکانسی رکورد،

حمل‌کننده مقادیر قابل توجه انرژی جنبشی است. بروز مشخصات فرایند جهت‌داری پیش‌رونده در هنگام زلزله‌های شدید، به‌گونه‌ای است که روند گسیختگی و جهت لغزش گسل به سمت ساختگاه گسترش می‌یابد. افزون بر این مطلب، سایت مورد نظر نیز در محدوده کمتر از ۱۵ کیلومتر قرار داشته و در مسیر انتشار گسیختگی گسل واقع شده است [۱۹ و ۲۰].

جدول ۱. مشخصات رکوردهای حوزه نزدیک انتخابی، شامل مؤلفه‌های افقی با جهت موازی و عمود نسبت به راستای عمومی صفحه

گسیختگی گسل (مؤلفه‌های افقی LN و TR)

نام زلزله و رکورد انتخابی	مؤلفه افقی	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)	بزرگای مومنتوم Mw
زلزله شهر بم ۲۰۰۳	LN	۰/۶۳۵	۵۹/۶۱	۲۰/۷۰	۶/۶
Bam City (BAM) – ۱/۰ km	TR	۰/۷۹۳	۱۲۳/۷	۳۷/۴۰	
زلزله امپریال ولی ۱۹۷۹	LN	۰/۴۸۴	۳۷/۳۵	۲۰/۲۳	۶/۵
El Centro Array (E04) – ۶/۵ km	TR	۰/۳۶۰	۷۶/۵۲	۵۸/۹۳	
زلزله امپریال ولی ۱۹۷۹	LN	۰/۳۳۸	۴۷/۶۱	۲۴/۶۸	۶/۵
El Centro Array (E07) – ۰/۶ km	TR	۰/۴۶۳	۱۰۹/۳	۴۴/۷۴	

#### ۴. شبیه‌سازی پالس سرعت با کاربرد مدل فرم بسته برازشی

با توجه به این که محتوای فرکانسی پرنرژی متناظر با بخش پالس‌گونه یک رکورد نیرومند حوزه نزدیک به صورت تک پرپود و یک فرایند تصادفی باند باریک در مدل‌های فرم بسته پیشین در نظر گرفته شده، استفاده از برازش مدل فرم بسته رکورد با لحاظ نمودن بازه گسترده‌تری از پالس سرعت و اسپایک‌های هر دو سوی آن، همگام با ترکیب اثرات چند فرکانس اصلی پرنرژی توصیه شده است. بر این اساس، کاربرد مدل‌های فرم بسته تعمیم یافته در تحقیق حاضر با هم‌پوشانی مناسب محاسباتی، می‌تواند تصویر کاملی از پالس‌های پیوسته و چند موجکی موجود در تاریخچه زمانی یک رکورد حوزه نزدیک حاوی اثرات جهت‌داری پیش‌رونده را ارائه دهد.

برازش‌های انجام شده در این پژوهش بر پایه انطباق هر چه بیشتر شکل و هندسه پالس‌های سرعت و نیز سهم انرژی جنبشی حمل‌شده، با مقادیر متناظر مربوط به رکورد اصلی است. نخستین مدل تعمیم یافته در این تحقیق که برگرفته از روش منون [۱۷] است، بر پایه یک عبارت ترکیبی ریاضی متشکل از حاصل ضرب تابع نمایی در توابع مثلثاتی (تابع سینوسی با توان فرد) است. قابلیت برازشی این مدل تعمیم یافته نیز در هم‌پوشانی پالس بزرگ اصلی و موجک‌های پر دامنه پیش و پس از آن است. انتخاب پارامترهای به کار برده شده در عبارت پارامتری معادله ۶ بر پایه هم‌پوشانی مناسب با رکورد اصلی است و بر مبنای روش سعی و خطا به دست می‌آید. همچنین در همین موضوع نیز انطباق نمودار انرژی جنبشی متناظر با مدل فرم بسته (نگاشت تعمیم یافته)، با رکورد اصلی از شاخص‌های

مهم است. ساختار پارامتری تعمیم یافته بر اساس عبارت فرم بسته زیر تدوین شده است:

$$Vp \exp[-n_s(t - t_0)] \times \sin^n(\omega(t - t_0)); \quad (6)$$

$$t_0 < t < T_p$$

نماد  $Vp$  ماکزیمم سرعت، پارامترهای  $n_s$  ضریب شکل برازشی،  $n$  ضریب توان است که برای برازش پالس‌های سرعت در تاریخچه زمانی رکوردهای انتخابی، براساس آزمون و خطا تعیین می‌شوند. ساختار تحلیلی حاصل از پیاده‌سازی محاسباتی فرایند مذکور برای برازش فرم بسته پالس و اسپایک‌های پردامنه سرعت موجود در تاریخچه زمانی مؤلفه TR رکورد E07 به صورت عبارات جبری زیر در بازه‌های زمانی مشخص شده است که در شکل ۳ مشاهده می‌شود:

$$-57.366 \exp(-0.09(t - 4.4)) \times \sin^3(5.66(t - 4.4));$$

$$4.4 < t < 4.955 \text{ sec}$$

$$109.234 \exp(-0.06(t - 4.96)) \times \sin^3(1.67(t - 4.96));$$

$$4.96 < t < 6.83 \text{ sec}$$

$$-67.674 \exp(-0.06(t - 6.84)) \times \sin^3(1.68(t - 6.84));$$

$$6.835 < t < 8.725 \text{ sec}$$

قابل ذکر است که در برازش رکورد E07 برای هم‌پوشانی مناسب پالس پیوسته سرعت با رکورد واقعی و همچنین انطباق بیشتر با روند آزاد شدن انرژی جنبشی، از تابع توان فرد سینوس استفاده شده است.

مدل تعمیم یافته دیگر نیز برگرفته از روش ماکریس [۱۶] است و در روند تعمیم محاسباتی در تحقیق حاضر، به جای استفاده از یک پالس تک پریودی (مطابق مرجع مذکور) از

پالس‌های با پریود مختلف و متشکل از عبارت پارامتری دارای تابع سینوس با توان فرد، برای برازش و مدل‌سازی استفاده می‌شود. پریود و دامنه پالس، پارامترهای تعریف‌کننده شکل پالس پیوسته سرعت و تغییر مکان در این مدل فرم بسته هستند. پیاده‌سازی این مدل تعمیم یافته، بر اساس برازش پالس اصلی و موجک‌های پردامنه دو سوی آن با استفاده از توان فرد تابع سینوس است. همچنین جهت حصول هم‌پوشانی هر چه بیشتر با رکورد اصلی، تطابق‌های محاسباتی با روش سعی و خطا صورت می‌گیرد. فرایند تحلیلی و برازش‌های محاسباتی یاد شده، در مورد پالس کوچک و اسپایک کم دامنه شتاب نیز به روش مشابه انجام می‌شود. رابطه اصلی پارامتری تعمیم یافته برای برازش پالس پیوسته و موجک‌های وابسته آن به صورت عبارت پارامتری رابطه ۸ تنظیم شده است:

$$Vp \sin^n(\omega(t - t_0)); \quad t_0 < t < t_1 \quad (8)$$

توضیح آن که در این عبارت فرم بسته، پارامترهای  $\omega$ ،  $Vp$ ،  $n$  به ترتیب فرکانس دورانی و دامنه و توان تابع سینوس برازش کننده پالس (موجک) هستند. انتخاب پارامترهای فوق در هر بازه پریودیک در داخل گام زمانی پالس پیوسته سرعت، بر مبنای انطباق هر چه بهتر بیشینه سرعت پالس معادل شده با رکورد اصلی صورت می‌گیرد. روند تحلیلی برازش پالس پیوسته سرعت در تاریخچه زمانی رکورد BAM با استفاده از فرمول بالا انجام گردیده و موجک‌های کوچک و اسپایک‌های کم دامنه موجود در قبل از پالس اصلی سرعت نیز به خوبی هم‌پوشانی شده‌اند. عبارات ریاضی برای برازش فرم بسته مربوط به پالس پیوسته و موجک‌های سرعت در مؤلفه TR از رکورد BAM به صورت روابط ۹ در بازه‌های زمانی مشخص شده است و در شکل ۳ مشاهده می‌شود:



پیاده‌سازی هر دو مدل تعمیم یافته در این تحقیق بر روی رکوردهای حوزه نزدیک انتخابی آورده شده در جدول ۱ صورت گرفته و نتایج بسیار نزدیک به یکدیگر هستند. برآزش‌ها و هماهنگ‌سازی محاسباتی نیز شامل پالس‌های پیوسته موجود در تاریخچه زمانی سرعت و تغییر مکان، نمودار آزاد شدن انرژی جنبشی رکورد در بازه زمانی پالس سرعت است. نتایج حاصل از پژوهش حاضر نشان‌دهنده برآزش کارآمد برای پالس‌های سرعت و دیگر مشخصات طیفی متناظر با دو مؤلفه موازی با صفحه شکست گسل (مؤلفه LN) و نیز عمود بر صفحه مذکور (مؤلفه TR) از رکوردهای نیرومند E04 و E07 و BAM است. بر پایه مدل‌های تعمیم یافته در پژوهش حاضر، این امکان فراهم شده که علاوه بر تطبیق مناسب پالس پیوسته و اسپایک‌های پردامنه موجود در تاریخچه زمانی سرعت، برآزش تحلیلی جابه‌جایی زمین و انرژی جنبشی نیز هم‌پوشانی مناسبی را داشته باشند. شکل ۴ نمایش دقیقی از تاریخچه زمانی متناظر با بازه ۱۰ ثانیه مربوط به پالس اصلی سرعت و اسپایک‌های پردامنه دو سوی آن را برای مؤلفه عمود بر راستای عمومی شکست گسل (مؤلفه TR) از سه رکورد نیرومند و حوزه نزدیک E04 و E07 و BAM را نشان می‌دهد.

نکته دیگر آن که متناظر با پالس بزرگ سرعت رکورد، پالس پیوسته تغییر مکان و بازه زمانی مربوط به گام پرش پلکانی در نمودار تجمعی آزاد شدن انرژی دیده می‌شود. محورهای زمانی متناظر با نقاط فراز در پالس اصلی سرعت، به صورت هم‌ارز با موقعیت‌های زمانی نقاط نشیب در پالس پیوسته تغییر مکان هستند. مجموعه متشکل از موجک اصلی در پالس پیوسته و چندین اسپایک پردامنه همراه که دارای گام زمانی به نسبت بلند هستند، ایجاد کننده گام پرش پلکانی در نمودار تجمعی آزاد شدن انرژی رکورد بوده و پس از آن نیز در یک روند هموار شونده، یک یا دو جهش کوچک پس بازه زمانی پالس اصلی، پدیدار

$$21.14 \sin(6.15(t - 2.295));$$

$$2.295 < t < 2.805 \text{ sec}$$

$$20.79 \sin(9.1(t - 3.225))$$

$$3.225 < t < 3.57 \text{ sec}$$

$$-48.36 \sin(3.67(t - 3.575))$$

$$3.575 < t < 4.43 \text{ sec}$$

$$61.124 \sin(3.88(t - 4.435))$$

$$4.435 < t < 5.245 \text{ sec}$$

$$-29.539 \sin^3(3.27(t - 5.25))$$

$$5.25 < t < 6.21 \text{ sec}$$

$$9.424 \sin^3(11.58(t - 6.22))$$

$$6.22 < t < 6.485 \text{ sec}$$

ساختار فرم بسته برآزش شده برای پالس بزرگ و پردامنه

موجود در مؤلفه TR از رکورد E07 نیز به شرح روابط ۱۰

در بازه‌های زمانی مربوطه است که در شکل ۳ آمده است:

$$-0.114 \sin(5.37(t - 4.195))$$

$$4.195 < t < 4.78 \text{ sec}$$

$$0.463 \sin(8.15(t - 4.785))$$

$$4.785 < t < 5.17 \text{ sec}$$

$$-0.064 \sin(13.36(t - 5.175))$$

$$5.175 < t < 5.41 \text{ sec}$$

$$-0.426 \sin^3(6.34(t - 5.925))$$

$$5.925 < t < 6.42 \text{ sec}$$

$$-0.106 \sin^3(2.41(t - 6.425))$$

$$6.425 < t < 7.725 \text{ sec}$$

$$0.209 \sin^3(4.87(t - 7.73))$$

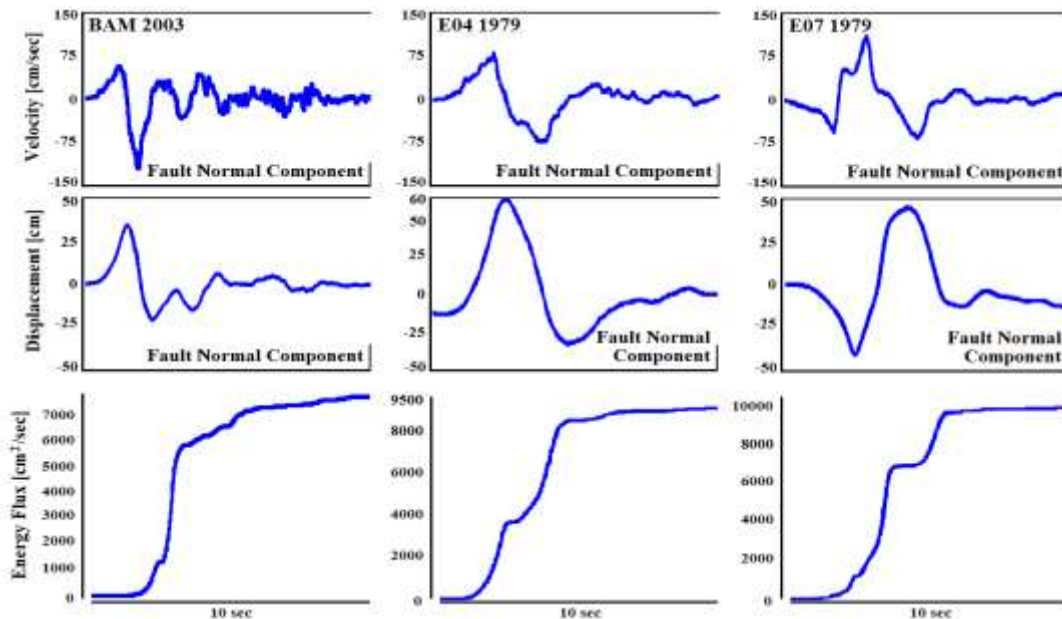
$$7.73 < t < 8.375 \text{ sec}$$

(۹)

(۱۰)

روندهای تحلیلی برای برازش و پوشش طیفی هر چه کارآمدتر رکوردهای نیرومند زلزله و اثرات جهت‌داری، وابستگی کامل با شناخت مجموعه مشخصات فوق را دارد [۱۹-۲۰].

خواهد شد. این فرایند نیز ایجادکننده یک جنبش نیرومند و پرنرژی ضربه‌ای زمین به‌ویژه در فواصل کمتر از ۲۰ کیلومتر و در حوزه بروز اثرات جهت‌داری پیش‌رونده در نزدیک گسل خواهد شد. تدوین ساختارهای محاسباتی و



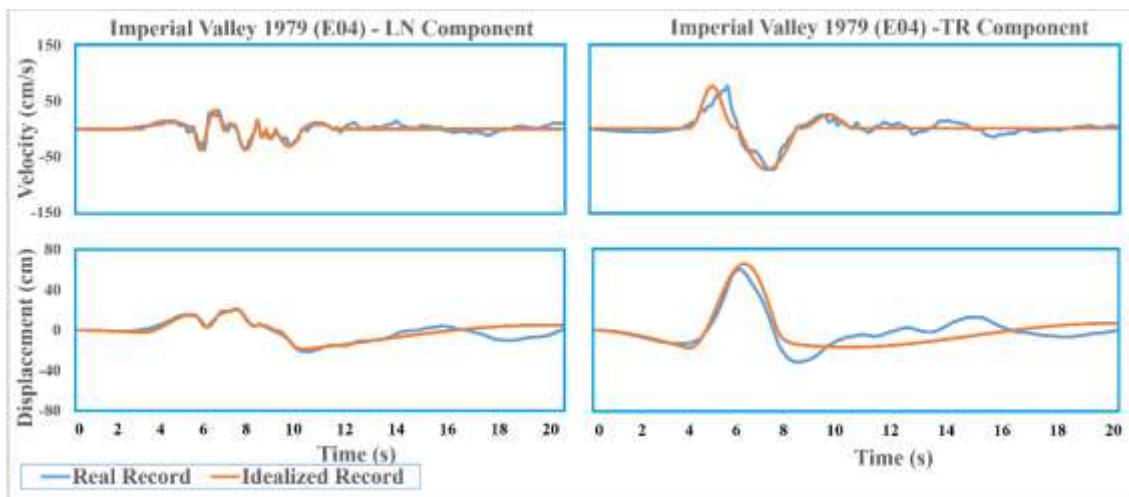
شکل ۴. بازه زمانی ۱۰ ثانیه متناظر با پالس پیوسته و پدیده سرعت مربوط به مؤلفه TR از سه رکورد نیرومند حوزه نزدیک انتخابی همراه با ساختار موجی شکل پالس بزرگ تغییر مکان و نمودار روند تجمعی آزاد شدن انرژی.

ناچیزی در روند آزاد شدن انرژی جنبشی در طی زمان به نسبت طولانی دارند. مقایسه نمودارهای آورده شده در شکل‌های ۵ تا ۱۰ مربوط به رکورد واقعی و نگاشت مصنوعی برای هر سه رکورد حوزه نزدیک E04، E07، BAM، مؤید این موضوع است. شکل‌های ۵، ۷ و ۹ در برگیرنده نتایج برازش پالس بزرگ و اسپایک‌های پدیده همراه آن در تاریخچه زمانی سرعت و جابه‌جایی مربوط به مؤلفه موازی با صفحه شکست گسل (مؤلفه LN) و نیز عمود بر این صفحه (مؤلفه TR) از رکوردهای E04، E07 و BAM است. شکل‌های ۶، ۸ و ۱۰ نیز نمایش‌دهنده روند تجمعی آزاد شدن انرژی مربوط به رکوردهای انتخابی جدول ۱ و نگاشت‌های برازشی متناظر هستند. نمودارهای مربوط به

وقوع فرایند انتشار گسیختگی گسل با سرعت نزدیک به سرعت موج برشی به سمت یک ساختگاه، سبب ایجاد اثرات نیرومند جهت‌داری پیش‌رونده می‌شود. همچنین، برقراری یک وضعیت درهم آمیختگی و انباشت امواج لرزه‌ای در جبهه گسترش یابنده انتشار گسیختگی گسل نیز منجر به تشکیل یک پالس مشخص پدیده و با پریود بلند در تاریخچه زمانی رکوردهای ثبت شده در منطقه تأثیر پذیرفته از فرایند جهت‌داری پیش‌رونده خواهد شد. نمایش پالس‌های بزرگ و پرنرژی نیز بیشتر در شکل یک ساختار منفرد موجک مانند و یا ترکیبی از چند موجک پدیده است [۲۱ و ۲۲]. توضیح تکمیلی آن که در بقیه بازه زمانی یک رکورد نیرومند حوزه نزدیک، مجموعه‌ای از اسپایک‌های متعدد کم دامنه وجود داشته و به‌طور کلی سهم کوچک و

سرعت موجود در تاریخچه زمانی رکورد واقعی است. نکته دیگر آن که هر دو مؤلفه جابه‌جایی متناظر با نداشت مصنوعی و رکورد واقعی زلزله، دارای هم‌پوشانی و انطباق مناسب هستند. دلیل این موضوع نیز انجام برازش کارآمد با روند چند گامی آزمون و خطا بر روی پالس‌های

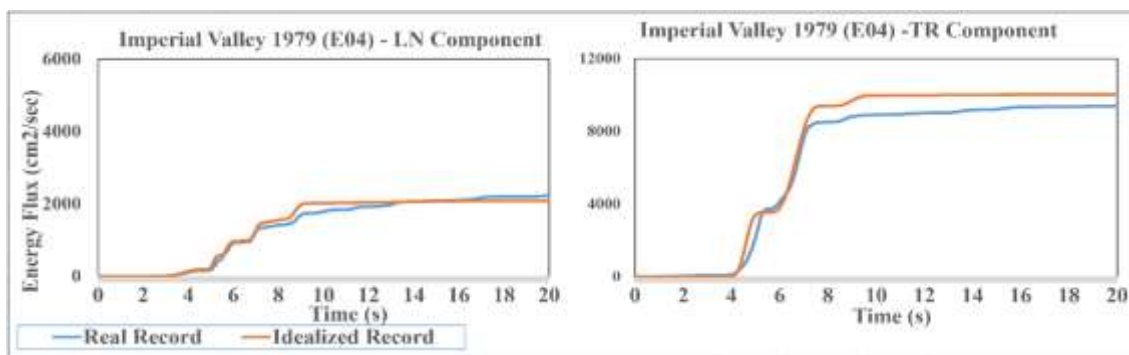
مؤلفه جابه‌جایی و روند تجمعی آزاد شدن انرژی متناظر با نداشت مصنوعی و رکورد واقعی زلزله، دارای هم‌پوشانی و انطباق مناسب هستند. دلیل این موضوع نیز انجام برازش کارآمد با روند چند گامی آزمون و خطا بر روی پالس‌های



(ب)

(الف)

شکل ۵. نمودر برازش و انطباق پالس‌های سرعت و تغییر مکان مربوط به نگاشت فرم بسته و رکورد واقعی حوزه نزدیک E04 متناظر با؛ (الف) مؤلفه عمود بر صفحه شکست گسل (TR)، (ب) مؤلفه موازی با صفحه شکست گسل (LN).



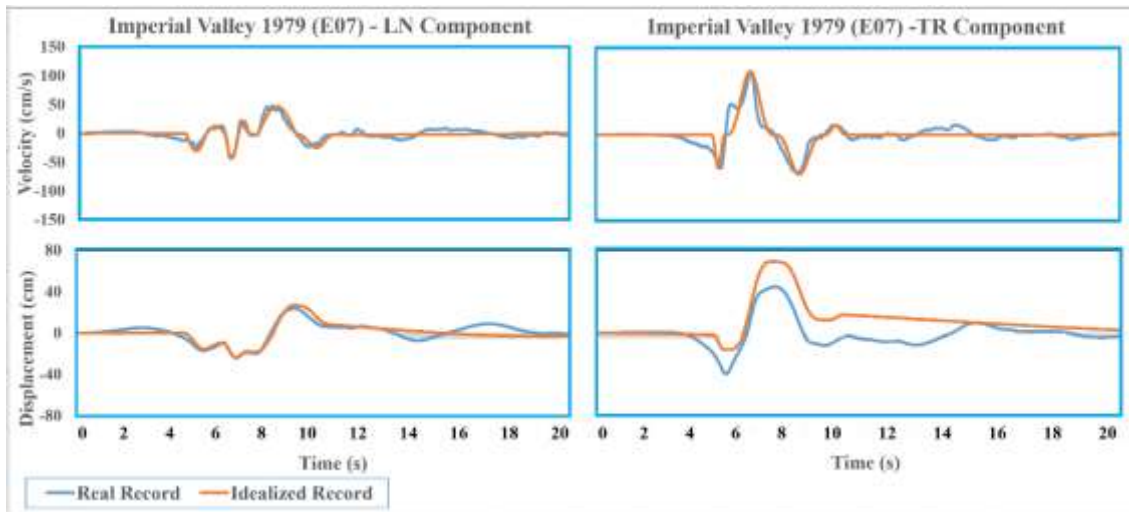
(ب)

(الف)

شکل ۶. نمودر انطباق تاریخچه تجمعی آزاد شدن انرژی مربوط به نگاشت فرم بسته و رکورد واقعی حوزه نزدیک E04 متناظر با؛ (الف) مؤلفه عمود بر صفحه شکست گسل (TR)، (ب) مؤلفه موازی با صفحه شکست گسل (LN).

صورت گرفته و تا حد امکان نیز شباهت تحلیلی برای نمودارهای روند تجمعی آزاد شدن انرژی ایجاد شود.

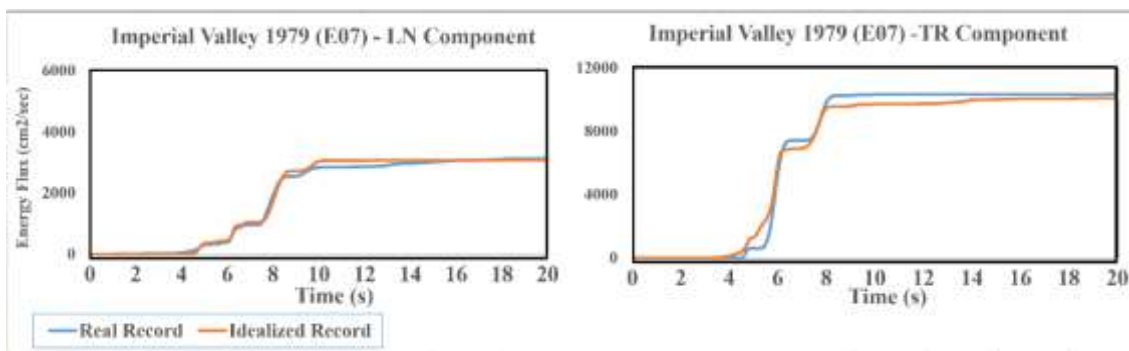
همچنین، در برازش پالس و اسپایک‌های بزرگ شتاب سعی شده که روند محاسباتی در محدوده زمانی مربوطه



(ب)

(الف)

شکل ۷. نمود برازش و انطباق پالس‌های سرعت و تغییر مکان مربوط به نگاهت فرم بسته و رکورد واقعی حوزه نزدیک E07 متناظر با؛ (الف) مؤلفه عمود بر صفحه شکست گسل (TR)، (ب) مؤلفه موازی با صفحه شکست گسل (LN).



(ب)

(الف)

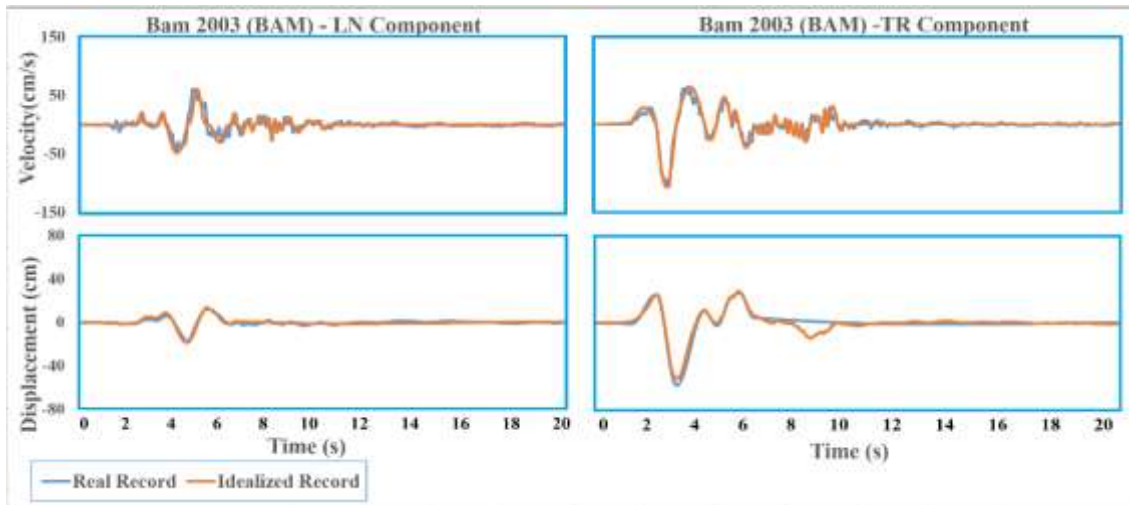
شکل ۸. نمود انطباق تاریخچه تجمعی آزاد شدن انرژی مربوط به نگاهت فرم بسته و رکورد واقعی حوزه نزدیک E07 متناظر با؛ (الف) مؤلفه عمود بر صفحه گسل (TR)، (ب) مؤلفه موازی با صفحه شکست گسل (LN).

شتاب با گام زمانی بسیار کوچک و یا چشم‌پوشی تعدادی اسپایک کوچک و کم انرژی سرعت، می‌تواند نمود نه چندان مشخصی در فرایند برازش و هم‌پوشانی در برخی بازه‌های کوچک زمانی را ایجاد نماید. مواردی از این موضوع در روند برازش پالس بزرگ تغییر مکان مؤلفه TR از رکوردهای E04 و E07 ملاحظه شد. یکی از موضوعات مهم در مبحث لرزه‌شناسی و نگرش‌های مطالعاتی مربوطه، ارزیابی و شناخت مشخصات فیزیکی جنبش‌های نیرومند زمین ثبت شده در حوزه نزدیک

نتایج حاصل از کاربرد هر دو مدل تعمیم یافته در شکل‌های فوق، نشان‌دهنده برازش خوب محاسباتی برای بخش متناظر با پالس و اسپایک‌های وابسته در تاریخچه زمانی شتاب و نیز تطابق نمودارهای سرعت و جابه‌جایی متناظر با مؤلفه‌های LN و TR از رکوردهای مطالعاتی است. افزون بر این مطلب در بخش‌هایی از نمودارها، ناهمگونی‌های موضعی دیده می‌شود. پیاده‌سازی روند عددی آزمون و خطا در گام‌های پیاپی تحلیلی صورت گرفته و در پاره‌ای موارد، نادیده انگاشتن یک یا دو اسپایک

این مطلب نیز ارتباط مستقیم با تشخیص باند فرکانس‌های پرنرژی رکوردهای حوزه نزدیک داشته و حساسیت محاسباتی آن در برازش نمودارهای تجمعی آزاد شدن انرژی مربوط به نگاشت مصنوعی مشخص می‌شود.

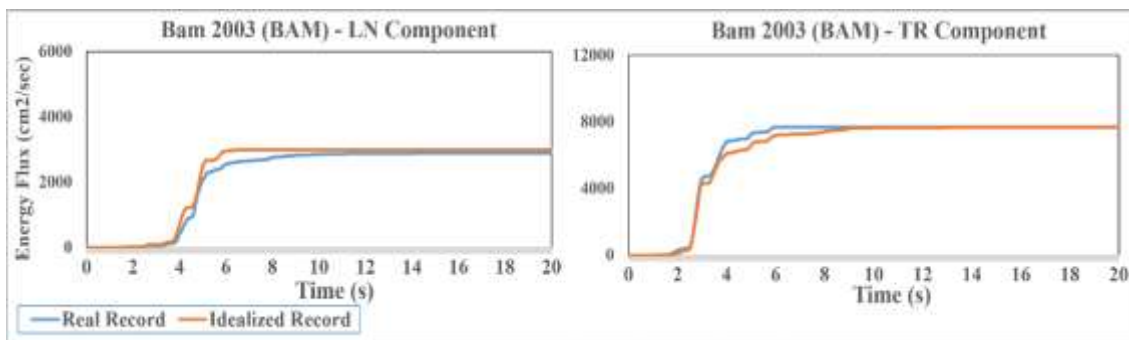
گسل‌های فعال و اثرات آن بر عملکرد ساختگاه‌های مختلف است. ملاحظه شد که پارامترهای پرپود پالس و گام زمانی اسپایک‌های پدمانه موجود در تاریخچه زمانی اینگونه زمین لرزه‌ها، نقش مهمی در مقوله یاد شده دارد.



(ب)

(الف)

شکل ۹. نمود برازش و انطباق پالس‌های سرعت و تغییر مکان مربوط به نگاشت فرم بسته و رکورد واقعی حوزه نزدیک BAM متناظر با؛ (الف) مؤلفه عمود بر صفحه شکست گسل (TR)، (ب) مؤلفه موازی با صفحه شکست گسل (LN).



(ب)

(الف)

شکل ۱۰. نمود انطباق تاریخچه تجمعی آزاد شدن انرژی مربوط به نگاشت فرم بسته و رکورد واقعی حوزه نزدیک BAM متناظر با؛ (الف) مؤلفه عمود بر صفحه شکست گسل (TR)، (ب) مؤلفه موازی با صفحه شکست گسل (LN).

## ۵. نتیجه‌گیری

نزدیک گسل ارائه شده است. با توجه به پیچیده بودن ماهیت فیزیکی رکوردهای حوزه نزدیک، نمی‌توان درباره کارایی فراگیر مدل‌های فرم بسته ریاضی از دیدگاه هم‌پوشانی کامل و برازش دقیق اسپایک‌های پرنرژی

تاکنون مدل‌های فرم بسته گوناگون به منظور برازش و شبیه‌سازی پالس‌های بزرگ و پیوسته سرعت در تاریخچه زمانی جنبش نیرومند ضربه‌ای و پالس‌گونه زمین در حوزه

همراه پالس پیوسته سرعت اطمینان حاصل نمود. بر این اساس، نیاز به تولید و برآزش نگاشت‌های مربوط به جنبش‌های نیرومند زمین با کاربرد مدل‌های فرم بسته و پردازش مشخصات طیفی رکوردهای زلزله ضرورت دارد. در این مطالعه تلاش شد تا با برآزش پالس‌های بزرگ و پیوسته موجود در تاریخچه زمانی رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک حاوی اثرات پر قدرت جهت‌داری پیش‌رونده، فرایند ساخت نگاشت‌های مصنوعی هم‌پایه آنها به گونه‌ای تدوین و تبیین شود که یک شبیه‌سازی کارآمد برای مشخصات تحلیلی و پارامترهای سرعت، جابه‌جایی و روند تجمعی آزاد

شدن انرژی به‌دست آید. هر دو مدل برآزشی تبیین شده در این مطالعه قابلیت شبیه‌سازی پالس‌های پیوسته چند موجی و اسپایک‌های پر دامنه با پر بود بزرگ و کوچک را دارا هستند. پارامترهای تحلیلی این مدل‌های ریاضی بر پایه روند سعی و خطا حاصل می‌گردند. بررسی نتایج حاصله به خوبی نشان می‌دهد که هر دو این ساختارهای فرم بسته برآزشی، همسان‌سازی و تطابق محاسباتی خوبی را به‌ویژه برای تاریخچه زمانی‌های سرعت و جابه‌جایی متناظر با دو مؤلفه LN و TR رکوردهای حوزه نزدیک حاوی مشخصات جهت‌داری نیرومند پیش‌رونده ایجاد می‌نمایند.

## ۶. مآخذ

- [۱] میرعابدینی، م.، آق‌آتابای، م.، "تغییرات فضایی پارامترهای فرکتالی در البرز مرکزی ایران"، علوم زمین خوارزمی، ج. ۱، ش. ۱، ۱۳۹۴.
- [2] Singh, Jogeshwar P., "Earthquake ground motions: implications for designing structures and reconciling structural damage", *Earthquake Spectra*, 1985, Vol.1, no.2, pp.239-270.
- [3] Rodriguez-Marek, Adrian, and Jonathan D. Bray, "Seismic site response for near-fault forward directivity ground motions", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006, Vol.132, no.12, pp.1611-1620.
- [4] Loh, Chin- Hsiung, Zheng- Kuan Lee, Tsu- Chiu Wu, and Shu- Yuan Peng, "Ground motion characteristics of the Chi Chi earthquake of 21 September 1999", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2000, Vol.29, no.6, pp.867-897.
- [5] Somerville, P.G., "Development of an improved representation of near fault ground motions", In *SMIP98 Seminar on Utilization of Strong-Motion Data*, 1998, Vol.15, p.1998.
- [6] Somerville, P.G., and Robert Graves, "Conditions that give rise to unusually large long period ground motions", *The Structural Design of Tall Buildings*, 1993, Vol.2, no.3, pp.211-232.
- [7] Somerville, P.G., "Engineering characterization of near-fault ground motions", New Zealand Society for Earthquake Engineering, NZSEE Conference, 2005.
- [8] Alavi, Babak, and Helmut Krawinkler, "Effects of near-field ground motion on building structures", Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering, 2001.
- [9] Mavroeidis, George P., and Apostolos S. Papageorgiou, "A mathematical representation of near-fault ground motions", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2003, Vol.93, no.3, pp.1099-1131.
- [10] Vaez, S.R. Hoseini, M.K. Sharbatdar, G. Ghodrati Amiri, H. Naderpour, and A. Kheyroddin, "Dominant pulse simulation of near fault ground motions", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2013, Vol.12, no.2, pp.267-278.
- [11] Mimoglou, Petros, Ioannis N. Psycharis, and Ioannis M. Taflampas, "Determination of the parameters of the directivity pulse embedded in near-fault ground motions and its effect on structural response", In *Computational Methods in Earthquake Engineering*, Springer, Cham, 2017, pp.27-48, DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-47798-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-47798-5_2).
- [12] Dabaghi, Mayssa, and Armen Der Kiureghian, "Simulation of orthogonal horizontal components of near- fault ground motion for specified earthquake source and site characteristics", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2018, Vol.47, no.6, pp.1369-1393.

- [13] Puglia, Rodolfo, Emiliano Russo, Lucia Luzi, Maria D'Amico, Chiara Felicetta, Francesca Pacor, and Giovanni Lanzano, "Strong-motion processing service: A tool to access and analyse earthquakes strong-motion waveforms", *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2018, Vol.16, no.7, pp.2641-2651.
- [14] Rupakhety, Rajesh, and Ragnar Sigbjörnsson, "Can simple pulses adequately represent near-fault ground motions?", *Journal of Earthquake Engineering*, 2011, Vol.15, no.8, pp.1260-1272.
- [15] Hemmat, Mehdi, Seyed Shaker Hashemi, and Mohammad Vaghefi, "Seismic evaluation of steel frames subjected to decaying sinusoidal records through IDA method", *Journal of Seismology and Earthquake Engineering (JSEE)*, 2013, Vol.15, pp.207-222.
- [16] Makris, Nicos, and Shih-Po Chang, "Response of damped oscillators to cycloidal pulses", *Journal of Engineering Mechanics*, 2000, Vol.126, no.2, pp.123-131.
- [17] Menun, Charles, and Qiang Fu, "An analytical model for near-fault ground motions and the response of SDOF systems", In *Proceedings of the 7th US National Conference on Earthquake Engineering*, 2002, Vol.10.
- [18] Standard No. 2800, *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings*, 4th Edition, Tehran, Iran, 2014.
- [19] Wang, Zhenming, N. Seth Carpenter, Lifang Zhang, and Edward W. Woolery, "Assessing potential ground-motion hazards from induced earthquakes", *Natural Hazards Review*, 2017, Vol.18, no.4, DOI: 10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000264.
- [20] Bradley, Brendon A., Didier Pettinga, Jack W. Baker, and Jeff Fraser, "Guidance on the utilization of earthquake-induced ground motion simulations in engineering practice", *Earthquake Spectra*, 2017, Vol.33, no.3, pp.809-835.
- [21] Yaghmaei-Sabegh, Saman, "Frequency content parameters of the ground motions from the 2017 Mw 7.3 Ezgeleh earthquake in Iran", *Natural Hazards*, 2020, pp.1-17, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03876-2>
- [22] Whitney, Reeves, "Quantifying near fault pulses using generalized Morse wavelets", *Journal of Seismology*, 2019, Vol.23, no.5, pp.1115-1140.

پی نوشت:

1. Tectonics
2. Landers, 1992
3. Northridge, 1994
4. Kobe, 1995
5. Tohoku, 2011
6. Chi Chi, 1999
7. Darfield, 2010
8. Christchurch, 2011
9. Bam, 2003, Iran
10. Ezgeleh, 2017, Iran
11. Fault Normal Component
12. Fault Parallel Component
13. Strike-Slip Faulting
14. Fling-Step Pulse
15. Makris
16. Menun
17. Imperial Valley, 1979