



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره چهل و هفت، شماره ۲، پاییز ۱۳۹۴، صفحه ۳۳ تا ۵۰
Vol. 47, No. 2, Fall 2015, pp. 33- 50



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی عمران و محیط زیست
Amirkabir Journal of Science & Research - Civil & Environmental Engineering
(AJSR - CEE)

بهینه‌سازی ژنتیکی محاسبات سخت در مقابل محاسبات نرم برای مدل‌سازی میراگر MR و ارائه یک مدل شبه استاتیکی وارون‌پذیر

بهنام مهرکیان^{۱*}، آرش بهار^۲، علی چائی بخش^۳

۱- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه گیلان، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه گیلان، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، ایران

(دریافت ۱۳۹۱/۵/۸، پذیرش ۱۳۹۳/۱۲/۲۴)

چکیده

برای بیان رفتار غیرخطی میراگرهای MR بعنوان ابزارهای تثبیت شده‌ی نیمه فعال در کنترل ارتعاشات، مدل‌های مختلفی ارائه شده که در دو عرصه محاسبات سخت و نرم قابل دسته‌بندی هستند. اما تنها برخی قادرند از ویژگی‌های هیستریک و بشدت دینامیکی میراگرهای MR بصورت مستقیم و معکوس، که یک خصیصه‌ی اصلی کنترلی است، بخوبی تقلید کنند؛ بطور دقیق‌تر، انتخاب یک مدل باکیفیت و معکوس‌پذیر نقش مهمی در کنترل نیمه فعال ایفا میکند، که تا کنون بصورت خاص مورد توجه قرار نگرفته است. ازینرو در این پژوهش ابتدا تعدادی از بهترین مدل‌های ارائه شده‌ی محاسبات سخت (پارامتری) میراگر MR انتخاب و توسط بهینه‌سازی ژنتیکی تحت شرایط برابر شناسایی میشوند. دوم، بوسیله‌ی روش‌های محاسبات نرم دو مدل فازی-ژنتیک و عصبی-فازی ساخته میشوند. سپس یک مدل شبه استاتیکی ارائه شده، که بر خلاف مدل‌های دینامیکی دقیق کنونی، بدون معادله دیفرانسیل و وارون‌پذیر است. سرانجام، تمامی مدل‌ها در معرض زلزله‌های فیلترشده‌ی ایرانی و خارجی مقایسه میشوند. در کلیه مراحل، داده‌های آزمایشگاهی با بکارگیری یک برنامه‌ی معیار مجهز به میراگرهای بزرگ مقیاس MR ارائه‌شده توسط انجمن مهندسی عمران آمریکا (ASCE)، تولید میشوند. مقایسه‌ها دو نتیجه بهمراه دارند: مدل فازی-ژنتیکی دقیق‌تر از مدل‌های محاسبات سخت است و مدل ارائه‌شده موثرتر از مدل‌های دینامیکی عمل میکند، زیرا نه تنها دارای دقت مطلوب و سرعت بمراتب بالاتر بوده، بلکه بسادگی وارون‌پذیر است.

کلمات کلیدی

مدل‌های میراگر MR، برنامه‌ی مرجع، بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک، فازی، مدل شبه استاتیک، زلزله، مقایسه

* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات Email: behnam_mkian@msc.guilan.ac.ir

۱- مقدمه

بتواند از نوع غیر فعال خود بهتر کار کرده و عملکرد مشابه نوع فعال خود را داشته باشد، منوط به طراحی صحیح این سیستم است. یک سیستم کنترل نیمه فعال شامل الگوریتم کنترل نیمه فعال و ابزارهای نیمه فعال است. در سال‌های اخیر الگوریتم‌های متنوع کنترلی برای این سیستم‌ها ارائه شده است که بعضاً وام گرفته از الگوریتم‌های کنترل فعال هستند. از معروف‌ترین آنها میتوان از الگوریتم کنترل بهینه‌ی قیچی شده^۵ [۷] که در سال ۱۹۹۶ ارائه شد، مروری بر سیستم‌های کنترلی نیمه فعال [۸] در ۱۹۹۹، کنترلی‌های بر پایه‌ی تئوری پایداری لیاپانوف^۶ [۹] در ۲۰۰۰، کنترل فازی نیمه فعال یک سیستم آزمایشگاهی یک درجه آزادی [۱۰] در ۲۰۰۴، کنترل فازی- ژنتیک سازه [۱۱] در سال ۲۰۰۷ و کنترل ابداعی [۱۲] که در ۲۰۱۰ برای یک سازه‌ی کف-جداسازی شده^۷ ارائه شد، نام برد.

اما تمایز اساسی‌تر و به نوعی برتری یک سیستم کنترل نیمه فعال نسبت به سیستم‌های کنترل فعال، در ابزار کنترلی مورد استفاده است. هرچند که در سال‌های اخیر ابزارهای نیمه فعال متنوعی معرفی و به کار برده شدند، اما بی تردید یکی از بهترین این ابزارها میراگرهای MR [۱۳] بوده‌اند.

میراگر MR^۸ وسیله‌ای است که با کمترین میزان صرف انرژی و کمترین نقص نسبت به دیگر ابزارهای نیمه فعال، قادر است مقادیر بزرگ نیروی کنترلی را در سریع‌ترین زمان فراهم کند. در سال‌های اخیر خصوصیات منحصر به فرد این وسیله بطور فزاینده نگاه جامعه مهندسی کنترل را به خود جلب کرده و بیش از پیش بر شهرت عرصه‌ی کنترل نیمه فعال افزوده است. اما رفتار به شدت غیرخطی و هیستریک میراگر MR منجر شده تا بدون داشتن مدلی دقیق که بتواند رفتار پیچیده این وسیله را توصیف کند، استفاده از این وسیله در فرایند کنترل و بهره بردن از ویژگی‌های ممتازش مقدور نباشد. این امر سبب شده که در دو دهه‌ی گذشته مدل‌های مختلف و فراوانی برای بیان رفتار مکانیکی میراگر MR ارایه شود.

این مدل‌ها را میتوان در دو عرصه‌ی محاسبات سخت^۹ و محاسبات نرم^{۱۰}، که بترتیب مدل‌های پارامتری^{۱۱} و مدل‌های بدون پارامتر^{۱۲} را تشکیل میدهند، دسته‌بندی کرد.

عرصه محاسبات سخت را مدل‌های ریاضی خشک^{۱۳} تشکیل میدهند که در دو گروه دینامیکی و شبه استاتیکی قابل بررسی هستند. گروه اول بعضاً برای توضیح دینامیک موجود در فیزیک ابزار از معادلات دیفرانسیل استفاده کرده و ازینرو پارامترهای موجود در این مدل‌ها معنای فیزیکی دارند. معادله‌های موجود در

مهندسی سازه همواره در تلاش برای کاهش خسارات وارد به ساختمان‌ها در مقابل خطرات طبیعی و یا ساختمانی دست بشر هستند. در این بین کنترل سازه زمینه‌ای است که توجه بسیار زیادی را به خود معطوف ساخته است [۱]. بطور کلی، کنترل غیر فعال و کنترل فعال دو انتهای طیف زمینه‌ی کنترل سازه هستند که برای کاهش پاسخ سازه‌ها در مقابل زلزله‌های قوی یا بادهای شدید به کار میروند [۲].

سیستم‌های کنترل غیرفعال^۱ [۳] سیستم‌هایی هستند که عملکردشان بی‌نیاز از منبع انرژی خارجی بوده و برای تولید نیروی کنترلی از حرکت سازه استفاده میکنند. این سیستم‌ها به الگوریتم کنترلی خاصی احتیاج نداشته و در طول تحریک دارای عملکرد ثابتی هستند و به طور گسترده برای کاهش لرزش سازه در مقابل بارهای دینامیکی استفاده شده‌اند. اما همانطور که از نامشان پیداست این سیستم‌های کنترلی درحین اعمال بار دینامیکی هیچ گونه وقف‌پذیری نداشته و محدود به یک بازه‌ی مشخص از قبل طراحی شده‌اند. (حتی بعضی از مهندسیین کنترل، عبارت «کنترل غیرفعال» را بی‌مفهوم دانسته و سازه‌ی مجهز به کنترل غیر فعال را تنها سازه‌ی «دوباره طراحی شده» میدانند [۲].)

در مقابل سیستم‌های کنترل فعال^۲ که اولین بار بطور سازمان‌یافته با کار ممتاز یاو^۴ [۴] پی‌ریزی و بعدها توسط مرجع [۲] بخوبی تشریح شد، با اعمال قانون کنترل دارای وقف‌پذیری کامل برای شرایط متفاوت بار دینامیکی هستند. این سیستم‌ها قابلیت انطباق با شرایط را مدیون الگوریتم کنترلی خود هستند. ولی سیستم‌های کنترل فعال دارای دو ایراد چشمگیرند. اولاً، برای کار نیازمند یک منبع بزرگ انرژی‌اند (چیزی که در حین زلزله تضمینی به دسترسی به آن نیست). ثانیاً، از آنجاکه این سیستم‌ها با اعمال انرژی به سازه، آن را کنترل میکنند، پایداری سازه را کاملاً به نیروی اعمالی وابسته میسازند.

در این میان سیستم‌های کنترل نیمه فعال^۳ که اولین بار در عرصه‌ی کنترل سازه در سال ۱۹۸۳ ارائه شد [۵] و به عنوان نوع مترقی کنترل ظهور کرد، به طور وسیعی مورد توجه قرار گرفت. چراکه این سیستم‌ها از یک طرف وقف‌پذیری سیستم‌های کنترل فعال را دارند و از طرف دیگر قابلیت اعتماد سیستم‌های کنترل غیر فعال را فراهم میکنند. این در حالیست که به منبع انرژی بزرگی نیز وابسته نیستند (شاید در حد یک باطری دوربین) [۶].

باید توجه کرد، پیاده‌سازی سیستم کنترل نیمه فعالی که

این مدل‌ها، به جز با ساده‌سازی‌هایی، اغلب وارون‌پذیر نبوده و محاسبه‌ی دستور کنترلی زمان‌بر است. گروه دوم، مدل‌های شبه استاتیکی هستند که البته به دلیل بهره از روابط ریاضی و پارامترهای فیزیکی در عرصه مدل‌های محاسبات سخت جا دارند. اما تفاوت عمده‌ی یک مدل شبه استاتیکی با هم‌تای دینامیکی‌اش، سادگی در وارون‌پذیری و سرعت در محاسبه دستور کنترلی مدل است، هرچندکه چالش پیش روی این مدل‌ها اغلب دقت پایین آنها در بیان رفتار غیرخطی، هیستریک و دینامیکی ذکر می‌شود.

در مقابل و بر خلاف محاسبات سخت سنتی، محاسبات نرم وجود دارد که برای حل مشکلات در دنیای واقعی که انباشته از اطلاعات نادقیق و ناکافی بوده هدف‌گذاری شده است. از اینرو، اصول راهبردی محاسبات نرم، بهره بردن از قدرت تحمل در مقابل کم‌دقتی‌ها، غیرمنطقی بودن‌ها و واقعیت‌های جزئی و ناقص برای رسیدن به مسیر اصلی و پایداری، با هزینه‌ی کم و انطباق بهتر با واقعیت داشتن است. مدل‌های محاسبات نرم برای توصیف رفتار یک سیستم، بی‌توجه به خصوصیات فیزیکی و روابط سخت و زمان‌بر ریاضی، تنها به داده‌های ورودی - خروجی آزمایشگاهی آن سیستم بسنده می‌کنند و تمام تلاششان به کارگیری روش‌های نرم محاسباتی برای تقلید از آن داده‌هاست. این مدل‌ها اغلب بسادگی، با تغییر ستون داده‌های ورودی - خروجی، وارون‌پذیر بوده و عملکرد بسیار سریعی دارند.

از اینرو، این پژوهش بر آن است که با برگزیدن الگوریتم ژنتیک، به عنوان روشی قدرتمند برای بهینه‌سازی، بصورت واحد برای کلیه مدل‌ها و استفاده از داده‌های ثبت‌های^{۱۷} واقعی زلزله، اقدام به بهینه‌سازی ژنتیکی معروف‌ترین مدل‌های محاسباتی سخت، ساختن دو مدل محاسباتی نرم و ارائه یک مدل شبه استاتیکی وارون‌پذیر مناسب برای فرایند کنترل نماید و شرایطی یکسان برای قیاس را فراهم آورد. در این راستا در ادامه، این مجموعه گام‌های زیر را دنبال می‌کند:

از مشهورترین روش‌های نرم محاسباتی منطق فازی است که اولین بار در سال ۱۹۶۵ توسط یک پروفیسور ایرانی بنام لطفی‌زاده [۱۴] ارائه و بعدها بخوبی توسط یکی از دانشجویانش، جنگ^{۱۴} از دانشگاه برکلی در ۱۹۹۷، با عنوان عصبی - فازی و محاسبات نرم [۱۵] تشریح شد. شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)^{۱۵} [۱۵] و الگوریتم ژنتیک^{۱۶} GA [۱۶] و [۱۷] نیز از دیگر مهمترین این روش‌ها هستند.

- معرفی میراگر MR و بررسی مدل‌های محاسبات سخت و نرم این میراگر که در مقالات سال‌های اخیر ارایه شده است.

- معرفی یک مدل کاربردی از الگوریتم ژنتیک که تا حدی دارای عمومیت به سایر مسائل باشد.

- جمع‌آوری ۱۰ ثبت زلزله‌ی خارجی و داخلی کاملاً متمایز از لحاظ ماهیت و سپس فیلتر کردن آنها توسط نرم‌افزار سائزمو سیگنال^{۱۸} و تولید ولتاژ کنترلی نظیر، توسط راه‌اندازی کنترل‌کننده‌ی یک ساختمان کف - جداسازی شده معیار^{۱۹} مجهز به میراگرهای MR با مقیاس بزرگ [۱۸] و [۱۹].

تا به امروز، مدل‌های ارائه شده برای میراگر MR، هر یک در شرایط خاص و محدود یک پژوهش، تحت روشی از میان تعداد متعدد روش‌های مینم‌سازی تعیین پارامتر شده‌اند. بعلاوه، اکثریت این پژوهش‌ها برای تعیین پارامترهای مدل خود از یک تحریک متناوب و ولتاژ ثابت و تکرار این کار در گام‌های مختلف ولتاژی استفاده می‌کردند. همچنین، تاکنون قیاس مشخصی میان عملکرد مدل‌های محاسباتی سخت و نرم صورت نگرفته است. این موضوعات باعث می‌شود که ارزیابی دقیقی از عملکرد این مدل‌ها در یک شرایط کلی و تحت داده‌های تصادفی زلزله مانند و

- انتخاب پنج مدل محاسبات سخت مشهور برای میراگر MR و تعیین پارامترهای هر مدل با به کارگیری الگوریتم ژنتیک، نه با استفاده از یک تحریک متناوب و منظم و ولتاژ ثابت، بلکه با ثبت زلزله‌ی واقعی و ولتاژ لحظه به لحظه‌ی نظیر که از کنترل نیمه فعال ساختمان معیار مذکور تولید شده است.

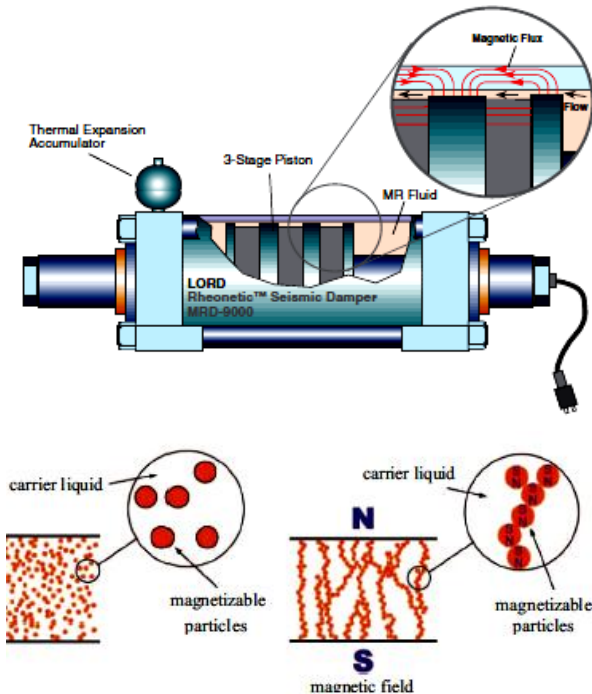
- ساختن دو مدل محاسباتی نرم؛ یک بار با پیاده‌سازی ترکیب منطق فازی و الگوریتم ژنتیک (مدل فازی - ژنتیک) و بار دیگر با پیاده‌سازی ترکیب شبکه عصبی و منطق فازی (مدل عصبی - فازی) برای میراگر MR.

- ارائه‌ی یک مدل شبه استاتیکی از میراگر MR بطوریکه دارای عملکردی مؤثر، وارون‌پذیر و مناسب در فرایند کنترل باشد.

- مقایسه‌ی کلیه‌ی مدل‌ها، زمانیکه در معرض ۱۰ ثبت متمایز زلزله و ولتاژهای تصادفی تولید شده توسط کنترل‌کننده‌ی برنامه‌ی معیار قرار می‌گیرند.

۲- میراگر MR

در طرف دیگر مدل‌های قابل ذکر محاسبات نرم عبارتند از: مرجع [۳۸] بعنوان یکی از اولین کارها در ترکیب منطق فازی و شبکه‌ی عصبی برای میراگر MR؛ مدل‌های شبکه‌ی عصبی [۳۹]؛ بلوک سیاه^{۲۹} [۴۰]؛ ارائه‌ی مدل نامتقارن بوک-ون و بهینه‌سازی ژنتیکی آن [۴۱]؛ کار جالبی که با تهیه و دستکاری یک میراگر هیدرولیک استاندارد به ساخت وسیله‌ی پیشرفته و پیچیده‌ی میراگر MR پرداخت و یک مدل فازی-عصبی برای آن ارائه داد [۴۲]؛ شناسایی آزمایشگاهی میراگر MR توسط مدل فازی-عصبی [۴۳]؛ ترکیب مدل فازی TSK^{۳۰} و الگوریتم ژنتیک [۲۳]؛ و شناسایی مدل میراگر MR متشکل از بوک-ون اصلاحی که در یک وسیله‌ی نقلیه به کار رفت، توسط GA به روش معکوس با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی [۴۴].



شکل (۱): ساختار و رفتار میراگر MR [۳۶] و [۳۷]

صرف‌نظر از اینکه مدل پیشنهادی چه باشد، مرحله‌ی مهم بعد از آن تعیین پارامترهاست. در این میان الگوریتم‌های تکاملی کاربرد وسیعی پیدا کرده‌اند که آن را مدیون مستقل بودن خود از گرادیان یا مشتق مسأله هستند. یکی از قدرتمندترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک است که نیازی به مشتق مسأله‌ی موردنظر ندارد.

۳- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک [۱۶] و [۱۷] که اولین بار توسط هالند^{۳۱} از دانشگاه میشیگان آمریکا در ۱۹۷۵ ارائه شد، یک روش

میراگرهای MR در گروه ابزارهای کنترل نیمه فعال هستند که از مایع قابل کنترل استفاده میکنند [۷]، [۲۰] - [۲۳]. این وسیله از یک سیلندر هیدرولیک تشکیل شده که شامل مایع MR است. این ماده شامل ذرات بسیار ریزی است که قابلیت قطبی شدن دارند و در یک مایع همچون آب، روغن‌های معدنی یا مصنوعی محلول هستند. اغلب در این ماده ۲۰ تا ۴۰ درصد حجم آن آهن کربونیل به نسبت خالص که دارای قطری حدود ۳ تا ۵ میکرون بوده، تشکیل شده‌است. وجود ذرات آهن باعث میشود که پس از اعمال ولتاژ، یک میدان مغناطیسی ساخته شده و ظرف یک میلی ثانیه زنجیری از دانه‌های آهن در مقابل هجوم پیستون به داخل مایع تشکیل شود؛ به عبارت دیگر، در عمل مایع MR طی این زمان کوتاه از یک مایع ویسکوز خطی با جریان آزاد به یک ماده‌ی نیمه جامد^{۳۲} تبدیل میشود. ساختار و رفتار میراگر MR در شکل (۱) آورده شده است. خصوصیت جالب دیگر این مایع، عملکرد تقریباً یکسان آن در بازه‌ی دمایی ۴۰- تا ۱۵۰ درجه‌ی سلسیوس بوده که تاثیر ناچیزی روی نقطه‌ی تسلیم^{۳۱} آن دارد. همچنین مایع MR تنها با ولتاژی در حدود ۱۲ تا ۲۴ ولت، قابل کنترل است (منبع جریان حدود ۱ تا ۲ آمپر را تأمین میکند) [۲۴].

اما میراگر MR در کنار ویژگی‌های شاخص، رفتار بشدت غیرخطی داشته که کاربردش در فرایند کنترل را ملزم به وجود مدلی دقیق و شاید پیچیده میکند. ازینرو در سال‌های اخیر مدل‌های زیادی از آن ارائه شده که در دو عرصه‌ی محاسبات سخت و نرم قابل بررسی هستند.

مدل‌های قابل ذکر محاسبات سخت عبارتند از: مدل بینگهام^{۳۳} و همچنین نوع توسعه یافته‌اش [۲۵]؛ استفاده از مدل هیستریک بوک-ون^{۳۴} [۲۶] در مدلی با عنوان فنامنالاجیکال^{۳۴} [۲۷]؛ مدل‌هایی که از مدل اصطکاک دال^{۳۵} [۲۱] بهره بردند [۲۸]؛ مدل لوگره اصلاحی^{۳۶} [۲۹]؛ مدل هیستریک بی‌ویسکوز^{۳۷} [۳۰]؛ مدل اصلاحی و ارتقا یافته نرمال بوک-ون^{۳۸} برای میراگر MR [۳۱] و [۳۲]؛ مدل غیرخطی میراگرهای MR با لحاظ متغیرهای وابسته‌ی فرکانس، دامنه و جریان تحریک بعنوان ورودی‌ها [۲۲]؛ یک مدل ساده مکانیکی متشکل از یک المان بوک-ون موازی با یک دمپر ویسکوز [۳۳]؛ مدل دینامیکی میراگر MR با مقیاس بزرگ که دینامیک مایع را نیز لحاظ کرد [۳۴]؛ و مدل تشخیص منحنی با استفاده از چندجمله‌ای‌ها [۲۰]، [۳۵].

تنظیم عملگرهای GA میشود. ولی باید توجه داشت که هر یک از عملگرها مستقل نبوده و با عملگرهای دیگر در ارتباطند [۴۵]. به همین علت در این پژوهش سعی شده علاوه بر مروری بر نحوه‌ی عملکرد GA، تعیین مشخصات به گونه‌ای که مؤثرتر باشند نیز بررسی شود. عبارت دیگر اولاً، از سرگردانی، تکرارهای طولانی و اتکا به حوادث کاسته شده؛ ثانیاً، الگوریتم در یک قالب ساده، کاربردی و قابل تعمیم به دیگر مسائل قابل استفاده است. نتیجه اینکه با یک یا دو بار راه اندازی هدف‌دار و بدون آزمون و خطا، ممکن است بهترین جواب‌ها به دست آیند.

۳-۱- اندازه جمعیت^{۴۰} (N)

اندازه‌ی جمعیت متغیری حیاتی در نحوه‌ی عملکرد الگوریتم است. این متغیر باید طوری باشد تا قابلیت پوشش فضای بزرگی از مقادیر فراهم آید. مرجع [۴۵] در مطالعه‌ی خود از روش دریافت ژنتیک^{۴۱} برای تعیین اندازه‌ی جمعیت استفاده کرد و نشان داد که این روش از بسیاری از روشهای موجود و اغلب پیچیده [۴۶] عملکرد بسیار بهتری دارد. حسن این روش به ساده بودن آن است و تنها کفایت تعداد دفعات ارزیابی (FE) تابع هدف (تابعی که قرار است بهینه شود) در کل روند GA مشخص شود. رابطه‌ی مذکور عبارت است از:

$$\frac{FE}{N} \log\left(1 - \frac{1}{N}\right) = -M - \log \sqrt{\frac{L}{12}} \quad (1)$$

اگر L پارامتر مجهول در تابع هدف باشد، آنگاه پیشنهاد میشود $[FE = [L \times 10^2, L \times 10^4]]$ (این بازه برای $L < 20$ مناسب و در غیراینصورت قابل افزایش است). در این رابطه M توان منفی آرگومان داخل لگاریتم یا همان مقدار بهینه‌ی خطاست. بدیهی است بهترین مقدار خطا صفر بوده، ولی از آنجا که $\log(0)$ تعریف نشده است، عدد کوچکی همچون $M=3$ مناسب است.

۳-۲- عملگر نخبه

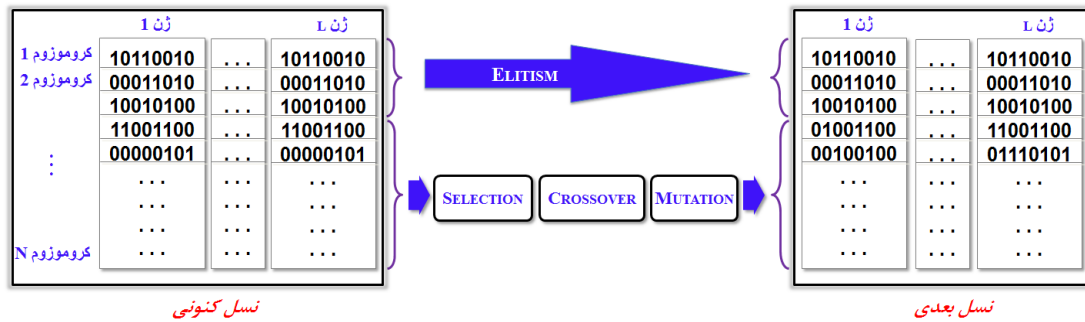
این عملگر منجر به حفظ بهترین جواب هر نسل و انتقال بدون تغییرش به نسل بعد میشود. هر چند که مقدار زیاد آن GA را دچار رکود میکند. اغلب در کارها مقدار ۲ مناسب است.

احتمالاتی و تصادفی بهینه‌سازی مستقل از مشتق است. این روش بطور کلی ۴ عملگر اساسی بر پایه‌ی فرایند زندگی طبیعی انسان‌ها را شامل میشود؛ انتخاب دو انسان برای ازدواج (عملگر انتخاب^{۴۲})؛ تولید فرزندی که ژن‌های والدین^{۴۳} را به ارث می‌برد (عملگر پیوند^{۴۴})؛ رخ دادن یک جهش ژنتیکی که تفاوتی چشمگیر میان فرزند و والدین ایجاد میکند (عملگر جهش^{۴۵})؛ و انتقال بدون تغییر ژن‌های ممتاز به نسل بعد (عملگر نخبه^{۴۶}).

روش کار GA به این صورت است که ابتدا، یک جمعیت اولیه که حاوی تعداد معینی کروموزوم (بسته به مسأله‌ی موردنظر) است را بطور تصادفی حدس می‌زنند. هر کروموزوم خود دارای تعدادی ژن است (در هر مسأله به تعداد پارامترهای مجهول مسأله ژن داریم). سپس، الگوریتم با جاگذاری هر کروموزوم در تابع هدف^{۴۷}، مقدار برازندگی^{۴۸} آن کروموزوم را بدست می‌آورد. و در نهایت، الگوریتم با ارزیابی کلیه‌ی مقادیر برازندگی به ازای کروموزوم‌های حاضر در جمعیت اول یا نسل^{۴۹} اول، اقدام به ساختن نسل دوم، سوم و غیره میکند که مطمئناً دارای خصوصیات بهتری هستند. در این مرحله است که GA برای تولید نسلی بهتر از چهار عملگر مذکور خود بهره میبرد. این فرایند تا تعداد معینی نسل (بسته به شرایط مسأله باید تعیین شود) ادامه میابد تا در پایان کار الگوریتم، بهترین نسل که حاوی بهترین کروموزوم که به نوبه‌ی خود دارای بهترین ژن‌ها (مقادیر واقعی پارامترها) است، بدست آید.

لازم به ذکر است GA در نوع قدیمی خود به جای ژن‌هایی با مقادیر واقعی از ژن‌هایی با مقادیر باینری (صفر و یکی) استفاده میکرد که نسبت به حالت کنونی دارای عملکرد ضعیف‌تری بود. مکانیزم تولید نسل بهتر توسط GA در شکل (۲) نشان داده شده است. این شکل مسئله‌ای با L متغیر و اندازه جمعیت N را نشان میدهد که قرار است این فرایند تا $g_{converge}$ نسل ادامه پیدا کند (توضیح اینکه برای درک بهتر عملگرهای GA بصورت گرافیکی، نوع باینری نمایش داده شده است؛ بدیهی است این مفاهیم در GA با مقادیر واقعی نیز صادق هستند).

نکته‌ی مهم اینکه تنظیمات مراحل فوق در GA عموماً وابسته به هر مسأله‌ی خاص است و قانون کلی برای تنظیم این مراحل وجود ندارد. ازینرو اغلب توسط آزمون و خطا اقدام به



شکل (۲): فرایند تولید نسل بعد در الگوریتم ژنتیک

۳-۳- عملگر انتخاب

این عملگر با جایگزینی کروموزوم‌های بدتر با بهتر از انحراف مقدار بهینه‌ی تابع هدف می‌کاهد. در اینجا از روش احتمال یکنواخت^{۴۴} برای این عملگر استفاده شده است. این عملگر در میان جمعیت به دنبال تعیین والدین است (یک کروموزوم میتواند چند بار نیز انتخاب شود).

۳-۴- عملگر پیوند

پس از تعیین والدین، این عملگر آنها را به روش تنظیم شده با هم می‌آمیزد تا کروموزوم فرزند تولید شود. در اینجا از روش پراکنده^{۴۵} استفاده میشود. این روش ابتدا یک بردار باینری تصادفی حدس میزند؛ بعد ژن‌های نظیر درایه‌ی یک از کروموزوم اول $parent1$ و ژن‌های نظیر درایه‌ی صفر از کروموزوم دوم $parent2$ انتخاب میشوند. مثلا اگر بردار باینری حدسی $parent1 = [a,b,c,d,e,f,g,h]$ باشد و $parent2 = [1,2,3,4,5,6,7,8]$ باشد، آنگاه کروموزوم تولید شده $[1,2,c,d,5,f,g,h]$ است.

در ضمن ۸۰ درصد جمعیت (غیر از تعداد نخبه) تحت تاثیر عملگر پیوند و باقی تحت عملگر جهش قرار داده شدند. بعبارت دیگر کسر عملگر پیوند^{۴۶} برابر 0.8 لحاظ شد. اهمیت این پارامتر از آنجاست که مقادیر بزرگش باعث بازتولیدهای فراوان در جمعیت و مانع جستجوی فضاهای دیگر و مقادیر کوچک آن باعث عدم استفاده از ترکیب کروموزوم‌های با کیفیت میشود. اغلب مقدار 0.8 برای آن مناسب است. هرچند گاهی (مثل شروع الگوریتم با مقادیر اولیه و یا ادامه‌ی مسئله‌ای از آخرین راه‌اندازی قبلی) مقادیر کمتر کسر عملگر پیوند میتواند کمک شایانی باشد چراکه جستجوی بیشتر فضاهای جدید را همراه می‌آورد (حالت عکس نیز میتواند درست باشد).

۳-۵- عملگر جهش

این عملگر مهم با تغییر ناگهانی و تصادفی یک یا چند ژن از یک یا چند کروموزوم، فضای وسیعی از اعداد را پوشش میدهد، مانع گیر افتادن GA در تله‌های کمینه^{۴۷} موضعی و باعث حفظ پراکندگی^{۴۸} در جمعیت میشود. در اینجا از روش گاوسین^{۴۹} با $scale=1$ و $shrink=1$ استفاده شده است.

این روش دو مرحله‌ای است که در آن یک عدد تصادفی که از یک توزیع گاوسین با میانگین صفر می‌آید، به ژن‌های کروموزوم والدین اضافه میشود. یعنی اگر v بردار بازه‌ی اولیه‌ی^{۴۸} تخمین باشد، آنگاه انحراف اولیه و انحراف k ام به ترتیب از رابطه‌های زیر بدست می‌آیند:

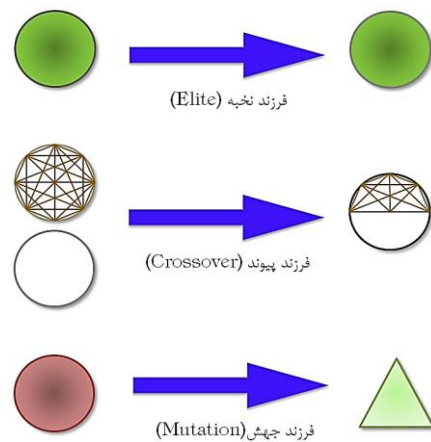
$$scale \times (v(2) - v(1)) = var$$

$$var_k = var_{k-1} \left(1 - shrink \times \frac{k}{Generation}\right) \quad (2)$$

که در آن $scale$ انحراف استاندارد در نسل اول را و $shrink$ چگونگی منقبض شدن پارامتر $scale$ حین پیشروی نسل‌ها را کنترل میکند. یعنی در ابتدا، پراکندگی بیشترین مقدار اولیه‌اش را داراست و در نهایت به $(1 - shrink)$ برابر خود میرسد. در ضمن فرمول‌های بالا برای زمانبست که بردار اولیه با اندازه‌ی $[2 \times 1]$ باشد (یک متغیر var) داشته باشیم. در غیر اینصورت یک اندیس i به فرمول‌ها اضافه میشود (یعنی $var_{(i,k)}$ و $scale(v(i,1), \dots)$ بوجود می‌آیند).

مورد آخر اینکه اغلب افزایش نسل را ابزاری برای بالا بردن دقت جواب میدانند؛ اما باید توجه کرد که اگر از تابع پرکاربردی چون گاوسین برای عملگر جهش استفاده شود، افزایش بی‌رویه‌ی نسل احتمالا به جواب‌های بدتر بیانجامد؛ چراکه تابع گاوسین میانگین مقدار جهش هر نسل را با ضربی که به تعداد نسل‌ها بستگی دارد کاهش میدهد و این به تبع خود کاهش پراکندگی و

جستجوی فضاهای دیگر را دنبال دارد. در شکل (۳) عملگرهای GA نمایش داده شده‌اند.



شکل (۳): عملگرهای الگوریتم ژنتیک

۳-۶- تابع هدف

نوشتن تابع هدفی مناسب در GA برای رسیدن به جوابی خوب حائز اهمیت است. در این پژوهش با الهام از روش تخمین‌زنده‌ی حداقل مربعات LSE^{۴۹}، نرم خطا بین نیروی تولیدی توسط مدل F_i و نیروی مطلوب تولیدی در آزمایشگاه مجازی F_{di} ، برای i امین ورودی به عنوان تابع هدف لحاظ شد:

$$error = \sqrt{\sum_i (F_i - F_{di})^2} \quad (۳)$$

۳-۷- معیار پایان الگوریتم

در این پژوهش تعداد معین نسل را معیار پایان کار GA قرار می‌دهیم. بسادگی با داشتن تعداد دفعات ارزیابی تابع از (۱) و اندازه جمعیت، حداکثر این تعداد نسل بدست می‌آید:

$$g_{converge} = \frac{FE}{N} \quad (۴)$$

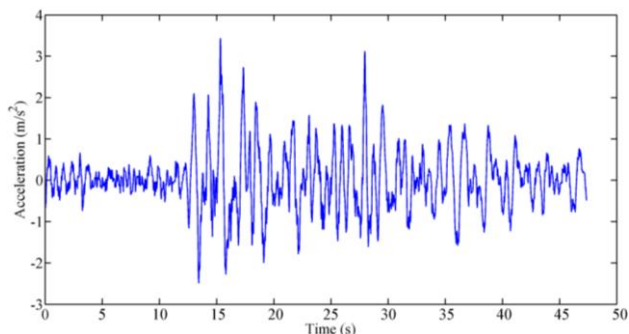
۴- جمع‌آوری و فیلتر ۱۰ ثبت زلزله برای تولید داده

در این پژوهش بعد از بهینه‌سازی، برای بررسی کفایت مدل‌ها در شرایط واقعی از ۱۰ زلزله با ماهیت کاملاً متمایز استفاده می‌شود. این ثبت‌ها متعلق به ایستگاه‌های شتاب نگاشت مختلف هستند: نیوهال^{۵۰}، رینالدی^{۵۱}، السنترو^{۵۲} و سیلمار^{۵۳} در آمریکا؛ جی‌جی^{۵۴} و کوبه^{۵۵} در ژاپن؛ ارزینکان^{۵۶} در ترکیه؛ و کرمان، نهاوند و ضیاءآباد در ایران. بعلاوه از آنجا که ثبت‌ها شامل

دو امتداد افقی موازی با و عمود بر گسل هستند، در عمل ۲۰ ثبت متمایز برای مقایسه ایجاد می‌شود.

گفتنی است داده‌های شتاب نگاشت در لحظه‌ی اول خام هستند. در اینجا برای استفاده از آنها تصحیحاتی شامل تصحیح محور پایه‌ی شتاب صفر، گرفتن اغتشاشات محیطی و خارج کردن فرکانس‌های بیش از ۲۵ هرتز روی آنها انجام شده است. این عملیات توسط نرم افزار سائزمو سیگنال صورت گرفت. برای نمونه ثبت زلزله نهاوند پس از اعمال تصحیحات مذکور در شکل (۴) آورده شده است.

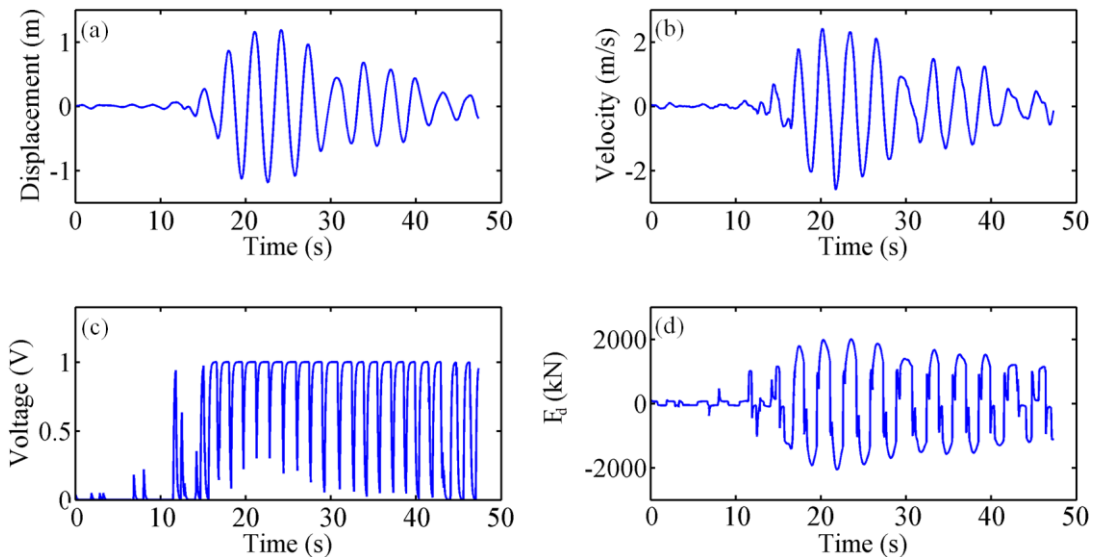
در این پژوهش پس از بررسی کلیه ثبت‌ها، از ثبت زلزله نهاوند و داده‌های حاصل از آن برای بهینه‌سازی مدل‌ها استفاده می‌شود. برای تولید این داده‌ها که شامل تغییر مکان، سرعت، نیرو و ولتاژ کنترلی میراگر MR در حین زلزله هستند، از کنترل نیمه فعال یک ساختمان معیار کف-جداسازی شده‌ی مجهز به میراگرهای MR با مقیاس بزرگ که توسط انجمن مهندسی عمران آمریکا (ASCE)^{۵۷} ارائه شد [۱۸]، [۱۹] استفاده می‌شود. در تولید ولتاژ کنترلی الگوریتم بهینه‌ی قیچی شده [۷] بکار رفت. در شکل (۵) داده‌های تولیدی برای یکی از میراگرهای MR موجود در کف ساختمان معیار آورده شده است. در ادامه در بخش ساختن مدل‌های محاسباتی نرم نیز از همین داده‌ها برای آموزش ساختار مدل‌ها استفاده خواهد شد.



شکل (۴): ثبت زلزله‌ی نهاوند پس از اعمال تصحیحات در محدوده‌ی فرکانسی [۰.۱، ۲۵] هرتز

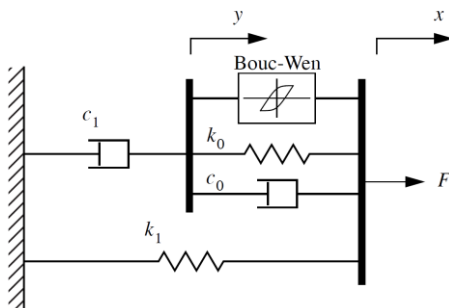
۵- انتخاب مدل‌های محاسبات سخت

در این بخش پنج مدل معروف محاسبات سخت سال‌های اخیر معرفی و پارامترهای هر یک توسط GA، نه با استفاده از یک تحریک متناوب و منظم و ولتاژ ثابت، بلکه با زلزله‌ی واقعی و ولتاژ لحظه‌ای نظیر تولید شده در بخش پیش تعیین می‌شوند.



شکل (۵): (a) تغییر مکان، (b) سرعت، (c) ولتاژ کنترلی و (d) نیروی تولید شده در یک میراگر MR در ساختمان معیار تحت زلزله نهانند امتداد X

چراکه میتواند آنرا بسیار کند گرداند یا آنکه به مقدار قابل توجهی بر سرعت همگرایی بیفزاید. از آنجاکه کلیه پارامترها در پژوهش اصلی مثبت هستند، پیشنهاد میشود در چنین مواقعی پارامترها به صورت لگاریتمی به GA معرفی شوند که عملکرد بهتری از حالت استفاده از ضرائب و سپس مقید کردن آنها دارد. پس از تنها یک بار راه اندازی GA مقادیر پارامترها به قرار جدول (۱) هستند.



شکل (۶): مدل مکانیکی برای میراگر MR [۲۷]

۵-۲- مدل بوک-ون نرمال

مدل اصلی بوک-ون در سال ۱۹۷۶ توسط ون ارائه شد [۲۶]:

$$F = kx(t) + (1 - \alpha)Dkz(t),$$

$$\dot{z} = D^{-1}(A\dot{x} - \beta|\dot{x}|z^{n-1}z - \gamma\dot{x}|z|^n),$$

$$n > 1, \quad 0 < \alpha < 1, \quad k > 0, \quad D > 0. \quad (7)$$

مطابق مرجع [۴۷]، اگر مقدار بیشینه z^* عبارت $z_0 = n\sqrt{\frac{A}{\beta + \gamma}}$

باشد، آنگاه نوع نرمال بوک-ون با معرفی $w = \frac{z(t)}{z_0}$ عبارت است

۵-۱- مدل فنا منالاجیکال

در سال ۱۹۹۷ اسپنسر و همکاران^{۵۸} ویرایشی از مدل بوک-ون را ارائه کردند [۲۷]. این مدل از معروفترین مدل‌های میراگر MR بوده و بطور گسترده در دو عرصه‌ی شناسایی و کنترل به کار رفته است. ساختار مکانیکی این مدل در شکل (۶) نشان داده شده که عبارت است از:

$$F = c_1(u)\dot{y} + k_1(x - x_0),$$

$$\dot{z} = -\gamma|\dot{x} - \dot{y}|z|z|^{n-1} - \beta(\dot{x} - \dot{y})|z|^n + A(\dot{x} - \dot{y}),$$

$$\dot{y} = \frac{1}{c_0(u) + c_1(u)}\{\alpha(u)z + c_0(u)\dot{x} + k_0(x - y)\},$$

$$\dot{u} = -\eta(u - v), \quad \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u,$$

$$c_1(u) = c_{1a} + c_{1b}u, \quad c_0(u) = c_{0a} + c_{0b}u. \quad (8)$$

که در آن F نیروی میراگر، z جمله هیسترسیز بوک-ون، v ولتاژ و u تابعی برای در نظر گرفتن دینامیک مایع MR برای رسیدن به تعادل بعد از اعمال ولتاژ هستند. همانطور که مشاهده میشود، مدل شامل ۱۴ پارامتر بوده که تعدادی وابسته به ولتاژ و تعدادی نیز ثابت هستند. پارامترهای این مدل در پژوهش اصلی با الگوریتم SQP^{۵۹} تعیین شدند. در اینجا برای تعیین این پارامترها از الگوریتم ژنتیک استفاده میشود. بر اساس بخش‌های پیشین داریم:

$$FE = 14 \times 10^4$$

$$\Rightarrow N = 140 \Rightarrow g_{converge} = \frac{14 \times 10^4}{140} = 1000 \quad (9)$$

گفتنی است نحوه معرفی پارامترها به GA حائز اهمیت است؛

از:

$$\begin{aligned} F(t) &= k_x(i)\dot{x}(t) + k_w(i)w(t), \\ \dot{w}(t) &= \rho(i)(\dot{x}(t) - |\dot{x}(t)||w(t)|), \\ k_x(i) &= k_{xa}i + k_{xb}, \quad k_w(i) = k_{wa}i^2 + k_{wb}i + k_{wc}, \\ \rho(i) &= \rho_a i^2 + \rho_b i + \rho_c. \end{aligned} \quad (10)$$

توسط GA با $FE = 8 \times 10^4, N = 110, g_{converge} = 727$ مقادیر ۸ پارامتر مجهول محاسبه و در جدول (۳) خلاصه شده‌اند.

۴-۵- مدل لوگره اصلاحی

مرجع [۲۹] از مدل اصلاحی اصطکاک لوگره استفاده کرد:

$$\begin{aligned} F(t) &= \frac{\beta(i)}{\alpha} y + \gamma(i)\dot{x} + \delta\dot{x} + \frac{\varepsilon}{\alpha} \dot{y} + f_0, \\ \dot{y} &= \alpha(\dot{x} - |\dot{x}|y), \\ \beta(i) &= \alpha(q_1 i + q_2), \quad \gamma(i) = p_1 i^2 + p_2 i + p_3, \\ \rho(i) &= \rho_a i^2 + \rho_b i + \rho_c. \end{aligned} \quad (11)$$

توسط GA با $FE = 8 \times 10^4, N = 110, g_{converge} = 727$ مقادیر ۸ پارامتر مجهول محاسبه و در جدول (۴) خلاصه شده‌اند.

۵-۵- مدل بوک-ون نرمال اصلاحی

مرجع [۳۲] با افزودن جمله سختی به مدل نرمال بوک-ون بنحو چشمگیری عملکرد مدل را بهبود بخشید که عبارت است از:

$$\begin{aligned} F(t) &= k_x(v)x(t) + k_x(v)\dot{x}(t) + k_w(v)w(t), \\ \dot{w}(t) &= \rho(i)(\dot{x}(t) - \sigma|\dot{x}(t)||w(t)|^{n-1}w(t) + (\sigma-1) \\ &\quad \cdot \dot{x}(t)|w(t)|^n), \\ k_x(v) &= k_{xa} + k_{xb}v, \quad n(v) = n_a + n_b \exp(-13v), \\ \rho(v) &= \rho_a + \rho_b \exp(-14v), \quad \sigma(v) = \sigma_a + \sigma_b \exp(-14v) \\ k_w &= \begin{cases} k_{w1} + k_{w1}v^{1.15}, & v \leq 0.3 \\ k_{w3} + k_{w4} \sin\left(\frac{\pi(v-0.3)}{0.8}\right) \\ \quad + k_{w5} \sin\left(\frac{3\pi(v-0.3)}{0.8}\right), & 0.3 \leq v \leq 0.7 \\ k_{w6} + k_{w7}v + k_{w8}v^3 + k_{w9}v^5, & v \leq 0.7 \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

توسط GA با $FE = 18 \times 10^4, N = 160, g_{converge} = 1125$ مقادیر ۱۸ پارامتر مجهول محاسبه و در جدول (۵) خلاصه شده‌اند.

$$\begin{aligned} F(t) &= k_x x(t) + k_w w(t), \\ \dot{w}(t) &= \rho(\dot{x} - \sigma|\dot{x}(t)||w(t)|^{n-1}w(t) + (\sigma-1) \\ &\quad \cdot |\dot{x}(t)||w(t)|^n), \\ k_x &= \alpha k > 0, \quad k_w = (1-\alpha)Dkz_0 > 0, \\ \sigma &= \frac{\beta}{\beta+\gamma} \geq 0, \quad \rho = \frac{A}{Dz_0}. \end{aligned} \quad (8)$$

در نتیجه مقدار $w(t)$ در بازه‌ی $[-1, 1]$ قرار گرفته و همچنین تعداد پارامترها از ۷ به ۵ کاهش می‌یابند. جالب اینکه رفتار مدل نرمال عینا همانند مدل اصل است. مرجع [۴۷] نشان داد که رفتار مدل میراگر MR، به طور مستقل به این ۵ پارامتر وابسته بوده و نه به ۷ پارامتر در مدل اصلی. مرجع [۳۱] از مدل مذکور (البته با جاگذاری \dot{x} بجای x) برای میراگر MR به صورت زیر استفاده کرد:

$$\begin{aligned} F(t) &= k_x(i)|\dot{x}(t)| + k_w(i)w(t), \\ \dot{w}(t) &= \rho(i)(\dot{x} - \sigma|\dot{x}(t)||w(t)|^{n-1}w(t) + (\sigma-1) \\ &\quad \cdot \dot{x}(t)|w(t)|^n), \\ k_x(i) &= k_{xa}i + k_{xb}, \quad k_w(i) = k_{wa}i^2 + k_{wb}i + k_{wc}, \\ \rho(i) &= \rho_a i^2 + \rho_b i + \rho_c. \end{aligned} \quad (9)$$

توسط GA با $FE = 10^5, N = 120, g_{converge} = 833$ مقادیر ۱۰ پارامتر مجهول محاسبه و در جدول (۲) خلاصه شده‌اند.

گفتنی است در اینجا پارامترها توسط ضرائب و بدون قید به GA معرفی شدند؛ چراکه علامت مثلا ρ_a نامعلوم است. بعلاوه، مشاهده شد که سرعت همگرایی GA در بهینه‌سازی مدل نرمال بسیار بیشتر از مدل اصلی است. در ضمن در اینجا بر خلاف پژوهش اصلی، بجای جریان از ولتاژ استفاده شد که اتفاقا عملکرد مدل را بهبود بخشید.

۳-۵- مدل دال اصلاحی

مدل اصطکاک دال [۲۱] همان مدل بوک-ون بوده با این تفاوت که در آن $\sigma = 1, n = 1$ هستند. از اینرو یک معادله دیفرانسیل خطی تولید میشود که تاثیر چشمگیری در کاهش زمان بهینه‌سازی دارد. مرجع [۲۸] به صورت زیر از این مدل استفاده کرد:

۶- ساخت دو مدل محاسبات نرم میراگر MR

در این بخش اقدام به ساختن دو مدل محاسباتی نرم میشود: مدلی بر اساس ترکیب منطق فازی و الگوریتم ژنتیک با عنوان مدل فازی- ژنتیک و مدلی دیگر بر اساس ترکیب شبکه عصبی و منطق فازی با عنوان مدل عصبی- فازی. در این راستا با اعمال ثبت‌های زلزله‌ی نه‌اوند و همچنین زلزله‌ی نیوهال به ساختمان معیار، چهار ستون داده‌ی آزمایشگاهی شامل تغییرمکان، سرعت، ولتاژ و نیروی میراگر MR تولید میشود. سه ستون اول معرف

ورودی و ستون چهارم معرف خروجی هستند. داده‌های زلزله‌ی نه‌اوند با شتاب اوج زمین (PGA)^{۶۱} برابر 0.35 m/s^2 به عنوان داده‌های آموزشی^{۶۲} و داده‌های زلزله‌ی از پیش تعریف شده‌ی نیوهال به عنوان داده‌های چک^{۶۳} استفاده میشوند. در نتیجه ترتیبی فراهم میشود مدلی که با یک زلزله‌ی ایرانی آموزش میبیند، توسط یک ثبت معیار خارجی تایید خواهد شد. در ادامه مراحل ساخت دو مدل مذکور به اختصار شرح داده میشود.

جدول (۱): مقادیر پارامترهای مدل فنمانالاجیکال

$\log(\cdot)$	γ	n	β	A	c_{0a}	c_{0b}	c_{1a}	c_{1b}	k_0	k_1	α_a	α_b	η	x_0
	۲/۵۷	۰/۰۰۱	-۱/۳۹	۲/۳۳	۲/۴۹	-۰/۳۷	۲/۳۹	۵/۰۵	۲/۱۰	-۱/۷۷	۲/۲۴	۲/۲۹	۵/۱۷	۲/۰۲

جدول (۲): مقادیر پارامترهای مدل بوک- ون نرمال

k_{xa}	k_{xb}	k_{wa}	k_{wb}	k_{wc}	ρ_a	ρ_b	ρ_c	σ	n
۳۸۸/۷۴	۲۵/۳۲	-۱۰۵۸/۵۶	۲۱۰۶/۳۴	۵۹/۰۴	-۸۴۸/۷۶	۲۴۳/۶۶	۸۷۷/۷۲	۸/۳۴	۱/۰۸

جدول (۳): مقادیر پارامترهای مدل دال اصلاحی

k_{xa}	k_{xb}	k_{wa}	k_{wb}	k_{wc}	ρ_a	ρ_b	ρ_c
۳۰۸/۱۲	۶۰/۰۸	-۹۲۹/۰۹	۲۰۰۵/۳۵	۵۵/۰۲	-۶۷۸/۵۶	-۳۳/۱۲	۱۰۱۷/۰۴

جدول (۴): مقادیر پارامترهای مدل لوگره اصلاحی

q_1	q_2	p_1	p_2	p_3	α	δ	ε
۱۰۷۵/۷۳	۶۱/۶۳	-۱۹۵۴/۶۸	۲۱۶۹/۸۶	۶۵/۳۲	۵۳۰/۵۵	۲۵۶/۳۲	۴۰۴۹/۸۳

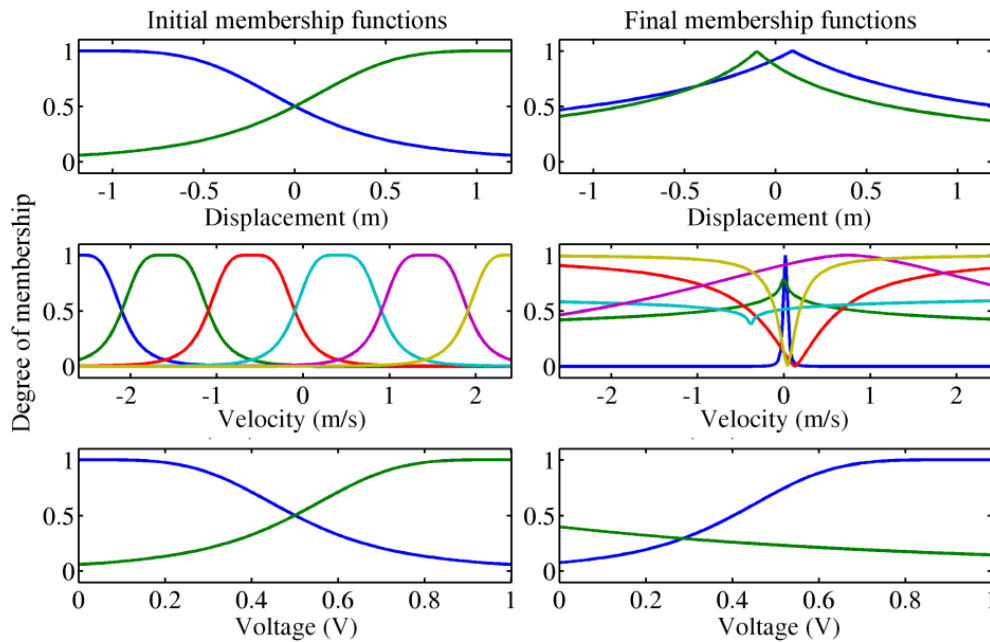
جدول (۵): مقادیر پارامترهای مدل بوک- ون نرمال اصلاحی

k_x	k_{xa}	k_{xb}	k_{w1}	k_{w2}	k_{w3}	k_{w4}	k_{w5}	k_{w6}
۲۰۰/۲۶	۷۱/۴۳	۳۱۳/۱۲	۵۷/۳۹	۲۳۸۶/۹۵	-۷۶۵/۵۴	۳۹۰/۴۳	-۱۹۹/۹۶	۶۰۷/۶۴
k_{w7}	k_{w8}	k_{w9}	ρ_a	ρ_b	σ_a	σ_b	n_a	n_b
۵۵۴/۲۸	-۹۵/۷۱	-۹/۶۵	۱۰۲۱/۰۱	۱۳۶/۹۴	۴/۲۰	۵۰/۸۶	۰/۴۱	۰/۶۰

۶-۱- مدل فازی-ژنتیک

خروجی‌ها با مشارکت GA و الگوریتم خطی LSE تعیین میشوند. در اینجا پس از مرحله‌ی اول، $MFs = [2 \ 6 \ 2]$ به عنوان توابع عضویت تغییر مکان‌ها، سرعت‌ها و ولتاژها بدست می‌آیند و پس از مرحله‌ی دوم، مقادیر ۳۰ پارامتر غیرخطی در قسمت مقدمه و ۹۶ پارامتر خطی در قسمت نتیجه‌ی مدل فازی TSK محاسبه میشوند. توابع عضویت، پیش و پس از آموزش توسط الگوریتم ژنتیک، در شکل (۷) آورده شده است.

برای ساخت این مدل از رویکرد پیشنهادی نویسندگان این پژوهش [۴۸] استفاده میشود. این رویکرد متشکل از دو مرحله است. در مرحله‌ی اول با بکارگیری الگوریتم ژنتیک، تعداد توابع عضویت (MFs)^{۶۶} مدل فازی TSK که از نوع زنگوله‌ای^{۶۵} هستند برای هر کدام از ورودی‌ها مشخص میشوند؛ سپس در مرحله‌ی دوم مقادیر پارامترهای کلیدی توابع عضویت ورودی‌ها و



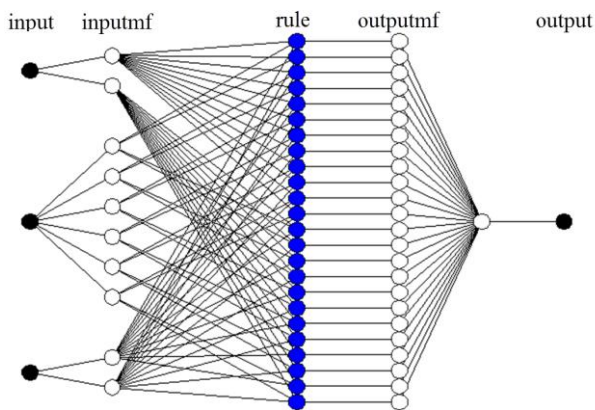
شکل (۷): توابع عضویت مدل فازی-ژنتیک میراگر MR در [۴۸] پیش (چپ) و پس (راست) از آموزش توسط الگوریتم ژنتیک

الگوریتمی بر پایه‌ی مشتق است محاسبه میشوند.

۶-۲- مدل عصبی-فازی

برای ساخت مدل فازی-عصبی، از معروفترین ساختار ارائه شده در این زمینه با عنوان سیستم استنتاجی عصبی-فازی وقف پذیر، یا اصطلاحاً ANFIS^{۶۶} که در ۱۹۹۳ توسط جنگ [۴۹] عرضه شد، استفاده میشود. در ANFIS هیچ روشی برای تعیین توابع عضویت پیشنهاد نشده است؛ از اینرو همان آرایش توابع عضویت مدل پیشین لحاظ میشود تا مدل‌ها نسبت بهم بدون برتری باشند. این ساختار در شکل (۸) آورده شده است.

برای انجام عملیات آموزش ANFIS تعداد دوره‌های رفت و برگشت یا اصطلاحاً اپاک^{۶۷} عدد بزرگی مثل ۱۰۰۰ فرض میشود. توضیح اینکه در هر دور رفت ANFIS، پارامترهای توابع عضویت غیرخطی مقدمه، ثابت و پارامترهای خطی توابع عضویت خروجی توسط LSE تعیین میشوند. سپس در برگشت، پارامترهای توابع عضویت خروجی، ثابت و پارامترهای توابع عضویت مقدمه توسط الگوریتم یادگیری پس انتشار^{۶۸} که



شکل (۸): مدل عصبی-فازی ساخته شده برای میراگر MR

۷- مدل شبه استاتیکی ارائه شده

همانطور که پیشتر گفته شد، پیچیدگی مدل‌های دینامیکی ناشی از معادله دیفرانسیل آنها است (یعنی رفتار یک لحظه بعد با داده‌ها و محاسبات لحظه‌ی کنونی تعیین میشود)؛ این موضوع

مدل وارون میگردند تا دستور کنترلی که ولتاژ مورد نیاز میراگرهای MR در یک لحظه بعد است محاسبه شوند. حال در مدل‌های دینامیکی حاوی معادل دیفرانسیل تهیه این مدل وارون بسیار دشوار است. نتیجه اینکه مدل شبه استاتیکی ارائه شده به سهولت وارون پذیر بوده و بصورت زیر قابل ارائه است:

$$v = \frac{[\ln(\frac{F(t) - k_x(v)\dot{x}(t) - k_x x(t)}{a(v) \cdot \text{sign}(\dot{x}(t))}) + c(v)]}{b} \quad (14)$$

توسط GA و تنظیمات ساده‌ی $N = 20$, $g_{converge} = 100$ مقادیر ۸ پارامتر مجهول محاسبه و در جدول (۶) خلاصه شده‌اند.

۸- مقایسه مدل‌ها

در این بخش ابتدا برای نمایش عملکرد GA در بهینه‌سازی از مدل فنمانالاجیکال و یک تحریک سینوسی با دامنه 3 cm فرکانس $\frac{\pi}{2} \text{ rad/sec}$ و ولتاژ ثابت صفر استفاده میکنیم. شکل (۹) تطبیق بی چون و چرا با داده‌ی آزمایشگاهی برنامه معیار را نمایان میکند (هرچند همانطور که در ادامه مشاهده خواهد شد، همین مدل برای داده‌های تصادفی و غیر متناوب حاصل از اعمال ثبت زلزله به برنامه معیار با ولتاژ کنترلی، عملکرد ضعیفی دارد).

جدول (۶): مقادیر پارامترهای مدل شبه استاتیکی ارائه شده

a_1	a_2	b	c_1	c_2	k_{x1}	k_{x2}	k_x
۲۷/۵۴	۱۱۹۳/۸۹	۰/۳۴	-۰/۵۲	۱/۰۳	۱۰۹/۸۲	۲۸۸/۰۹	۲۴۶/۳۶

تحت تمامی زلزله‌های امتداد X را نشان میدهد. همچنین در شکل (۱۱) میانگین خطای نرم-۱ برای تمامی مدل‌ها تحت ۱۰ زلزله و ولتاژ متغیر در ایستگاه‌های شتاب نگاشت مختلف امتداد X آورده شده است.

۹- بحث توجیهی

همانطور که از این نمودارها بر می‌آید، مدل محاسباتی سخت مدل بوک-ون نرمال اصلاحی و مدل محاسباتی نرم فازی-ژنتیک دارای بهترین عملکرد هستند. در مورد مدل فنمانالاجیکال باید گفت که با وجود شهرتش، این مدل نمیتواند نماینده‌ی جامع و دقیقی برای یک میراگر MR با مقیاس بزرگ باشد. مدل دال اصلاحی و لوگره اصلاحی، که هر دو دارای هشت پارامتر بودند، عملکرد متوسطی را نشان میدهند. هرچند که مدل

از دو جنبه مدل را دچار ضعف میکند؛ از یک طرف بهینه‌سازی مدل زمانبر است و از طرف دیگر مدل‌ها برای استفاده در زمان واقعی در یک کنترل‌کننده‌ی سازه که نیازمند مدل وارون است، مناسب نیستند. از همین رو در این پژوهش یک مدل شبه استاتیکی ارائه میشود که عبارت است از:

$$F(t) = a(v) \exp(bv - c(v)) \cdot \text{sign}(\dot{x}(t)) + k_x(v)\dot{x}(t) + k_x x(t) \quad (13)$$

$$a(v) = a_1 + a_2 v, \quad c(v) = c_1 + c_2 v, \quad k_x(v) = k_{x1} + k_{x2} v$$

در این مدل از رابطه میان نیرو-ولتاژ در داده‌های آزمایشگاهی الهام گرفته شده که در بخش بعد این موضوع نشان داده میشود. نکته مهم اینکه اغلب در مدل‌های شبه استاتیکی، دقت مدل قربانی سرعت عملکرد میشود. اما همانطور که در بخش مقایسه دیده خواهد شد، مدل پیشنهادی علاوه بر سرعت در بهینه‌سازی دارای دقت قابل قبولی نیز است.

ویژگی مهم مدل ارائه شده، وارون‌پذیری مدل است؛ چراکه آنچه در کنترل وسیله‌ی نیمه فعالی چون میراگر MR صدور دستور کنترلی را بر عهده دارد، مدل وارون آن است و نه مدل مستقیم. بعبارتی در حین یک زلزله، اطلاعات لحظه‌ی کنونی از سنسورها که شامل پاسخ‌های سازه و نیروی میراگرهای MR موجود بوده دریافت میشوند؛ سپس ارزیابی شده و در نهایت وارد

اکنون با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی کفایت مدل‌های بررسی شده مورد مقایسه قرار میگیرند. در این راستا هریک از ده زلزله جداگانه به ساختمان معیار اعمال میشود که باعث ایجاد تغییرمکان، سرعت در میراگرهای MR شده و با ارسال همزمان ولتاژ کنترلی به این میراگرها میتوان به نیروی مطلوب آزمایشگاهی میراگرها F_d دست یافت. معیار مقایسه، خطای نرم-۱ قرار داده میشود که عبارت است از:

$$\varepsilon = \frac{\|F_d - F\|_1}{\|F_d\|_1}, \quad \|f\|_1 = \int_0^{T_r} \|f(t)\| dt \quad (15)$$

که در آن F نیروی تولید شده توسط هر مدل بوده که باید هرچه بیشتر به F_d نزدیک باشد و T_r طول زمان هر زلزله هستند.

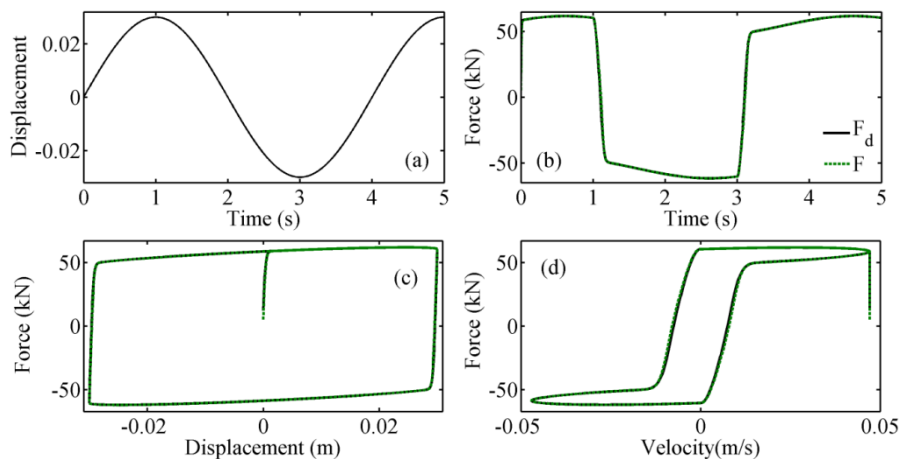
شکل (۱۰) خطای نرم-۱ برای هر مدل در هر ایستگاه

برای ارزیابی بیشتر مدل شبه استاتیکی ارائه شده، عملکردش در توصیف رفتار میراگر MR تحت زلزله‌ی السنترو با جزئیات بیشتر بررسی میشود.

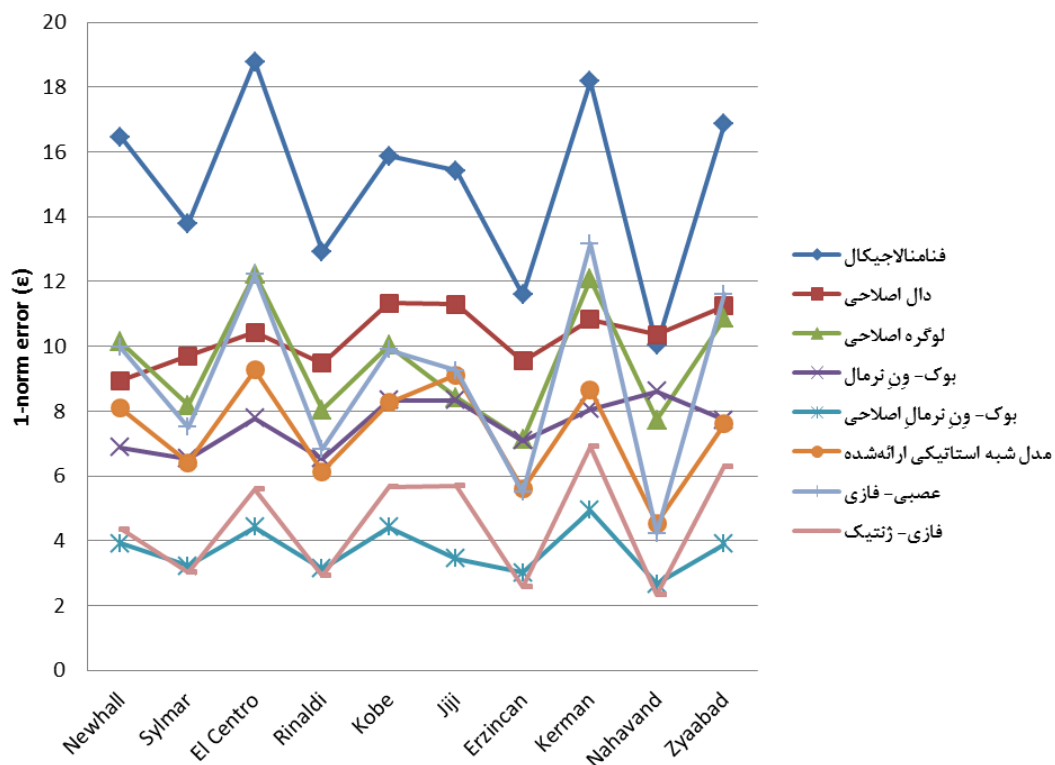
شکل (۱۲) تغییرمکان و ولتاژ نظیر فرستاده شده از کنترل‌کننده برنامه‌ی معیار، هنگامیکه ثبت زلزله السنترو در امتداد Y به ساختمان معیار مجهز به میراگرهای MR اعمال میشود را نشان میدهد. در شکل (۱۳) و شکل (۱۴) به ترتیب بخشی از پاسخ پیش‌بینی شده توسط مدل بوک-ون نرمال اصلاحی و مدل شبه استاتیکی در مقابل داده‌های آزمایشگاهی، آورده شده است. میزان انطباق مدل شبه استاتیکی در تحریک تغییرمکان-متغیر و ولتاژ-متغیر نشان از عملکرد قابل توجه این مدل ساده در مقابل همتای دینامیکی و پیچیده خود دارد.

دال اصلاحی را میتوان بیشتر یک مدلی برای توصیف میراگرهای MR با رفتار برشی دانست، تا میراگرهای با رفتار سیلندری. مدل بوک-ون نرمال تقریباً دارای عملکرد خوبی است، حال آنکه به علت نبود جمله سختی درون مدل خود کاستی‌هایی دارد. این موضوع، در قیاس با مدل بوک-ون نرمال اصلاحی که جمله سختی را در خود جای داده کاملاً مشهود است.

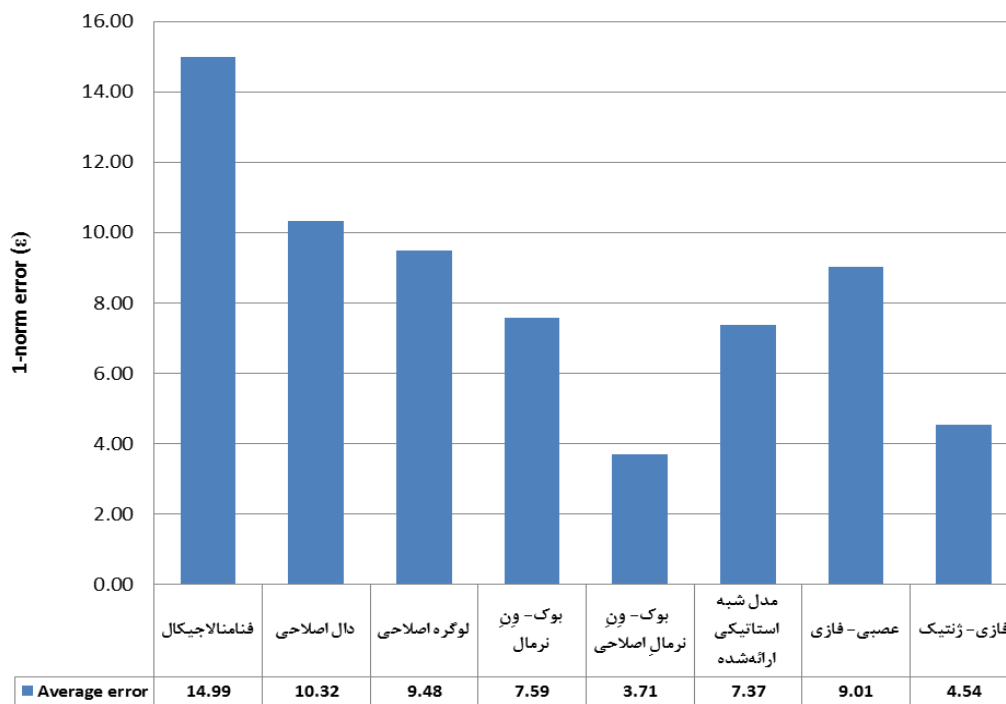
اما نکته جالب و قابل تأمل اینکه، مدل شبه استاتیکی ارائه شده، از لحاظ دقت، از مدل‌های دینامیکی پیچیده و حتی از مدل عصبی-فازی که از معروفترین ساختارهای محاسبات نرم محسوب میشود، نیز پیشه گرفته است. همه‌ی این‌ها در حالی است که مدل شبه استاتیکی پیشنهادی از هیچ معادله دیفرانسیلی استفاده نکرده، وارون‌پذیر بوده و زمان بهینه‌سازی و محاسبه‌ی خروجی‌اش قابل قیاس با زمان بسیار طولانی مورد نیاز دیگر مدل‌ها نیست.



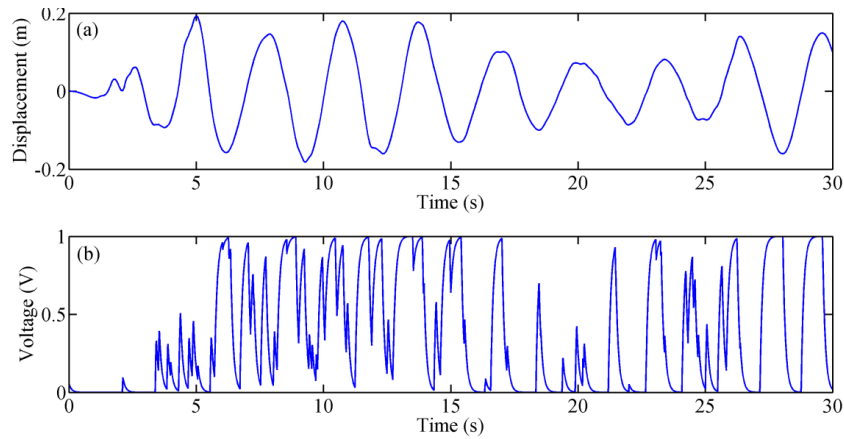
شکل (۹): (a) تحریک سینوسی، مقایسه نیروی پیش‌بینی شده توسط مدل فنمانالاجیکال (F) و داده آزمایشگاهی (F_d) در مقابل: (b) زمان (c) تغییرمکان (d) سرعت



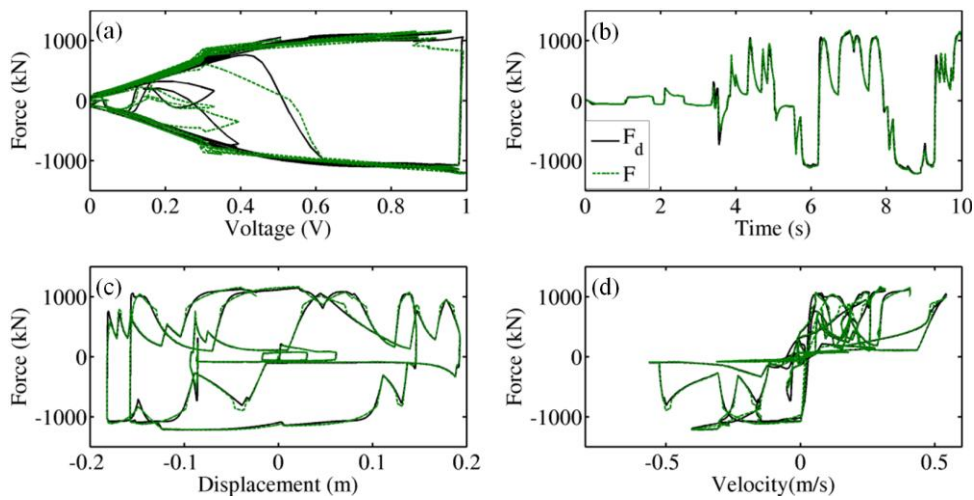
شکل (۱۰): نمودار خطای نرم-۱ برای انواع مدلها تحت ثبت زلزله و ولتاژ متغیر در هر ایستگاه شتاب نگاشت امتداد X



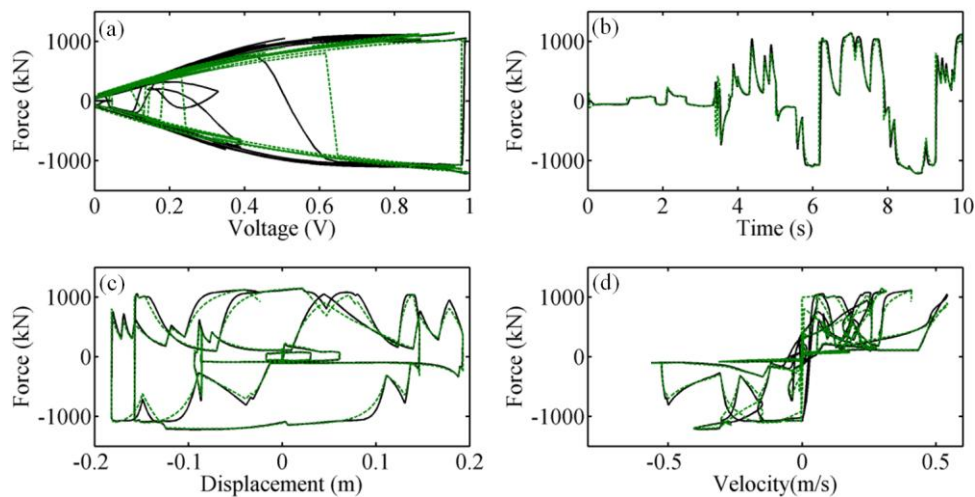
شکل (۱۱): نمودار میانگین خطا برای مدلها تحت ۱۰ زلزله و ولتاژ متغیر در ایستگاههای شتاب نگاشت مختلف امتداد X



شکل (۱۲): (a) تغییر مکان (b) ولتاژ نظیر فرستاده شده از کنترل‌کننده، هنگامی که ثبت زلزله السنترو جهت Y اعمال میشود



شکل (۱۳): قیاس نیروی پیش‌بینی مدل بوک-ون نرمال اصلاحی (F) و داده آزمایشگاهی (F_d) مقابل: (a) ولتاژ (b) زمان (c) جابجایی (d) سرعت



شکل (۱۴): قیاس نیروی پیش‌بینی مدل شبه‌استاتیکی پیشنهادی (F) و داده آزمایشگاهی (F_d) مقابل: (a) ولتاژ (b) زمان (c) جابجایی (d) سرعت

England, 1990.

Soong, T. T. and Dargush G. F., "Passive energy [۳] dissipation systems in structural engineering", John Wiley & Sons, Inc., New York, N.Y, 1997.

Yao J. T. P., "Concept of Structural Control", ASCE [۴] Journal of Structural Division, Vol. 98, 1972.

Hrovat D., Barak P., Rabins M., "Semi-active versus [۵] passive or active tuned mass dampers for structural control", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 109, No. 3, pp. 691-705, 1983.

Soong T. T. and Spencer B. F. Jr., "Supplemental [۶] energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice", Eng.Struct, Vol. 24, pp. 243-259, 2002.

Dyke, S. J., Spencer, B. F., Jr., Sain, M. K., and [۷] Carlson, J. D., "Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction", Smart Mat. and Struct, Vol, 5, pp. 565-575, 1996.

Symans M. D., Constantinou M. C., "Semi-active [۸] control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review", Engineering Structures, Vol. 21, pp. 469-487, 1999.

Jansen L. M. and Dyke S. J., "Semi-active control [۹] strategies for MR dampers: A comparative study", ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol. 126, pp. 795-803, 2000.

Lin P. Y., Roschke P. N., Loh C. H. and Cheng C. P., [۱۰] "Semi-Active Controlled Base-Isolation System With Magnetorheological Damper And Pendulum System", 13th World Conf. on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada August, pp. 1-6, 2004.

Kim H. S., Roschke P. N., "GA-fuzzy control of [۱۱] smart base isolated benchmark building using supervisory control technique", Advances in Engineering Software, Vol. 38, pp. 453-465, 2007.

Bahar A., Pozo F., Acho L., Rodellar J., Barbat A., [۱۲] "Hierarchical semi-active control of base-isolated structures using a new inverse model of magnetorheological dampers", Computers and Structures, Vol. 88, pp. 483-496, 2010.

Jolly M. R., Bender J. W. and Carlson J. D., [۱۳] "Properties and applications of commercial magnetorheological fluids", J. Int. Mater. Syst. Struct, Vol. 101, pp. 5-13, 1999.

Zadeh L. A., "Fuzzy sets", Information and Control, [۱۴] Vol. 8, pp. 338-353, 1965.

Jang J. R., Sun C. T., Mizutani E., "Neuro-fuzzy and [۱۵] soft computing", Prentice-Hall International Inc, 1997.

۱۰- نتیجه گیری

در این پژوهش ابتدا میراگر MR معرفی و مروری بر مدل‌های محاسباتی سخت و نرم دو دهه‌ی اخیر آن انجام شد. در گام بعد، ۵ مدل معروف محاسباتی سخت انتخاب و توسط الگوریتم ژنتیک که روشی سازمان‌یافته نیز برای به‌کارگیری‌اش معرفی شد، بهینه‌سازی شدند. این بهینه‌سازی یگانه زمین‌های برابر را برای مقایسه فراهم آورد. سپس، دو مدل محاسباتی نرم برای توصیف رفتار کاملاً غیرخطی و هیستریک میراگر MR ساخته شد. در مرحله‌ی بعد، یک مدل شبه استاتیکی مستقیم به‌همراه مدل وارون برای میراگر MR ارائه شد. داده‌های آزمایشگاهی مورد نیاز، برای بهینه‌سازی و آموزش مدل‌ها از اعمال ثبت‌های واقعی زلزله بر یک ساختمان کف-جداسازی شده معیار، که توسط انجمن مهندسين عمران آمریکا (ASCE) ارائه شده بود، تولید شدند. در نهایت تمامی مدل‌های سخت، نرم و مدل شبه استاتیکی ارائه شده، تحت ۱۰ ثبت زلزله خارجی و داخلی متمایز جدایش^{۶۹} شده و ولتاژهای تصادفی حاصل از بلوک کنترلی برنامه‌ی معیار مقایسه شدند.

از مقایسه مدل‌ها دو نتیجه حاصل شد. ابتدا اینکه مدل محاسباتی سخت بوک-ون نرمال اصلاحی و مدل محاسباتی نرم فازی-ژنتیک دارای بهترین عملکرد هستند؛ هرچند از جنبه‌ی وارون‌پذیری مدل فازی-ژنتیکی نسبت به مدل دینامیکی مذکور دارای ارجحیت است. دوم، مشاهده شد که مدل شبه استاتیکی ارائه شده از لحاظ دقت، از مدل‌های دینامیکی پیچیده و حتی از مدل عصبی-فازی نیز پیشه گرفت؛ این در حالی است که مدل پیشنهادی از هیچ معادله دیفرانسیلی استفاده نکرده و بر خلاف مدل‌های دینامیکی بسادگی وارون‌پذیر و مناسب در فرایند کنترل سازه توسط میراگرهای نیمه فعال MR است؛ همچنین اشاره شد که زمان بهینه‌سازی این مدل قابل قیاس با زمان بسیار طولانی مورد نیاز دیگر مدل‌ها نبود. این موضوعات نشان از ظرفیت وسیع مدل‌های شبه استاتیکی و مدل‌های فازی-ژنتیکی در دو عرصه‌ی شناسایی و کنترل میراگر MR دارند.

۱۱- مراجع

Housner G. W., Bergman L. A., Caughey T K, [۱] Chassiakos A G, Claus R O, Masri S F, Skelton R E, Soong T. T., Spencer B. F. and Yao J. T. P., "Structural control: past, present, and future", J. Eng. Mech, Vol. 1239, pp. 897-971, 1997.

Soong, T.T., "Active Structural Control: Theory and [۲] Practice", Longman Scientific and Technical, Essex,

- magnetorheological damper behaviors”, *J. Int. Mater. Syst. Struct.*, Vol. 17, pp. 3– 14, 2006.
- Rodriguez A., Ikhouane F., Rodellar J., Luo N., [۳۱]
“Modeling and identification of a small-scale magnetorheological damper”, *J. Intell Mater Syst Struct.*, Vol. 20, pp. 25– 35, 2009.
- Bahar A., Pozo F., Acho L., Rodellar J., Barbat A., [۳۲]
“Parameter identification of large scale magnetorheological dampers in a benchmark building”, *Computers and Structures*, Vol. 88, pp. 198– 206, 2010.
- Oka S., Kimb D., Parkc K., Kohb H., “Semi-active [۳۳]
fuzzy control of cable-stayed bridges using magneto-rheological dampers”. *Eng Struct*, Vol. 29, pp. 776– 788, 2007.
- Yang G., Spencer B. F., Jung H. J., Carlson J. D., [۳۴]
“Dynamic modeling of large-scale magnetorheological damper systems for civil engineering applications”, *J Eng Mech*, Vol. 130, pp. 1107– 1114, 2004.
- Ma X. Q., Wang E. R., Rakheja S., Su C. Y., [۳۵]
“Modeling hysteretic characteristics of MR-fluid damper and model validation”. In: *Proc. 41st IEEE conf. On decision and control*. pp. 75– 80, 2002.
- Yang G., “Large-scale magnetorheological fluid [۳۶]
damper for vibration mitigation: Modeling, testing and control”, Ph.D dissertation, University of Notre Dame, 2001.
- Kciuk M. and Turczyn R., “Properties and [۳۷]
application of magnetorheological fluids”, *Journal of Achievement in Material and Manufacturing Engineering*, Vol. 18, No. 1-2, pp. 127– 130, 2006.
- Schurter K.C., Roschke P.N., “Fuzzy modelling of a [۳۸]
magnetorheological damper using ANFIS”, In: *Proc. 9th IEEE intl. conf. on fuzzy systems*, 2000.
- Wang D. H., Liao W. H., “Modeling and control of [۳۹]
magnetorheological fluid dampers using neural networks”, *Smart Materials and Structures*, Vol. 14, pp. 11– 26, 2005.
- Jin G., Sian M. K., Spencer Jr. B. F., “Nonlinear [۴۰]
blac-kbox modeling of MR-dampers for civil structural control”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*; Vol. 13, No. 3, pp. 45– 55, 2005.
- Kwok N. M., Ha Q. P., Nguyen M. T., Li J., Samali [۴۱]
B., “Bouc-Wen model parameter identification for a MR fluid damper using computationally efficient GA”, *ISA Trans*, Vol. 46, pp. 167– 179, 2007.
- Atray V. S., Roschke P. N., “design, fabrication, [۴۲]
testing, and fuzzy modeling of a large Magnetorheological damper for vibration control in a railcar”, *Proceedings of the 2003 IEEE I ASME Joint*
- Holland J.H., “Adaptation in natural and artificial [۱۶]
systems”, University of Michigan Press, Michigan, 1975.
- Goldberg D.E., “Genetic algorithms in search, [۱۷]
optimization and machine learning”, Reading (MA): Addison-Wesley, 1989.
- Narasimhan S., Nagarajaiah S., Gavin H., Johnson E. [۱۸]
A., “Smart base isolated benchmark building part I: problem definition”, *Journal of Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 13, pp. 573– 588, 2006.
- Nagarajaiah S., Narasimhan S., “Smart base isolated [۱۹]
benchmark building part II: phase I sample controllers for linear isolation system”, *Journal of Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 13(2– 3), pp. 589– 604, 2006.
- Choi S. B., Lee S. K. and Park Y. P., “A hysteresis [۲۰]
model for the field-dependent damping force of a magnetorheological damper”, *J. Sound Vib*, Vol. 83, pp. 245– 375, 2001.
- Dahl P. R., “A solid friction model”, Technical [۲۱]
Report TOR-158(3107-18) (El-Segundo, CA: The Aerospace Corporation), 1968.
- Dominguez A., Sedaghati R., Stiharu I., “Modeling [۲۲]
and application of MR dampers in semi-adaptive structures”, *Comput Struct*, Vol. 86, pp. 407– 415, 2008.
- Du1 H. and Zhang N., “Evolutionary Takagi-Sugeno [۲۳]
Fuzzy Modelling for MR Damper”, *Proc. of the Sixth IEEE Int. Conf. on Hybrid Intelligent Systems*, 2006.
- Carlson, J.D. and Weiss, K.D., “A Growing [۲۴]
Attraction to Magnetic Fluids”, *Machine Design*, August, pp. 61– 64, 1994.
- Stanway R., Sproston J. L. and Stevens N. G., “Non- [۲۵]
linear modelling of an electro-rheological vibration damper”, *J. Electrostat*, Vol. 20, pp. 167– 84, 1987.
- Wen Y. K., “Method of random vibration of [۲۶]
hysteretic systems”, *ASCE J. Eng. Mech*, Vol. 102, pp. 249– 63, 1976.
- Spencer B. F. Jr., Dyke S. J., Sain M. K. and Carlson [۲۷]
J. D., “Phenomenological model for a magnetorheological damper”, *ASCE J.Eng. Mech*, Vol. 123, pp. 23– 52, 1997.
- Ikhouane F. and Dyke S. J., “Modeling and [۲۸]
identification of a shear mode magnetorheological damper”, *Smart Mater. Struct*, Vol. 16, 2007.
- Jimenez R. and Alvarez-Icaza L., “LuGre friction [۲۹]
model for a magnetorheological damper”, *Struct. Cont. Health Monit*, Vol. 20, pp. 91– 116, 2004.
- Guo S., Yang S. and Pan C., “Dynamic modeling of [۳۰]

- 18 Seismo Signal
- 19 Benchmark
- 20 Semi-Solid
- 21 Yield
- 22 Bingham
- 23 Bouc-Wen
- 24 Phenomenological
- 25 Dahl
- 26 LuGre
- 27 Bi Viscous Hysteretic
- 28 Normalized Bouc-Wen
- 29 Black Box
- 30 Takagi, Sugeno, Kang
- 31 Holland
- 32 Selection
- 33 Parents
- 34 Crossover
- 35 Mutation
- 36 Elite
- 37 Objective Function
- 38 Fitness Value
- 39 Generation
- 40 Population Size
- 41 Genetic Drift
- 42 Uniform Stochastic
- 43 Scattered
- 44 Crossover fraction
- 45 Minimum
- 46 Diversity
- 47 Gaussian
- 48 Initial range
- 49 Least-Squares Estimator (LSE)
- 50 Newhall
- 51 Rinaldi
- 52 Elcentro
- 53 Sylmar
- 54 Jiji
- 55 Kobe
- 56 Erzincan
- 57 American Society of Civil Engineering (ASCE)
- 58 Spencer et al.
- 59 Sequential Quadratic Programming (SQP) Algorithm
- 60 Maximum
- 61 Peak Ground Acceleration (PGA)
- 62 Training Data
- 63 Checking Data
- 64 Membership Functions (MFs)
- 65 Gbell
- 66 Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)
- 67 Epoch
- 68 Backpropagation Learning (BP Learning)
- 69 Filter

Rail Conference, Chicago, Illinois, 2003.

Kim H. S., Roschke P. N., Pei-Yang Linc, Chin-Hsiung Lohc, "Neuro-fuzzy model of hybrid semi-active base isolation system with FPS bearings and an MR damper", Engineering Structures, Vol. 28, pp. 947- 958, 2006.

Giuclea M., Sireteanu T., Stanciou D., Stammers CW., "Model parameter identification of vehicle vibration control with magnetorheological dampers using computational intelligent methods", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I: Journal of Systems and Control Engineering, Vol. 218, pp. 69- 81, 2004.

Gibbs M. S., Dandy G. C., Maier H. R., "A genetic algorithm calibration method based on convergence due to genetic drift", Information Sciences, Vol. 178, pp. 2857- 2869, 2008.

Srinivasa K., Venugopal K., Patnaik L., "A self-adaptive migration model genetic algorithm for data mining applications", Information Sciences, Vol. 177, No. 20, pp. 4295- 4313, 2007.

Ikhouane F., Rodellar J., "Systems with hysteresis: analysis, identification and control using the Bouc-Wen model", John Wiley and Sons Inc, 2007.

Mehrkian B., Bahar A., Chaibakhsh A., "Genetic-Optimized Neuro-Fuzzy Inference System (GONFIS) in nonlinear system identification", IEEE Int. conf. on control system, computing, and engineering (ICCSCE) Penang, Malaysia, pp. 1035-1041, 2011.

Jang J. S. R., "ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference systems", IEEE Trans. Syst., Man, and Cybern., vol. 23, pp. 665- 685, May, 1993.

۱۲- زیر نویس ها

- 1 Passive Control Systems
- 2 Active Control Systems
- 3 Yao
- 4 Semi-Active Control Systems
- 5 Clipped-Optimal Control
- 6 Control Based on Lyapunov Stability Theory
- 7 Base-Isolated
- 8 Magnetorheological (MR) Damper
- 9 Hard Computing
- 10 Soft Computing
- 11 Parametric
- 12 Non-Parametric
- 13 Crisp
- 14 Jang
- 15 Artificial Neural Network (ANN)
- 16 Genetic Algorithm (GA)
- 17 Rrecords