مدل‌سازی ریاضی پالس‌های نیرومند سرعت زمین با رویکرد تجزیه طیفی و اثرات جهت‌داری

سعید ولیان، افشین مشکوه‌الدینی، جعفر کیوانی قمصری؛
دانشگاه خوارزمی، دانشکدهٔ فنی مهندسی

تاریخ: دریافت ۹٦/۰٦/۱۵ پذیرش ۹۷/۰۹/۱۷

چکیده

در این پژوهش، شناخت پارامترهای اساسی لرزه‌شناسی مربوط به ساختارهای پالس‌گونه موجود در تاریخچهٔ زمانی رکوردهای نیرومند حوزهٔ نزدیک، با هدف مدل‌سازی ریاضی مورد توجه قرار گرفته است. پارامترهای مشخصه این ساختارهای پالس شکل، عبارت از دامنه، پریود و بازهٔ زمانی متناظر آن هستند. با استفاده از این عوامل و جای‌گذاری آن‌ها در روند برازش تحلیلی مربوط به یک فرمولاسیون فرم بسته، مدل‌های ریاضی توصیف کننده پالس‌های مشخص سرعت حاصل شده که می‌توانند ویژگی‌های اصلی لرزه‌شناسی مربوط به رکوردهای حوزهٔ نزدیک را به‌خوبی نمایش دهند. هدف از این مدل‌سازی، ایجاد گسترهٔ وسیعی از نگاشت‌های مصنوعی نیرومند و پرانرژی است که با توجه به معدود بودن رکوردهای حوزهٔ نزدیک در بررسی عملکرد انواع سازه‌ها کاربرد دارد. محتوای فرکانسی (تواتر) رکوردهای ثبت شده در زلزله‌ها را می‌توان به دو بخش باند فرکانس‌های بالا و باند فرکانس‌های پایین تفکیک کرد. نتایج پژوهش‌های لرزه‌شناسی بیان‌گر آن است که نمود مشخص‌ترین ویژگی‌های رکوردهای نیرومند حوزهٔ نزدیک را باند فرکانسی پایین ایجاد می‌کند. همین موضوع باعث شده است که در روند مدل‌سازی فرم بسته نیز توجهات تحلیلی بیش‌تر به باند فرکانسی پایین صورت گیرد. بر این اساس، مدل‌های فرم بسته ریاضی حاصل از این روند نیز تطابق قابل قبولی با رکوردهای نیرومند حوزهٔ نزدیک داشته و ویژگی‌های طیفی اصلی را به‌خوبی نمایش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: حوزه نزدیک، پالس سرعت، مدل فرم بسته، محتوای فرکانسی، باند فرکانس پایین

*نویسنده مسئول meshkat@khu.ac.ir

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.2.9]

مقدمه

ماهیت زلزله‌های حوزهٔ نزدیک با فاصلهٔ ایستگاه لرزه‌نگاری کم‌تر از ۲۰ کیلومتر تا صفحه شکست گسل، بسیار پیچیده و نامشخص است. این پیچیدگی فیزیکی، ساختارسازی رفتار و پیش‌بینی پاسخ سازه را دچار مشکل می‌سازد. بر این اساس می‌توان بر پایه تحلیل مشخصات فیزیکی رکوردهای حوزهٔ نزدیک، مدل‌های ریاضی ساده‌سازی شده‌ای را به‌کار برد. جنبش‌های زمین در حوزه نزدیک که اغلب به‌دلیل نوع خاص گسلش با پدیده جهت‌داری پیش‌رونده همراه هستند، اثر تخریبی بسیار بیش‌تری را نسبت به جنبش‌های حوزهٔ دور بر سازه دارند. پژوهش‌ها نشان می‌دهد تحت اثر جنبش‌های پر قدرت و نیرومند زمین در حوزهٔ نزدیک گسل، سازه‌ها با شدت زیادی وارد حوزهٔ رفتار غیرخطی می‌شوند. این ساختار رفتاری در ساختمان‌های میان مرتبه تا بلند نیز به‌صورت تشکیل و گسترش سریع مکانیزم‌های غیرخطی به‌ویژه در بخش‌های میانی‌سازه است. ملاحظه شده که با نزدیکی پریود سازه با پریود غالب رکورد این موضوع شدت می‌یابد. هم‌چنین با توجه به محدود بودن تعداد و اطلاعات رکوردهای حوزهٔ نزدیک در دسترس، این نیاز حس می‌شود تا نگاشت‌هایی ایجاد شود که بتوانند خصوصیات حاکم بر جنبش زمین را مدل‌سازی کنند. بدین‌ترتیب می‌توان با استفاده از نگاشت‌های ساده ایجاد شده و اعمال آن‌ها بر سازه، پاسخ لرزه‌ای را تحت اثر گستره وسیعی از جنبش‌های نیرومند زمین به‌دست آورد. در نتیجه با این کار می‌توان یک دید کلی نسبت به اثرات وقوع این دسته از زلزله‌ها و نیز عملکرد سازه‌ها در مواجه با این جنبش‌های ویرانگر به‌دست آورد و این رفتار را بهتر پیش‌بینی کرد [۱]، [۲].

با توجه به موارد مذکور، ایجاد مدل‌های قابل اعتماد که هر کدام جای‌گزین رکورد حوزهٔ نزدیک اصلی احتمالی هستند اهمیت بسیار زیاد دارد. ماکریس و چانگ سه پالس نوع A و نوع B و نوع Cn را به‌ترتیب با عنوان پالس‌های معرف حرکات یک‌سویه استاتیک پایه، دو سویه دینامیک پایه و نیز چند موجی معرفی کردند، (ماکریس و چانگ ۱۹۹۷–۱۹۹۸). آگراوال با اضافه کردن یک پارامتر میرایی، تقریب فرم بسته‌ای از جنبش‌های حوزهٔ نزدیک به دست آورد. ژانگ یوشان و همکاران با استفاده از تجزیه تاریخچهٔ زمانی شتاب به بخش‌های فرکانس بالا و فرکانس پایین، اقدام به تفکیک و شناسایی پالس‌ها و مدل‌سازی جنبش‌های

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.2.9]

نیرومند زمین کردند. ژی لیلی و همکاران با استفاده از دو موجک‌های تناوبی اصلی و فرعی، اقدام به مدل‌سازی پالس موجود در تاریخچهٔ زمانی رکوردهای نیرومند زلزله کردند. موکوپادهیای و گوپتا نیز با تعریف معیاری برای شناسایی رکوردهای حاوی پالس، اقدام به مدل‌سازی با چند فرمول فرم بسته کردند. پاپاجورجیو و ماوردیس یک مدل ریاضی با استفاده از موجک گابور (Gabor Wavelet) برای شبیه‌سازی پالس‌های موجود در تاریخچهٔ زمانی رکوردهای حوزهٔ نزدیک ارایه کردند که پارامترهای اصلی آن دامنه، بازه زمانی، فاز و تعداد تناوب بود [۳].

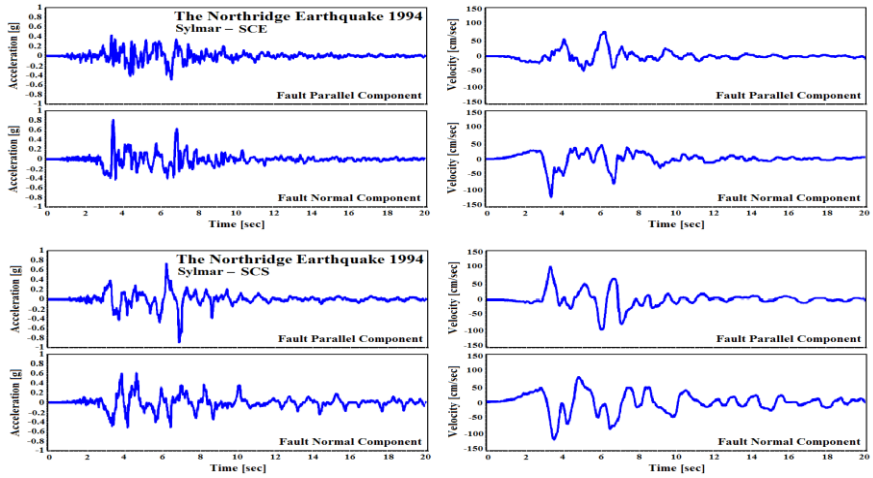
ماهیت تحلیلی مجموعه مدل‌های فرم بسته فوق، دارای ارتباط مستقیم با محتوای فرکانسی به نسبت گسترده رکوردهای حوزه نزدیک هست. بدین‌ترتیب؛ ساختار پاسخ لرزه‌ای اسکلت‌های مقاوم سازه‌ای نیز باید تحت اثر گسترهٔ وسیعی از این مدل‌ها که اغلب شامل یک پالس با پریود طولانی هست، قرار گیرند. تنوع فیزیکی رکوردهای حوزهٔ نزدیک، همراه با تدوین محاسبات پارامتری-تحلیلی مدل‌های فرم بسته، چالشی است که باید در نظر قرار داد. همچنین نزدیک بودن پریود پالس‌های پر انرژی موجود در تاریخچهٔ زمانی این‌گونه رکوردها با پریود سازه‌های میان مرتبه تا بلند، نمود پدیده تشدید دینامیکی و ورود به حوزهٔ رفتار غیرخطی با دامنه بزرگ را در پی دارد [٤].

ساختارشناسی رکوردهای حوزهٔ نزدیک

رکوردهای ثبت شده از جنبش‌های نیرومند زمین با فاصله‌های کم‌تر از ۲۰ کیلومتر تا گسل که در دسته جنبش‌های حوزه نزدیک قرار می گیرند، ویژگی‌های متمایزی از دیگر رکوردها دارند. هم‌چنین در تاریخچهٔ زمانی بیش‌تر رکوردهای حوزهٔ نزدیک به‌دلیل ساز و کارخاص گسلش و آشکار شدن پدیدهٔ جهت‌داری پیش‌رونده، پالس‌هایی با دامنه و پریود بلند در نگاشت شتاب و تاریخچهٔ زمانی سرعت زمین به‌چشم می‌خورد. وجود این پالس‌ها در تاریخچهٔ زمانی سرعت، نمود واضح‌تری دارد. بررسی علل این موضوع یکی از چالش‌های بزرگ پژوهشی در مباحث مهندسی زلزله است [۵]، [٦]، [۷]، [۸].

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.2.9]



شکل ۱. تاریخچهٔ زمانی شتاب و سرعت مؤلفه موازی با راستای گسلش (مؤلفه LN) و مؤلفهٔ عمود بر راستای گسلش (مؤلفه TR) مربوط به دو رکورد نیرومند حوزهٔ نزدیک SCE و SCS، ثبت شده در بخش Sylmar و هنگام زلزله Northridge 1994 کالیفرنیا؛ پالس‌ها و اسپایک‌های پر دامنه شتاب به‌همراه پالس‌های پیوسته سرعت مشخص هستند.

ماهیت پدیده جهت‌داری پیش‌رونده[1] به‌دلیل وقوع فرایند شکست و گسترش گسیختگی در ساز و کار گسل، با سرعتی نزدیک به‌سرعت انتشار امواج نیرومند برشی زلزله در محیط پیوسته خاک در برگیرنده ساختگاه، به‌سوی سایت مورد نظر رخ می دهد. پدیدهٔ مذکور باعث می‌شود که بخش چشم‌گیری از انرژی آزاد شده طی فرایند شکست گسل، در بازهٔ زمانی کوتاهی به ساختگاه اعمال شود. نمود این انرژی بسیارزیاد در کالبد تحلیلی یک شتاب نگاشت و به‌ویژه در تاریخچهٔ زمانی سرعت جنبش زمین، به‌صورت وجود پالس‌های پیوسته با دامنهٔ بزرگ و پریود بلند است. پالس‌های موجود در تاریخچهٔ زمانی که قابل تشخیص و تمایز از قسمت‌های دیگر رکورد هستند، نقش تعیین‌کننده را در شکل‌گیری پاسخ سازه ایفا می‌کنند [٦].

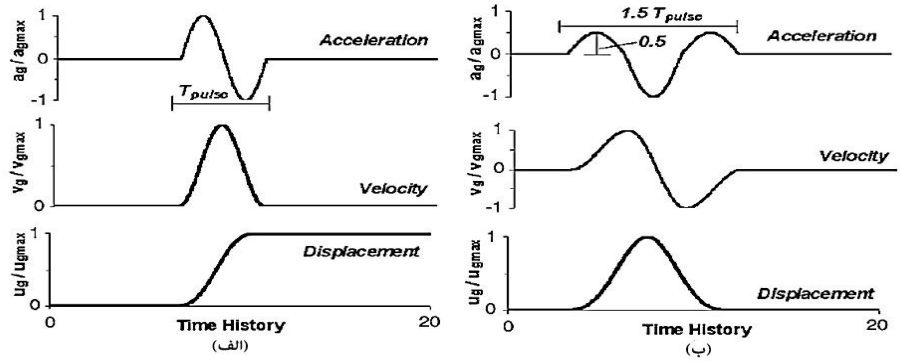
ساختار انتشار سه‌بعدی امواج برشی زلزله و نیز ساز و کار گسل‌های امتدادلغز[2] و شیب‌لغز[3] به‌گونه‌ای است که مؤلفه موازی راستای عمومی صفحه شکست‌گسل[4]

1. Forward Directivity
2. Strike Slip
3. Dip Slip
4. LN Component

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.2.9]

و نیز مؤلفهٔ عمود بر صفحهٔ مذکور (TR Component) می‌توانند حاوی اسپایک‌ها و پالس‌های بزرگ شتاب و سرعت باشند. به‌طور معمول، ماهیت و ساختار پالس‌های سرعت در تاریخچهٔ زمانی مؤلفهٔ TR دارای نمود بزرگ‌تری نسبت به مؤلفهٔ LN است. نکته دیگر آن که تاریخچهٔ زمانی تغییر مکان زمین مربوط به یک رکورد حوزهٔ نزدیک حاوی اثرات جهت‌داری پیش‌رونده نیز دارای پالس‌های پر دامنه و بلند مدت با ساختارهای شبه سینوس است. نمایش پالس‌های تغییرمکان به‌صورت موجک‌های پر دامنه و با پریود بزرگ (بیش از ۲ ثانیه) است [٦]، [۷]، [۸].

تاریخچهٔ زمانی دو رکورد بسیار پرقدرت ثبت شده در ایستگاه‌های SCE و SCS حوزهٔ سیلمار کالیفرنیای جنوبی، در هنگام زلزله نورتریج ۱۹۹٤ در شکل ۱ مشاهده می‌شود. مطابق شکل ۱، شتاب‌نگاشت هر دو مؤلفهٔ افقی این رکوردهای نیرومند دارای دو پالس بزرگ شتاب با گام زمانی بیش از ۱ ثانیه و تعدادی اسپایک‌های شتاب پردامنه با گام زمانی ۰,۲ تا ۰,۵ ثانیه است. متناظر با پالس‌ها و اسپایک‌های پردامنه شتاب، چند پالس پیوسته و بزرگ در تاریخچهٔ سرعت هر دو رکورد ملاحظه می‌شود. به‌طور معمول، مؤلفهٔ موازی با راستای گسلش (مؤلفه LN) در مقایسه با مؤلفهٔ عمود بر راستای گسلش (مؤلفه TR) دارای دامنه طیفی کوتاه‌تر، محتوای



شکل ۲. منحنی‌های پالس نرمالیزه شده سینوسی الف) پالس یک سویه سرعت همراه با پدیده گام پرتابی تغییرمکان زمین، ب) پالس دو سویه سرعت همراه با پدیده جهت‌داری پیش‌رونده [۱۱]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.2.9]

فرکانسی ضعیف‌تر و سهم انرژی جنبشی کم‌تری است. پدیدهٔ دیگری که در ماهیت فیزیکی رکوردهای حاوی اثرات شکست پیش‌رونده گسل به‌چشم می‌خورد، اثر گام پرتابی[1] است که با جابه‌جایی بزرگ و برگشت‌ناپذیر سطح زمین ساختگاه همراه است. این جا به‌جایی به‌صورت دایمی است و بیش‌تر در ساختگاه‌های با خاک نرم اتفاق می‌افتد. نکته دیگر آن که در تاریخچهٔ زمانی‌هایی که متأثر از این پدیده هستند، پالس‌های یک‌سویه سرعت وجود دارد. هم‌چنین در صورت وجود پالس‌های سرعت دوسویه، نمود اثر گام پرتابی یا دایمی نیست یا این‌که یک جابه‌جایی ماندگار ناچیز در پی دارد [۸]، [۹]، [۱۰]، [۱۱]. به‌طورکلی، پالس‌های بزرگ حاصل از فرایند جهت‌داری پیش‌رونده (یا همان شکست پیش‌رونده گسل) را می‌توان در دو دستهٔ عمومی نشان داده شده در شکل ۲ جای داد.

بخشی از پژوهشهای جامع روی تغییر مکان الاستیک سازه بر اساس نسبت بیشنیه شتاب به بیشینهٔ سرعت Ap/Vp در تاریخچهٔ رکورد است. Ap/Vp یک نسبت نشان‌دهندهٔ محتوای فرکانس زلزله طرح است. نتایج به‌دست آمده از پژوهش‌های مختلف روی پارامتر Ap/Vp بیان‌گر این است که این پارامتر، نمایندهٔ مشخصات مهم لرزه‌شناسی مثل بزرگا، ساز و کار گسلش، فاصلهٔ تا خط گسل و نوع خاک است. بر اساس این بررسی‌ها، نسبت‌های کوچک Ap/Vp می‌تواند نشان‌دهندهٔ زمین لرزه‌ای پر انرژی و ویران‌گر نیز باشد. هم‌چنین مقادیر بزرگ Ap/Vp، مشخصه جنبش‌های معمول با پتانسیل تخریبی پایین است. بر این اساس نسبت عددی ۳ <Ap/Vp، جنبشی با پتانسیل تخریب بسیار زیاد را نشان می‌دهد. نکتهٔ مهم دیگر آن که وجود بیشینهٔ شتاب بسیارزیاد، همواره همراه با بیشینهٔ سرعت زیاد نیست. هم‌چنین هر گاه بیشینهٔ شتاب زیاد با بیشینهٔ سرعت زیاد در تاریخچهٔ زمانی یک رکورد حوزهٔ نزدیک ایجاد شود، وجود قابلیت ویران‌گری و حجم بسیار گسترده رهاسازی انرژی جنبشی ناشی از ارتعاشات نیرومند پالس‌گونه زمین، قابل انتظار است [۱۲]، [۱۳].

نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهند که با تفکیک طیفی رکوردهای حوزهٔ نزدیک حاوی اثرات جهت‌داری پیش‌رونده به دو بخش باند فرکانسی بالا[2] و باند فرکانسی پایین[3]، هم‌چنین به

1. Fling Step
2. High Frequency-HF
3. Low Frequency - LF

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.2.9]

دست آوردن تاریخچهٔ سرعت و تغییر مکان زمین بر اساس آن دو بخش، معیارسازی مناسبی برای شناخت ماهیت فیزیکی جنبش‌های ضربه‌ای زمین در میدان نزدیک گسل حاصل می‌شود. بخش فرکانس پایین نقش پررنگ‌تری را در ایجاد ویژگی‌های فیزیکی رکورد ایفا می‌کند. باید توجه داشت که در بعضی موارد دامنهٔ طیفی بخش فرکانس بالا بیش‌تر از بخش فرکانس پایین است.

هم‌چنین به‌دلیل انرژی بیش‌تر پالس‌های فرکانس پایین و نیز با مقایسه تاریخچهٔ زمانی سرعت این دو بخش فرکانسی، می‌توان دریافت که دامنه پارامتر سرعت در بخش فرکانس پایین بیش‌تر است. این امکان وجود دارد که بخش فرکانس بالای یک رکورد نیرومند حوزهٔ نزدیک، چندان قابل توجه نباشد. به هرحال همیشه بخش فرکانس پایین، حاوی انرژی جنبشی قابل توجه در این‌گونه رکوردها است. نتایج پژوهش‌ها نشان‌دهندهٔ آن است که بخش فرکانس پایین نقش تعیین‌کننده‌ای را در نمود خصوصیات رکورد نیرومند حوزهٔ نزدیک ایفا نموده و به‌طور تقریبی می‌تواند نمایش‌گر ویژگی‌های فیزیکی رکورد اصلی باشد. وجود همین مشخصه سبب شده که شبیه‌سازی‌های فرم بسته، بر اساس برازش عددی پالس‌های با پریود بلند در تناظر تحلیلی با بازه فرکانس پایین مطرح شوند [۱٤].

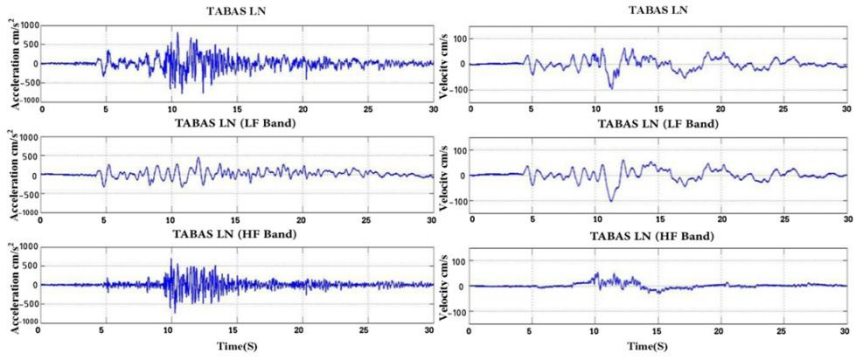
نمودهای تحلیل فرکانسی رکورد نیرومند TABAS در شکل ۳ بررسی شده است. در این پژوهش با استفاده از روش تجزیه طیفی، رکورد زلزله به مؤلفه‌های مود ذاتی EMD[1] تبدیل می‌شود. هم‌چنین مؤلفهٔ LN این رکورد به تعداد ۱۰ مؤلفهٔ مود ذاتی تجزیه شده و به هر کدام از این مؤلفه‌ها نیز یک پارامتر محاسباتی IMF[2] از رکورد اصلی اطلاق می‌شود. شایان ذکر است که با بر هم نهادن دو IMF اول، بخش فرکانس بالای این رکورد با پریود کم‌تر از ۰,۲ ثانیه (فرکانس بیش‌تر از ۵ هرتز) به‌دست می‌آید و مجموع هشت IMF بعدی نیز بخش فرکانس پایین این رکورد با پریود بزرگ‌تر از ۰,۲ ثانیه (فرکانس کم‌تر از ۵ هرتز)

1. Empirical Mode Decomposition
2. Intrinsic Mode Functions

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.2.9]

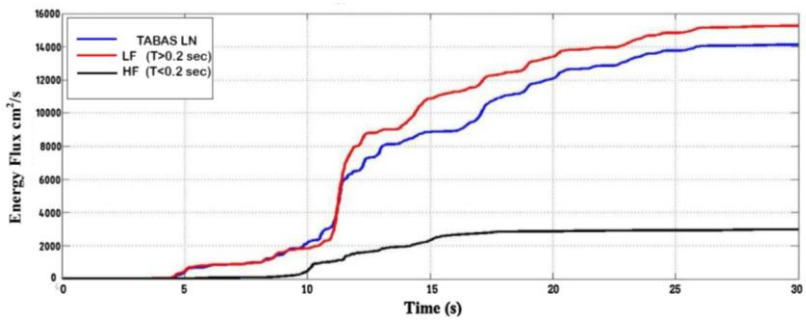
را تشکیل می‌دهد. در شکل۳ رکورد اصلی و دو بخش فرکانس پایین و بالای آن قابل مشاهده هستند. ملاحظه می‌شود، دامنهٔ پارامتر سرعت HF در مقایسه با LF بسیار کم‌تر است. هم‌چنین ظاهر کلی تاریخچهٔ زمانی رکورد نیز در یک نگاه تا حد زیادی با بخش LF آن شباهت و تطابق دارد [۱۵].

با توجه به این‌که در این پژوهش تمرکز ویژه‌ای بر ساختار محتوای انرژی موجود در رکوردهای حوزه نزدیک وجود دارد، با مقایسهٔ انرژی آزاد شده به‌وسیلهٔ هر دو بخشLF و HF مشاهده می‌شود که انرژی حاصل از بخش فرکانس بالا در مقایسه با بخش دیگر قابل چشم‌پوشی است، (شکل ٤). این نتیجه تأیید دیگری بر مناسب بودن مدل‌های ریاضی فرکانس پایین برای شبیه‌سازی رکوردهای حوزهٔ نزدیک است. با توجه به‌روش مدل‌سازی در این تحقیق که بر اساس تحلیل ساختار تاریخچهٔ سرعت زمین انجام می‌گیرد، دوگونه تغییرات عددی در پیکرهٔ زمانی این پارامتر تشخیص داده می‌شود. بدین‌ترتیب، در گونهٔ اول ساختار تاریخچه سرعت زمین، پالس فرکانس پایین به‌وضوح قابل تمایز است. هم‌چنین در گونهٔ دوم پارامتر یاد شده، ممکن است به‌دلیل وجود فرکانس‌های بالا، تشخیص ظاهری پالس موجود در تاریخچه سرعت به‌سختی انجام گیرد. معیار تحلیلی کارآمد در این خصوص نیز روش EMD است.



شکل ۳. تاریخچهٔ زمانی شتاب و سرعت متناظر با مؤلفهٔ LN از رکورد اصلی زلزله TABAS، بخش‌های فرکانس پایین (LF) و فرکانس بالا (HF)، نمایش تاریخچهٔ زمانی سرعت متناظر با بخش فرکانس پایین شباهت زیادی با تاریخچه اصلی دارد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.2.9]



شکل ٤ . نمودار انرژی تجمعی رکورد TABAS و سهم متناظر با مؤلفه‌های فرکانس پایین (LF) و فرکانس بالای رکورد (HF) ؛ چنان‌چه تأثیر اختلاف فاز محاسباتی برای دو سهم انرژی متناظر با باندهای LF و HF لحاظ شود، نمودار طیف حاصل از ترکیب هر دو سهم مذکور با نمودار مربوط به طیف واقعی تجمعی انرژی رکورد TABAS مشابهت کامل دارد.

فرمولاسیون مدل‌سازی رکوردهای حوزه نزدیک

روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی رکوردهای حوزه نزدیک پیشنهاد شده است. بنیان عددی بیش‌تر مدل‌سازی‌های گذشته بر اساس توابع‌هارمونیک و با تکیه بیش‌تر بر بخش فرکانس پایین یک رکورد زلزله، استوار است. هم‌چنین مدل‌های سینوسی ساده ارایه شده به‌وسیلهٔ ماکریس و همکاران (۱۹۹۷ و ۱۹۹۸)، همراه با اضافه شدن پارامتر عددی میرایی به توابع مثلثاتی نیز از جمله معیارهای تحلیلی شبیه‌سازی و ساخت پالس‌های سرعت است. یکی از جامع‌ترین مدل‌سازی‌ها نیز به‌وسیلهٔ ماوردیس و پاپاجورجیو (۲۰۰۳) با انتخاب موجک گابور[1] و ارائه یک روش برازش تحلیلی، صورت گرفته است. موجک گابور با در بر داشتن پارامترهای دامنه، فرکانس، فاز و کاراکتر نوسانی می‌تواند انعطاف خوبی برای تطابق با هر نوع پالسی را داشته باشد. ماوردیس و پاپاجورجیو با ایجاد تغییراتی در موجک گابور (فرمول۱) و جای‌گزینی تابعی ساده تر به‌جای منحنی گاوس به فرمولاسیونی با کارایی بیش‌تر دست یافتند (فرمول۲) که تطابق به نسبت بهتری با پالس سرعت رکوردهای مورد نظر داشت [١٦]، [١٧].

1. Gabor Wavelet

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.2.9]

قدرتی امیری و همکاران (۲۰۱۲) با ارایه فرمولاسیونی که مزایای پژوهش ماوردئیس و پاپاجورجیو (۲۰۰۳) و کاراکترهای موجک گابور را داشت، اقدام به شبیه‌سازی رکوردهای حوزه نزدیک نمودند. آنها با ضرب منحنی پیشنهادی خود در بخش هارمونیک موجک گابور، فرمولاسیون مناسبی را برای مدل‌سازی ساختار اصلی و پالس‌گونه رکوردهای حوزهٔ نزدیک به‌دست آوردند. پارامترهای مشابه به‌کار برده شده در مدل‌سازی مذکور شامل فاکتور A ، کنترل‌کنندهٔ دامنهٔ پالس، f_p فرکانس پالس، ν فاز و γ کاراکتر نوسان و t_0 نشان‌دهندهٔ زمان وقوع بیشینهٔ پالس در تاریخچهٔ زمانی رکورد مورد نظر است. هم‌چنین با مشتق‌گیری از فرمول ارایه شده و انتگرال آن به‌ترتیب رابطهٔ مربوط به شتاب پالس مورد نظر و تغییر مکان آن نیز به‌دست می‌آید [۱۸].

$$f(t) = A \times e^{-\left(\frac{2\pi f_p}{\lambda}\right)^2 t^2} \times \cos(2\pi f_p t + \nu) \quad f(t) = G(t) \times \cos(2\pi f_p t + \nu) \quad (۱)$$

$$\begin{cases} for(t_0 - \frac{\gamma}{4 f_p}) \le t \le (t_0 + \frac{\gamma}{4 f_p}) \\ v(t) = A\left(\frac{4 f_p}{\gamma}\right)^4 \left((t - t_0)^2 - (\frac{\gamma}{4 f_p})^2 \right)^2 \cos(2\pi f_p t + \nu), \gamma \ge 1 \\ Otherwise, v(t) = 0 \end{cases} \quad (۲)$$

ساختار تحلیلی مدل‌سازی رکوردهای حوزه نزدیک

رکوردهای حوزهٔ نزدیک حاوی اثرات جهت‌داری پیش‌رونده، دارای مقادیر شتاب، سرعت و تغییر مکان بالاتر برای زمین ساختگاه (ایستگاه لرزه‌نگاری) بوده و محتوای فرکانسی پر انرژی آن‌ها به‌ویژه در یک باند به نسبت باریک تواتر است. روند آزاد شدن انرژی جنبشی متناظر با ارتعاشات نیرومند زمین نیز طی یک بازهٔ زمانی نه‌چندان دراز مدت و به‌طور معمول کم‌تر از ۱۰ ثانیه صورت می‌گیرد. نمود رفتار دینامیکی زمین به‌صورت تغییر مکان‌های پردامنه رفت و برگشتی است و پالس‌های بلندمدت سرعت زمین نیز دارای پریود بیش از ۱ ثانیه و به‌صورت ساختارهای ترکیبی شبه سینوس پدیدار می‌شوند. نمونه‌های این

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.2.9]

ساختارهای موجی شکل در تاریخچهٔ زمانی شتاب و سرعت مربوط به دو رکورد SCE و SCS به‌خوبی مشاهده می‌شوند (شکل ۱).

مشخصات فیزیکی و ویژگی‌های طیفی رکوردهای انتخابی در این تحقیق (جدول ۱)، نزدیکی زیادی به ماهیت تحلیلی دو رکورد شکل ۱ دارند. تاریخچهٔ زمانی هر دو رکورد

جدول ۱. مشخصات رکوردهای ۳۰ ثانیه‌ای حوزهٔ نزدیک انتخابی و پارامترهای طیفی مدل‌سازی

Event	Mw	Component	PGV cm/s	A (Velocity Amplitude)	γ	υ (rad)	f_p (Hz)	t_0 (sec)
BAM 2003 (BAM)	٦,٦	LN	٥٩,٨٦	٦٥	٤	١,٣٠٩	٠,٥٦	٤,٣
		TR	١٢٣,٧	١٢٣,٧	٣	٠	٠,٥٢	٢,٨
		UP	٣٩,٤٣					
TABAS 1978 (TAB)	٧,٤	LN	١٠٠,٦٨	١١٠&٨٠	٤&٢	٣,١٤&٢,٨٧٩	٠,٥٢٥٥&٠,١٨	١١,٥&١٨,١
		TR	١٢٢,٦٦	١٢٥	٥	٠,٥٢	٠,٢	١٢,٠٨
		UP	٤٤,٤					
Loma Perita 1989 (LGP)	٦,٩	LN	٥١,٠٧	٦٠&٤٠&٦٠	&١&٢١	−١,٥٧&٣,١٤ ٢,٦١٨&	٠,٥٦&٠,٥&١	&٦,٣&٧,٣ ٥,٣
		TR	٩٦,٢٣	&٩٥&١٠٠ ٩٠	&١&٤١	٠&−١,٥٧&٠	&٠,٥٣&٠,٥٥ ٠,٢٤	&٥,٢&٧,٥ ٣,٧
		UP	٥٤,٥١					
Erzincan 1992 (ERZ)	٦,٧	LN	٦٤,٠٥	٧٥&٨٠	٢/٢	−٠,٧٨&١,٥٧	٠,٩٥&٠,٤٣	٣&٤,٨
		TR	٨٣,٩٥	٩٠	٤	٢,٣٥	٠,٤٨	٣,٤
		UP	١٨,٣٣					
Northridge 1994 (NWH)	٦,٧	LN	٧٤,٩٤	٨٠&٦٠	&٣,٥ ٢,٥	−١,٨٣&٠	١,١&٠,٥٥	٥,٣&٧,٥
		TR	٩٧,٣٢	٧٥&١١٠	&٢,٥ ٢,٣	−٠,٧٨&٤,٤٥	٠,٦٥&١,١	٣,٨&٥,٤
		UP	٣١,٢					
Northridge 1994 (WPI)	٦,٧	LN	٦٧,٣٩	٧٠	٤	٣,١٤	٠,٥	٥,٠
		TR	٩٢,٧٤	١١٠	٣	٣,١٤	٠,٤٤	٥,١
		UP	٣٧,٢١					

BAM و TAB دارای یک پالس پیوسته و بزرگ سرعت، متناظر با مؤلفهٔ TR و یک پالس سرعت پردامنه و به نسبت کوچک‌تر متناظر با مؤلفه LN است. مجموعه بزرگی از اسپایک‌های پردامنه نیز در نگاشت شتاب زمین وجود دارند. هم‌چنین پالس‌های منفرد و

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.2.9]

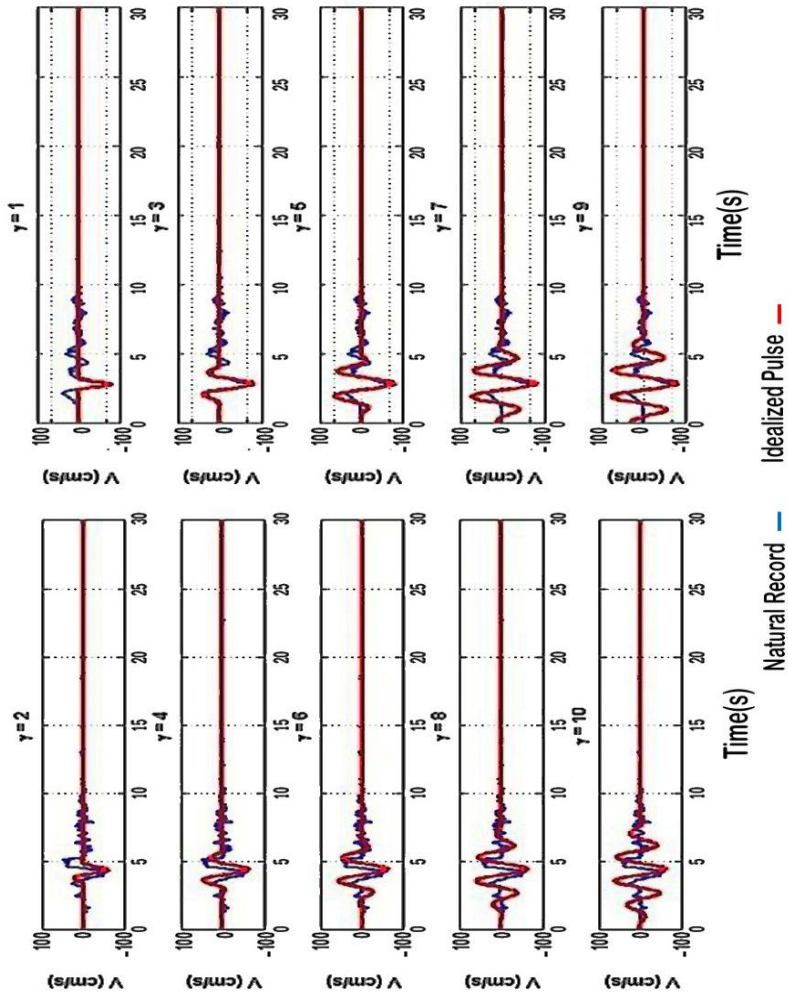
مشخص سرعت در تاریخچهٔ زمانی رکوردهای ERZ ، WPI و LGP موجود است. مؤلفهٔ TR این سه رکورد به مراتب قدرتمندتر از مؤلفهٔ LN است. ویژگی خاص رکورد NWH وجود دو پالس کوچک به‌همراه تعداد قابل توجه اسپایک‌های شتاب برای هر دو مؤلفهٔ LN و TR است. در پژوهش حاضر، هر شش رکورد حوزهٔ نزدیک مذکور با مشخصات مطابق جدول ۱ برای مدل‌سازی انتخاب شده‌اند. با توجه به ساختار تحلیلی هر یک از این رکوردها، پارامترهای مدل پایه ریاضی آن انتخاب و کالیبره شده است. هم‌چنین برای کالیبراسیون مدل پایهٔ ریاضی هر رکورد حوزهٔ نزدیک، علاوه بر انتخاب پارامترهای تحلیلی مناسب با استفاده از نرم افزار Matlab ، مقایسه نمودار انرژی تجمعی جنبشی رکورد اصلی با مدل فرم بسته نیز صورت گرفته است [۱۹]، [۲۰].

در این پژوهش؛ در اولین گام برای رکورد مورد نظر، پارامترهای A و t_0 با توجه به PGV و زمان وقوع آن، پارامتر f_0 با توجه به پریود پالس و نیز پارامترهای γ و ν با توجه به شکل کلی پالس به لحاظ تعداد نوسان و فاز آن انتخاب شدند. هم‌چنین با توجه به این‌که اساس این مدل‌سازی بر ساختار پالس سرعت استوار است، از مقایسهٔ پالس اولیه ایجاد شده با رکورد اصلی، پارامتر γ انتخاب می‌شود. سپس دو پارامتر ν و t_0 برای کالیبراسیون نهایی مدل با گام‌های مشخص، تغییر یافته است و بهترین تطابق به‌عنوان مدل ساده‌سازی شده تاریخچهٔ زمانی سرعت اصلی، انتخاب شده است. در نهایت به‌عنوان آخرین معیار سنجش، نمودار انرژی تجمعی رکورد مورد نظر با توجه به نمودار انرژی تجمعی مدل ریاضی آن مقایسه شده که نشان‌دهندهٔ قابل قبول بودن مدل است.

تعریف مشخصات رکورد BAM-TR (مؤلفهٔ عمود بر صفحه گسل) با انتخاب اعداد ۱۲۳,۷ cm/s ، ۰,۵۲ s ، ۲,۸ s , ۰ انجام شده و برای BAM-LN (مؤلفهٔ موازی با صفحه گسل) نیز اعداد ٦٥ cm/s، ۰,٥٦s ، ٤,۳ s و ۰ ، به‌ترتیب به‌عنوان A ، f_p ، t_0 و ν در مدل‌های اولیه همراه با در نظرگیری پارامتر γ برابر با ۱ تا ۱۰ لحاظ شده است. شکل‌های ٥ و ٦ نمایش‌دهندهٔ مدل‌های فرم بسته برازش شده هستند. با توجه به پالس موجود در رکورد اصلی، در اولین گام پارامتر γ=٤ انتخاب شد. سپس در مرحلهٔ بعدی با تغییر پارامتر ν

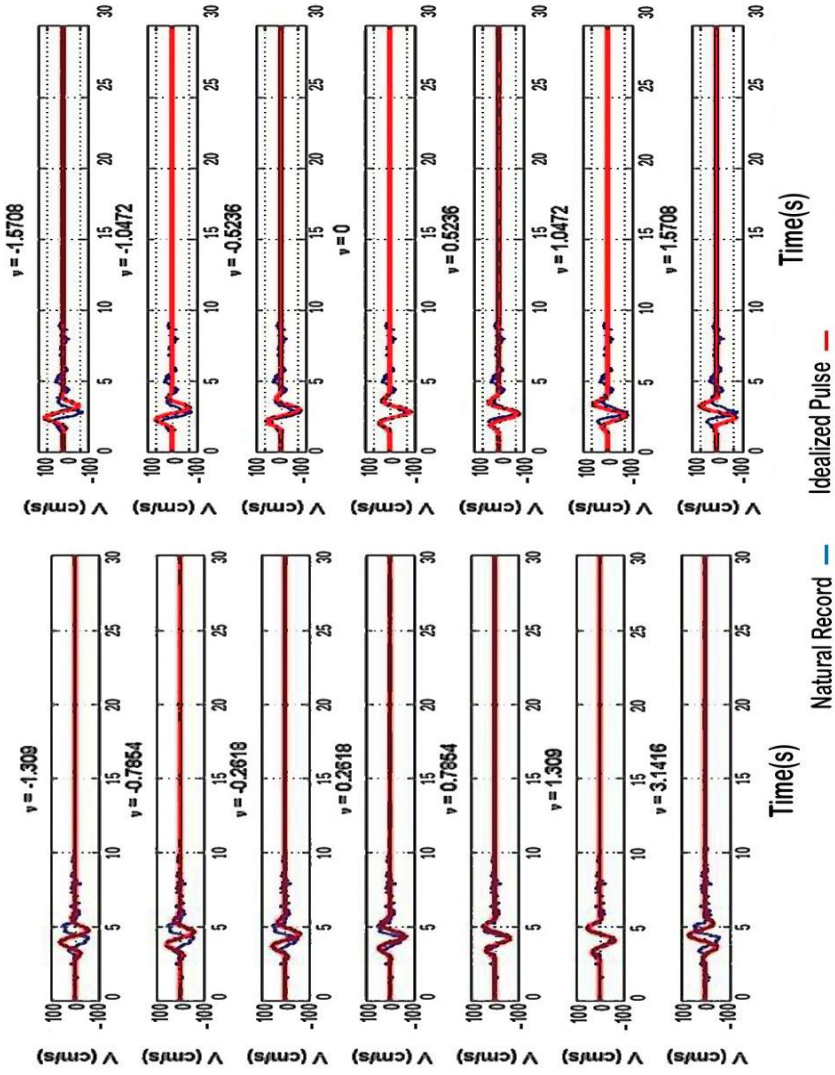
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.2.9]

با گام‌های $\pi/12$ و هم‌چنین تغییر t_0 با گام‌های ۰٫۱ ثانیه، بهترین تطابق انتخاب می‌شود. این فرایند نیاز به چندین تکرار داشته تا تطابق نسبی مدل فرم بسته و رکورد واقعی به‌دست آید.



شکل ۵. گام اول فرایند مدل‌سازی رکورد BAM 2003 ستون سمت راست مؤلفهٔ TR و ستون سمت چپ مؤلفهٔ LN ،انتخاب مناسب ترین γ به‌عنوان پارامتر مشخص‌کننده تعداد نوسان پالس

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.2.9]

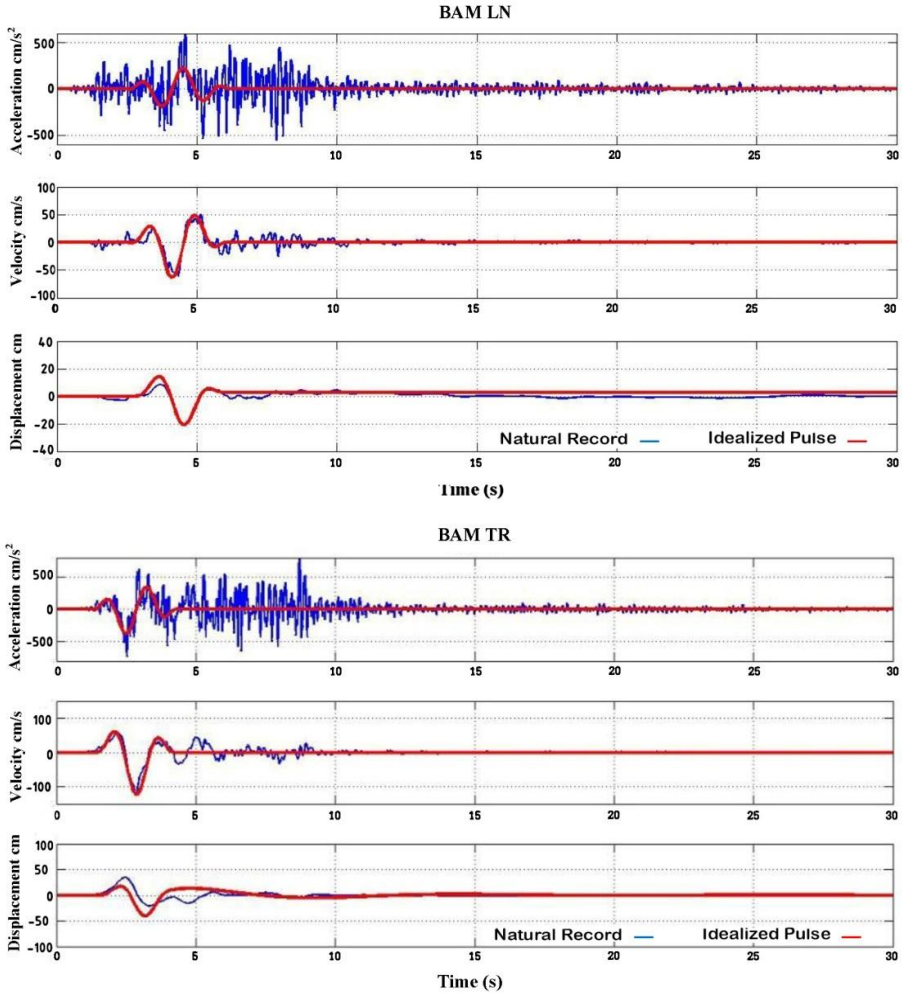


شکل ٦. فرایند مدل‌سازی رکورد BAM 2003 ستون سمت راست مؤلفه TR و ستون سمت چپ مؤلفهٔ LN ، انتخاب مناسب‌ترین v به‌عنوان پارامتر مشخص کننده فاز

چنان‌که در شکل ٧ مشاهده می‌شود، تطابق پالس‌های سرعت فرم بسته و رکورد اصلی قابل تشخیص است. نکته دیگر آن که پالس شتاب مدل‌سازی شده شباهت چندانی با رکورد

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.2.9]

اصلی ندارد. این عدم شباهت نیز هم در اندازه دامنه و هم برای پریود پالس به چشم می‌خورد. تاریخچهٔ زمانی رکورد اصلی حاوی اسپایک‌های پرقدرت و پرانرژی است و ساختار متناظر پالس شتاب نیز به‌صورت یک فرایند ترکیبی طیفی ایجاد می‌شود. این در حالی است که در تحلیل فرمولاسیون مدل فرم بسته (فرمول‌های ۱ و ۲)، ساختار پرانرژی شتاب به‌صورت یک موجک پیوسته آشکار می‌شود.



شکل ۷. تاریخچهٔ زمانی شتاب، سرعت و جابه‌جایی متناظر با دو مؤلفه LN و TR رکورد BAM 2003 و نمایش مدل هم‌ارز فرم بسته آن‌ها

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.2.9]

چنان‌که پیش‌تر بیان شد، بخش فرکانس پایین تاریخچهٔ زمانی یک رکورد زلزله؛ بیش‌ترین تأثیر را در تعیین مشخصات مدل فرم بسته دارد. بدین‌ترتیب، اسپایک‌های موجود در تاریخچهٔ زمانی رکورد که در دسته فرکانس بالا قرار می‌گیرند، نقش به نسبت کم‌رنگ‌تری در تعریف ویژگی‌های فیزیکی آن دارند.

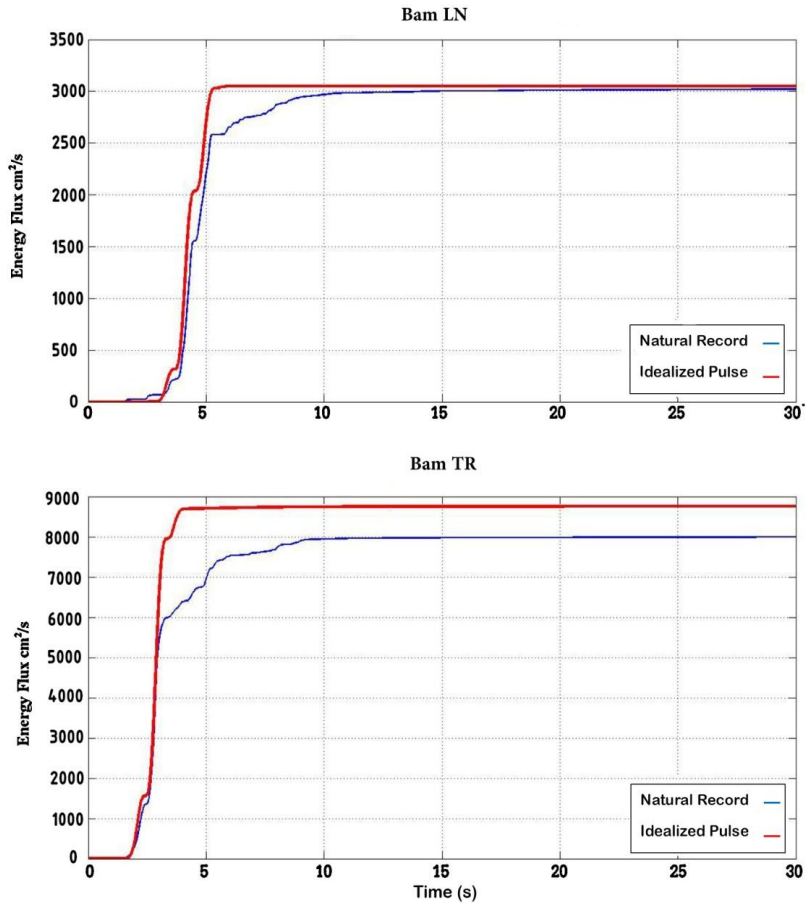
هم‌چنین برای بررسی جامع‌تر روند مدل‌سازی فرم بسته در این پژوهش، نمودار انرژی تجمعی رکورد نیرومند BAM 2003 با نمودار انرژی تجمعی انرژی پالس معادل شتاب، ارایه و مقایسه شده است. ساختار نمودارها در شکل ۸ بیان‌گر شباهت زیاد بین نمودار انرژی تجمعی هر دو فرایند رکورد واقعی و مدل فرم بسته متناظر آن است. با مقایسهٔ نمودارهای انرژی متناظر با رکورد اصلی و پالس فرم بسته ارایه شده، شباهت قابل قبولی در این دو نمودار مشاهده می‌شود. باید توجه داشت که برای یک رکورد نیرومند حوزهٔ نزدیک حاوی اثرات جهت‌داری پیش‌رونده، مدت زمان به نسبت کوتاه آزاد شدن انرژی می‌تواند ساختگاه را تحت تأثیر تغییر شکل‌های بزرگ زمین قرار دهد. وجود این ویژگی نیز سبب ورود سریع رفتار لرزه‌ای سازه‌ها به محدوده غیرخطی است [۲۱]، [۲۲].

با مقایسهٔ طیف فوریه و طیف پاسخ شتاب و سرعت و تغییر مکان مؤلفهٔ TR رکورد BAM در شکل ۹ و ۱۰ به‌وضوح می‌توان حذف بخش فرکانس بالا را در باند فرکانسی بیشتر از ۱ مشاهده کرد و تطابق مناسب طیف پاسخ شتاب در فرکانس‌های پایین‌تر قابل مشاهده است. هم‌چنین، با مقایسهٔ طیف پاسخ سرعت و تغییر مکان در شکل ۱۱ می‌توان تأثیر کم بخش حذف شده را با توجه به تطابق قابل قبول در گسترهٔ کامل فرکانسی، ملاحظه کرد. در هر سه نمودار شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ فرکانس‌های زیر ۱ هرتز طیف مربوط به رکورد اصلی (میدان آزاد) و مدل ریاضی مطابقت مناسبی دارد.

هم‌چنین به‌عنوان نمونه‌ای دیگر، در شکل ۱۲ نمودارهای شتاب، سرعت و انرژی مربوط به مؤلفهٔ LN از رکورد LGP نمایش داده شده‌اند. مدل‌سازی فرم بسته آن نیز بر اساس ساخت سه پالس مجزا با فرایند ذکر شده در بالا صورت گرفته و از بر هم نهادن آن‌ها، مدل نهایی به دست آمده است. چنان‌که مشاهده می‌شود به‌دلیل این‌که موجک‌های پریود کوتاه دیگری نیز علاوه بر پالس‌های اصلی در تاریخچهٔ سرعت رکورد وجود دارد، اختلاف میان

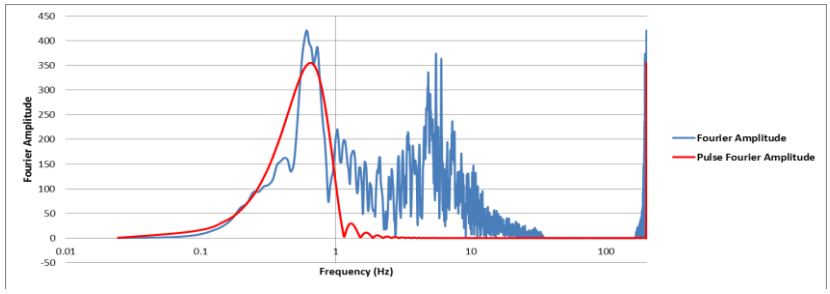
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.2.9]

دو نمودار انرژی تجمعی متناظر در این حالت کمی بیش‌تر است. نکتهٔ دیگر آن که نزدیک به ۸۰ درصد انرژی این رکورد در طی بازهٔ زمانی ۲٫۵ ثانیه، از ثانیه ۵ تا ۷٫۵ و نیز ۲۰ درصد باقی‌مانده هم در طی بیش از ۲۰ ثانیه آزاد می‌شود. بخش حاوی پالس‌های اصلی رکورد، به‌خوبی با مدل ریاضی فرم بسته پوشش داده شده است.

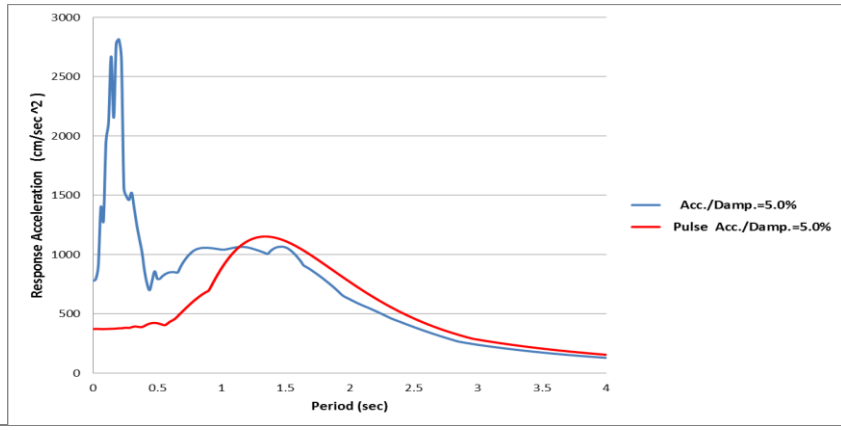


شکل ۸ . مقایسه نمودار انرژی تجمعی جنبشی دو مولفه LN و TR رکورد اصلی و مدل پایه ریاضی BAM 2003

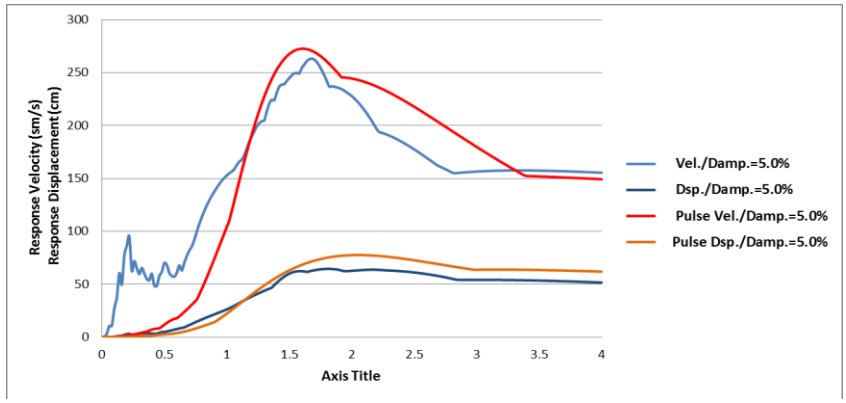
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.2.9]



شکل ۹. مقایسهٔ طیف فوریه مؤلفه TR رکورد اصلی و مدل پایه ریاضی BAM 2003



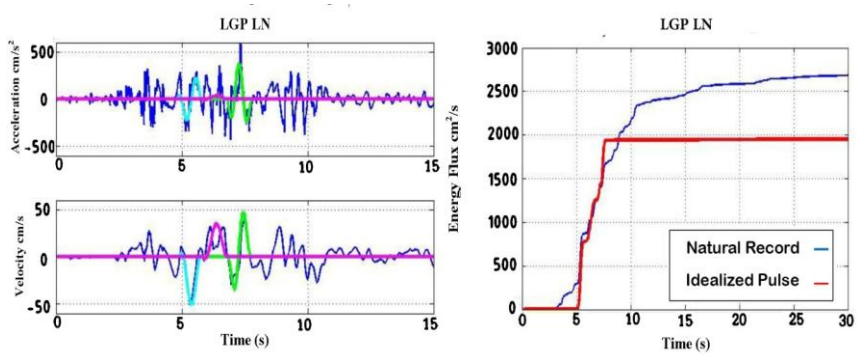
شکل ۱۰. مقایسهٔ طیف پاسخ شتاب مؤلفه TR رکورد اصلی و مدل پایه ریاضی BAM 2003



شکل ۱۱. مقایسهٔ طیف‌های پاسخ سرعت و تغییر مکان مؤلفه TR رکورد اصلی و مدل پایه ریاضی BAM 2003

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.2.9]



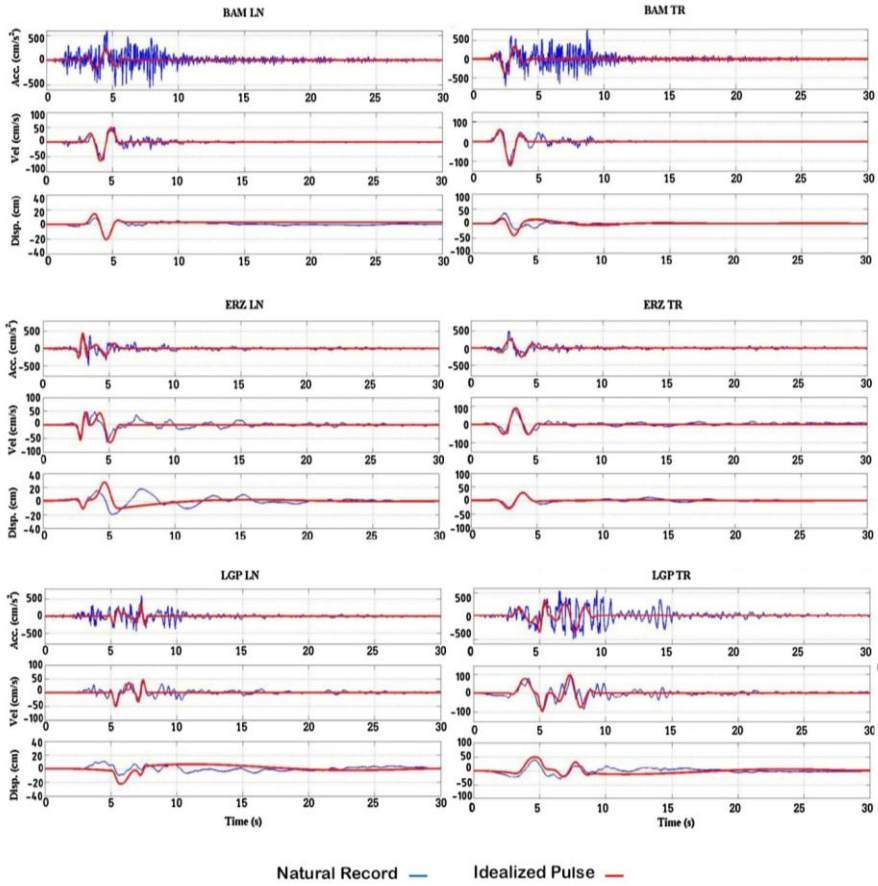
شکل ۱۲. تاریخچهٔ شتاب و سرعت مؤلفهٔ LN از رکورد LGP و مدل ریاضی سه پالس پر انرژی آن که نظیر به نظیر به‌صورت رنگی نمایش داده شده‌اند. نمودار انرژی تجمعی جنبشی رکورد اصلی و مدل فرم بسته ترکیبی سه پالس متناظر آن نیز مشخص است.

فرایند مدل‌سازی فرم بسته به‌شیوهٔ مشابه فوق برای شش رکورد حوزهٔ نزدیک قدرتمند حاوی پالس‌ها و اسپایک‌های پرانرژی شتاب و سرعت، با در نظر گرفتن پارامترهای موجود در جدول ۱ انجام گرفت. نتایج برازش‌های تحلیلی و تعیین پارامترهای طیفی متناظر رکوردهای جدول ۱ نیز در شکل‌های ۱۳ و ۱٤ نمایش داده شده است. قابل ذکر است که برای برخی از رکوردها با توجه به‌وجود چند پالس مشخص در تاریخچهٔ سرعت، فرایند مدل سازی و تعیین پارامترهای وابسته تا چند بار پی در پی برای هر ساختار موجی شکل در تاریخچه صورت گرفته است. روندهای محاسباتی هر پالس نیز به شکل جداگانه انجام شده و در آخرین گام با برهم نهی تاریخچهٔ زمانی ساختارهای فرم بسته، مدل کامل محاسباتی به‌دست آمده است. پارامترهای محاسباتی مربوط به هر یک از پالس‌های موجود در رکوردهای انتخابی؛ در جدول ۱ به‌صورت جدا شده و به‌ترتیب از چپ به‌راست قرار داده شده‌اند.

نتایج تحلیلی این پژوهش برای برازش فرم بسته رکوردهای جدول ۱ در شکل ۱٤ مشاهده می‌شوند. قابل ذکر است که نمود بخش فرکانس بالای این رکوردها؛ بیش‌تر متناظر با اسپایک‌های بسیار کوتاه مدت شتاب است و تأثیر کم‌تری در ساختار و ویژگی‌های فیزیکی آن‌ها دارند. تمرکز تحلیلی فرایند مدل‌سازی فرم بسته در این پژوهش بر بخش فرکانس پایین که تطابق با پالس‌های موجود در تاریخچهٔ شتاب و سرعت دارد، است. بدین لحاظ،

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.2.9]

هماهنگی پارامتری مدل‌سازی فرم بسته در این پژوهش دارای مطابقت مناسبی با آن دسته از رکوردهای نیرومند حوزهٔ نزدیک است که حاوی تعداد کم اسپایک‌های فرکانس بالا در تاریخچهٔ زمانی شتاب هستند.

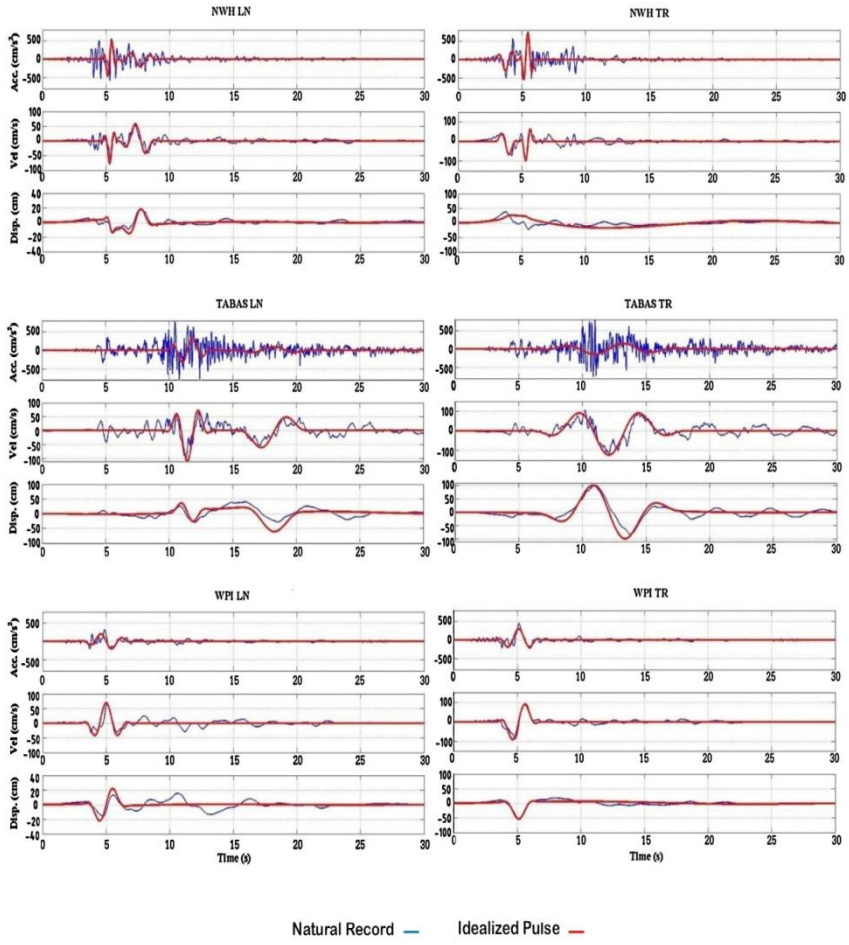


شکل ۱۳. تاریخچهٔ زمانی شتاب، سرعت و جابه‌جایی متناظر با رکوردهای BAM ، ERZ و LGP (جدول ۱) و ساختار ریاضی مدل فرم بسته معادل

تاریخچهٔ زمانی رکوردهای بسیار نیرومندی مانند TABAS و BAM دارای هر دو باند پر انرژی فرکانس‌های بالا و پایین است. هم‌چنین از آن‌جاکه روند مدل‌سازی فرم بسته با برازش باند فرکانس پایین انجام شده، نمود ظاهری تاریخچه شتاب فرم بسته متناظر با دو

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.2.9]

رکورد یاد شده، تطابق چندانی با آرایه‌های عددی ثبت شده واقعی ندارد. با این وجود، یک تطابق و هماهنگی بسیار خوب برای پالس‌های پر انرژی و پریود بلند سرعت دیده می‌شود. بدیهی است که بخش فرکانس بالای این دو رکورد، تاثیر چندان زیادی در نمود فیزیکی پالس‌های سرعت ندارند.



شکل ۱۴. تاریخچهٔ زمانی شتاب، سرعت و جابه‌جایی متناظر با رکوردهای NWH ، TABAS و WPI (جدول ۱) و ساختار ریاضی مدل فرم بسته معادل

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.2.9]

هم‌چنین تاریخچهٔ زمانی بعضی از رکوردهای نیرومند حوزهٔ نزدیک مانند TABAS، LGP ، ERZ ، NWH حاوی یک پالس ترکیبی و یا چند پالس مشخص سرعت هست و باید برای بالا بردن دقت مدل‌سازی فرم بسته، آن‌ها را در فرایند محاسباتی به‌طور جداگانه لحاظ کرد. هر کدام از این پالس‌ها بخش چشم‌گیری از انرژی رکورد را حمل می‌کنند و نیز دارای پریود متفاوت هستند. وجود همین ویژگی سبب ایجاد قابلیت تاثیرگذاری دینامیکی شدید و افزایش بزرگ ظرفیت ویران گری رکوردها در رفتار لرزه‌ای سازه‌های میان مرتبه تا بلند است. کاربرد شاخص این پژوهش در مدل‌سازی ریاضی و برازش فرم بسته رکوردهای چند پالسی است. افزون بر آن، تطابق قابل قبولی نیز برای ویژگی‌های تحلیلی- طیفی نگاشت‌های مصنوعی با رکوردهای اصلی برقرار است.

نتیجه‌گیری

با توجه به کم اثر بودن باند فرکانس‌های بالا در ساختار طیفی تاریخچهٔ زمانی‌های شتاب، سرعت و همین‌طور انرژی جنبشی، نادیده گرفتن آن نیز چندان تأثیرگذار نیست. بدین لحاظ، مدل‌سازی ریاضی رکوردهای حوزه نزدیک می‌تواند با دقت قابل قبولی انجام شود. هم‌چنین در حین وقوع جنبش‌های نیرومند حوزهٔ نزدیک گسل، حجم انرژی بسیار زیادی در بازهٔ زمانی به نسبت کوتاه آزاد می‌شود. ساختارهای حمل‌کنندهٔ این انرژی نیز به‌صورت پالس‌های با پریود بلند، همراه با اسپایک‌های پردامنه و پرانرژی است. بر همین اساس، در این تحقیق برای مدل فرم بسته ارایه شده، یک پالس بسیار بزرگ و پردامنه با پریود بلند رابطه‌سازی و جای‌گزین شده است. رکوردهای حوزهٔ نزدیک حاوی اثرات جهت‌داری پیش‌رونده ممکن است که دارای بیش از یک پالس مشخص پردامنه با ویژگی‌های متفاوت و به‌ویژه در چند بخش از تاریخچهٔ زمانی باشند.

هر یک از پالس‌های موجود در تاریخچهٔ زمانی رکوردهای پرقدرت حوزهٔ نزدیک، بخش چشم‌گیری از انرژی جنبشی زمین‌لرزه را حمل می‌کند. نمود واقعی این مشخصات به‌صورت پدیدار شدن چندین موج تغییر مکان در جنبش زمین ساختگاه است. باید دقت

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.2.9]

داشت که برای مدل‌سازی فرم بسته این‌گونه رکوردها، هر پالس مشخص به‌صورت جداگانه و با پارامترهای متناظر خود مورد توجه قرار گیرد. اختلاف نسبی دامنه‌های نمودار انرژی تجمعی رکورد اصلی و مدل فرم بستهٔ ریاضی برای این دسته از رکوردهای نیرومند، ممکن است در مقایسه با رکوردهای حاوی تنها یک پالس سرعت بزرگ و پردامنه بیش‌تر باشد.

موضوع با اهمیت دیگر نیز آزاد شدن بخش عمدهٔ انرژی جنبشی در بازهٔ زمانی کوتاه است و فرایند مدل‌سازی فرم بسته در این حالت به‌خوبی انجام می‌شود. برخی از رکوردهای نیرومند حوزهٔ نزدیک، حاوی چند پالس متوالی با پریودهای متفاوت هستند و نمی‌توان هیچ‌یک از آن‌ها را نادیده گرفت. بدیهی است که تأثیرگذاری این رکوردها بر رفتار لرزه‌ای سازه‌های میان مرتبه تا بلند با آرایش پریودیک گسترده، چشم‌گیر است. هم‌چنین امکان نزدیک بودن گام زمانی یک یا چند مود ارتعاشی با پریود پالس یا پالس‌های موجود در تاریخچهٔ زمانی رکورد وجود داشته و اثرات احتمالی تشدید پدیدار می‌شود. در پژوهش حاضر، توجهات تحلیلی به این مقوله نیز در شبیه‌سازی پالس‌های چندگانه موجود در تاریخچهٔ زمانی رکوردهای انتخابی لحاظ شد. مدل‌های ریاضی برازش شده برای رکوردهای انتخابی، تطابق خوبی با ساختار فیزیکی رکورد اصلی نشان می دهند.

منابع

1. Amiri J. V., Davoodi M. R., Sahafi A., "Simulation of near-fault ground motions with equivalent pulses and compare their effects on MRF structures", 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China (2008) 12-17.
2. Khaloo A. R., Khosravi H., "Multi-mode response of shear and flexural buildings to pulse-type ground motions in near-field earthquakes", Journal of Earthquake Engineering, 12 (4) (2008) 616-630.

۳. نظری ش.، کیوانی ج.، مشکوه‌الدینی ا.، "شبیه‌سازی رکوردهای زلزله حوزهٔ نزدیک با استفاده از تابع موجک"، نشریهٔ زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه خوارزمی، جلد دوازدهم، شمارهٔ ٤ زمستان (۱۳۹۷) ۷۰۷-۷۲٦.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.2.9]

4. Nazari S., Keyvani J., Meshkat-Dini A., Azhdarifar M., "Study on the seismic response of mid-rise bundled tube resistant systems under simulated closed-form near-field records", Asian Journal, of Civil Engineering (BHRC), Tehran, Iran, 18 (6) (2017)961-976.
5. Tavakoli, H. R., Gilani H., Abdollahzadeh G. R., "Comparative evaluation of seismic parameters for near-fault and far-fault earthquakes", 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal 24-28 (2012).
6. Bray J. D., Rodriguez-Marek A., "Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 24 (11) (2004)815-828.
7. Agrawal A. K., He W. L., "A close-form approximation of near-fault ground motion pulses for flexible structures", ASCE Engineering Mechanics Conference, Columbia University, New York, N.Y., (2002).
8. Kalkan E., Kunnath S. K., "Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings", Earthquake Spectra, 22 (2) (2006) 367-390,.
۹. ولیان س.، کیوانی ج.، "بررسی رفتار دینامیکی سازهٔ فولادی با سیستم مقاوم جانبی دوگانه تحت اثرمدل‌های ریاضی رکوردهای حوزه نزدیک"، دهمین کنگرهٔ ملی مهندسی عمران، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف ۳۰ و ۳۱ فروردین (۱۳۹٦).
10. Burks L. S., Baker J. W., "A predictive model for fling-step in near-fault ground motions based on recordings and simulations", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 80 (2016) 119-126.
11. Kalkan E., Kunnath S. K., "Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings", Earthquake Spectra, 22 (2) (2006) 367-390.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.2.9]

12. Durucan C., Durucan A. R., "Ap/Vp specific inelastic displacement ratio for the seismic response estimation of SDOF structures subjected to sequential near fault pulse type ground motion records", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 89 (2016) 163-170.
13. Hatzigeorgiou G. D., "Behavior factors for nonlinear structures subjected to multiple near-fault earthquakes", Computers and Structures, 88 (5) (2010) 309-321.
14. Zhang Y., Hu Y., Zhao F., Liang J., Yang C., "Identification of acceleration pulses in near-fault ground motion using the EMD method", Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 4 (2) (2005) 201-212.
15. Kedadouche M., Thomas M., Tahan A., "A comparative study between empirical wavelet transforms and empirical mode decomposition methods: Application to bearing defect diagnosis", Mechanical Systems and Signal Processing, 81 (2016) 88-107.
16. Mavroeidis G. P., Papageorgiou A. S., "A mathematical representation of near-fault ground motions", Bulletin of the Seismological Society of America (BSSA) 93 (3) (2003)1099-1131.
17. Mollaioli F., Bosi A., "Wavelet analysis for the characterization of forward-directivity pulse-like ground motions on energy basis", Meccanica, 47 (1) (2012) 203-219.
18. Vaez S. H., Sharbatdar M. K., Amiri G. G., Naderpour H., Kheyroddin A., "Dominant pulse simulation of near fault ground motions", Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 12 (2) (2013) 267-278,.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.2.9]

19. Mukhopadhyay S., Gupta V. K., "Directivity pulses in near-fault ground motions–II: Estimation of pulse parameters", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 50 (2013) 38-52.
20. MATLAB Programm, http://mathworks.com/products/matlab.
21. Xu Z., Agrawal A. K., He W. L., Tan P., "Performance of passive energy dissipation systems during near-field ground motion type pulses", Engineering Structures, 29 (2) (2007) 224-236.
22. Zhai C., Chang Z., Li S., Chen Z., Xie L., "Quantitative identification of near-fault pulse-like ground motions based on energy", Bulletin of the Seismological Society of America (BSSA), 103 (5) (2013) 2591-2603.
23. PEER Ground Motion Database, http://peer.berkeley.edu/.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.2.9]