شبیه‌سازی رکوردهای زلزله حوزه نزدیک با استفاده از توابع موجک

شیدا نظری، افشین مشکوه‌الدینی*، جعفر کیوانی؛
دانشگاه خوارزمی، دانشکدهٔ فنی و مهندسی

تاریخ: دریافت ۹۵/۱۰/۱۷ پذیرش ۹۶/۰۲/۰۳

چکیده

بررسی مشخصات اصلی جنبش‌های نیرومند زمین، سابقه طولانی دارد. مشاهدات و ارزیابی‌های انجام شده بر خسارات ساره‌ای ایجاد شده پس از زلزله‌های بزرگ نورتریج ۱۹۹٤ کالیفرنیا، کوبه ۱۹۹۵ ژاپن، بم ۲۰۰۳ و طبس ۱۹۷۸ ایران، بیانگر اثرات بسیار ویرانگر رکوردهای نیرومند حوزهٔ نزدیک است. مهم‌ترین ویژگی این رکوردها که آن‌ها را از رکوردهای حوزهٔ دور متمایز می‌کند، توانایی تولید اسپایک‌های پر انرژی و به نسبت کوتاه مدت شتاب همراه با پالس‌هایی با دامنه بزرگ و به نسبت طولانی مدت در تاریخچه زمانی سرعت زمین است. هم‌چنین با توجه به ساختار آماری محدود و وجود کاستی‌های فراوان، پردازش داده‌های طیفی موجود ناتوان از ارائه کامل اطلاعات هستند. با توجه به این‌که زلزله‌های بزرگ دارای دورهٔ بازگشت طولانی است و نیز بسیاری از مناطق لرزه‌خیز ایران فاقد ثبت رکوردهای نیرومند زلزله هستند، بدین لحاظ نیاز به تولید و شبیه‌سازی رویدادهای بزرگ محتمل با کاربرد مدل‌های فرم بسته و آنالیز داده‌های موجود احساس می‌شود. در این تحقیق تلاش بر آن است تا با نگرش جامع تحلیلی بر مدل فرم بسته ماورودیس و پاپوجورجیو به ارائهٔ یک مدل ریاضی تعمیم یافته به‌منظور شبیه‌سازی پالس‌های موجود در رکوردهای حوزهٔ نزدیک پرداخته شود.

واژه‌های کلیدی: جنبش‌های نیرومند زمین، اسپایک‌های پرانرژی، پالس‌های با دامنه بزرگ، مدل‌های فرم بسته

مقدمه

شایان ذکر است در نزدیکی صفحهٔ شکست یک گسل فعال، جنبش‌ها و لرزش‌های زمین به میزان چشم‌گیری تحت تأثیر مکانیزم گسلش، انتشار گسیختگی و هم‌چنین تغییرشکل‌های

*نویسنده مسئول meshkat@khu.ac.ir

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.707]

پردامنه دینامیکی قرار گرفته و در شرایط خاص نیز متأثر از حرکات پرتابی در ساختار شکست گسل‌ها (به‌ویژه گسل‌های امتداد لغز و شیب لغز) است. ملاحظه شده است زمانی که نیاز به داشتن چگونگی تغییرات مشخصات طیفی جنبش‌های زمین باشد، پردازش داده‌های محدود ناتوان از ارائه کامل اطلاعات است. نمود تاریخچهٔ زمانی رکوردهای ثبت شده از زمین لرزه‌های بزرگ به‌ویژه در ایستگاه‌های نزدیک گسل، کامل‌ترین مجموعه اطلاعاتی از یک زلزله را ارائه می‌دهد. باید توجه داشت که دورهٔ بازگشت زلزله‌های بزرگ، طولانی است و نیز بسیاری از مناطق لرزه‌خیز ایران فاقد ثبت رکوردهای نیرومند هستند. بدین لحاظ ایجاد یک فرایند تحلیلی ساخت و مدل‌سازی رکوردهای پرقدرت زلزله، اهمیت به‌سزایی دارد [۱]. نتایج ثبت شده حاکی از آن است که این نوع رکوردها اغلب با یک پالس انرژی بزرگ در ابتدای تاریخچهٔ زمانی همراه هستند. این پالس نیز با نمود طیفی یک فرایند باند باریک همراه است و افزایش پریود آن با بزرگای زلزله در تناظر مستقیم است. پریود این پالس بزرگ وابسته به پارامترهای فیزیکی و طیفی منبع لرزه‌زا مانند مدت زمان لغزش نقاط روی ساختار شکست گسل و ابعاد صفحه حوزه گسیختگی است و این پارامترها به‌طور معمول با افزایش بزرگا افزایش می‌یابند [۲].

باید دانست که از جمله مهم‌ترین ویژگی‌های رکوردهای حوزهٔ نزدیک به‌ویژه هنگامی که در برگیرندهٔ اثرات جهت‌داری پیش‌رو[1] نیز باشند، توانایی تولید اسپایک‌های پر انرژی و به نسبت کوتاه‌مدت شتاب و هم‌چنین پالس‌هایی با دامنه بزرگ و به نسبت طولانی در تاریخچه زمانی سرعت زمین است. این یک مشخصه مهم در تفاوت‌گذاری میان این گونه رکوردها با رکوردهای حوزهٔ دور است. پالس‌های بلندمدت و با دامنهٔ بزرگ در زلزله‌های حوزهٔ نزدیک گسل به ساختار موج برشی زلزله، راستای انتشار شکست گسل و تغییر مکان‌های دائمی ناشی از لغزش گسل (گام پرتابی[2]) وابسته‌اند [۳]. به‌طورکلی می‌توان ملاحظه کرد جهت‌داری پیش‌رونده و جابه‌جایی ماندگار دو عامل اصلی ایجاد کننده پالس پریود بلند سرعت در رکوردهای حوزهٔ نزدیک هستند. چنان‌چه انتشار شکست گسل به‌سمت ساختگاه باشد و جهت

1. Forward directivity
2. Fling step

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.707]

لغزش گسل نیز در جهت ساختگاه باشد، جهت‌داری پیش‌رونده به‌وقوع می‌پیوندد Fling step نیز عبارت است از تغییر مکان‌های دائمی ماندگار ناشی از تغییر شکل ثابت حوزهٔ زلزله که در فواصل زمانی مجزا در چند ثانیه در طی لغزش گسل رخ می‌دهد [٤]. رکوردهای حاوی اثرات حرکت پرتابی باعث تحریک سیستم در مود اساسی می‌شود در حالی‌که رکورد با اثر جهت‌داری پیش‌رونده سبب تحریک مودهای بیش‌تر نیز می‌شود [۵].

قابل ذکر است که به‌منظور درک اهمیت جنبش‌های نیرومند حوزهٔ نزدیک گسل بر عملکرد سازه‌ها، تحقیقات زیادی برای توسعهٔ پیش‌بینی روابط تحلیلی برای پارامترهای مشخص کننده این نوع حرکات پالس گونه انجام شده است. چندین مدل ریاضی ساده از پالس‌ها به‌عنوان نماینده‌ای برای ویژگی‌های شاخص حرکات حوزهٔ نزدیک زمین نیز پیشنهاد شده‌اند. تاکنون بر پایه پژوهش‌های هال و همکاران (۱۹۹۵)، ماکریس و چانگ (۲۰۰۰)، علوی و کراوینکلر (۲۰۰۱)، ماورودیس و پاپوجورجیو (۲۰۰۳) و آگراوال (۲۰۰۸)، مجموعه بزرگی از مدل‌های ریاضی حرکات موجی شکل زمین در حوزهٔ نزدیک گسل و رکوردهای حاوی اثرات جهت‌داری ارائه شده‌اند. بر اساس شکل پیچیده رکوردهای حوزهٔ نزدیک این امکان وجود ندارد که همیشه مدل‌های ساده قاعده‌مندی به‌منظور نمایش دقیق رکوردهای واقعی، حاصل شوند. با استفاده از توابع موجک می‌توان مدل‌هایی پیچیده که در بردارنده اثرات بیش‌تری از رکوردهای حوزه نزدیک باشند، ارائه داد. هرچند چنین مدل‌هایی محدودیت‌های مشابهی داشته و کالیبره کردن آن‌ها برای به‌دست آوردن پارامترهای تکمیلی در تعریف توابع موجک مشکل‌تر است [۵]- [۱۲].

هم‌چنین باید توجه داشت که مدل پیشنهادی ماورودیس و پاپوجورجیو به‌عنوان یکی از جامع‌ترین و مفهومی‌ترین ساختارهای ریاضی توصیف‌کننده حرکت‌های قوی زمین در نزدیکی گسل مطرح می‌شود. تدوین ریاضی مدل یاد شده بر پایهٔ یک مجموعه پارامترهای ورودی مشخص و ساده است. در این پژوهش سعی بر آن است تا با استفاده از تغییراتی در این مدل بتوان رکوردهای مصنوعی را ساخت که علاوه بر برازش پالس‌های موجود در تاریخچهٔ زمانی سرعت رکورد اصلی، طیف شتاب و انرژی آن نیز دارای شباهت بیش‌تری با رکورد واقعی باشد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.707]

مشخصات کلی زلزله‌های حوزه نزدیک

چنان‌که بررسی‌ها نشان می‌دهد مشخصات فیزیکی رکوردهای حوزهٔ نزدیک گسل، نسبت به رکوردهای حوزهٔ دور دارای تفاوت‌های چشم‌گیری هستند. علوی و کراوینکلر اثرات حوزه نزدیک گسل را برای سازه‌هایی که در فاصلهٔ ۱۰تا ۱۵ کیلومتری از منبع زلزله‌اند، تعریف کرده‌اند. آمبرایسس و همکاران فاصلهٔ ۱۵ کیلومتری را عنوان کردند. چوپرا و همکاران ثبت رکوردها در فاصله ۱۰ تا ۱۵ کیلومتری از منبع زلزله را به‌عنوان حرکات نزدیک گسل در نظر گرفته‌اند. به‌طورکلی پژوهش‌های لرزه‌شناسی نشان می‌دهند که اغلب جنبش‌های نیرومند زمین در فاصلهٔ ۲۰ کیلومتری از صفحه شکست گسل رخ می‌دهند [۱۳]-[۱۷]. وجود پالس‌های پردامنه و بلندمدت سرعت و هم‌چنین اسپایک‌های پردامنه شتاب در تاریخچهٔ زمانی یک رکورد نیرومند حوزهٔ نزدیک، اثرات چشم‌گیری را در ویژگی‌های پاسخ ساختمان‌های بلند با پریود طبیعی طولانی مدت دارد. به‌همین دلیل افزایش مقادیر پارامترهای نیاز یک سیستم سازه‌ای در معرض رکوردهای حوزه نزدیک نسبت به رکوردهای حوزهٔ دور قابل انتظار است [۱۸]-[۱۹].

نمونه‌ای از تفاوت‌های میان رکوردهای حوزهٔ دور (**السنترو**، El Centro 1940 Mw=6.9) و حوزهٔ نزدیک (**طبس**، TAB 1978 Mw=7.1) در بخش‌های الف و ب شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، حضور اسپایک‌های بلنددامنه در تاریخچهٔ زمانی شتاب و نیز پالس سرعت طولانی‌مدت در تاریخچهٔ زمانی سرعت رکورد طبس سبب می‌شود که مقدار انرژی جنبشی حاصل از این حرکت پرقدرت زمین، چندین برابر انرژی ایجاد شده به‌وسیلهٔ رکورد حوزهٔ دور السنترو باشد. تحمیل این انرژی زیاد در مدت زمان کوتاه به سازه سبب گسترش سریع مفاصل غیرخطی در سیستم باربر جانبی سازه شده و باعث می‌شود ویژگی‌های رفتاری اعضای سازه وارد حوزه غیر خطی شود [۲۰].

چنان‌که در شکل‌های ۱ پ و ۲ پ دیده می‌شود، تغییر مکان ایجاد شده در تاریخچهٔ زمانی رکورد طبس به حدود ۱ متر می‌رسد در حالی‌که این مقدار در مورد رکورد السنترو به‌طور

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.707]

تقریبی ۱۳ سانتی‌متر است. هم‌چنین در مورد محتوای فرکانسی نیز تفاوت‌ها به‌صورت چشم‌گیر است (شکل‌های ۱ ث و ۲ ث).

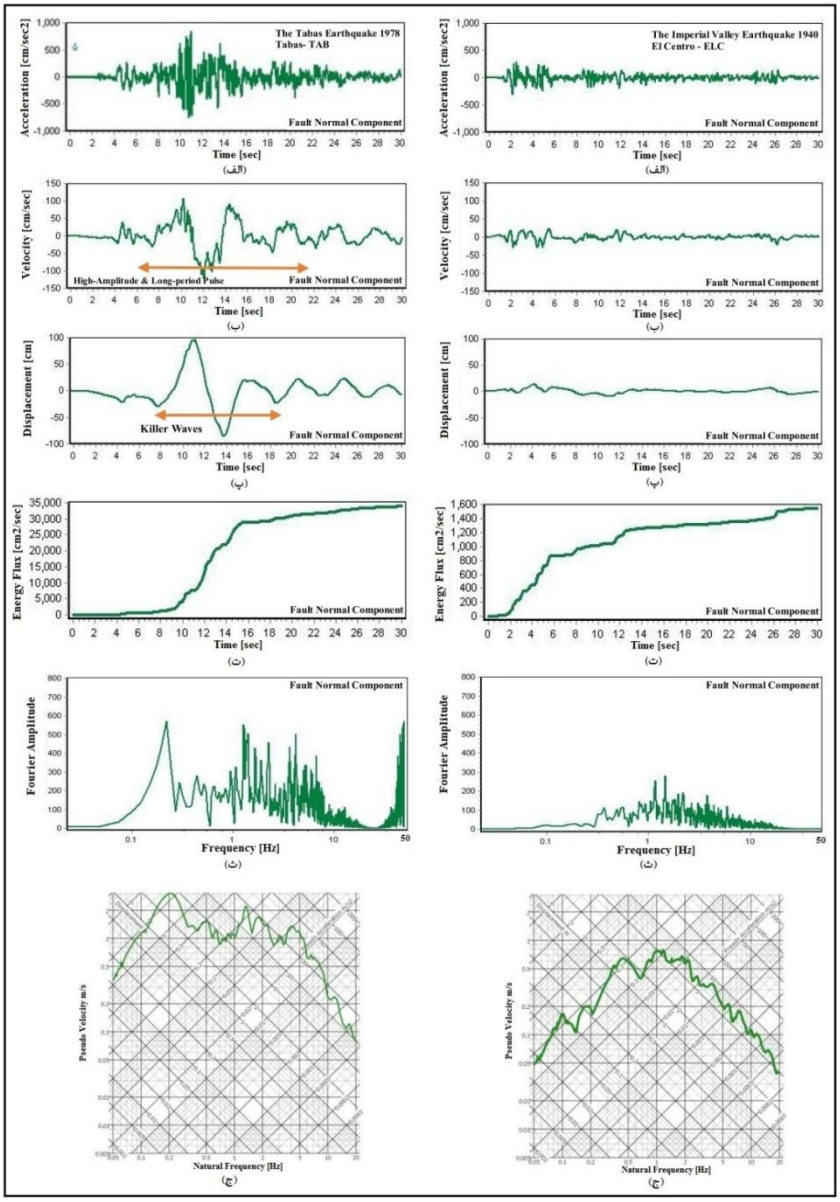
تحقیقات صورت گرفته در زمینهٔ لرزه‌شناسی نشان می‌دهند که رکوردهای حوزهٔ نزدیک با نسبت بیش‌تر PGV/PGA دارای طیف سه جانبه با بخش بزرگ‌تر حساس به شتاب زمین هستند. هم‌چنین زلزله‌های حوزهٔ نزدیک برای نسبت‌های کوچک‌تر PGD/PGV دارای بخش کوچک‌تر حساس به سرعت و نیز بخش بزرگ‌تر حساس به تغییرمکان زمین در طیف سه جانبه هستند. افزایش ارتفاع ساختمان‌ها؛ به‌همراه بیش‌تر شدن پریود طبیعی آن‌ها و نیز نزدیک‌تر شدن پریود مودهای بالاتر سازه به مناطق حساس به‌سرعت و تغییر مکان زمین، باعث اثرگذاری هر چه بیش‌تر مودهای بالاتر در ویژگی‌های پاسخ سازه می‌شود. این موضوع نیز تأثیرگذاری ویژگی‌های منطقه حساس به سرعت و حساس به تغییر مکان در رفتار سازه را در پی دارد.، (شکل‌های ۱ ج و ۲ ج) به‌طورکلی می‌توان انتظار داشت که اثرات مربوط به مودهای ارتعاشی بالاتر با نزدیک‌تر شدن پریود طبیعی ساختمان به منطقه حساس به تغییر مکان افزایش یابد [۲۱].

شکل ۳ جنبش هجومی زمین و اثرگذاری آن در جهت‌گیری پرتوهای امواج برشی زلزله هنگام وقوع لغزش در گسل‌های امتداد لغز قائم[1] را نمایش می‌دهد. پدیدار شدن اثر شکست پیش‌رونده در یک گسل امتداد لغز قائم به‌گونه‌ای است که ساختار هندسی انتشار امواج SH با حداکثر انرژی در راستای جنبش هجومی زمین است و هم‌چنین ساختار فیزیکی شکست در صفحه گسل نیز به شکل یک سویه یا دو سویه در همان راستای جنبش هجومی زمین منتشر می‌شود.

شایان ذکر است که ساختار هندسی امواج SV نیز دارای حداقل انرژی در راستای جنبش هجومی زمین است که در پی آن مجموعه‌ای از تغییرمکان های دینامیکی کوچک موازی با راستای صفحه شکست گسل ایجاد می‌شود. اندازهٔ این پالس‌های کوچک دینامیکی در مقایسه با پالس یک سویه تغییرمکان (احتمالی) استاتیکی پیش‌رونده به نسبت کوچک است [۲۲].

1. Vertical Strike Slip Fault

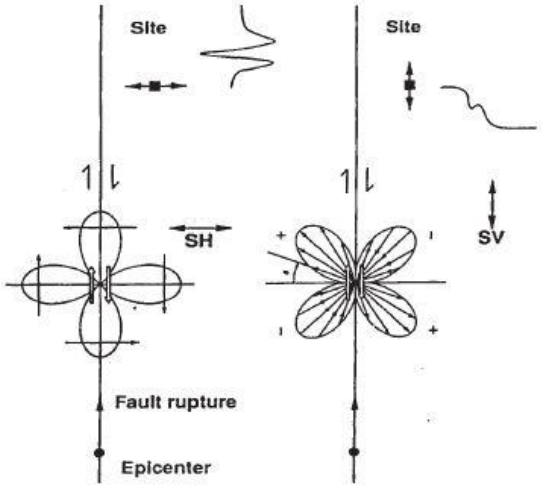
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.707]



شکل۱. مشخصات رکورد حوزه دور ELC متناظر با مولفه عمود بر صفحه شکست گسل از زلزله کالیفرنیا El Centro 1940

شکل۲. مشخصات رکورد حوزه نزدیک TAB متناظر با مولفه عمود بر صفحه شکست گسل از زلزله Tabas 1978

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.707]



شکل ۳. نمایش ساختار فیزیکی ارتعاشات حاصل از فعالیت مکانیزم یک گسل امتدادلغز قائم، شکل سمت چپ نمایش‌گر الگوی انتشار امواج SH و شکل سمت راست الگوی انتشار امواج SV را نشان می‌دهد (Somerville and Graves 1993)

معرفی مدل Mavroeidis و Papageorgiou

ماورودیس و پاپوجورجیو (۲۰۰۳) به بررسی پارامترهای مؤثر بر حرکات نزدیک گسل پرداختند. آن‌ها با استفاده از تعداد زیادی از رکوردهای حوزهٔ نزدیک گسل که دارای بزرگایی در حدود ۵,٦ تا ۸,۱ بودند، یک عبارت ترکیبی ریاضی با توانایی برازش مربوط به شکل پالس سرعت را ارائه کردند. این مدل براساس رکوردهای واقعی حوزهٔ نزدیک، کالیبره شده است و هدف آن تعریف پالس‌های بلندمدت براساس پارامترهای ورودی داده شده است. پریود پالس، دامنه پالس، تعداد و فاز نیم سیکل‌ها، پارامترهای کلیدی هستند که ویژگی‌های موج‌شکل پالس‌های سرعت نزدیک گسل را در این مدل تعریف می‌کنند. بنابراین در اصل از یک مدل تحلیلی با چهار پارامتر برای توصیف مجموعه‌ای از پالس‌های سرعت حرکت جهت‌دار پیش‌رونده با اثرات جابه‌جایی ماندگار استفاده شده است. پایه و اساس این مدل، موجک گابور[1] است. این سیگنال محصول یک نوسان هارمونیک ترکیبی با یک تابع نمایی کاهشی است. چنان‌که در معادلهٔ (۱) دیده می‌شود موجک گابور نیز به‌وسیلهٔ چهار پارامتر شناخته شده

1. Gabor Wavelet

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.707]

است که به‌عنوان پارامترهای کلیدی، ویژگی‌های موج‌شکل پالس‌های حوزهٔ نزدیک را توصیف می‌کنند. این پارامترها عبارتند از A ، f_P ، V و γ که به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ دامنه، فرکانس حاکم، زاویه فاز و ویژگی‌های نوسانی سیگنال‌ها هستند.

$$f(t) = Ae^{-(2\pi f_p/\gamma)^2 t^2}\, cos\left[2\pi f_p t + v\right] \qquad (۱)$$

به‌منظور تسهیل در به‌دست آوردن مشتقات عبارت (۱)، یک تابع گوسین[1] متقارن که دارای بیان ریاضی ساده‌تر است، جای‌گزین تابع نمایی موجود در موجک گابور شده است. بنابراین سیگنال تحلیلی پیشنهاد شده به صورت معادلهٔ (۲) اصلاح شده است. تابع کسینوسی قرار داده شده در این عبارت یک تابع تناوبی است و یک پوش با یک برآمدگی سینوسی، مانند تابع نمایی موجک گابور تولید نمی‌کند. این مشکل با محدود کردن فاصلهٔ زمانی سیگنال به شرح معادلهٔ (۳) حل شده است. هم‌چنین از طرف دیگر به‌منظور تولید سیگنال فیزیکی قابل قبول، پریود نوسان هارمونیک باید کوچک‌تر از پریود ایجاد شده به‌وسیلهٔ تابع کسینوسی باشد، به‌همین دلیل γ باید بزرگ‌تر از یک در نظر گرفته شود (رابطهٔ ٤). هم‌چنین به‌منظور تعریف دقیق زمان اوج پوش، پارامتر زمان به اندازه t_0 که نمایش‌گر زمان تقریبی اوج است، شیفت داده شده است (معادلهٔ ۵).

$$f(t) = A\frac{1}{2}\left[1 + cos\left(\frac{2\pi f_p}{\gamma}t\right)\right] cos\left(2\pi f_p t + v\right) \qquad (۲)$$

$$-\frac{\gamma}{2f_p} \le t \le \frac{\gamma}{2f_p} \qquad (۳)$$

$$\frac{1}{f_p} < \frac{\gamma}{f_p} \rightarrow \qquad \gamma > 1 \qquad (٤)$$

$$t \rightarrow t - t_o \qquad (۵)$$

از ترکیب معادلات مذکور عبارت مدل تحلیلی نمایش‌دهندهٔ پالس‌های سرعت نزدیک گسل زمین بدین‌صورت به‌دست آمده است:

$$V(t) = \begin{cases} A\frac{1}{2}\left[1 + cos\left(\frac{2\pi f_p}{\gamma}(t - t_0)\right)\right] cos\left[2\pi f_p (t - t_0) + v\right] \\ t_0 - \frac{\gamma}{2f_p} \le t \le t_0 + \frac{\gamma}{2f_p} \quad with\, \gamma > 1 \\ 0, \quad otherwise \end{cases} \qquad (٦)$$

[1] Gaussian

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.707]

در این عبارت پارامتر A کنترل‌کنندهٔ دامنهٔ سیگنال، f_p فرکانس هارمونیک دامنهٔ مدول شده یا فرکانس غالب سیگنال، v فاز هارمونیک دامنهٔ مدول شده ($v=\pm\pi/2,\ v=0$ به‌ترتیب سیگنال متقارن و نامتقارن را تعریف می‌کنند)، γ نشان‌دهنده ویژگی‌های نوسانی و t_0 نیز بیان‌گر زمان اوج است.

هم‌چنین عبارات تحلیلی تاریخچهٔ زمانی جابه‌جایی و شتاب به‌ترتیب براساس انتگرال‌گیری و مشتق‌گیری عبارت سرعت زمین، با استفاده از عامل $\bar{t} = 2\pi f_p(t - t_0)$ که به‌منظور نرمالیزه نمودن مدل به‌کار گرفته شده است بدین‌صورت به‌دست آمده است:

$$\bar{a}(\bar{t}) = \frac{a(t)}{Af_p} = \begin{cases} -\frac{\pi}{\gamma}\left[\sin\left(\frac{\bar{t}}{\gamma}\right)\cos(\bar{t}+v) + \gamma\sin(\bar{t}+v)\left(1+\cos\left(\frac{\bar{t}}{\gamma}\right)\right)\right], -\pi\gamma \le \bar{t} \le \\ 0, \quad otherwise \end{cases}$$
$$\pi\gamma\ with\ \gamma > 1 \qquad (۷)$$

$$\bar{v}(\bar{t}) = \frac{v(\bar{t})}{A} = \begin{cases} \frac{1}{2}\left[1+\cos\left(\frac{\bar{t}}{\gamma}\right)\right]\cos(\bar{t}+v), -\pi\gamma \le \bar{t} \le \pi\gamma\ with\ \gamma > 1 \\ 0, \quad otherwise \end{cases} \qquad (۸)$$

$$\partial(\bar{t}) = \frac{d(t)}{(A/f_p)} =$$
$$\begin{cases} \frac{1}{4\pi}\left[sin(\bar{t}+v) + \frac{1}{2}\frac{\gamma}{\gamma-1}sin\left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\bar{t}+v\right) + \frac{1}{2}\frac{\gamma}{\gamma+1}sin\left(\frac{\gamma+1}{\gamma}\bar{t}+v\right)\right], & -\pi\gamma \le \bar{t} \le \pi\gamma \\ \frac{1}{4\pi}\frac{1}{(1-\gamma^2)}sin(v-\pi\gamma), & \bar{t} < -\pi\gamma \qquad \gamma > 1 \\ \frac{1}{4\pi}\frac{1}{(1-\gamma^2)}sin(v+\pi\gamma), & \bar{t} > \pi\gamma \end{cases} \qquad (۹)$$

پارامترهای $\bar{v}(\bar{t})$،$\bar{a}(\bar{t})$ و نیز $\partial(\bar{t})$ به‌ترتیب شاخص‌های تاریخچهٔ زمانی شتاب، سرعت و تغییرمکان نرمالیزه هستند [۱۲]، [۲۳].

ارائه مدل پیشنهادی

در این پژوهش سعی بر آن است تا به‌منظور هم‌پوشانی بهتر تاریخچهٔ زمانی شتاب، سرعت و طیف انرژی رکورد اصلی با رکورد مصنوعی، تغییرات و بهبودهایی در مدل ماورودیس و پاپوجورجیو، اعمال شود. نویسندگان پس از بررسی عبارت‌های ریاضی مختلف با استفاده از توان‌های بالاتر مدل یاد شده، ملاحظه کردند که تنها عبارتی که بهترین نتایج را به لحاظ پوشش محتوای فرکانسی به‌دست می‌دهد، مدل فرم بسته با استفاده از توان‌های فرد است. در

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.707]

واقع تحقیقات نشان می‌دهد که گرادیان تغییرات توابع مثلثاتی تحت اثر توان‌های فرد، دارای روند محاسباتی نزدیک است. ساختار ریاضی فرم بسته مدل پالس پیشنهادی با استفاده از توان‌های فرد به‌صورت معادله (۱۰) است:

$$\bar{a}(\bar{t}) = \frac{a(t)}{Af_p} = \begin{cases} -\frac{\pi}{\gamma}\left[\sin\left(\frac{\bar{t}}{\gamma}\right)(\cos(\bar{t}+v))^3 + \gamma(\sin(\bar{t}+v))^3\left(1+cos\left(\frac{\bar{t}}{\gamma}\right)\right)\right], -\pi\gamma \le \bar{t} \le \\ 0, \quad otherwise \end{cases}$$
$$\pi\gamma \; with \; \gamma > 1 \qquad (۱۰)$$

باید توجه کرد که توان‌های ۳ ایجاد شده در عبارت تعمیم یافته مدل ماورودیس و پاپوجورجیو (مدل مرجع) باعث می‌شود تا علاوه بر یک‌سان بودن PGV رکورد اصلی و مدل پالس معادل، مقدار PGA آن‌ها نیز در بیش‌تر موارد به هم نزدیک‌تر شود. در واقع این امکان فراهم می‌شود تا با ثابت ماندن بیشینه سرعت تاریخچهٔ زمانی مدل ساخته شده، مقدار بیشینه شتاب رکورد مصنوعی را افزایش داد. به‌منظور هم‌پوشانی بهتر و کامل‌تر رکورد اصلی و مصنوعی، استفاده از یک تابع نمایی که سبب نزدیک‌تر شدن طیف انرژی رکورد اصلی و پالس معادل است به مدل مذکور اضافه شده است.

(۱۱)

$$\bar{a}(\bar{t}) = \frac{a(t)}{Af_p} = \begin{cases} -\frac{\pi}{\gamma}e^{-0.1\bar{t}}\left[\sin\left(\frac{\bar{t}}{\gamma}\right)(\cos(\bar{t}+v))^3 + \gamma(\sin(\bar{t}+v))^3\left(1+cos\left(\frac{\bar{t}}{\gamma}\right)\right)\right], -\pi\gamma \\ 0, \quad otherwise \end{cases}$$
$$\le \bar{t} \le \pi\gamma \; with \; \gamma > 1$$

چنان‌که دیده می‌شود پارامترهای معادلهٔ (۱۰) همان پارامترهای معادلهٔ مدل مرجع است و پارامتر جدیدی اضافه نشده است.

رکوردهای استفاده شده در این پژوهش

در این پژوهش هدف اصلی ارزیابی و مقایسه نمودارهای تاریخچهٔ زمانی شتاب، سرعت و طیف انرژی رکوردهای اصلی و مدل‌های پالس معادل است. بنابراین معیار اصلی در انتخاب رکوردهای نیرومند زلزله، وجود پالس‌های پر انرژی و بلندمدت در تاریخچهٔ زمانی سرعت زمین بوده است. رکوردهای انتخاب شده همراه با پاره‌ای از خصوصیات طیفی در جدول

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.707]

شمارهٔ ۱ مشخص شده است. موقعیت ثبت رکوردها با فاصلهٔ کم‌تر از ۱۵ کیلومتر نسبت به صفحه شکست گسل به‌عنوان معیار منبع نزدیک انتخاب شده است [۲٤].

جدول ۱. مشخصات طیفی رکوردهای حوزهٔ نزدیک انتخابی در این پژوهش [۲٤]

Ground Motion	Component	Duration (sec)	PGA (cm/s^2)	PGV (cm/s)	PGD (cm)	Magnitude (M_W)
Tabas 1978 Tabas City - 3.00 km	LN	30.00	820.11	97.34	36.99	7.4
	TR		835.81	121.18	95.47	
	UP		674.92	44.41	16.48	
Northridge 1994 Newhall (WPI) - 7.10 km	LN	30.00	319.24	67.39	16.12	6.7
	TR		446.28	92.74	56.66	
	UP		284.88	37.21	13.3	
Northridge 1994 Rinaldi (RRS) - 7.10 km	LN	30.00	463.44	72.72	19.82	6.7
	TR		821.63	166.87	29.8	
	UP		835.92	51.01	11.71	
Northridge 1994 Sylmar (SCE) – 6.40 km	LN	30.00	483.67	74.58	29.21	6.7
	TR		812.54	117.52	34.37	
	UP		369.35	24.32	7.41	
Erzincan 1992 (ERZ) - 2.0 km	LN	30.00	486.24	64.05	23.94	6.7
	TR		505.47	83.95	61.98	
	UP		243.06	18.33	8.10	

Fault Parallel: LN, Fault Normal: TR, Fault Vertical: UP

هماهنگ کردن جنبش‌های نیرومند زمین با پالس‌های معادل

به‌منظور ساختن پالس معادل برای یک رکورد نزدیک گسل، ارزیابی چهار پارامتر دامنه پالس (A)، پریود پالس (t_p)، زاویهٔ فاز (v) و ویژگی‌های نوسانی پالس (γ) لازم است. پارامتر A به گونه‌ای حاصل می‌شود که مقدار بیشینهٔ سرعت پالس مصنوعی با PGV رکورد واقعی، به‌طور نسبی برابر بوده و هم‌چنین دامنه پالس سرعت مصنوعی متناظر با رکورد واقعی نیز به‌دست آید. مدت زمان تداوم پالس t_p به‌گونه‌ای به‌دست می‌آید که پریود پالس سرعت مصنوعیهٔ نزدیک به پریود پالس سرعت رکورد است و مقادیر پیک طیف پاسخ شبه سرعت حرکات ثبت شده نزدیک گسل و مدل مصنوعی، به نسبت هم‌زمان رخ دهند. نکته دیگر آن که ممکن است در مواردی این امر میسر نشود. پارامترهای v و γ برای سوار کردن بهینه

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.707]

پالس‌های سرعت مصنوعی بر رکوردهای ثبت شده زمین تنظیم می‌شوند. شایان ذکر است که اغلب، پارامترهای A ، v و γ به‌صورت سعی و خطا به‌دست می‌آیند [۱۲]، [۲۳]، [۲۵].

باید دانست برای به‌دست آوردن چهار پارامتر به‌گونه‌ای که مقادیر بیشینه شتاب، سرعت و تغییرمکان مشابهی برای پالس مصنوعی نسبت به رکورد واقعی به‌دست دهد و هم‌چنین طیف انرژی متناسب با طیف انرژی رکورد واقعی داشته باشد، نیاز به آزمون و خطای بسیار است. به‌طور مثال افزایش fp افزایش شتاب، کاهش انرژی و کاهش پریود پالس را به‌همراه دارد. هم‌چنین افزایش γ باعث افزایش انرژی و کاهش آن، کاهش انرژی را در پی دارد. به هر حال مقادیر بهینه این پارامترها به‌منظور ساخت پالس‌های مصنوعی، بر پایهٔ مدل فرم بسته ماورودیس و پاپوجورجیو و نیز مدل تعمیم یافته این پژوهش، در جدول ۲ خلاصه شده‌اند.

هم‌چنین اگرچه ممکن است مجموعه‌های مختلف پارامترهای ورودی، پالس‌های سرعت مصنوعی متناسب با سرعت ثبت شده زمین تولید کنند، بهرحال همه آن‌ها قادر به تولید طیف‌های پاسخ شتاب، جابه‌جایی و انرژی مناسب متناظر با رکوردهای واقعی نیستند. تاریخچه‌های زمانی شتاب و سرعت و طیف انرژی به‌دست آمده بر اساس مقادیر جدول ۲ در شکل ۳ نشان داده شده است.

شایان ذکر است در برخی از موارد، رکورد نزدیک گسل انتخابی دارای بیش از یک پالس است و به‌همین دلیل، به‌منظور مشابه‌سازی از چند پالس ترکیبی معادل استفاده شده است. نمونه بارز آن رکورد SCE است که در تاریخچه زمانی سرعت مؤلفهٔ LN آن ۳ پالس مشخص و نیز برای مؤلفهٔ TR آن ۲ پالس به نسبت نیرومند سرعت، وجود دارد. چنان‌که در شکل ۳ دیده می‌شود استفاده از مدل پیشنهادی این امکان را فراهم می‌سازد تا علاوه بر مشابه بودن پالس‌های سرعت موجود در رکورد مصنوعی و رکورد واقعی، نمودارهای شتاب و طیف انرژی رکورد مصنوعی هم‌پوشانی بهتری با رکورد اصلی داشته باشند. به‌طور مثال در مورد مؤلفهٔ LN رکورد طبس چنان‌که دیده می‌شود علاوه بر برابر بودن PGV رکورد اصلی و مدل پیشنهادی، مقدار PGA رکورد مصنوعی تعمیم یافته تا حدودی بیش‌تر از PGA حاصل از مدل مرجع به‌دست آمده است. هم‌چنین چنان‌که مشاهده می‌شود پالس سرعت موجود در تاریخچه زمانی سرعت مؤلفهٔ TR در مدل تعمیم یافته از تطابق بهتری با پالس موجود در رکورد اصلی برخوردار است. در مورد طیف‌های انرژی به‌دست آمده نیز باید توجه داشت که میزان حداکثر

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.707]

انرژی آزاد شده در مدل پیشنهادی هم‌پوشانی بهتری نسبت به مدل مرجع، یافته و اثرات تحلیلی اسپایک‌های سرعت در این مدل نمود بهتری دارد.

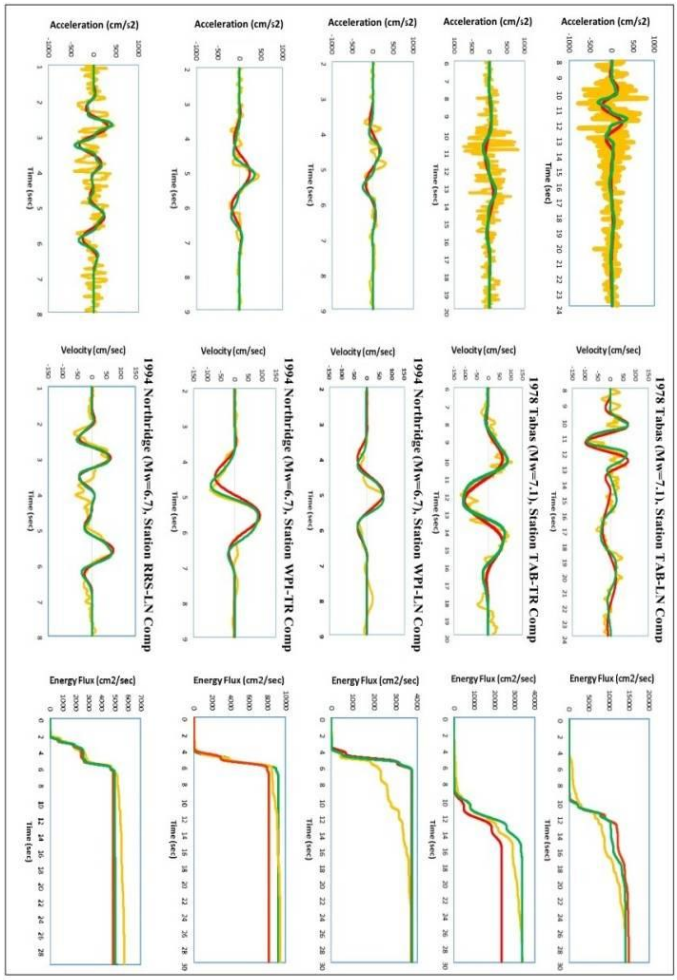
هم‌چنین به‌طور مثال در مورد طیف انرژی مؤلفهٔ LN رکورد ERZ باید تأکید کرد که علاوه بر این‌که نمودار مربوط به مدل پیشنهادی هم‌پوشانی بهتری با رکورد اصلی دارد، مقدار کل انرژی آزاد شده نیز نزدیک‌تر به مقدار کل انرژی آزاد شده رکورد اصلی است.

جدول ۲. پارامترهای ورودی به‌دست آمده به‌منظور ساخت بهینه پالس‌های سرعت معادل

Station	Component	t_0 (sec)		fp (Hz)		γ		A		v(°)	
		MP	*MPN*	MP	*MPN*	MP	*MPN*	MP	*MPN*	MP	*MPN*
Tabas 1978 Tabas City – 3.00 km	LN (first pulse)	11.5	11.7	0.4	0.44	2.7	2.3	98	130	180	250
	LN (second pulse)	18.7	18.5	0.14	0.2	2	3	30	45	-90	-90
	TR (coherent pulse)	12.4	13.1	0.19	0.2	3	2.5	122	150	180	250
Northridge 1994 Newhall (WPI) – 7.10 km	LN (coherent pulse)	5	5.3	0.45	0.44	2	1.7	67	95	0	45
	TR (coherent pulse)	5.2	5.5	0.39	0.4	1.7	1.65	100	140	120	150
Northridge 1994 Rinaldi (RRS) - 7.10 km	LN (first pulse)	3	3.2	0.83	0.83	2.5	2.5	65	84	0	65
	LN (second pulse)	5.6	5.8	0.6	0.62	1.5	1.5	73	95	0	50
	TR (coherent pulse)	2.43	2.5	0.8	0.8	1.7	2	166	190	20	70
Northridge 1994 Sylmar (SCE) - 6.40 km	LN (first pulse)	4.5	4.5	0.29	0.35	1.5	1.5	58	69	65	65
	LN (second pulse)	6.3	6.3	0.36	0.49	1	1	115	150	20	20
	LN (third pulse)	7.2	7.2	0.65	0.65	1.5	1.5	28	27	-50	-50
	TR (first pulse)	3.42	3.42	0.5	0.68	1	1	118	190	180	200
	TR (second pulse)	6.75	6.75	0.4	0.47	1.2	1.1	80	75	160	170
Erzincan 1992 (ERZ) – 2.0 km	LN (first pulse)	4.13	4.71	0.5	0.46	3	3	47	60	50	190
	LN (second pulse)	7.1	7.38	0.35	0.22	1.5	1	37	65	0	20
	TR (coherent pulse)	3.53	3.9	0.47	0.52	2.5	2.4	82	110	210	270

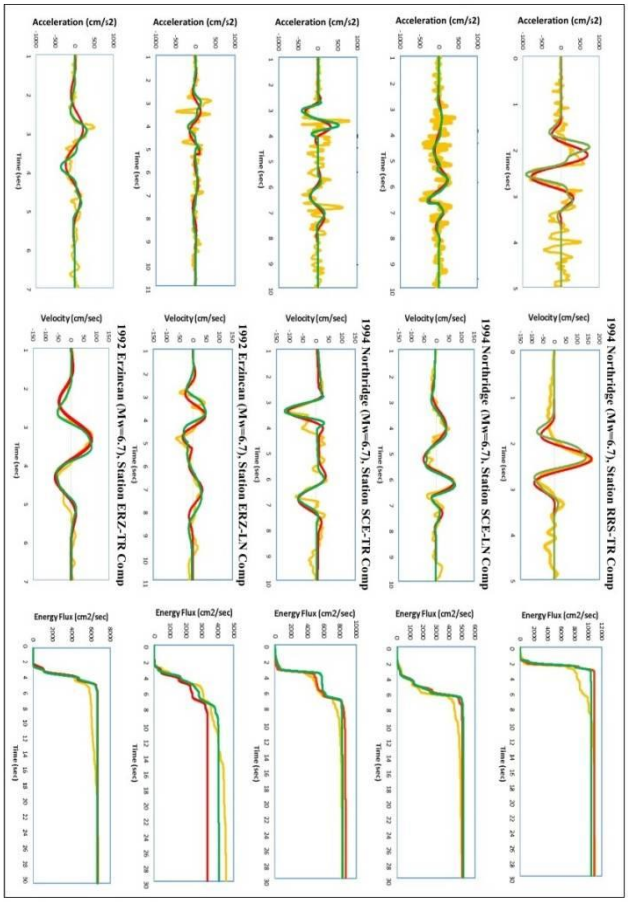
MP: مدل ماورودیس و پاپوجورجیو **MPN**: مدل تعمیم یافته این پژوهش

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.707]



شکل٤. برازش و انطباق تاریخچهٔ زمانی شتاب، سرعت و طیف انرژی رکوردهای مصنوعی ساخته شده بر پایهٔ رکورد اصلی (رکورد اصلی با رنگ زرد، رکورد ساخته شده براساس مدل ماورودیس و پاپوجورجیو به رنگ قرمز و رکورد ساخته شده پیشنهادی به رنگ سبز نشان داده شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.707]



شکل٤. برازش و انطباق تاریخچهٔ زمانی شتاب، سرعت و طیف انرژی رکوردهای مصنوعی ساخته شده بر پایهٔ رکورد اصلی (رکورد اصلی با رنگ زرد، رکورد ساخته شده براساس مدل ماورودیس و پاپوجورجیو به رنگ قرمز و رکورد ساخته شده پیشنهادی به رنگ سبز نشان داده شده است.

نتیجه‌گیری

تاکنون به‌منظور مدل‌سازی پالس‌های موجود در رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک، مدل‌های ریاضی و آماری بسیاری پیشنهاد شده است. هم‌چنین به‌دلیل ماهیت پیچیده فیزیکی این‌گونه رکوردها تنها با اکتفا کردن به مدل‌های ساده ریاضی، نمی‌توان به ارزیابی یک سازه در معرض

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.707]

جنبش‌های نیرومند زمین پرداخت. بر این اساس، نیاز به تولید و شبیه‌سازی رویدادهای لرزه‌ای بزرگ محتمل، با کاربرد مدل‌های فرم بسته و آنالیز داده‌های موجود که به‌نحو مناسب نماینده ویژگی‌های رکوردهای اصلی باشد، احساس می‌شود. مدل‌های ریاضی که تاکنون بدین‌منظور ساخته شده‌اند، اغلب در برازش پالس‌های موجود در تاریخچه زمانی سرعت زمین، به‌طور مناسب عمل نکردند. افزون بر آن، در بسیاری موارد نیز تاریخچه زمانی شتاب رکورد مصنوعی با رکورد اصلی همواره تطابق خوبی نداشته است. وجود این امر تا حدودی سبب بروز اختلاف پاسخ سازه به پالس‌های معادل، نسبت به اعمال رکورد اصلی می‌شود.

هدف از این پژوهش تعمیم مدل فرم بسته ماورودیس و پاپوجورجیو به‌منظور تطبیق بهتر نمودارهای تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و طیف انرژی رکوردهای مصنوعی با رکوردهای اصلی است. بدین‌منظور، مفاهیم و نکات تحلیلی مدل‌سازی پنج رکورد نیرومند حوزهٔ نزدیک که هر کدام حاوی یک یا چند پالس پرانرژی در تاریخچهٔ زمانی سرعت متناظر با هر دو مؤلفهٔ موازی و عمود بر صفحه شکست گسل هستند، استفاده شده است. بر پایه نتایج این پژوهش، فرایند تعمیم مدل ماورودیس و پاپوجورجیو با استفاده از توان‌های فرد و تابع نمایی اضافه شده، این امکان را فراهم ساخته تا به شکل مناسب و جامع‌تری، تاریخچه‌های زمانی شتاب و سرعت پالس معادل و رکورد اصلی مشابه یک‌دیگر باشند. هم‌چنین گام پرش پلکانی موجود در طیف تجمعی انرژی و نیز بیشینه انرژی آزاد شده با استفاده از مدل تعمیم یافته در این پژوهش، هم‌پوشانی بهتری با رکورد اصلی یافته و اثرات تحلیلی اسپایک‌های سرعت و شتاب در این مدل به‌نحو مناسب‌تری در نظر گرفته شده است.

منابع

1. Halldórsson B., Mavroeidis G. P., Papageorgiou A. S., "Near-fault and far-field strong ground-motion simulation for earthquake engineering applications using the specific barrier model", Journal of Structural Engineering, Vol. 137, No. 3 (2011) 433-444.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.707]

2. Somerville P. G., "Magnitude scaling of the near fault rupture directivity pulse", Physics of the Earth and Planetary Interiors, Vol. 137, No.1 (2003) 201-212.
3. Afsary M., Keyvani Ghamsari J., Meshkat-Dini A., "Assessment of nonlinear dynamic response of steel tall buildings with bundled tube structural system subjected to ground motions caused by strike slip faults", 4th National Conference on Steel & Structure, Tehran, Iran (2014).
4. Somerville P. G., "Engineering characterization of near fault ground motions", NZSEE Conference, (2005)
5. Kalkan E., Kunnath S. K., "Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings", Earthquake Spectra, Vol. 22, No.2 (2006) 367-390.
6. Somerville P. G., Smith N. F., Graves R. W., Abrahamson N. A., "Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity", Seismological Research Letters, Vol. 68, No. 1 (1997) 199-222.
7. Somerville P. G., "Development of an improved ground motion representation for near-fault ground motions", SMIP 98, Seminar on Utilization of Strong Motion Data: Oakland, CA, (1998).
8. Alavi B., Krawinkler H., "Consideration of near-fault ground motion effects in seismic design", Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand, (2000).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.707]

9. Somerville P. G., "New developments in seismic hazard estimation", Proceedings of the 6th International Conference on Seismic Zonation (6ICSZ), Palm Springs, CA, November 12-15, (2000).
10. Rupakhety R., Sigbjörnsson R., "Can simple pulses adequately represent near-fault ground motions?", Journal of Earthquake Engineering , Vol. 15, No. 8 (2011) 1260-1272.
11. Khaloo A. R., Khosravi H., "Nonlinear interstory drift contours for idealized forward directivity pulses using modified Fish-Bone models", Advances in Structural Engineering, Vol. 18, No. 5 (2015) 603-627.
12. Mavroeidis G. P., Papageorgiou A., "mathematical representation of near-fault ground motions", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 93, No. 3 (2003) 1099-1131.
13. Tavakoli H. R., Gilani H., Abdollahzadeh G. R., "Comparative evaluation of seismic parameters for near-fault and far- fault earthquakes", Department of Civil Engineering Faculty, Noshivani University of Technology, Babol, Iran, (2012).
14. Alavi B., Krawinkler H., "Effects of near-fault ground motions on frame structures", The John A. Blume earthquake engineering center, Department of civil and environmental engineering, Stanford University; Report No.138, (2001) 1-301
15. Ambraseys N. N., Douglas J., "Near-Field horizontal and vertical earthquake ground motions", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 23, No. 1 (2003) 1-18.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.707]

16. Chopra A. K., Chintanapakdee C., "Comparing response of SDF systems to Near-Fault and Far-Fault earthquake motions in the context of spectral regions", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 30, No. 12 (2001) 1769-1789.

17. Vaseghi Amiri J., Davoodi M. R., Sahafi A., "Simulation of near-fault ground motions with equivalent pulses and compare their effects on mrf structures", The 14th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, Beijing, China, (2008)

18. Bray J. D., Rodriguez-Marek A., "Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 24, No. 11 (2004) 815-828

19. Naeim F.," The seismic design handbook", 2th edition, Kluwer Academic Publisher, (2001).

20. Kalkan E., Kunnath S. K., "Effective cyclic energy as a measure of seismic demand", Journal of Earthquake Engineering, Vol. 11, No. 5 (2007) 725-751.

21. Malhotra P. K., "Response of buildings to near-field pulse like ground motion", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 28, No. 11 (1999) 1309-1326.

22. Agrawal A. K.,"A closed-form approximation of near-fault ground motion pulses for flexible structures", 15th ASCE Engineering Mechanics Conference, June 2-5, Columbia University, New York, NY, (2002).

23. Mavroeidis G. P., Papageorgiou A.,"Near-fault ground motions, and the response of elastic and inelastic single-degree-of-freedom (sdof)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.707]

systems", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 33, No. 9, (2004) 1023-1050.

24. PEER Ground Motion Database, http://peer.berkeley.edu/.
25. Nazari S., Azhdarifar M., Keyvani Ghamsari J., Meshkat-Dini A., "Study on the seismic response parameters of bundled tube structural system subjected to closed form near field records", The 5th National and International Conference on Modern Materials and Structures in Civil Engineering, Tehran, Iran, (2016).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.6.6]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.707]