

چکیده

در این مطالعه با به کارگیری الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات به شناسایی و استخراج پالس سرعت رکوردهای نزدیک گسل با استفاده از مدل‌های شبیه سازی پرداخته شده است. تابع هدف در فرآیند بهینه سازی، به صورت یک تابع مقید است، که در آن جذر میانگین مربعات اختلاف میان مقادیر طیف پاسخ الاستیک شبه سرعت حاصل از مدل شبیه سازی پالس و رکورد واقعی به عنوان تابع هدف و جذر میانگین اختلاف مقادیر تاریخچه زمانی سرعت متناظر به عنوان قید می‌باشد. الگوریتم بهینه سازی با تابع هدف تعریف شده، انطباق هم زمان تاریخچه زمانی سرعت و طیف پاسخ الاستیک شبه سرعت حاصل از مدل پیشنهادی و رکورد واقعی را ممکن می‌سازد. از این طریق، پارامترهای فیزیکی مدل‌های شبیه سازی بدون نیاز به فرآیند سعی و خطا دستی که تاکنون کاربرد مدل‌های مذکور را محدود ساخته است، تعیین می‌شود. رویکرد پیشنهادی در استخراج و بیان ریاضی مجموعه‌ای از رکوردهای نزدیک گسل در پایگاه داده پروژه نسل جدید روابط کاهندگی و رکوردهای نزدیک گسل ایران طی زلزله های طیس و بم مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن است که رویکرد نوین پیشنهادی پروسه اتوماتیک و کمی با حداقل قضاوت تحلیل گر را به منظور شبیه سازی طیف وسیعی از رکوردهای نزدیک گسل در اختیار قرار می‌دهد.

واژگان کلیدی: حرکات نزدیک گسل، پالس غالب رکورد سرعت، مدل‌های شبیه سازی، الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات، تابع جریمه.

استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات در شناسایی و استخراج پالس غالب رکورد سرعت حرکات نزدیک گسل

سید روح‌الله حسینی واعظ (نویسنده مسئول)

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه قم
hoseinivaez@qom.ac.ir

زهرا مینائی

دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه قم

۱- مقدمه

مانند گار^۲ را منجر می‌شوند که می‌بایست در تخمین حرکات زمین در مجاورت گسل‌های مسبب، در نظر گرفته شوند. راستاپذیری پیش رونده^۳ به صورت یک پالس بزرگ در ابتدای رکورد و در جهت عمود بر صفحه گسل مشاهده می‌شود و به سازوکار گسیختگی و راستای لغزش نسبت به سایت بستگی دارد. اما در مقابل، جابه جایی مانند گار متأثر از تغییر شکل‌های تکتونیکی در گسل می‌باشد و معمولاً تغییر مکان‌های استاتیکی مانند گاری تولید می‌کند که در گسل‌های راستا لغز^۴ به موازات امتداد گسل و در گسل‌های شیب لغز^۵ عمود بر گسل، رخ می‌دهند [۱۱-۱۲].

به دلیل اثرات مخرب چنین زلزله‌هایی توجه مهندسی و

با افزایش رکوردهای ثبت شده زلزله طی دهه‌های گذشته مشخص شده است که حرکات زمین در مجاورت گسل مسبب (تا فاصله ۱۵ کیلومتر از گسل) می‌توانند به طور قابل توجهی با حرکات دور از گسل متفاوت باشند. این حرکات غالباً شامل پالس‌های بزرگ سرعت و تغییر مکان با پتانسیل تخریب سازه‌ای قابل توجهی هستند و تقاضای لرزه ای زیادی را به سازه تحمیل می‌کنند که از طریق روش‌های معمول مانند طیف‌های پاسخ الاستیک قابل پیش بینی نیست [۱-۱۰]. حرکات نزدیک گسل شدیداً متأثر از عواملی چون سازوکار گسل، راستای انتشار پاره شدگی نسبت به سایت و تغییر شکل‌های ماندگار زمین می‌باشد. این پارامترها دو اثر مهم به نام‌های راستاپذیری^۱ و جابه جایی

مدل می‌باشد. این مهم از طریق انطباق هم‌زمان تاریخچه زمانی شتاب، سرعت، تغییر مکان و طیف‌های پاسخ متناظر حاصل از مدل ریاضی و رکورد اصلی زلزله انجام می‌پذیرد. تاکنون انطباق هم‌زمان تاریخچه‌های زمانی و طیف‌های پاسخ در چنین مدل‌هایی با یک فرآیند آزمون و خطا دستی همراه بوده است. به عبارت دیگر مؤلفان این گونه مدل‌ها با اختصاص دادن مقادیر مختلف به پارامترهای ورودی و از طریق یک روند تکراری، پارامترهای ورودی را به گونه‌ای یافتند که پالس حاصل از مدل و پالس رکورد واقعی با یکدیگر مطابقت داشته و طیف پاسخ الاستیک مصنوعی نیز در تطابق خوب با طیف الاستیک رکورد باشد [۱۲ و ۱۴]. چنین روند مبتنی بر سعی و خطا توانایی محققان و مهندسان را در به کارگیری این روابط و بررسی اثرات آنها بر تحقیقات و کاربردهای عملی محدود می‌سازد. چراکه بدین طریق تنها شناسایی تعداد معدودی از رکوردها نزدیک گسل امکان پذیر بوده و بخش وسیعی از رکوردهای نزدیک گسل ثبت شده در چنین پروسه زمان بری استخراج نخواهند شد. از این رو در این مطالعه با بهره‌گیری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی رویکرد جدیدی برای شناسایی و استخراج بزرگ‌ترین پالس سرعت از رکوردهای زلزله با استفاده از مدل‌های مذکور پیشنهاد شده است، به نحوی که الگوریتم‌های بهینه‌سازی با هدف به حداقل رساندن هم‌زمان اختلاف میان مقادیر تاریخچه زمانی و طیف پاسخ الاستیک متناظر حاصل از مدل شبیه‌سازی پالس و رکورد واقعی به انطباق هر چه بیشتر نمودارهای مذکور می‌پردازند.

به این ترتیب روش پیشنهادی به‌عنوان ابزار مناسب با کمترین مداخله و قضاوت تحلیلی و حذف روند آزمون و خطا، پاسخ‌های قابل تکرار و سازگاری را تولید می‌نماید. همچنین از آنجایی که در این مطالعه مدل‌های ریاضی در شبیه‌سازی پالس‌ها مد نظر قرار گرفته است، از این پس پالس‌های ثبت شده در رکوردهای نزدیک گسل به صورت روابط ساده ریاضیاتی قابل بیان خواهند بود. بر این اساس رویکرد پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر در پردازش مجموعه گسترده‌ای از

زلزله‌شناسان بسیاری به سوی شناسایی کمی رکوردهای حاوی پالس، شبیه‌سازی حرکات نزدیک گسل و مطالعه پاسخ سازه‌ای به حرکت پالس گونه معطوف شده است. از جمله بارزترین آنها می‌توان به معیار بیکر در سال ۲۰۰۷ [۱۳] به‌عنوان روشی برای شناسایی کمی رکوردهای شامل پالس اشاره نمود. در این روش بیکر با استفاده از تحلیل موجک به استخراج بزرگ‌ترین پالس سرعت رکورد داده شده می‌پردازد. سپس از طریق مقایسه رکورد اصلی و باقی‌مانده رکورد زمانی که پالس از آن استخراج می‌شود، معیاری را جهت طبقه‌بندی رکوردها به‌عنوان پالس گونه معرفی می‌کند. دیگر محققین شکل‌های موجی مختلفی را برای بیان و مدل‌سازی تحلیلی پالس‌های شناسایی شده در مناطق حوزه نزدیک ارائه کرده‌اند. بسیاری از مدل‌های موجود که حرکات نزدیک گسل را با استفاده از یک یا چند پالس ساده شده شبیه‌سازی می‌کنند، قابلیت پیش‌بینی پاسخ دینامیکی سازه‌ها را دارند، اما چنانچه با خصوصیات تاریخچه زمانی و طیف پاسخ رکورد واقعی مطابقت نداشته باشند می‌توانند منجر به نتایج گمراه‌کننده‌ای شوند. از این رو گسترش مدل‌هایی که در عین سادگی، با اطمینان مطلوب خصوصیت ضربه‌ای حرکات نزدیک گسل را فراهم کنند، ضروری می‌باشد. علاوه بر این، پارامترهای مدل می‌بایست دارای مفهوم فیزیکی واضحی بوده و مستقیماً با پارامترهای فیزیکی حرکات نزدیک گسل و انتشار امواج مرتبط باشد. چنین مدلی مهندسان را قادر می‌سازد رفتار سازه‌ها و شریان‌های حیاتی را تحت حرکات نزدیک گسل مورد بررسی قرار دهند.

از جمله مدل‌های ساده ریاضی که در خدمت اهداف فوق بوده و به‌طور موفق مجموعه کاملی از رکوردهای نزدیک گسل و طیف‌های پاسخ متناظر آنها را شبیه‌سازی می‌کند، می‌توان به مدل‌های ماورویدیس و پاپاجورجیو در سال ۲۰۰۳ [۱۲]، حسینی واعظ و همکاران در سال ۲۰۱۳ [۱۴] و سایر مدل‌های مشابه اشاره نمود. نخستین گام به‌منظور تخمین پالس غالب حرکات نزدیک گسل با استفاده از این روابط، تخمین مناسب پارامترهای

منطبق با مفاهیم فوق می‌باشد. در این مقاله مدل سرعت ارائه شده توسط شی و ابرهات [۲۱] مطابق با روابط زیر مد نظر قرار گرفته است:

$$V_{i+1} = WV_i + C_1 r_1 (Pbest_i - X_i) + C_2 r_2 (Gbest - X_i) \quad (۱)$$

$$X_{i+1} = X_i + V_{i+1} \quad (۲)$$

هر ذره از جمعیت با اندیس i به عنوان یک نقطه در فضای D بعدی با مختصات X و بردار سرعت V رفتار می‌کند. بهترین موقعیت قبلی هر ذره و بهترین ذره در میان جمعیت به ترتیب با $Pbest$ و $Gbest$ نشان داده شده است. r_1 و r_2 اعداد تصادفی مستقل با توزیع یکنواخت در بازه $[۰, ۱]$ می‌باشند. C_1 و C_2 فاکتورهای یادگیری بوده و به ترتیب، پارامتر ادراکی و پارامتر اجتماعی نامیده می‌شوند. پارامترهای ادراکی در این مطالعه برابر با عدد صحیح ۲ در نظر گرفته شده است. W پارامتر وزن اینرسی است. این پارامتر کنترل‌کننده اکتشاف محلی و کلی در فضای جستجو می‌باشد و بر اساس توصیه شی و ابرهات [۲۱] به صورت تابع خطی کاهشی مطابق با رابطه (۳) در نظر گرفته شده است.

$$W = W_{max} - \frac{W_{max} - W_{min}}{it_{max}} it \quad (۳)$$

در این رابطه it_{max} تعداد تکرار الگوریتم، it شماره تکرار جاری، W_{max} برابر با مقدار $۰/۸$ و W_{min} برابر با مقدار $۱/۴$ می‌باشد. به علاوه مسائل بهینه‌سازی غالباً دارای قيودی هستند که می‌بایست در فرآیند حل مسئله اغنا گردند. از این رو در این زمینه روش‌های مختلفی توسط محققان ارائه شده است که محبوب‌ترین آنها در میان استفاده‌کنندگان، روش تابع جریمه^۸ می‌باشد.

۲-۲- روش تابع جریمه

مسائل بهینه‌سازی مقید به فرم کلی زیر قابل بیان می‌باشند:

$$\min f(x) \quad x = (x_1, \dots, x_n)^t \in s \subseteq S \subseteq R^n \quad (۴)$$

که در آن:

$$g_i(x) \leq 0 \quad i = 1, \dots, q \quad (۵)$$

رکوردهای نزدیک گسل و طیف وسیعی از فعالیت‌های علمی به کار رود. در ادامه با توجه به مطالب گفته شده، نخست تعریفی اجمالی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی و توصیف الگوریتم پیشنهادی آورده شده است. سپس مدل‌های ریاضی جهت شبیه‌سازی پالس غالب رکورد سرعت حرکات نزدیک گسل توصیف شده‌اند. نهایتاً در قسمت پایانی نحوه به کارگیری الگوریتم‌های بهینه‌سازی در شناسایی و استخراج بزرگ‌ترین پالس سرعت از رکوردهای ثبت شده زلزله ارائه شده است.

۲- الگوریتم بهینه‌سازی

۲-۱- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۶ (PSO) که نخستین بار توسط ابرهات، شی و کندی ارائه شد، الگوریتمی تصادفی مبتنی بر جمعیت در هوش ازدحامی است که از رفتار اجتماعی پرندگان و ماهی‌ها اقتباس شده است [۱۵-۲۰]. مانند بسیاری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، روش PSO نیز با یک جمعیت تصادفی اولیه به عنوان مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بالقوه آغاز می‌شود. هر عنصر از جمعیت، یک ذره^۷ نامیده می‌شود. ذرات به صورت تکرار شونده در فضای n بعدی مسئله حرکت کرده و با محاسبه مقدار بهینگی به عنوان یک ملاک سنجش به جستجوی راه‌حل‌های ممکن جدید می‌پردازند. اما نکته قابل توجه آن است که در روش PSO هر ذره پرواز خود را بر اساس تجربه پرواز خود و سایر ذرات تنظیم می‌کند. به این معنی که در طول فرآیند بهینه‌سازی بهترین موقعیت تجربه شده توسط یکایک ذرات و نیز بهترین موقعیت تجربه شده توسط مجموعه ذرات در حافظه الگوریتم ذخیره می‌شود و به روز کردن سرعت ذرات با توجه به این مقادیر انجام می‌گیرد. بدین ترتیب با تکرار حرکت ذرات در فضا دانش راه‌حل خوب با تمام ذرات باقی می‌ماند و ذرات بر اساس اطلاعات شخصی و جمعی به جستجوی فضا پرداخته و نهایتاً پاسخ بهینه را خواهند یافت. بدین ترتیب مهم‌ترین بخش الگوریتم PSO تعریف بردار سرعت

نزدیک گسل و مطالعه پاسخ سازه‌ای به حرکات پالس گونه معطوف شده و شکل‌های موجی مختلفی توسط محققین برای این منظور ارائه شده است. از جمله در سال ۲۰۱۳ مدل ریاضیاتی جدیدی توسط حسینی واعظ و همکاران جهت شبیه سازی پالس غالب رکورد سرعت حرکات نزدیک گسل ارائه شده است. مدل پیشنهادی مطابق با رابطه (۱۰)، متشکل از توابع هارمونیک و چند جمله‌ای است و بر اساس آن عبارات مرتبط با سرعت شامل تاریخچه زمانی‌های شتاب و تغییر مکان زمین نیز در فرم بسته قابل بیان می‌باشد.

$$\gamma \geq 1 \text{ و } \left(t_0 - \frac{\gamma}{4f_p}\right) \leq t \leq \left(t_0 + \frac{\gamma}{4f_p}\right) \text{ برای}$$

$$V(t) = A \left(\frac{4f_p}{\gamma}\right)^4 \left((t - t_0)^2 - \left(\frac{\gamma}{4f_p}\right)^2\right)^2 \cos(2\pi f_p t + \nu) \quad (10)$$

و در غیر این صورت:

$$V(t) = 0 \quad (11)$$

که در آن A کنترل کننده دامنه سیگنال، f_p فرکانس، ν اختلاف فاز، γ معرف خصوصیت نوسانی (تعداد سیکل‌ها) و t_0 بیانگر مرکز پنجره زمانی یا همان زمان متناظر با نقطه حداکثر پوش می‌باشد. مدل ارائه شده توسط نویسندگان، با برخی رکوردهای پالس گونه نزدیک گسل از اطلاعات موجود در پایگاه داده پروژه نسل جدید روابط کاهندگی^۹ (NGA)، مطابقت داده شده است. نتایج حاکی از آن است که مدل پیشنهادی در عین سادگی، با دقت بالایی بخش پریود بالای رکوردهای نزدیک گسل را شبیه‌سازی می‌نماید. همچنین انطباق قابل قبولی میان طیف پاسخ الاستیک مدل پیشنهادی و رکورد واقعی در نزدیکی فرکانس غالب مشهود است. اما نکته حائز اهمیت آن است که در کنار ویژگی‌های منحصربه‌فرد رابطه معرفی شده، تعیین پارامترهای آن بر اساس روش آزمون و خطا دستی استوار است. بدین ترتیب که در نخستین گام مقدار پارامتر f_p به نحوی تعیین می‌گردد که طیف پاسخ الاستیک شبه سرعت مدل پیشنهادی و رکورد ثبت شده، در زمان تناوب تقریباً یکسانی واقع شوند. پارامترهای فاز و مرکز پنجره زمانی بر اساس انطباق حداکثر دامنه پالس و دامنه رکورد سرعت در پنجره

$$h_j(x) = 0 \quad j = q + 1, \dots, m \quad (6)$$

در روابط بالا x ، s ، S ، $f(x)$ ، $g(x)$ ، $h(x)$ و $q-m$ به ترتیب عبارتند از بردار مختصات ذرات، فضای ممکن، کل فضای جستجو، تابع هدف، قید نابرابری، قید برابری، تعداد قیود نابرابری و تعداد قیود برابری. بر اساس تعریف بالا الگوریتم بهینه‌سازی مقید می‌بایست به یافتن نقاط بهینه در فضای n بعدی مسئله با شرط برقراری قیود برابری و نابرابری پردازد. روش تابع جریمه از طریق کم کردن یا اضافه نمودن مقادیری به تابع هدف متناسب با مقدار نقض قید به حل مسائل مقید می‌پردازد و به طور کلی از الگوی زیر پیروی می‌کند:

$$F = f(x) + \sum_{i=1}^q r_i G_i + \sum_{j=q+1}^m c_j L_j \quad (7)$$

که در آن F تابع هدف جدیدی است که می‌بایست بهینه شود. r و c ضرایب پینالیتی، G و L به ترتیب توابعی از قیود g و h می‌باشند و به فرم کلی زیر بیان می‌شوند:

$$G_i = \max[0, g_i(x)]^\alpha \quad (8)$$

$$L_j = |h_j(x)|^\beta \quad (9)$$

در توابع بالا α و β ثابت‌هایی هستند که معمولاً برابر با ۱ یا ۲ منظور می‌شوند و در مطالعه حاضر توسط نویسندگان برابر با ۱ لحاظ شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود با برقراری قیود، مقدار تابع جریمه برابر با صفر و در غیر این صورت مقداری مثبت است. بدین ترتیب در صورت وجود تخطی از قیود مقداری مثبت به تابع هدف افزوده شده و الگوریتم جهت یافتن نقطه بهینه به عقب بازگشته و در نهایت با تکرار الگوریتم پاسخ مسئله بهینه‌سازی مقید حاصل می‌شود.

۳- مدل‌های شبیه‌سازی رکوردهای نزدیک گسل

همان‌طور که گفته شد کمبود تاریخچه زمانی‌های واقعی حرکات پالس گونه و تقاضای تحلیل سازه‌ای، لزوم گسترش شیوه‌ای کارا جهت تولید و شبیه‌سازی حرکات پالس گونه نزدیک گسل را برای مهندسين طراح ایجاب می‌نماید. از این رو در دهه‌های اخیر، توجه گسترده‌ای به شبیه‌سازی حرکات

زلزله تحقق می‌یابد.

$$F = \text{RMS}(SV_{\text{Target}} - SV_{\text{Pulse}}) + \text{Penalty} \times \text{RMS}(V_{\text{Target}}(t) - V_{\text{Pulse}}(t)) \quad (12)$$

در روابط بالا F ، SV_{Target} ، SV_{Pulse} ، V_{Target} ، V_{Pulse} ، RMS و Penalty به ترتیب عبارتند از تابع هدف مقید، طیف پاسخ الاستیک شبه سرعت رکورد واقعی، طیف پاسخ الاستیک شبه سرعت حاصل از مدل تحلیلی، تاریخچه زمانی سرعت رکورد واقعی، تاریخچه زمانی سرعت حاصل از مدل تحلیلی، ضریب پنالتی و تابع جذر میانگین مربعات^{۱۰}.

۳-۴- نحوه عملکرد الگوریتم و روش پیشنهادی

پیش از به کارگیری الگوریتم پیشنهادی در شناسایی و استخراج بزرگ‌ترین پالس سرعت، نحوه عملکرد الگوریتم مطابق با شکل (۱) به شرح زیر ارائه می‌شود:

- ۱- جمعیت اولیه از ذرات در محدوده حرکتی پارامترهای ورودی که در بخش ۳ معرفی شده‌اند، به صورت تصادفی در فضای جستجو ایجاد می‌شوند.
- ۲- هر ذره مقدار تابع هدف متناظر با موقعیت خود در فضا را مطابق با رابطه (۱۲) محاسبه می‌کند.
- ۳- هر ذره با توجه به موقعیت فعلی خود و سایر ذرات، بهترین موقعیتی که تا کنون در آن بوده است را به همراه موقعیت بهترین ذره در میان جمعیت شناسایی می‌کند.
- ۴- هر ذره با ترکیب اطلاعات بالا، مطابق با روابط (۱) و (۲) جهتی را برای حرکت انتخاب می‌کند.
- ۵- پس از انجام حرکت جمعی، یک مرحله از الگوریتم به پایان می‌رسد.
- ۶- مراحل ۲ تا ۴، تا رسیدن به آخرین تکرار الگوریتم بهینه‌سازی ادامه می‌یابد.
- ۷- با همگرایی فرآیند بهینه‌سازی، نقطه بهینه یافت می‌شود.

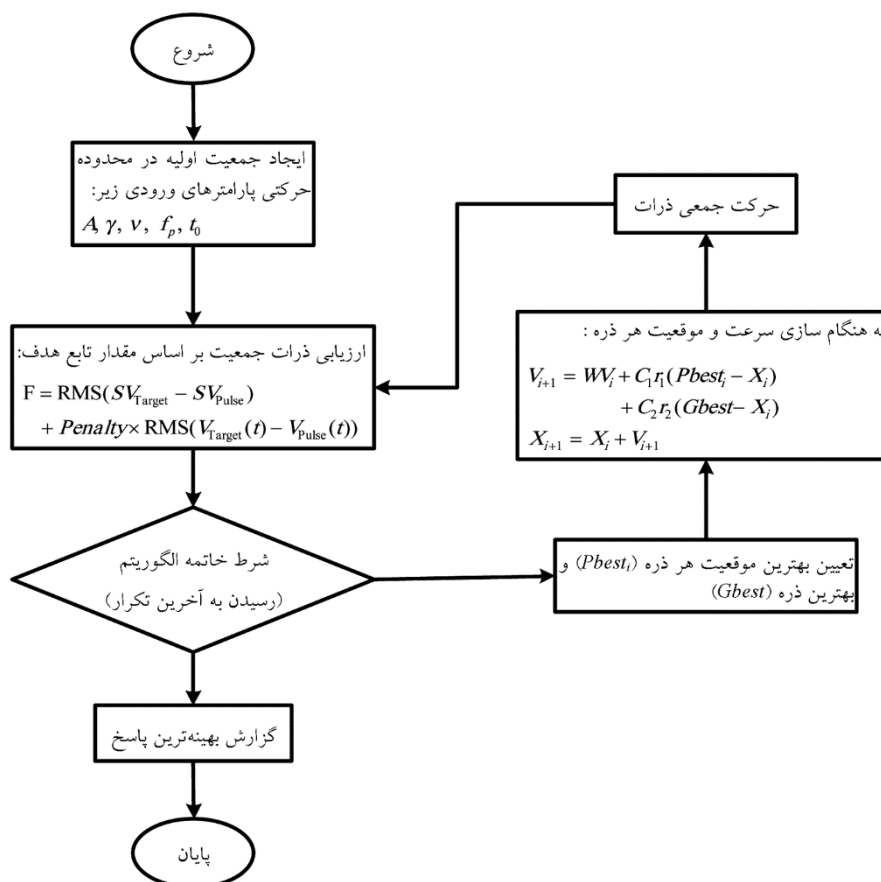
زمانی مشخص می‌شوند. سپس پارامتر A به عنوان پارامتر کنترل‌کننده دامنه پالس، با در نظر گرفتن دامنه رکورد واقعی سرعت و مقدار حداکثر طیف پاسخ الاستیک شبه سرعت آن انتخاب شده است. نهایتاً پارامتر γ با توجه به تأثیرگذاری بر مدت زمان پالس، تعداد سیکل‌ها و دامنه طیف پاسخ به گونه‌ای تعیین می‌شود که انطباق شکل پالس شبیه‌سازی شده و رکورد واقعی در حد قابل قبول حاصل شود [۱۴].

همان‌طور که مشاهده می‌شود چنین روند آزمون و خطایی از توانایی مهندسی و زلزله‌شناسان در تولید زلزله نزدیک گسل با استفاده از مدل تحلیلی می‌کاهد. بنابراین اتخاذ تدابیری جهت تخمین پارامترهای مدل پیشنهادی به منظور افزایش کارایی آن ضروری به نظر می‌رسد. از این‌رو در این مطالعه با به کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی PSO به حذف پروسه آزمون و خطا دستی در فرآیند شبیه‌سازی زلزله‌های نزدیک گسل اقدام شده است.

۴- استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات در شبیه‌سازی رکوردهای نزدیک گسل

۴-۱- معرفی تابع هدف

در رویکرد جدید سعی شده است با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی PSO و با حداقل کردن اختلاف میان مقادیر طیف پاسخ الاستیک شبه سرعت حاصل از مدل شبیه‌سازی پالس و رکورد واقعی انطباق هر چه بیشتر طیف‌های پاسخ الاستیک شبه سرعت و به تبع آن طیف‌های پاسخ الاستیک تغییر مکان و شتاب حاصل شود. اما از آنجایی که انطباق مقادیر تاریخچه زمانی نیز حائز اهمیت است اختلاف مقادیر تاریخچه زمانی سرعت مدل پیشنهادی و رکورد واقعی به عنوان قید در فرآیند بهینه‌سازی لحاظ شده است. بدین ترتیب تابع هدف مقیدی به شرح زیر مبنای مطالعه حاضر قرار گرفته است و از این طریق انطباق هم‌زمان تاریخچه زمانی شتاب، سرعت، تغییر مکان و طیف‌های پاسخ الاستیک متناظر حاصل از مدل ریاضی و رکورد اصلی



شکل (۱): فلوجارت روش پیشنهادی.

مشخصات رکوردهای مذکور به‌عنوان بخشی از رکوردهای موجود در اطلاعات پروژه نسل جدید روابط کاهش‌دهنده (NGA) که به‌عنوان حرکات پالس‌گونه دسته‌بندی شده‌اند، در جدول (۱) قابل مشاهده است.

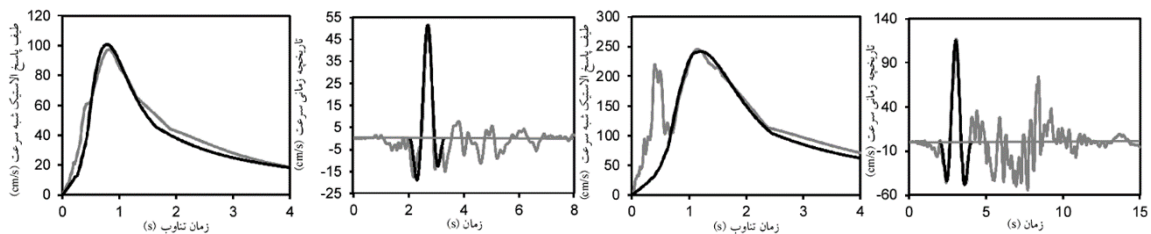
۴-۲- انطباق مدل پیشنهادی و رکوردهای نزدیک گسل
به منظور نمایش کارایی استفاده از رویکرد نوین پیشنهادی در این بخش به استخراج و شبیه‌سازی مجدد پالس غالب رکوردهای شبیه‌سازی شده در مرجع [۱۴] مبادرت شده است.

جدول (۱) مشخصات رکوردهای حرکات نزدیک گسل.

ردیف	رویداد	ایستگاه	سال وقوع	بزرگای زلزله (ریشتر)	بیشینه سرعت (سانتی‌متر بر ثانیه)	فاصله از گسل (کیلومتر)
۱	سانفرناندو	PCD	۱۹۷۱	۶/۶	۱۱۶/۵	۱/۸
۲	کاپوتی لیک	GA6	۱۹۷۹	۵/۷	۵۱/۵	۳/۱
۳	ایمپریال ولی	AGR	۱۹۷۹	۶/۵	۵۴/۴	۰/۷
۴	نورت پالم اسپرینگ	NPS	۱۹۸۶	۶/۱	۷۳/۶	۴/۰
۵	سوپر استیشن هیلز	PTS	۱۹۸۷	۶/۵	۱۰۶/۸	۱/۰
۶	نورث‌ریج	LAD	۱۹۹۴	۶/۷	۷۷/۱	۵/۹
۷	نورث‌ریج	RRS	۱۹۹۴	۶/۷	۱۶۷/۲	۶/۵
۸	چی چی	TCU076	۱۹۹۹	۶/۲	۵۹/۴	۱۴/۷

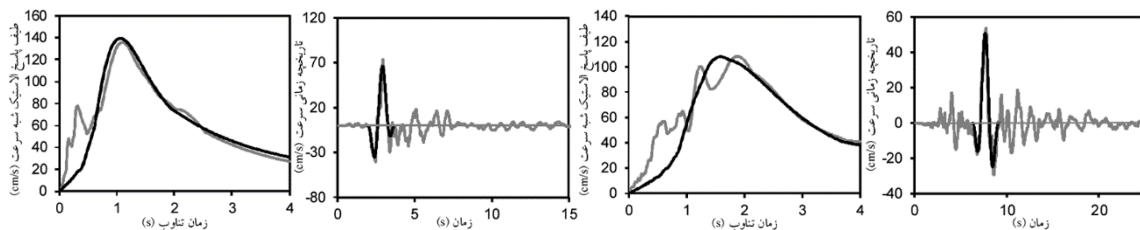
گام زمانی ثبت رکورد زلزله و زمان وقوع حداکثر تاریخچه زمانی سرعت می‌باشند. نهایتاً با معرفی بازه‌های فوق در مسئله بهینه‌سازی مورد نظر از حرکت ذرات در خارج از محدوده تعریف شده در فضای پنج‌بعدی خودداری خواهد شد. مطابق با شکل (۲)، با استفاده از روش پیشنهادی انطباق هم‌زمان تاریخچه‌های زمانی سرعت و طیف پاسخ الاستیک شبه‌سرعت رکورد واقعی و پالس شبیه‌سازی شده برای تمام رکوردهای تحت بررسی انجام شده است. در این شکل‌ها کیفیت انطباق پالس شبیه‌سازی شده و رکورد واقعی و توانایی روش

در اجرای الگوریتم PSO اندازه جمعیت ذرات برابر با ۵۰، تعداد تکرار الگوریتم برابر با ۲۰۰ و ضریب پناستی برابر با ۵ منظور شده است. همچنین با مطالعه بر روی طیف گسترده‌ای از رکوردها و الگو گرفتن از تحقیقات انجام شده توسط حسینی واعظ و همکاران در سال ۲۰۱۳ [۱۴] محدوده حرکتی پارامترهای A ، γ ، ν ، f_p و t_0 به ترتیب به صورت بازه‌های $[PGV-25, PGV]$ ، $[2, 4]$ ، $[0, 2\pi]$ ، $[0.1, 1.4]$ و $[t_{PGV}-30 \times Dt, t_{PGV}+30 \times Dt]$ تعریف شده است. لازم به ذکر است که در این عبارات پارامترهای Dt ، PGV و t_{PGV} به ترتیب معرف حداکثر مقدار تاریخچه زمانی سرعت،



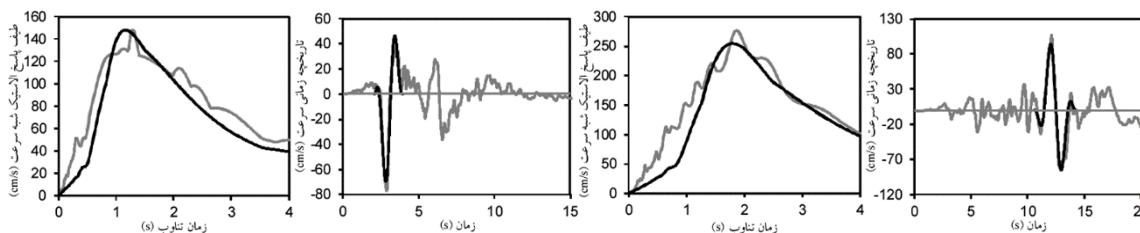
کایوتی لیک، GA6، ۱۹۷۹

سان فرناندو، PCD، ۱۹۷۱



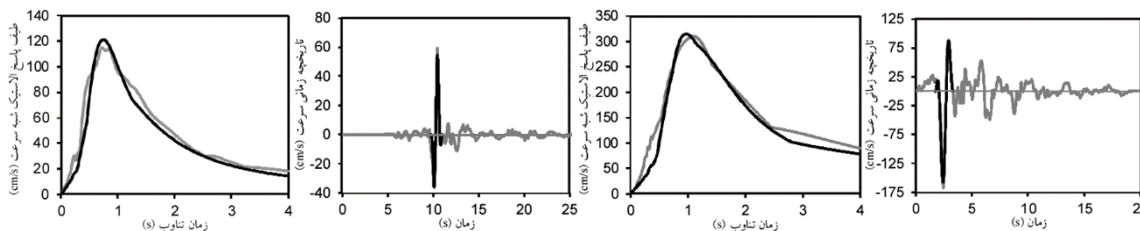
نورت پالم اسپرینگ، NPS، ۱۹۸۶

ایمپریال ولی، E04، ۱۹۷۹



نورث ریج، LAD، ۱۹۹۴

سوپر استیشن هیلز، PTS، ۱۹۸۷



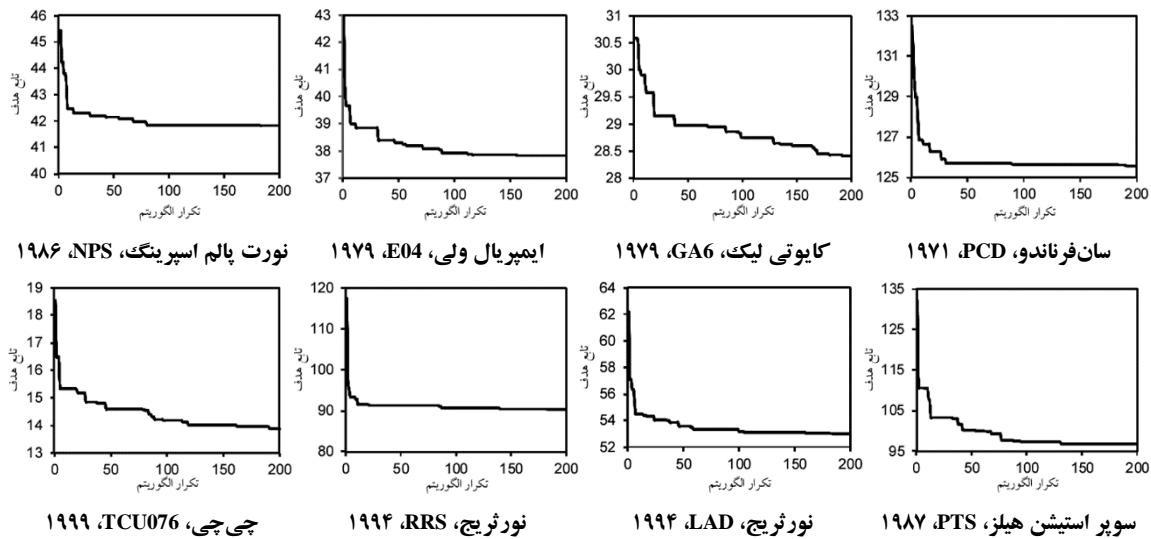
چی چی، TCU076، ۱۹۹۹

نورث ریج، RRS، ۱۹۹۴

شکل (۲): تاریخچه زمانی سرعت و طیف پاسخ الاستیک شبه‌سرعت رکورد واقعی و شبیه‌سازی شده.

خلاصه شده در جدول (۲) در مدل تحلیلی حسینی واعظ و همکاران [۱۴] انطباق کامل پالس مصنوعی و رکورد واقعی را در تمامی رکوردهای پالس گونه به همراه دارد. به منظور مقایسه نتایج و سنجش روش پیشنهادی، در جدول (۲) مقادیر نظیر در مرجع [۱۴] و در شکل (۴) مقایسه شماتیک رکوردهای سان فراندو^{۱۱} در سال ۱۹۷۱ و کایوتی لیک^{۱۲} در سال ۱۹۷۹ قابل مشاهده می‌باشد.

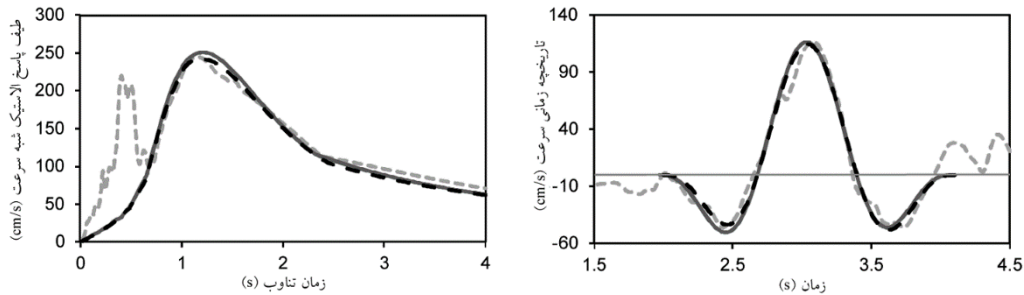
پیشنهادی در مدل‌سازی بخش پی‌ریود بالای رکورد واقعی نزدیک گسل با دقت بالا کاملاً مشهود است. همچنین همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی PSO در فرآیند شبیه‌سازی پالس در شکل (۳) قابل مشاهده است. بدین ترتیب بزرگ‌ترین پالس سرعت از رکوردهای ثبت شده زلزله استخراج و نتایج شامل پارامترهایی A ، γ ، v ، f_p و t_0 به شرح جدول (۲) ارائه شده است. جایگذاری پارامترهای



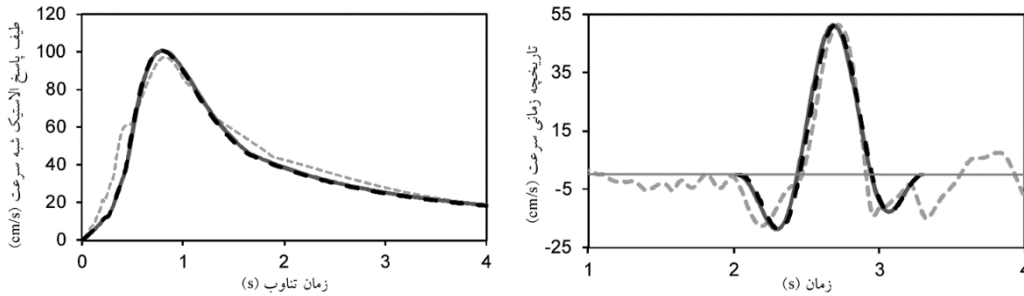
شکل (۳): نمودار همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی PSO.

جدول (۲): مقادیر پارامترهای ورودی حاصل از استخراج پالس غالب رکورد سرعت حرکات نزدیک گسل و مقایسه نتایج با مرجع [۱۴].

ردیف	رویداد	ایستگاه	مقایسه نتایج	سال وقوع	دامنه سیگنال	تعداد سیکل‌ها	اختلاف فاز (رادان)	فرکانس (هرتز)	مرکز پنجره زمانی (ثانیه)
۱	سان فراندو	PCD	مطالعه حاضر	۱۹۷۱	۱۱۴/۹۲	۲/۹۳	۵/۵۸	۰/۷۰	۳/۰۵
			[۱۴]						
۲	کایوتی لیک	GA6	مطالعه حاضر	۱۹۷۹	۵۱/۵۲	۲/۵۵	۱/۸۵	۱/۰۰	۲/۶۶
			[۱۴]						
۳	ایمپریال ولی	AGR	مطالعه حاضر	۱۹۷۹	۵۱/۱۸	۲/۹۲	۱/۱۰	۰/۵۰	۷/۷۳
			[۱۴]						
۴	نورت پالم اسپرینگ	NPS	مطالعه حاضر	۱۹۸۶	۶۸/۵۴	۲/۶۴	۴/۹۶	۰/۷۵	۲/۸۰
			[۱۴]						
۵	سوپر استیشن هیلز	PTS	مطالعه حاضر	۱۹۸۷	۱۰۴/۳۲	۳/۴۷	۱/۸۴	۰/۴۸	۱۲/۴۱
			[۱۴]						
۶	نورث ریج	LAD	مطالعه حاضر	۱۹۹۴	۷۷/۰۷	۲/۵۱	۴/۲۸	۰/۶۵	۳/۰۳
			[۱۴]						
۷	نورث ریج	RRS	مطالعه حاضر	۱۹۹۴	۱۶۶/۸۲	۲/۴۹	۴/۰۶	۰/۷۷	۲/۵۵
			[۱۴]						
۸	چی چی	TCU076	مطالعه حاضر	۱۹۹۹	۵۸/۸۶	۲/۶۸	۴/۱۲	۱/۰۸	۱۰/۳۷
			[۱۴]						



سانفراندو، PCD، ۱۹۷۱



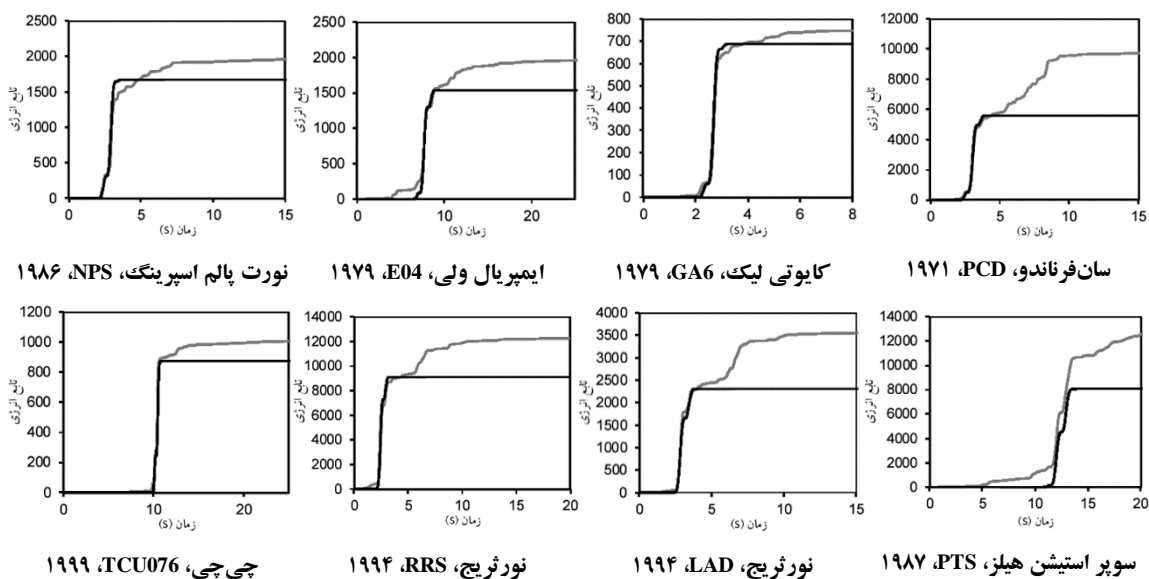
کایوتی لیک، GA6، ۱۹۷۹

شکل (۴): الف) مقایسه پالس معادل استخراج شده مربوط به رکوردهای سانفراندو، PCD، ۱۹۷۱ و کایوتی لیک، GA6، ۱۹۷۹ (خطوط خط چین خاکستری) در مطالعه حاضر (خطوط خط چین سیاه) و مرجع [۱۴] (خطوط خاکستری).

$$CSV(t) = \int_{t_1}^{t_2} V^2(t) dt \quad (13)$$

در روابط بالا $V(t)$ مؤلفه سرعت، t_1 و t_2 نقاط شروع و پایان تاریخچه زمانی هستند.

به عنوان پارامتر کنترلی دیگر، در شکل (۵) انرژی پالس رکورد واقعی و شبیه‌سازی شده با تعریف زیر نشان داده شده است [۲۲-۲۴] و تطابق مناسب پالس مصنوعی و رکورد ثبت شده زلزله را بیش از پیش به نمایش می‌گذارد.



شکل (۵): تابع انرژی رکورد واقعی و پالس شبیه‌سازی شده.

۱۹۷۸ و بم در سال ۲۰۰۳ مطابق با جدول (۳) مورد توجه قرار گرفته است. از مهم‌ترین خصوصیات این دو زلزله می‌توان به پالس بزرگی اشاره نمود، که در رکورد سرعت آنها ایجاد شده است. با مقایسه این دو رکورد مشاهده می‌شود، با وجود مقادیر نزدیک به هم PGV در رکوردهای مذکور، پالس سرعت رکورد نزدیک گسل طبس دارای زمان تناوب بیشتری است، که از اختلاف در بزرگای گشتاوری زلزله طبس نشأت می‌گیرد. بدین ترتیب با به کارگیری روش پیشنهادی و مدل شبیه‌سازی حسینی واعظ و همکاران [۱۴]، مدل پالس سرعت برای هر یک از این رکوردها استخراج شده و همراه با طیف پاسخ الاستیک با میرایی ۵ درصد در شکل (۶) نمایش داده شده است. نتایج حاکی از انطباق مناسب پالس سرعت و طیف پاسخ الاستیک نظیر در رکورد واقعی زلزله بم و پالس معادل آن می‌باشد. درحالی که در مورد رکورد نزدیک گسل زلزله طبس، چنین تطابقی صرفاً در محدوده زمان تناوب بالا مشاهده می‌شود. از این رو به نظر می‌رسد روش پیشنهادی، در استخراج پالس‌هایی با محتوای فرکانسی بالای غالب، کارایی محدودتری دارد.

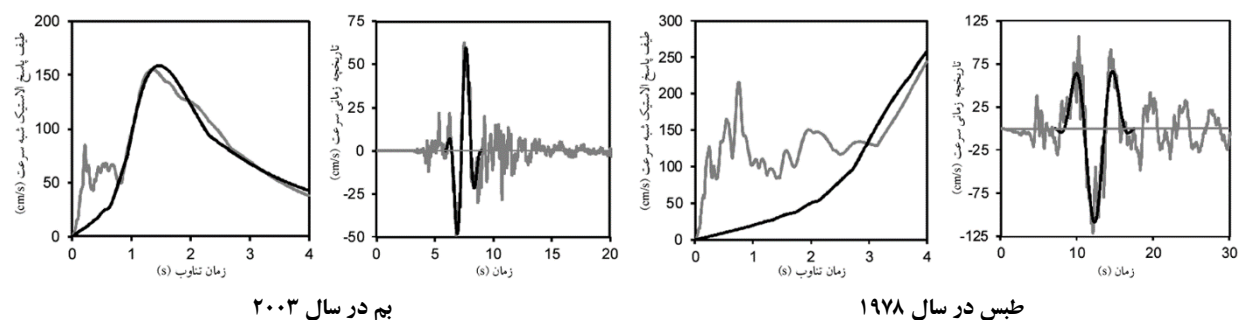
همان‌طور که مشاهده می‌شود روش پیشنهادی در این مطالعه امکان استخراج پالس از تمامی رکوردهای نزدیک گسل و بیان آنها به صورت روابط بسته ریاضیاتی را فراهم می‌آورد. تاریخچه پالس تولید شده می‌تواند در تحلیل سازه‌ای و مطالعه پاسخ سازه‌ها به حرکات پالس گونه نزدیک گسل مورد استفاده قرار گیرد. همچنین با توجه به آنکه تولید نهایی حرکات نزدیک گسل مصنوعی از طریق ترکیب یک پالس سرعت وابسته با زمان تناوب بالا و موج لرزه‌ای مستقل فرکانس بالا انجام می‌پذیرد، رابطه شبیه‌سازی با رویکرد بهینه‌سازی می‌تواند در تولید تاریخچه زمانی بخش پالس سرعت وابسته با زمان تناوب بالا به کار رود.

۵- مدل‌سازی پالس غالب رکوردهای نزدیک گسل ایران

در کنار رکوردهای پالس گونه NGA که در بخش قبل مورد بررسی قرار گرفت، در این بخش شبیه‌سازی پالس غالب رکوردهای نزدیک گسل ایران طی زلزله‌های طبس در سال

جدول (۳): مشخصات رکوردهای نزدیک گسل طبس و بم.

ردیف	رویداد	ایستگاه	سال وقوع	بزرگای زلزله (ریشر)	بیشینه سرعت (سانتی‌متر بر ثانیه)	فاصله از گسل (کیلومتر)
۱	طبس	TAB	۱۹۷۸	۷/۴	۱۲۱/۴	۲/۰۵
۲	بم	BAM	۲۰۰۳	۶/۶	۶۲/۵	۱



شکل (۶): تاریخچه زمانی سرعت و طیف پاسخ الاستیک شبه سرعت رکورد واقعی و شبیه‌سازی شده در رکوردهای نزدیک گسل طبس در سال ۱۹۷۸ و بم در سال ۲۰۰۳.

۶- نتیجه گیری

در این مطالعه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) به صورت مقید و با بهره‌گیری از روش تابع جریمه، به استخراج بزرگ‌ترین پالس سرعت در حرکات نزدیک گسل پرداخته شده است. در روش پیشنهادی تعیین پارامترهای مدل‌های تحلیلی که از طریق انطباق هم‌زمان خصوصیات تاریخچه زمانی و طیف پاسخ رکورد واقعی و شبیه‌سازی شده حاصل می‌شود، با بهینه کردن اختلاف مقادیر فوق و با تعریف تابع هدف مناسب صورت گرفته است. بدین ترتیب الگوریتم بهینه‌سازی، سعی و خطای دستی در شناسایی و استخراج پالس با استفاده از مدل‌های تحلیلی را به سعی و خطای سیستماتیک تبدیل می‌کند و فرآیندی با حداقل مداخله و قضاوت تحلیل‌گر را موجب می‌شود.

با انتخاب مدل ریاضیاتی حسینی واعظ و همکاران [۱۴] به دلیل فرم ساده‌تر و توانایی مدل‌سازی انواع پالس‌های تک‌سویه و دو سویه، مجموعه‌ای از رکوردهای پالس گونه در پایگاه نسل جدید روابط کاهندگی (NGA)، با استفاده از روش پیشنهادی شبیه‌سازی و به فرم ریاضی بیان شده‌اند. مقایسه نتایج با دیگر مطالعات، مؤید کارایی روش پیشنهادی در استخراج بزرگ‌ترین پالس سرعت از هر رکورد نزدیک گسلی می‌باشد. روش پیشنهادی در استخراج و شبیه‌سازی پالس غالب رکوردهای نزدیک گسل ایران طی زلزله‌های طبس و بم نیز مورد استفاده قرار گرفته است. تطابق طیف پاسخ الاستیک زلزله طبس صرفاً در محدوده زمان تناوب بالا، کارایی محدودتر روش پیشنهادی را در استخراج پالس‌هایی با محتوای فرکانسی بالای غالب نشان می‌دهد.

مراجع

- Hall, J.F., Heaton, T.H., Halling, M.W, and Wald, D.J. (1995) Nearsurface ground motion and its effects on flexible buildings. *Earthquake Spectra*, **11**(4), 569–605.
- Iwan, W.D. (1997) Drift spectrum: measure of demand for earthquake ground motions. *Journal of Structural Engineering*, **123**(4), 397–404.
- Alavi, B. and Krawinkler, H. (2001) Effects of near-fault ground motions on frame structures. *John A. Blume Earthquake Engineering Center*.
- Menun, C. and Fu, Q. (2002) An analytical model for near-fault ground motions and the response of SDOF systems. *Proceedings of 7th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, 21-25.
- Makris, N. and Black, C.J. (2003) Dimensional analysis of inelastic structures subjected to near fault ground motions. *Earthquake Engineering Research Center*, University of California.
- Mavroeidis, G.P., Dong, G. and Papageorgiou, A.S. (2004) Near-fault ground motions, and the response of elastic and inelastic single degree-of-freedom (SDOF) systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **33**(9), 1023–1049.
- Akkar, S., Yazgan, U., and Gulkan, P. (2005) Drift estimates in frame buildings subjected to near-fault ground motions. *Journal of Structural Engineering*, **131**(7), 1014–1024.
- Luco, N. and Cornell, C.A. (2007) Structure-specific scalar intensity measures for near-source and ordinary earthquake ground motions. *Earthquake Spectra*, **23**(2), 357–392.
- 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.
- Mavroeidis, G.P. and Papageorgiou, A.S. (2003) A mathematical representation of near-fault ground
- Bertero, V.V., Mahin, S.A., and Herrera, R.A. (1978) A seismic design implications of near-fault San Fernando earthquake records. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **6**(1), 31–42.
- Anderson, J.C. and Bertero, V.V. (1987) Uncertainties in establishing design earthquakes.

23. Todorovska, M.I., Meidani, H., and Trifunac, M.D. (2009) Wavelet approximation of earthquake strong ground motion-goodness of fit for a database in terms of predicting nonlinear structural response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **29**(4), 742–751.
24. Trifunac, M.D. (2008) Energy of strong motion at earthquake source. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **28**(1), 1–6.

واژه‌نامه

Directivity Effect	۱- اثر راستاپذیری، جهت‌یافتگی
Permanent Displacement	۲- جابه‌جایی ماندگار
Forward Directivity	۳- راستاپذیری پیش‌رونده
Strike-Slip Fault	۴- گسل راستا لغز
Dip-Slip Fault	۵- گسل شیب لغز
Particle Swarm Optimization	۶- بهینه‌سازی ازدحام ذرات
Particle	۷- ذره
Penalty Function	۸- تابع جریمه
Next Generation Attenuation	۹- نسل جدید روابط کاهندگی
Root Mean Square	۱۰- جذر میانگین مربعات
San Fernando	۱۱- سان‌فرناندو
Coyote Lake	۱۲- کایوتی لیک

motions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **93**(3), 1099–1131

13. Baker, J. (2007) Quantitative classification of nearfault ground motions using wavelet analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **97**(5), 1486–1501.
14. Hoseini Vaez, S.R., Sharbatdar, M.K., Ghodrati Amiri, G., Naderpour, H., and Kheyroddin, A. (2013) Dominant pulse simulation of near fault ground motions. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **12**(2), 267–278.
15. Shi, Y., and Eberhart, R.C. (1998) Parameter selection in particle swarm optimization. International conference on evolutionary programming, 591–600.
16. Eberhart, R.C. and Kennedy, J. (1995) A new optimizer using particles swarm theory. *Proceedings of the 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science*, **1**, 39–43.
17. Jie, J., Zeng, J., Han, C., and Wang, Q. (2008) Knowledge-based cooperative particle swarm optimization. *Applied Mathematics and Computation*, **205**(2), 861–873.
18. Kennedy, J. and Eberhart, R.C. (1995) Particle swarm optimization. *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Neural Networks*, 1942–1948.
19. Eberhart, R.C., Dobbins, R., and Simpson, P. (1996) Computational intelligence PC tools. *Academic Press Professional, Inc.*
20. Kennedy, J. (1997) The particle swarm: Social adaptation of knowledge. *IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, 303–308.
21. Shi, Y. and Eberhart, R. (1998) A modified particle swarm optimizer. *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, 69–73.
22. Mcfadden, P.D., Cook, J.G., and Forster, L.M. (1999) Decomposition of gear vibration signals by the generalised S transform. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **13**(5), 691–707.

Using the Particle Swarm Optimization Algorithm for Identifying and Extracting the Prevalent Pulse of Near-Fault Ground Motions

Seyed Rohollah Hoseini Vaez^{1*}, Zahra Minaei²

1. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran.

*Corresponding Author, e-mail: hoseinivaez@qom.ac.ir

2. Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran.

With increasing the earthquake records over the past decades, it has been determined that ground motions in the vicinity of the causative fault (up to 15 km from the fault) can be significantly different from the motions away from the fault. These movements often include high displacement and velocity pulses with a significant structural damage potential and impose considerable seismic demand on the structure. Due to the devastating effects of such earthquakes, many engineers and seismologists have focused on the quantitative identification of pulse bearing records and simulation of the near-fault ground motions. Many simulation models extract the prevalent velocity pulse of the near-fault motions through fitting the displacement, velocity, acceleration time histories, and the corresponding elastic-response spectra obtained from the model and the actual record. So far, determination of the analytical models parameters has been accompanied by a manual trial and error process. Such trial-and-error-based process limits the ability of engineers to apply these relationships and investigate their effects on research and practical applications. In this study, a new approach is proposed for identifying and extracting the prevalent velocity pulse from earthquake records by optimization algorithms and the mentioned models. Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm is used to simultaneously minimize the difference between the time history and the corresponding elastic-response spectra of the simulation model and those of actual, by defining a suitable objective function.

The objective function in the optimization process is as a constrained function where the root-mean-square difference between the values of the pseudo-velocity elastic-response spectrum obtained from the pulse simulation model and its actual record is as the target function, and the root-mean-square difference between time histories of the corresponding velocity is as the constraint. With the objective function defined, the physical parameters of the simulation models are determined without the need for manual trial and error process. The optimization algorithm converts the manual trial and error in process of pulse extraction into the systematic trial and errors with the minimum analytic intervention and judgment. Then, by the proposed method and Hosseini Vaez mathematical model, a set of near-fault records have been simulated and stated in mathematical expression. The mentioned model includes harmonic and polynomial expressions, which is capable to simulate various pulses with a simpler form. Although this model simulates the long-period portion of near fault records, the parameters of model are determined based on a try and error method. The proposed method has been used to extract and simulate the prevalent pulses of near-fault records of Iran for the Tabas and Bam earthquakes.

Comparing the results with other studies represents the efficiency of the proposed method for extracting the prevalent velocity pulse from near-fault records and expressing them as closed mathematical equations. The generated pulse history can be used to structural analysis and investigation of structures response to near-fault ground motions. Besides, since the synthetic near-fault ground motions are a combination of long-period-dependent velocity pulse and high-frequency independent seismic wave, the proposed approach can be used to generate time history of the long-period dependent velocity pulse.

Keywords: Near-Fault Ground Motions, Simulation Models, Velocity Pulse, Optimization Algorithms, Particle Swarm Optimization.