

## ارزیابی مدل‌های برازشی فرم بسته برای رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک حاوی اسپایک و پالس سرعت

گلناز جعفرپور<sup>ا</sup>، افشین مشکوه‌الدینی<sup>ب\*</sup>

<sup>ا</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

<sup>ب</sup> عضو هیات علمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

\* [meshkat@khu.ac.ir](mailto:meshkat@khu.ac.ir)

### چکیده

جنبش‌های نیرومند زمین در هنگام زلزله‌های بزرگ و پرانرژی، با ایجاد حرکات ضربه‌ای در فواصل نزدیک گسل فعال، سبب ایجاد خسارات گسترده در ساختگاه‌ها و زیرساخت‌ها و سازه‌ها می‌شوند. این موضوع، اهمیت گسترش دیدگاه‌های مطالعاتی در خصوص ارزیابی رفتار و پاسخ لرزه‌ای اسکلت مقاوم سازه‌ها تحت این‌گونه جنبش‌های زمین را به روشنی نشان می‌دهد. در این پژوهش، یک مجموعه رکوردهای نیرومند زلزله حوزه نزدیک به منظور شبیه‌سازی و ساخت نگاشت فرم بسته هم‌پایه، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. تمرکز اصلی مطالعاتی بر شبیه‌سازی و برازش پالس اصلی و پیوسته سرعت است که دارای بیشترین سهم انرژی رکورد زلزله می‌باشد. همچنین، روند محاسباتی برازش‌های مربوطه نیز با توجه به مشخصات پالس پیوسته سرعت، همانند پیرو پالس، بازه موجک اصلی، اسپایک‌های پرانرژی در پنجره‌های زمانی کوتاه مدت در پیش و پس از موجک اصلی پالس سرعت و نیز پردازش نمودار تجمعی تاریخچه آزاد شدن انرژی جنبشی متناظر با مولفه‌های افقی رکورد زلزله استوار گردیده است. تدوین ساختارهای فرم بسته در این مقاله، بر پایه بررسی موضوعی دو نگرش ریاضی پارامتری از مراجع معتبر و آورده‌های مربوطه، همراه با ترکیب توابع نمایی و مثلثاتی صورت گرفته است. همچنین اعتبار برازش‌های انجام شده و مدل‌های فرم بسته هم‌پایه نیز بر مبنای حصول همپوشانی هر چه بیشتر برای نمودار تجمعی تاریخچه آزاد شدن انرژی جنبشی مربوط به رکورد واقعی زلزله و نگاشت برازشی متناظر بررسی شده است. طبق نتایج حاصل شده، همخوانی و برابری مناسب و کارآمدی در تاریخچه زمانی و ویژگی‌های محتوای فرکانسی برای نگاشت فرم بسته بدست آمده است. دیدگاه کاربردی ساخت مدل فرم بسته متناظر با رکوردهای حوزه نزدیک را می‌توان در شناخت و شبیه‌سازی جنبش‌های پر قدرت ضربه‌ای زمین و همچنین ارزیابی رفتار اسکلت مقاوم سازه‌ها در هنگام رخداد زلزله‌های بزرگ در نظر گرفت.

**کلمات کلیدی:** زلزله حوزه نزدیک؛ مدل فرم بسته؛ اسپایک و پالس سرعت؛ برازش ریاضی

## ۱- مقدمه

توجه به موضوع ارزیابی ساختار فیزیکی و ویژگی‌های جنبش‌های نیرومند پالس‌گونه زمین در فواصل نزدیک گسل از اهمیت بالایی برخوردار است. بازتاب و نمود اثرات اینگونه رخدادهای نیز قابل توجه بوده و دربرگیرنده نشانه‌های مشخصی برای شناسایی ساختار منبع لرزه‌ای و ویژگی‌های گسل ایجادکننده آن می‌باشد. دامنه و ابعاد خسارات ناشی از زلزله‌های بزرگ به عوامل مختلفی بستگی دارد. در این راستا می‌توان به فاصله گسل تا ساختگاه، نوع خاک، مکانیزم شکست گسل، مشخصات جامع رکورد زلزله اشاره نمود [۵-۱]. جنبش‌های نیرومند زمین بر اساس فاصله از صفحه گسیختگی گسل را می‌توان به صورت گروه‌بندی رکوردهای حوزه نزدیک با ویژگی‌های کم و بیش متفاوت در نظر گرفت. رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک بیشتر در محدوده کمتر از ۱۵ کیلومتر تا صفحه شکست گسل ثبت می‌شوند. رکوردهای حوزه نزدیک متاثر از فرایند نیرومند جهت‌پذیری پیش‌رونده (Forward Directivity) بطور معمول دارای پالس پیوسته و بزرگ سرعت در هر دو مولفه افقی هستند. همچنین، ساختارهای شبه مثلثی و اسپایک‌های پدیده در تاریخچه شتاب‌نگاشت و نیز بطور معمول در بازه زمانی کمتر از ۴ ثانیه پس از پالس اصلی سرعت پدیدار می‌گردند. به سبب وجود این ویژگی پالس‌گونه در تاریخچه زمانی سرعت رکوردهای حوزه نزدیک، سهم انرژی جنبشی آزاد شده این رکوردها چندین برابر بیشتر از رکوردهای حوزه دور می‌باشد. نکته دیگر آن که از ارزیابی خسارات ناشی از زمین لرزه‌های نیرومندی مانند بم ۲۰۰۳ و طیس ۱۹۷۸ (ایران) و امپریال‌ولی ۱۹۷۹، لوماپریتا ۱۹۸۹ و نورتریج ۱۹۹۴ (کالیفرنیا جنوبی) مشاهده می‌شود که وجود پالس‌های با دامنه‌های بزرگ و طولانی مدت در تاریخچه زمانی سرعت یا تغییرمکان رکوردهای حوزه نزدیک می‌تواند تاثیرات ویران‌گر و پدیده‌ها بر سازه‌های مهندسی بگذارد [۶-۱۰]. این موضوع ارتباط مستقیم با ارزیابی پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها تحت اینگونه جنبش‌های نیرومند زمین دارد.

یکی از موضوعات پایه در مباحث مهندسی زلزله، مسئله ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی جنبش‌های نیرومند زمین در فواصل نزدیک گسل و تاثیر آنها بر عملکرد سازه‌های خاص و به ویژه ساختمان‌های میان مرتبه تا بلند است. این امر مستلزم به کارگیری تعداد زیادی از رکوردهای زلزله با محتوای فرکانسی مختلف می‌باشد. همچنین تاکید می‌شود که به درستی نمی‌توان پارامترهای نیاز رفتار بهینه لرزه‌ای با رویکرد تحلیلی قابلیت اطمینان و برآورد دامنه ریسک فروریزش سازه‌ها را با یک نگرش جامع تحت همگی رکوردهای نیرومند زلزله‌ها ارزیابی نمود. شناخت و سنجش تحلیلی انواع جنبش‌های نیرومند زمین نیازمند پردازش جامعی از اطلاعات زلزله‌های قدرتمندی است که دارای دوره بازگشت طولانی باشند و در همین راستا کمبود نسبی اطلاعات لرزه نگاری نیز نمود بیشتری پیدا می‌کند. بدین لحاظ با استفاده از پردازش داده‌های لرزه‌نگاری موجود و برپایی ساختارهای فرم بسته می‌توان موضوعات شبیه‌سازی و ساخت نگاشت هم‌پایه با زمین لرزه‌های قدرتمند را در نظر گرفت [۱۱-۱۴]. سازمان علمی این پژوهش در برگیرنده روش شبیه‌سازی و ساخت نگاشت فرم بسته برای رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک است. دیدگاه ویژه در این پژوهش، موضوع برآزش و شبیه‌سازی پالس‌های پدیده و پیوسته سرعت است که دارای سهم بزرگ انرژی می‌باشند. مشخصات پیرو و بازه زمانی پالس پیوسته و موجک اصلی سرعت، همراه با اسپایک‌ها و نمودار انرژی تجمعی آزاد شده از ارکان اصلی برآزش رکوردهای حوزه نزدیک هستند. تدوین ساختارهای فرم بسته با نگرش و استفاده از روابط پیشنهادی [۱۵] Menun 2002 و مطالعه حسینی واعظ و همکاران [۱۶] همراه با ترکیب چند جمله‌ای‌های مثلثاتی با توان فرد و توابع نمایی انجام شده است. معیار اصلی در تشخیص درستی و اعتبار برآزش‌های انجام شده و نیز نگاشت‌های فرم بسته مربوطه، حصول هم‌ارزی و همسانی در نمودارهای تجمعی روند آزاد شدن انرژی رکورد اصلی و نگاشت برآزش شده می‌باشد. ارزیابی‌ها و بررسی‌های انجام شده در این مطالعه نمایان‌گر وجود همپوشانی قابل ملاحظه در ویژگی‌های نگاشت برآزشی، همچون نمودار تجمعی انرژی و نیز تاریخچه زمانی جابجایی و شتاب، با مولفه‌های متناظر در ساختار تحلیلی رکوردهای واقعی است.

## ۲- پیکره تحلیلی مدل‌های فرم بسته

مطالعات بر روی مدل‌سازی پالس‌های پیوسته سرعت موجود در تاریخچه زمانی جنبش‌های نیرومند حوزه نزدیک به عنوان یک موضوع مهم و تاثیرگذار در مباحث تحلیلی رفتار و عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها در نظر گرفته می‌شود. تاکنون، پژوهش‌ها و مطالعات گسترده‌ای در این زمینه صورت پذیرفته و روابط تحلیلی متعددی جهت برآزش و ساختارسازی نگاشت‌های هم‌پایه با رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک ارائه شده است. پیکره تحلیلی بیشتر مدل‌های ارائه شده بر موضوع پردازش محاسباتی پالس پیوسته سرعت و

اسپایک‌های وابسته استوار بوده است. افزون بر این روند نیز یک رشته مطالعات در خصوص شناخت متغیرها و همبستگی احتمالی مدل‌های فرم بسته پالس سرعت صورت گرفته و به ارائه روش شبیه‌سازی رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک بر مبنای کاربرد آرایه ریاضی موجک Gabor و پارامترهای مدل‌سازی Copula انجامیده است [۱۷]. همچنین، تدوین تحلیلی بر اساس تعمیم و گسترش مدل فرم بسته پیشنهادی Dickinson نیز یک جنبه جامع‌تر برای برازش محاسباتی تاریخچه زمانی شتاب ساختگاه، همراه با در نظرگیری مشخصات زمان - فرکانس می‌باشد [۱۳]. در همین راستا، پردازش‌های پارامتری پالس‌های سرعت و اسپایک‌های پیرامنه وابسته نیز جنبه‌های گوناگون مرتبط با پیاده‌سازی دیدگاه ریاضی این مبحث را لحاظ می‌نماید [۱۵ و ۱۶]. ساختار پارامتری ذکر شده در رابطه (۱) بر اساس مدل فرم بسته پیشنهادی Menu 2002 است [۱۵].

$$\begin{aligned} \dot{u}_m(t, \theta) &= v_p \times \exp \left[ -n_1 \left[ \frac{3}{4} T_p - t + t_0 \right] \right] \times \sin \left[ \frac{2\pi}{T_p} (t - t_0) \right] \quad \& \quad t_0 < t \leq t_0 + \frac{3}{4} T_p \\ \dot{u}_m(t, \theta) &= v_p \times \exp \left[ -n_2 \left[ -\frac{3}{4} T_p + t - t_0 \right] \right] \times \sin \left[ \frac{2\pi}{T_p} (t - t_0) \right] \quad \& \quad t_0 + \frac{3}{4} T_p < t \leq t_0 + 2T_p \end{aligned} \quad (1)$$

عبارت  $\theta = [v_p, T_p, t_0, n_1, n_2]^T$  در روابط فوق شامل پارامترهای تحلیلی است که مدل فرم بسته را توضیح می‌دهند. دو پارامتر  $T_p$  و  $v_p$  به ترتیب بیشینه و پیرو پالس پیوسته سرعت است و  $t_0$  محور زمان شروع پالس می‌باشد. نمادهای  $n_1$  و  $n_2$  نیز پارامترهای شکل پالس هستند و در پردازش تحلیلی ساختارهای موجی شکل بکار می‌روند. مدل فرم بسته پوششی ارائه شده توسط حسینی واعظ ۲۰۱۳ مطابق روابط (۲) و (۳) است [۱۶].

$$\begin{aligned} G(t) &= (-1)^n \left( \frac{2nf_p}{\gamma} \right)^{2n} \left( t - \left( t_0 - \frac{\gamma}{2nf_p} \right) \right)^n \left( t - \left( t_0 + \frac{\gamma}{2nf_p} \right) \right)^n \quad \& \quad n \in N \\ & \text{for } \left( t_0 - \frac{\gamma}{2nf_p} \right) \leq t \leq \left( t_0 + \frac{\gamma}{2nf_p} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

پارامترهای  $f_p$ ،  $\gamma$  و  $n$  به ترتیب فرکانس غالب، ویژگی نوسانی سیگنال و پارامتر تغییردهنده درجه تابع پوشش هستند. نکته دیگر آن که برای آرایه سازی هر چه بهتر مدل برازشی، روند تکراری افزایش و کاهش دامنه عددی این پارامترها در نظر گرفته شده و ساختار نمایشی پالس متناظر نیز متفاوت خواهد بود.

$$v(t) = A \times \left( \frac{4f_p}{\gamma} \right)^4 \left( (t - t_0)^2 - \left( \frac{\gamma}{4f_p} \right)^2 \right)^2 \times \cos(2\pi f_p t + v) \quad \& \quad \gamma \geq 1 \quad (3)$$

پارامتر  $A$  دامنه سیگنال را ارزیابی می‌کند و  $v$  فاز هارمونیک دامنه است. نماد  $\gamma$  پارامتری است که مشخصه نوسانی را به صورت محور صفر برای گذر سیگنال تعریف نموده و  $t_0$  زمان نقطه اوج تابع پوشش را بیان می‌کند.

### ۳- مدل‌های فرم بسته بازپردازش شده

در این تحقیق به بررسی و بازپردازش مدل‌های فرم بسته Menu 2002 [۱۵] و حسینی واعظ ۲۰۱۳ [۱۶] به همراه تدوین پارامتری با روابط مثلثاتی دارای توان فرد و همچنین توابع نمایی پرداخته شده است. بنیان و رکن اساسی در آرایه سازی مدل‌های فرم بسته بازپردازش شده، بازه زمانی پالس‌های پیرامنه موجود در تاریخچه زمانی سرعت است. همچنین، همپوشانی گام پرش پلکانی در نمودار تجمعی روند آزاد شدن انرژی برای رکورد اصلی و نگاشت فرم بسته همپایه بررسی شده است. تمهیدات محاسباتی در نظر گرفته شده در ساختارسازی روابط و بازپردازش عبارات پارامتری، به شیوه مناسب پاسخگوی توصیف ویژگی‌های فیزیکی و نیز محتوای فرکانسی جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل می‌باشد. ساختارهای فرم بسته بازپردازش شده و همپایه با مدل Menu 2002 (مرجع ۱۵) به شرح زیر هستند، (مدل تحلیلی ۱):

$$\dot{u}_m(t, \theta) = C \times v_p \times \exp\left[-n_1 - \left[\frac{3}{4}T_p - t + t_0\right]\right] \times \sin\left[\frac{2\pi}{T_p}(t - t_0)\right] + B \times \sin^\alpha\left(\frac{2\pi t}{T_p}\right) \quad \& \quad t_0 < t \leq T_p \quad (۴)$$

$$\dot{u}_m(t, \theta) = C \times v_p \times \exp\left[-n_1 - \left[\frac{3}{4}T_p - t + t_0\right]\right] \times \sin\left[\frac{2\pi}{T_p}(t - t_0)\right] + B \times \cos^\alpha\left(\frac{2\pi t}{T_p}\right) \quad \& \quad t_0 < t \leq T_p \quad (۵)$$

$$\dot{u}_m(t, \theta) = C \times v_p \times \exp\left[-n_1 - \left[\frac{3}{4}T_p - t + t_0\right]\right] \times \sin\left[\frac{2\pi}{T_p}(t - t_0)\right] + D \quad \& \quad t_0 < t \leq T_p \quad (۶)$$

پارامترهای  $v_p$  و  $T_p$  در روابط فوق به ترتیب، بیشینه اندازه سرعت و پریود پالس پیوسته سرعت و  $t_0$  نیز زمان شروع پالس است. ضریب  $C$  یک ضریب عددی بدون بعد است که جهت تنظیم پالس سرعت در دامنه موجک اصلی بکار می‌رود. ضرایب  $B$  و  $D$  نیز عوامل پردازشی و تنظیم کننده مشخصات پالس سرعت می‌باشند. شایان ذکر است که همگی ضرایب اشاره شده بر حسب روند محاسباتی و پردازش تحلیلی رکورد مربوطه تعیین می‌شوند. همچنین، توان  $\alpha$  نیز اعداد طبیعی فرد می‌باشد. روابط و معادلات یاد شده جهت برازش پالس پیوسته سرعت به کار برده می‌شوند و برازش اسپایک‌های سرعت نیز از عبارات جبری زیر صورت می‌گیرد:

$$\dot{u}_m(t, \theta) = C \times v_p \times \sin^\alpha\left[\frac{2\pi}{T_p}(t - t_0)\right] \quad \& \quad t_0 < t \leq T_p \quad (۷)$$

$$\dot{u}_m(t, \theta) = C \times v_p \times \cos^\alpha\left[\frac{2\pi}{T_p}(t - t_0)\right] \quad \& \quad t_0 < t \leq T_p \quad (۸)$$

تعریف و شناسایی پارامترهای محاسباتی در روابط (۱) و (۴) تا (۸) بصورت یکسان با روابط قبلی است و تفاوت کاربری نیز در پردازش پالس و اسپایک می‌باشد. تنظیم و ساختار پالس و اسپایک‌های ترکیبی سرعت، بر پایه یک روند تکراری و بازگشتی محاسباتی صورت می‌گیرد. روابط بازپردازش شده پارامتری بر پایه مرجع [۱۶] به شرح زیر در نظر گرفته شده‌اند، (مدل تحلیلی ۲):

$$v(t) = A \times \left(\frac{4f_p}{\gamma}\right)^4 \left((t - t_0)^2 - \left(\frac{\gamma}{4f_p}\right)^2\right) \times \cos^\alpha(2\pi f_p t + v) \quad \& \quad \gamma \geq 1 \quad (۹)$$

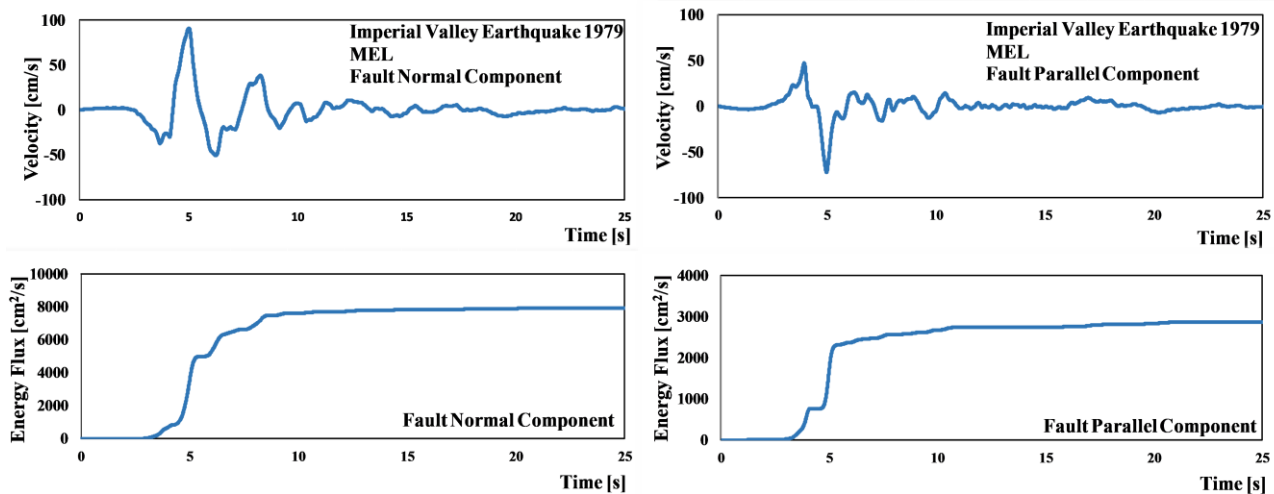
$$v(t) = A \times \left(\frac{4f_p}{\gamma}\right)^4 \left((t - t_0)^2 - \left(\frac{\gamma}{4f_p}\right)^2\right) \times \cos(2\pi f_p t + v) + D \quad \& \quad \gamma \geq 1 \quad (۱۰)$$

پارامترهای مشخصه در روابط (۲) و (۳) و همچنین روابط (۹) و (۱۰) به صورت نظیر به نظیر دارای تعریف همانند هستند.

#### ۴- رکوردهای مورد استفاده در این پژوهش

رکوردهای انتخابی در این پژوهش شامل یک گروه از جنبش‌های ثبت شده در نواحی نزدیک گسل در فاصله‌ای کمتر از ۱۵ کیلومتر تا محل صفحه شکست و حاوی پالس پر دامنه و پریود بلند در تاریخچه زمانی سرعت زمین است. گروه رکوردهای نیرومند انتخابی، دارای مشخصات و خصوصیات به نسبت یکسان برای ساختگاه می‌باشند. همچنین، پالس‌های سرعت موجود در تاریخچه زمانی مربوطه نیز دارای ویژگی‌های فیزیکی و طیفی متفاوتی هستند. مؤلفه مفروض عمود بر صفحه شکست گسل با نماد TR و مؤلفه مفروض موازی با این صفحه نیز با نماد LN نمایش داده شده است [۱۸]. نتایج مطالعات لرزه شناسی نمایان‌گر این امر می‌باشد که ساختار انتشار امواج برشی زلزله و ساز و کار گسلش به گونه‌ای است که پالس‌های سرعت در تاریخچه زمانی مؤلفه TR دارای نمود مشخص و بزرگ‌تری نسبت به مؤلفه LN هستند. گروه رکوردهای انتخابی شامل جنبش اصلی زمین در دو زلزله 2003 BAM و 1978 TABAS (ایران) است. همچنین از حوزه کالیفرنیا جنوبی نیز رکوردهای SYL و RRS از زلزله 1994 Northridge و نیز

رکورد MEL از زلزله Imperial Valley 1979 انتخاب گردیده و پارامترهای بیشینه شتاب زمین (PGA)، بیشینه‌های سرعت (PGV) و تغییرمکان زمین (PGD) نیز در نظر گرفته شده‌اند. دو بخش تحلیلی در سازمان علمی این تحقیق لحاظ شده‌اند و در بخش نخست، ارزیابی‌ها با توجه ویژه به نمودار تجمعی روند آزاد شدن انرژی و موقعیت‌های زمانی گام پرش پلکانی متناظر با موجک اصلی در پالس پیوسته سرعت صورت می‌گیرند. سپس در بخش دوم به بررسی بازه زمانی مربوط به گام کوچک‌تر متناظر با اسپایک‌های مشخص و ساختارهای شبه مثلثی موجود در تاریخچه زمانی رکورد پرداخته می‌شود. این روند تا همسویی و همگرا شدن شیب نمودار تجمعی یاد شده ادامه می‌یابد. جدول (۱) مهم‌ترین خصوصیات رکوردهای انتخابی را نشان می‌دهد. بازه زمانی پالس پیوسته و پرپود بلند سرعت به همراه یک گروه اسپایک‌های بزرگ دامنه پس از آن نیز در آرایه اطلاعاتی جدول (۱) ملاحظه می‌شوند. نمودارهای تجمعی روند آزاد شدن انرژی متناظر با تاریخچه زمانی‌های سرعت هر دو مولفه افقی موازی با صفحه شکست گسل (مولفه LN) و نیز عمود بر راستای مذکور (مولفه TR) مربوط به رکورد MEL در شکل (۱) نشان داده شده‌اند.



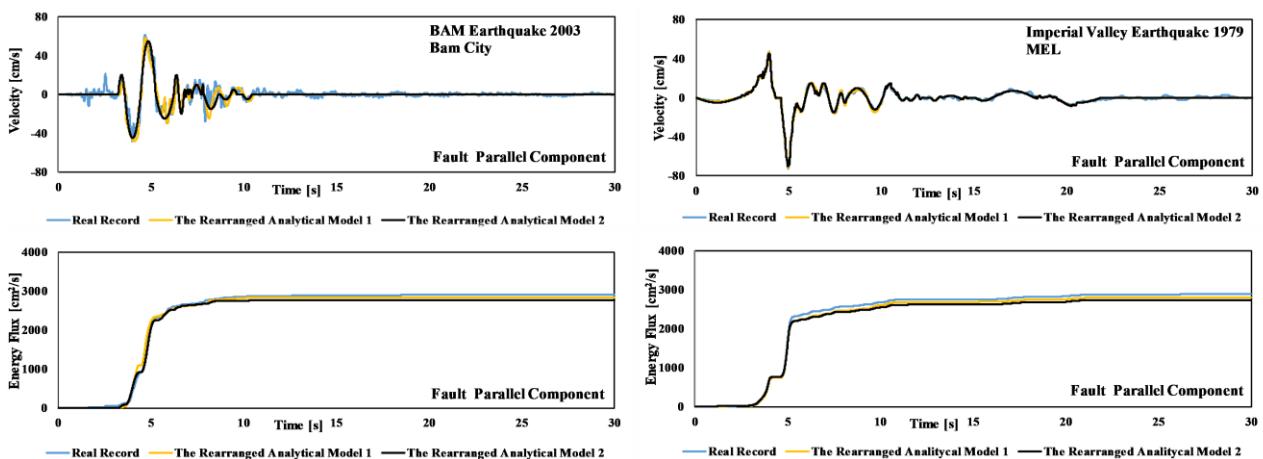
شکل ۱. نمودارهای تاریخچه زمانی سرعت و روند تجمعی آزاد شدن انرژی مربوط به هر دو مولفه افقی در جهت موازی (با نام مولفه LN) و عمود (با نام مولفه TR) نسبت به صفحه گسیختگی گسل از رکورد نیرومند حوزه نزدیک MEL 1979، (جدول ۱).

جدول ۱. مشخصات فیزیکی رکوردهای انتخابی

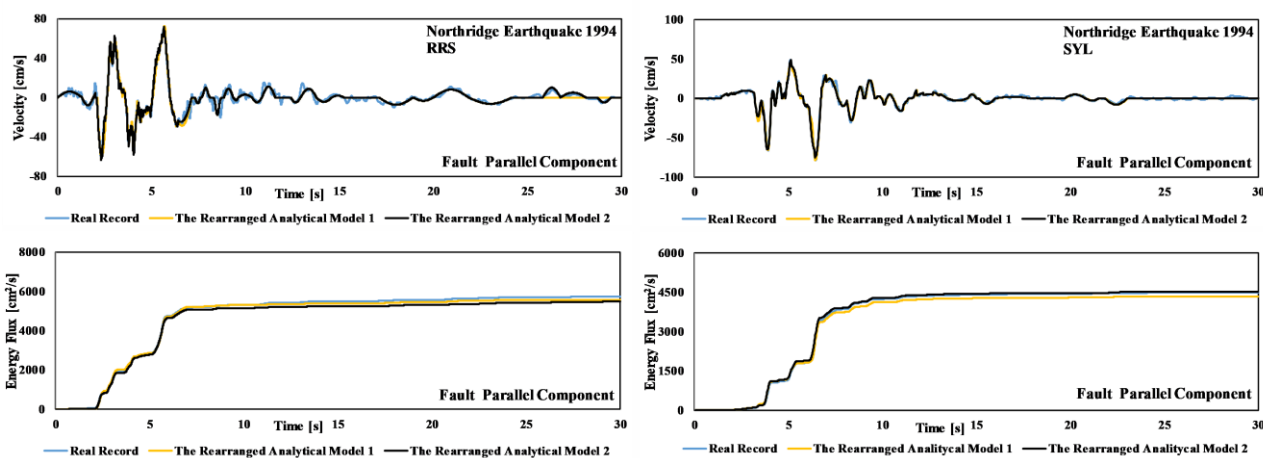
Ground Motion (Distance from the Fault)	Component	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)	Time Domain of the Distinct Velocity Pulse (sec)	Magnitude (Mw)
Bam 2003 Bam City (BAM) – 1.00km	LN	0.635	59.60	20.70	3.2s to 6.0s	6.6
	TR	0.793	123.7	37.40	1.3s to 5.5s	
TABAS 1978 Tabas City (TAB) – 3.00km	LN	0.836	97.70	39.90	9.5s to 14.5s	7.4
	TR	0.851	121.30	94.50	7.74s to 15.9s	
Imperial Valley 1979 Meloland Overpass (MEL) – 2.30km	LN	0.314	71.83	25.53	2.3s to 6.5s	6.5
	TR	0.297	90.50	31.71	2.5s to 8.9s	
Northridge 1994 Sylmar (SYL) – 6.40km	LN	0.604	78.24	17.10	3.2s to 6.7s	6.7
	TR	0.843	129	32.60	3.3s to 9.5s	
Northridge 1994 Rinaldi Receiving Station (RRS) – 7.10km	LN	0.472	72.72	19.82	1.45s to 8.40s	6.7
	TR	0.838	166.5	29.81	1.09s to 8.40s	

## ۵- ساختارهای برازشی فرم بسته

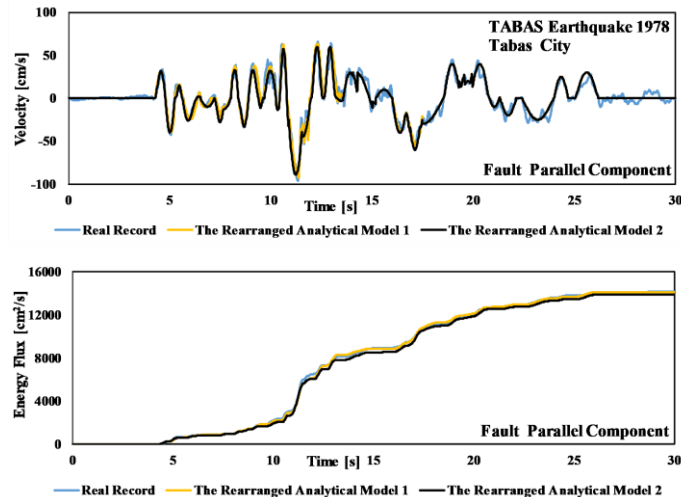
دیدگاه تحلیلی ویژه در این پژوهش به صورت مرتبط با موضوع آرایه سازی، تدوین پارامتری و تعیین دامنه عددی شاخص‌های اصلی در نظر گرفته شده برای رکوردهای حوزه نزدیک انتخابی، مطرح گردیده است. پیاده‌سازی این موضوع در مرحله نخست با بررسی نمودار تجمعی روند آزاد شدن انرژی و مشخص نمودن موقعیت‌های زمانی گام پرش پلکانی متناظر با موجک اصلی در پالس پیوسته سرعت صورت می‌گیرد. روند کار به گونه‌ای است که با توجه به آرایه‌های بازپردازش شده در روابط اصلی مدل تحلیلی ۱ (روابط ۴ تا ۶) و روابط پایه مدل تحلیلی ۲ (روابط ۹ و ۱۰)، نگاشت فرم بسته پالس پیوسته سرعت و موجک اصلی پالس متناظر با گام پرش پلکانی در نمودار انرژی رکورد زلزله، با هدف همپوشانی و پوشش کامل‌تر برازش داده شده است. همچنین در گام پس از آن نیز برازش اسپایک‌های پردامنه موجود در تاریخچه زمانی سرعت و بازه پالس اصلی صورت گرفته است. سپس بر پایه محاسبات مشتق عددی، نگاشت شتاب متناظر با پالس پیوسته سرعت حاصل شده و در گام آخر نیز مقایسه دامنه‌های عددی میان نمودارهای تجمعی روند آزاد شدن انرژی متناظر با رکورد اصلی و نگاشت برازشی آن صورت می‌گیرد. نکته تکمیلی آن که برازش اسپایک‌های با گام زمانی کوچک و دامنه به نسبت بزرگ، تا آن محور زمانی انجام می‌شود که همگرایی و همسو شدن هر چه بیشتر برای شیب نمودار تجمعی روند آزاد شدن انرژی مربوط به نگاشت برازشی و رکورد اصلی حاصل گردد. شکل (۲) نشان دهنده برآوردهای مقایسه‌ای میان تاریخچه زمانی سرعت و نمودارهای تجمعی روند آزاد شدن انرژی برای رکوردهای اصلی و نگاشت‌های هم‌پایه ساخته شده آن‌ها در مؤلفه LN می‌باشد. ملاحظه می‌شود که یک هم‌ارزی نسبی نزدیک حاصل شده است.



الف) ادامه دارد.

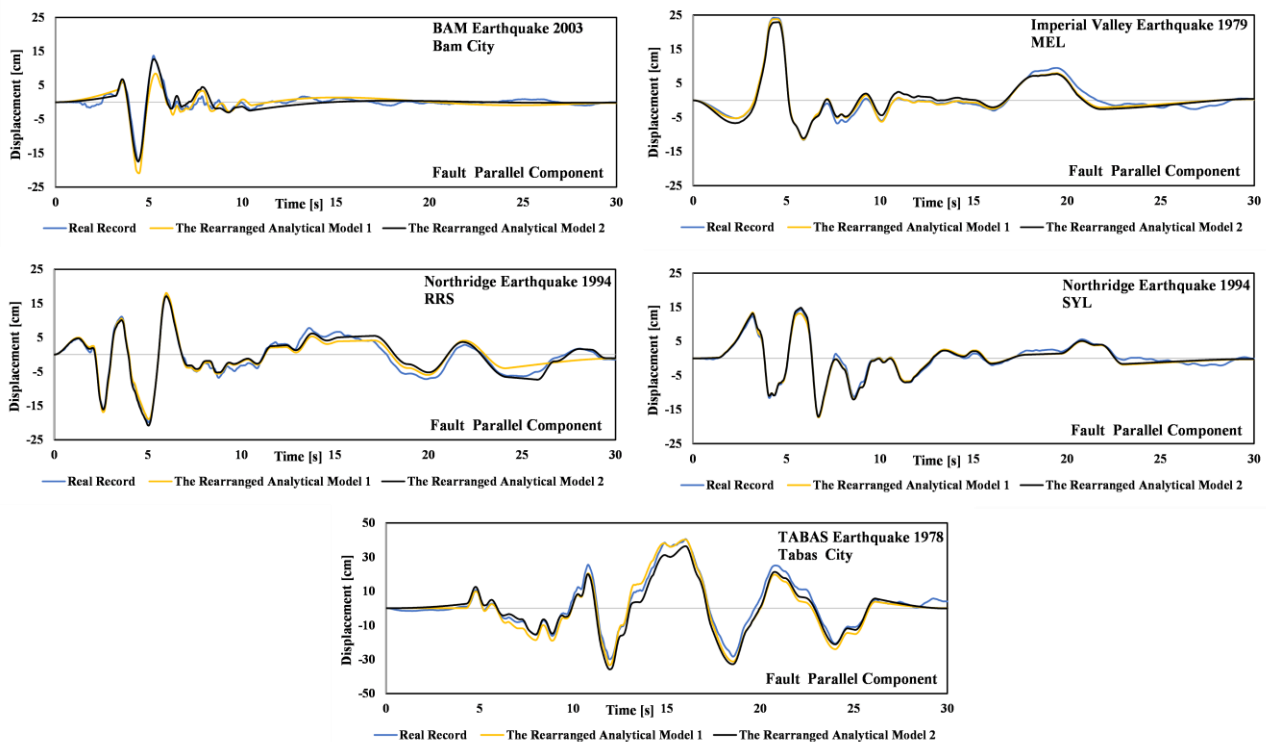


ب) ادامه دارد.



(پ)

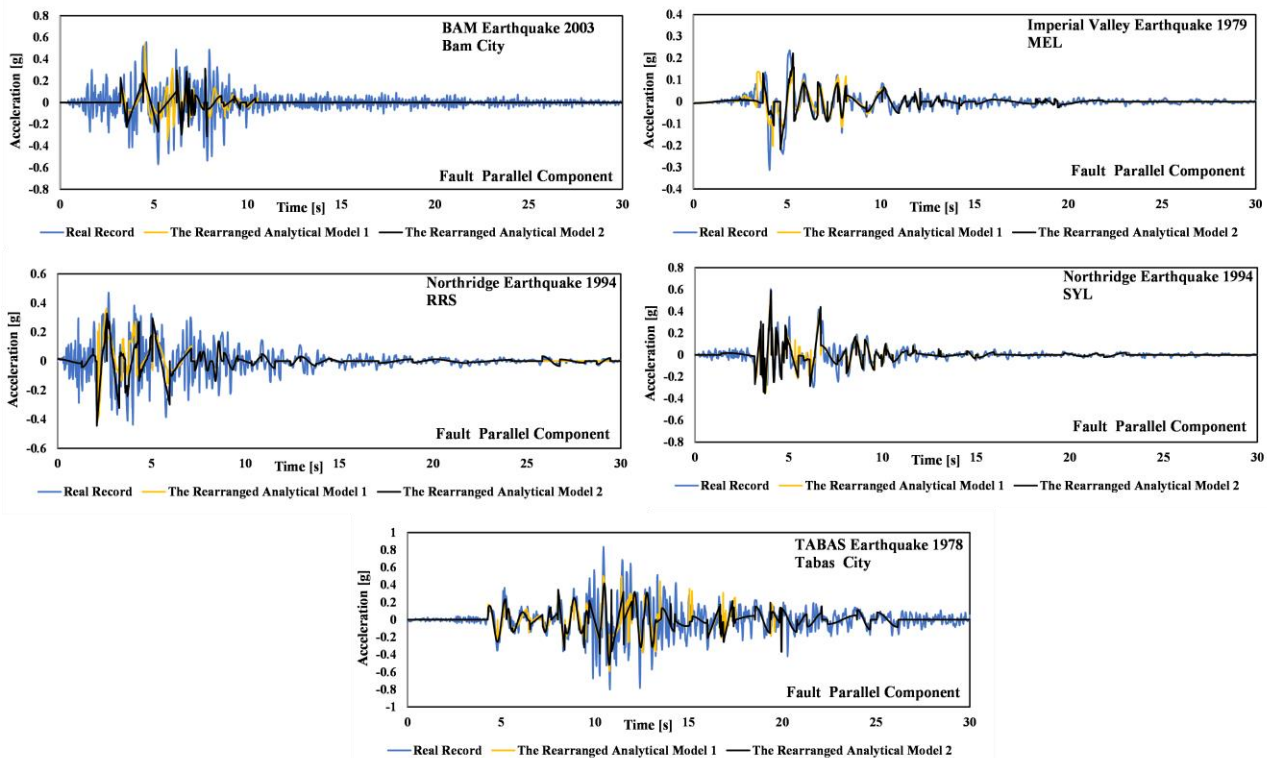
شکل ۲. نمودار تاریخچه زمانی سرعت و نمایش تغییرات تجمعی روند آزاد شدن انرژی مربوط به رکورد اصلی و نگاهت برازشی برای مؤلفه LN. (الف) رکوردهای BAM2003 و MEL1979، (ب) رکوردهای RRS1994 و SYL1994، (پ) رکورد TAB1978.



شکل ۳. نمودار تاریخچه زمانی جابجایی زمین متناظر با رکورد اصلی و نگاهت برازشی برای مؤلفه LN از رکوردهای BAM2003 و MEL1979، RRS1994، SYL1994، و TAB1978.

شکل‌های (۳) و (۴) به ترتیب نمایان‌گر نمودارهای تاریخچه زمانی جابجایی و شتاب زمین ساختگاه متناظر با مولفه LN از رکوردهای انتخابی (جدول ۱) و نیز ساختارهای برازشی مطرح شده در این تحقیق می‌باشند. مطابق با روش هر دو مرجع فوق و ساختارهای ریاضی بازپردازش شده و نیز با استفاده از عملیات ریاضی مشتق‌گیری و انتگرال‌گیری پارامتری، آرایه تاریخچه زمانی‌های شتاب و جابجایی از روی نگاهت برازشی متناظر با تاریخچه زمانی سرعت بدست آمده است. همانگونه که در شکل (۳) نشان داده شده

است، یک نمود و هم ارزی به نسبت پیوسته در نمودار جابجایی متناظر با بازه زمانی پالس پیوسته سرعت بویژه در محدوده موجک اصلی رکورد ملاحظه می‌شود. هماهنگی پردازشی نیز برای جابجایی متناظر با بازه زمانی اسپایک‌ها و موجک‌های کم‌دامنه در تاریخچه زمانی سرعت حاصل شده است. نمود این امر برای رکوردهای BAM2003 ، MEL1979 و RRS1994 مشخص می‌باشد. ملاحظه می‌شود که روند آزاد شدن انرژی ارتعاشات زمین در طی رکوردهای BAM2003 و MEL1979 و همچنین دو رکورد SYL1994 و RRS1994 کم و بیش شبیه به یکدیگر است. وجود اسپایک‌های پر دامنه و بخش‌های شبه مثلثی شکل حمل‌کننده فرکانس بالا در بازه زمانی پیش و پس از پالس پیوسته سرعت موجود در تاریخچه زمانی رکورد TAB1978 سبب ایجاد تفاوت‌هایی در چگونگی روند آزاد شدن انرژی این رکورد نسبت به دیگر رکوردها گردیده است. بررسی و ارزیابی نتایج مطرح شده در این مقاله بر اساس ساختارهای ریاضی بازپردازش شده مطابق با روابط (۴) تا (۶) (با نماد مدل تحلیلی شماره ۱) و نیز روابط (۹) و (۱۰) (با نماد مدل تحلیلی شماره ۲) توصیف‌کننده یک همپوشانی خوب میان تاریخچه زمانی‌های رکوردهای زلزله انتخابی و نگاشت‌های برازشی هم پایه آن‌ها است.



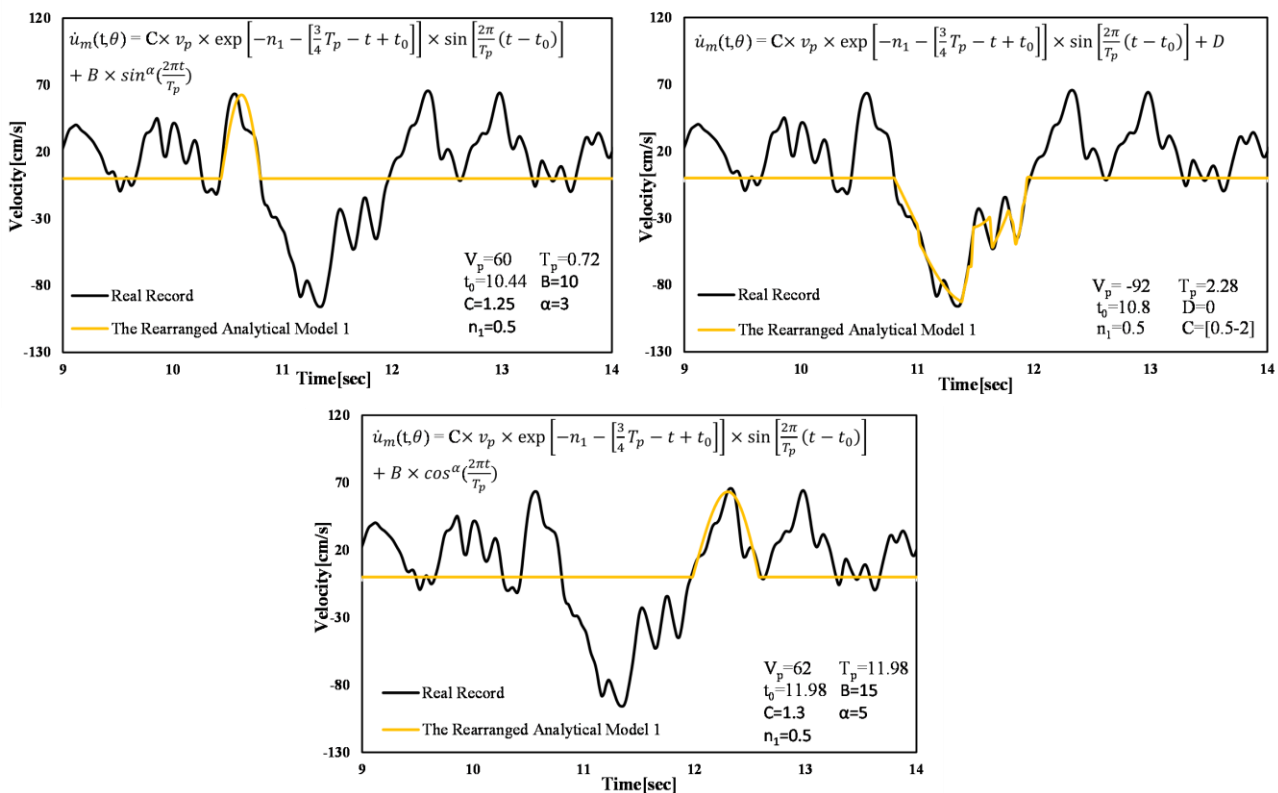
شکل ۴. نمودار تاریخچه زمانی شتاب متناظر با رکورد اصلی و نگاشت برازشی برای مؤلفه LN از رکوردهای BAM2003 و MEL1979 ، RRS1994 ، SYL1994 و TAB1978.

تمرکز اصلی مطالعاتی در این پژوهش، بر همپوشانی نمودار روند تجمعی آزاد شدن انرژی برای رکورد اصلی و نگاشت فرم بسته برازشی، به ویژه در گام پرش پلکانی هم ارز با پالس پیوسته سرعت موجود در تاریخچه زمانی جنبش نیرومند زمین می‌باشد. همچنین تدوین مدل‌های بازپردازش شده تحلیلی ۱ و ۲ نیز با توجه ویژه بر پالس و اسپایک‌های پر دامنه موجود در تاریخچه زمانی سرعت رکورد اصلی است که تطابق آن با نگاشت برازشی به روشنی در نمودارهای شکل (۲) مشخص می‌باشد. نکته مهم دیگر آن است که همگرایی و همسو شدن هر چه بهتر نمودار روند تجمعی آزاد شدن انرژی برای رکورد اصلی و نگاشت برازشی، به تعداد اسپایک‌های پر دامنه در نظر گرفته شده در بازه‌های زمانی پیش و پس از پالس پیوسته سرعت نیز وابسته است. پیاده‌سازی این موضوع در تحقیق حاضر با پوشش تعداد بیشتر بازه اسپایک‌های پر دامنه در پردازش نگاشت‌های فرم بسته، نمود یافته است. همان گونه که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، اختلاف و تمایز در بیشینه شتاب زمین (PGA) برای رکورد اصلی و نگاشت برازشی تا حدودی وجود دارد. این تمایز



ناشی از روند محاسباتی انجام گرفته در جهت ساختارسازی نمودار تاریخچه زمانی شتاب با در نظرگیری تاریخچه زمانی سرعت برآزش شده، می‌باشد.

شکل (۵) نمونه ای از شبیه سازی پالس پیوسته موجود در تاریخچه زمانی سرعت رکورد TAB1978 بر اساس مدل تحلیلی ۱ را نشان می‌دهد. در این شکل، شبیه سازی بازه زمانی ۲،۱۲ ثانیه ای متناظر با بخشی از پالس پیوسته سرعت، نشان داده شده است. این بازه شامل سه موجک محلی با دامنه‌های متفاوت است و اشتراک آن‌ها در دامنه بزرگ‌تر از ۵۰ سانتی‌متر بر ثانیه می‌باشد. هر یک از این موجک‌ها با توجه به پارامترهایی چون دامنه و پریود موجک، زمان شروع پالس و همچنین با در نظرگیری هندسه آن با استفاده از تعریف ساختارهای ریاضی متناسب در مدل تحلیلی ۱، نگاشت‌سازی شده است. دامنه عددی پارامترهای استفاده شده در هر بخش نیز در شکل (۵) آشکار است. با توجه به ماهیت تصادفی رکوردهای زلزله، پارامترهای استفاده شده در مدل برآزشی در نتیجه انجام روند آزمون و خطا برای یک مجموعه گسترده از رکوردهای حوزه نزدیک و با اعمال تغییرات جزئی در تقریب دامنه پالس اصلی سرعت و جایگزینی در توابع مثلثاتی، بدست آمده است. پیاده‌سازی روند فراگذاری شده در مدل تحلیلی ۲ نیز مشابه مدل تحلیلی ۱ می‌باشد.



شکل ۵. نمونه شبیه سازی پالس پیوسته سرعت بر پایه مدل تحلیلی ۱ برای مولفه LN از رکورد TAB1978.

## نتیجه گیری

در این پژوهش، بر پایه نگرش موضوعی بر دو مدل فرم بسته پایه و کارآمد در پردازش پالس‌های سرعت، تلاش گردید تا یک دیدگاه جامع و پوششی در شبیه‌سازی ساختارهای مذکور به همراه توصیف مشخصات چند اسپایک پر دامنه در بازه زمانی پس از موجک اصلی، در نظر گرفته شود. تمرکز اصلی سازمان این تحقیق در راستای تطابق و همپوشانی هر چه کامل‌تر برای نمودار تجمعی روند آزاد شدن انرژی مربوط به رکورد اصلی و نگاشت برآزشی متناظر آن است. پیاده سازی این موضوع بویژه از دیدگاه تشخیص بازه بسامدهای مربوط به موجک‌های پرنرژی متناظر با فرکانس‌های پایین موجود در ساختارهای پالس و اسپایک صورت گرفته است. تمهیدات محاسباتی در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی اسپایک‌های کوتاه مدت ترکیبی و شبه مثلثی، بطور نسبی در ایجاد تطابق و همپوشانی هر چه بهتر برای نمودار تاریخچه زمانی تغییر مکان متناظر با رکورد اصلی و نگاشت برآزشی تاثیرگذار است. یک جنبه

تحلیلی در این موضوع بر پایه لحاظ نمودن توابع نمایی و مثلثاتی با توان فرد انجام پذیرفته است. همچنین در خصوص شبیه سازی و ساخت نگاشت هم‌پایه در ارزیابی جنبش‌های قدرتمند حوزه نزدیک گسل، چگونگی روند بازپردازش و تحلیل موضوعی مربوطه نیز به صورت مستقیم از مشخصات فیزیکی رکوردهای زلزله نظیر محتوای فرکانسی، پریود پالس، تعداد اسپایک‌های پرنرژی و گام پرش پلکانی در نمودار تجمعی روند آزاد شدن انرژی تاثیر می‌پذیرد. عبارات و ساختارهای پارامتری بازپردازش شده در این مقاله، به خوبی می‌توانند دامنه‌های عددی مربوط به مشخصات فیزیکی و لرزه‌شناسی مرتبط با برازش پالس پیوسته و اسپایک‌های پرنرژی در تاریخچه زمانی رکوردهای حوزه نزدیک متاثر از اثرات جهت‌پذیری پیش‌رونده را پوشش دهند.

## مراجع

1. Ali, M.M. and Moon, K.S. (2007). "Structural developments in tall buildings: Current trends and future prospects", *Architectural Science Review*, 50 (3), 205-223.
2. MacRae, G.D. and Roeder, C. (2001). "Near-fault ground motion effects on simple structures", *Journal of Structural Engineering*, 127 (9), 996-1004.
3. Yang, D., Zhang, C., & Liu, Y. (2015). "Multi-fractal characteristic analysis of near-fault earthquake ground motions", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 72, 12-23.
4. 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 analyse earthquakes strong-motion waveforms", *Bulletin of Earthquake Engineering (Springer)*, doi:10.1007/s10518-017-0299-z
5. Chen, G., Liu, Y., Beer, M. (2023). "Identification of near-fault multi-pulse ground motion", *Applied Mathematical Modelling*, 117, 609-624.
6. Azhdarifar, M., Meshkat-Dini, A., Sarvghad-Moghadam, A., (2015). "Study on the seismic response parameters of steel medium-height buildings with framed-tube skeleton under near-fault records", *Electronic Journal of Structural Engineering*, 15(1), 70-87.
7. Naem, F. "The Seismic Design Handbook", 2th Edition, Kluwer Academic Publisher, 2001.
8. Somerville, P.G., and Graves, R. (1993). "Conditions that give rise to unusually large long period ground motions", *The Structural Design of Tall Buildings*, 2(3), 211-232.
9. Somerville, P.G., Smith, N.F., Graves, R.W. and Abrahamson, N.A. (1997). "Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity", *Seismological Research Letters*, 68(1), 199-222.
10. Chopra, A.K., Chintanapakdee, C. (2001). "Response of sdof systems to near-fault and far-fault earthquake motions in the context of spectral regions". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30, 1769-1789.
11. Cui, X.Z., and Hong, H.P. (2020). "A time-frequency representation model for seismic ground motions", *Bulletin of the Seismological Society of America*, XX,1-18, doi:10.1785/0120200123
۱۲. جمع دار، مهشاد و مشکوه الدینی، افشین. (۱۳۹۸). ارزیابی مدل‌های فرم بسته برازشی برای رکوردهای حوزه نزدیک در تحلیل پاسخ لرزه‌ای سازه‌های بلند مرتبه قاب خمشی محیطی، یازدهمین کنگره ملی مهندسی عمران، شیراز.
13. Liu, Y.X., Cui, X.Z., Hong, H.P. (2022). "Stochastic modelling of the pulse-like near-fault ground motions with time-frequency representation", *Journal of Seismology*, 26, 387-414, doi:10.1007/s10950-021-10064-7
14. Makris, N., Moghimi, G. (2022). "Response of seismic isolated structures with supplemental rotational inertia", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 51(12), 10.1002/eqe.3709.
15. Menun, C., Fu, Q. (2002). "An analytical model for near-fault ground motions and the response of sdof systems", *7th US National Conference on Earthquake Engineering (7NCEE)*. Boston, Massachusetts.
16. Hoseini Vaez, S.R., Sharbatdar M.K., Ghodrati Amiri G., Naderpour H., & Kheyroddin A. (2013). "Dominant pulse simulation of near fault ground motions", *Earthquake Engineering & Engineering Vibrations*, 12(2), 267-278.
17. Peng, Y., Luo, C.H., Qiu, C., Kong, F. (2023). "Stochastic simulation of velocity pulses of near-fault ground motions based on multivariate copula modeling", *Probabilistic Engineering Mechanics*, 72, 103434.
18. Sohrabifard, S., Mansoori, M.R., Meshkat-Dini, A., & Moghadam A.S. (2017). "Seismic response of asymmetric Steel bundled tube resistant skeletons under near-field earthquake records", 16th World Conference on Earthquake Engineering, Santiago, CHILE.