

کنترل فازی هم تکاملی همکار میراگر سیال مغناطیسی برای کاهش خسارت سازه

حسین اکرمی زاده^۱، سید مهدی زهرائی^{۲*}، مسعود بزرگوار^۳

^۱ دانشکده مهندسی عمران، دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۲ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۳ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، اراک، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۸ آذر ۱۳۹۴
بازنگری: ۲۴ اسفند ۱۳۹۵
پذیرش: ۱۹ خرداد ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۳۱ خرداد ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

کنترل نیمه فعال
میراگر سیال مغناطیسی
کنترل فازی
الگوریتم ژنتیک
فازی هم تکاملی همکار

چکیده: در این مقاله کاهش خسارت سازه‌ها در مقابل زلزله به روش کنترل نیمه فعال میراگر سیال مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته است. الگوریتم کنترل فازی از روش‌های کنترل هوشمند است که در مقابل روش‌های کنترل کلاسیک، از توانمندی‌هایی نظیر قابلیت پرداختن به مسائل غیرخطی، انطباق پذیری و استقامت نسبت به خطاها و عدم قطعیت برخوردار است. اما به دلیل عدم یادگیری کنترل کننده فازی از ترکیب آن با الگوریتم ژنتیک بهره برده می‌شود که این ترکیب در برخی موارد با مشکلاتی همچون همگرایی زود هنگام حول هدف نادرست رنج می‌برد.

بنابراین در این پژوهش به معرفی و طرح کنترل کننده فازی هم تکاملی همکار پرداخته می‌شود که در آن پارامترهای توابع عضویت و قوانین در دو گونه جدا از هم جستجو می‌گردد. برای ارزیابی و مقایسه این کنترل کننده با برخی کنترل کننده‌های دیگر، این روش‌ها بر روی میراگر سیال مغناطیسی در یک سازه مرجع سه طبقه در مقابل زلزله‌های مختلف به کار گرفته شده و نتایج آن‌ها مقایسه گردیده‌اند. نتایج بدست آمده نشان دهنده عملکرد مطلوب تر کنترل کننده فازی هم تکاملی همکار نسبت به سایر کنترل کننده‌های دیگر بوده که توانسته خسارت در سازه را در زلزله‌های مختلف به طور متوسط ۷۹ درصد کاهش دهد.

۱- مقدمه

به آنچه، انسان خبره به هنگام کنترل سیستم انجام می‌دهد، نشان می‌دهند. کنترل کننده فازی برخلاف کنترل کننده‌های کلاسیک، بدون نیاز به مدل ریاضی از سیستم، با استفاده از تجربیات افراد خبره که در قالب قوانین اگر آن‌گاه فازی بیان می‌شوند، به کنترل سیستم می‌پردازند.

در سال‌های اخیر کنترل کننده‌های فازی به دلیل عدم نیاز به مدل ریاضی، ساده بودن و مقاوم بودن به عدم قطعیت‌ها مورد توجه محققین قرار گرفته‌اند. سان^۱ و گوتو^۲ از منطق فازی برای تنظیم ضریب میرایی میراگرهای سیال مغناطیسی برای کنترل ارتعاشات پل بهره برده‌اند. لیبا^۳ نتایج آزمایشگاهی کنترل کننده فازی را در اثر ارتعاشات میز لرزان ارائه کرده است. ناگاراچایا^۴ از کنترل کننده فازی برای کنترل میراگرهای قابل تنظیم بر مبنای بازخور کردن پاسخ‌های سرعت و جابه‌جایی نسبی پایه استفاده کرده است [۱].

به طور کلی ساختمان‌ها قابلیت میرایی بسیار کمی دارند. برای ائتلاف انرژی زلزله و کاهش ارتعاشات سازه‌ها و در نتیجه کاهش ضرر مالی و جانی، وسایل کنترل در سازه‌ها به کار رفته‌اند. از سیستم‌های کنترل فعال می‌توان برای کاهش پاسخ سازه‌ها در برابر ارتعاشات داخلی و خارجی نظیر ارتعاش دستگاه‌ها، زلزله یا باد استفاده نمود. در مهندسی عمران سازه‌هایی که در آن‌ها کنترل سازه، به صورت فعال انجام شده باشد بسیار کمتر از سازه‌هایی است که در آن‌ها کنترل سازه به صورت غیرفعال انجام گرفته است. در طراحی سیستم‌های سازه‌ای با کنترل فعال می‌توان سیستم را طوری طراحی نمود که سازه بر اساس یک رفتار مشخص و تعریف شده‌ای پاسخ دهد. این ابزارها از پاسخ اندازه‌گیری شده سازه برای تولید نیروی کنترلی مورد نظر استفاده می‌کنند.

کنترل کننده‌های فازی، کنترل کننده‌های غیرخطی با ساختار خاص می‌باشند که کاربردهای موفقیت آمیزی از تئوری فازی را در مسائل عملی ارائه می‌نمایند. این کنترل کننده‌ها با به کارگیری تئوری فازی، رفتاری شبیه

- 1 Sun
- 2 Goto
- 3 Liba
- 4 Nagarajaiah

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mzahrai@ut.ac.ir

یکی از معایب اصلی کنترل کننده‌های فازی، عدم توانایی یادگیری آن‌ها می‌باشد که باعث مورد استفاده قرار گرفتن دانش و تجربه افراد کارشناس و متخصص در قالب پایگاه اطلاعات در این کنترل کننده‌ها می‌شود. به منظور رفع این مشکل و اتوماتیک کردن طراحی کنترل کننده‌های فازی، می‌توان از یک فرآیند یادگیری استفاده کرد.

روش‌های مختلفی بر اساس قابلیت یادگیری در کنترل کننده‌های فازی مطرح شده است. این نوع کنترل کننده‌ها، علاوه بر قابلیت تصمیم‌گیری به طریقه فازی، قابلیت ایجاد یا بهبود قوانین کنترلی را بر اساس اطلاعات گذشته خود دارند. یکی از روش‌های مؤثر برای طراحی کنترل کننده‌های فازی، استفاده از الگوریتم‌های ژنتیکی می‌باشد. الگوریتم‌های ژنتیکی با الهام‌گیری از تئوری تکامل، به جستجوی کنترل کننده فازی مناسب که بتواند معیارهای طراحی را ارضاء کند، می‌پردازند.

۲- الگوریتم ژنتیک فازی

کنترل فازی یک روش کنترل بر اساس منطق فازی است. در حقیقت اگر منطق فازی را به طور ساده "محاسبه با کلمات به جای اعداد" بنامیم، کنترل فازی را می‌توان "کنترل با جملات به جای معادلات" نامید [۱۱].

یک سیستم فازی دارای اجزاء و پارامترهای مختلفی است. هدف از طراحی یک سیستم فازی تعیین این اجزاء و پارامترها است، به طوری که سیستم حاصل هم دارای دقت عددی بالایی باشد و هم خاصیت تفسیرپذیری آن حفظ شود. پارامترهای یک سیستم فازی به چهار گروه تقسیم می‌شود. گروه اول پارامترهای منطقی سیستم فازی هستند. این گروه شامل شکل توابع عضویت و روابطی هستند که برای عملگرهای فازی، و، یا، استدلال، جمع قوانین و غیرفازی کردن مورد استفاده قرار می‌گیرند. گروه دوم پارامترهای ساختاری سیستم و عمدتاً مربوط به اندازه و بزرگی سیستم فازی هستند. این‌ها شامل تعداد توابع عضویت و تعداد قوانین فازی می‌باشند. سومین گروه، پارامترهای ارتباطی و مربوط به توپولوژی سیستم فازی هستند که شامل مقدمه، نتیجه و وزن قوانین فازی می‌شوند. بالاخره چهارمین گروه از پارامترهای سیستم فازی پارامترهای عملگری یعنی پارامترهای که ارتباط بین مقادیر عددی و مقادیر فازی متغیرها را برقرار می‌نمایند و در واقع همان توابع عضویت سیستم فازی می‌باشند.

در طراحی مستقیم سیستم‌های فازی کلیه این اجزاء و پارامترها باید توسط طراح انتخاب و تعیین شوند. انجام این کار نیاز به دانش کافی از رفتار سیستم و تخصص و تجربه کافی و گاهی هم نیاز به سعی و خطا دارد. استفاده از روش مستقیم در سیستم‌های پیچیده و بزرگ که دانش کافی از آن‌ها در اختیار نمی‌باشد و یا فضای مسئله و تعداد پارامترها زیاد هستند مشکل و گاهی غیرممکن خواهد بود. برای طراحی و مدل‌سازی سیستم‌های فازی در مسائل پیچیده و بزرگ، استفاده از روش‌های مدل‌سازی خودکار مورد توجه قرار گرفته است. در این روش‌ها نیز پارامترهای منطقی سیستم

لوح^۱ و همکاران روش کنترل فازی را با بهره‌گیری از میراگر سیال مغناطیسی^۲ برای کاهش پاسخ عرشه جداسازی شده از پایه‌ها در معرض تحریک زلزله بررسی نمودند [۲]. سامالی^۳ و آل داود^۴ با استفاده از کنترل کننده فازی، روش غیرفعال و روش تنظیم کننده درجه دوم خطی^۵ مدل آزمایشگاهی ساختمان ۵ طبقه‌ای را تحت زلزله‌های متفاوت مطالعه کردند [۳]. در تحقیق دیگری آل داوود و همکاران از روش کنترل فازی و محرک‌های فعال برای کنترل ساختمان‌های غیرخطی سه و بیست طبقه‌ای مینا استفاده کردند [۴].

سامالی و همکاران از کنترل کننده فازی و میراگر جرمی تنظیم شده فعال برای کنترل ساختمان ۷۶ طبقه محک تحت تحریک باد بهره‌جستند [۵]. دامون^۶ و سیمانس^۷ با استفاده از کنترل کننده فازی، یک ساختمان جداسازی شده به وسیله تکیه‌گاه‌های الاستومری را تحت تحریک زلزله مورد آزمایش قرار دادند [۶]. آن‌ها از کنترل کننده فازی برای تنظیم میراگرهای ویسکوز نیمه فعال استفاده کردند.

پورزینلی^۸ و همکاران روش فازی را برای کنترل یک ساختمان ۱۱ طبقه با استفاده از میراگر جرمی فعال بکار بردند [۷]. آن‌ها برای بدست آوردن متغیر بهینه میراگر جرمی و همچنین طراحی کنترل کننده‌های فازی از الگوریتم ژنتیک با هدف کمینه کردن پاسخ جابه‌جایی بام استفاده کردند. آن‌ها همچنین پاسخ‌های بدست آمده از این روش را با روش کنترل غیرفعال میراگر جرم تنظیم شده^۹ و روش تنظیم کننده درجه دوم خطی مقایسه کردند. کرم‌الدین از کنترل کننده فازی برای کنترل جابه‌جایی و خسارت در ساختمان‌های سه و نه طبقه محک بهره‌برد [۸]. وی از الگوریتم ژنتیک نیز برای طراحی کنترل کننده فازی استفاده کرد. در تحقیق دیگری، کرم‌الدین و همکاران با استفاده از کنترل کننده ژنتیک-فازی و بهره‌گیری از میراگر سیال مغناطیسی به کاهش خسارت در ساختمان‌های سه و بیست طبقه محک پرداختند [۹]. آز و هادی در سال ۲۰۱۴ از یک کنترل فازی یکپارچه به منظور ارائه روابط تعاملی بین نیروها و ولتاژ ورودی میراگر MR بر اساس مدل بوک-ون اصلاح شده استفاده کردند. نتایج خود را با روش‌های LQR (Linear Quadratic Regulator) و (Linear Quadratic) LQG (Gaussian) مقایسه نمودند. هدف آن‌ها از این تحقیق علاوه بر کاهش پاسخ‌ها، به حداقل رساندن هزینه کل میراگر بود [۱۰].

- 1 Loh
- 2 Magnetorheological-MR
- 3 Samali
- 4 Al-Dawod
- 5 Linear quadratic Regulator -LQR
- 6 Damon
- 7 Symans
- 8 Pourzeynali
- 9 Tuned Mass Damper- TMD

پایگاه داده (توابع عضویت) و پایگاه قواعد. این شیوه اساساً بر پایه چارچوب تعریف شده توسط پاتر و دی یانگ می‌باشد [۱۶، ۱۷]. فازی هم‌تکاملی همکار درجه بالایی از آزادی را به طراحی سیستم فازی می‌دهد تا استفاده‌کننده بتواند میان عملکرد و قابلیت توجه‌پذیری تعامل برقرار کند.

تعداد فرآیند مدل‌سازی فازی معمولاً نیاز به جستجوی همزمان پارامترهای عملیاتی و همبند دارد. این پارامترها یک تعریف کاملی از دانش زبانی برای توصیف سیستم فازی و مقادیر نگاشت از این توصیف نمادین به مقادیر واقعی ارائه می‌دهد (یک تعریف کامل نیاز به پارامترهای ساختاری مانند متغیرهای وابسته و تعداد قوانین دارد). بنابراین مدل‌سازی فازی را شامل دو فرآیند جدا از هم اما در هم پیچیده دانست: (۱) جستجو برای توابع عضویت که متغیرهای فازی (یعنی پارامترهای کاربردی) را تعریف می‌کند و (۲) جستجو برای قوانین (یعنی پارامترهای همبند) استفاده شده برای استنتاج.

مدل‌سازی فازی چندین خصوصیت را نشان می‌دهد که استفاده از هم‌تکاملی همکارانه را توجیه می‌کند:

- راه‌حل‌های مورد نیاز می‌توانند بسیار مشکل باشند زیرا که سیستم‌های فازی از یک دوجین متغیر، برای تعریف صدها پارامتر استفاده می‌کند.
- راه‌حل پیشنهاد شده (یک سیستم استنتاج فازی) را به دو جزء مجزا می‌توان تجزیه کرد: قوانین و توابع عضویت.
- توابع عضویت را می‌توان به صورت پیوسته یا مقادیر واقعی نشان داد در صورتی که قوانین به صورت گسسته و به صورت مقادیر نمادین نمایش داده می‌شوند.
- این دو جزء به هم وابسته هستند زیرا که توابع عضویت از طریق اولین گروه از مقادیر که به وسیله دومین گروه (قوانین) مرتب شده است تعریف شده‌اند.

در این روش افراد در اولین گونه، مقادیری را که تمام توابع عضویت را برای تمام متغیرهای سیستم تعریف می‌کند را کدگذاری می‌کند و افراد در گونه دوم یک مجموعه از قوانین را توصیف می‌کند.

در کنترل فازی هم‌تکاملی همکار دو الگوریتم تکاملی برای کنترل تکامل دو جمعیت که نمونه‌هایی از یک ژنتیک الگوریتم ساده هستند استفاده شده است. شکل ۱ الگوریتم این روش را به صورت شبه کد نشان می‌دهد. در این روش، یک فرد تحت ارزیابی برآزش با ایجاد همکاری با یک یا چند نماینده از سایر گونه‌ها ارزیابی می‌شود یعنی آن فرد با افراد دیگر گونه‌ها برای ساخت سیستم فازی ترکیب می‌شود. مقدار برآزندگی اختصاص یافته به هر فرد بستگی به عملکرد سیستم فازی است که در آن شرکت داشته است. شکل ۲ یک دید با جزئیات بیشتر از روند ارزیابی برآزش را به نمایش می‌گذارد.

فازی که خصوصیات کلی آن را تعیین می‌کنند توسط طراح انتخاب می‌شود. سایر پارامترهای سیستم فازی را می‌توان از طریق روش‌های محاسباتی تعیین و یا جستجو کرد.

الگوریتم‌های تکاملی توانایی جستجو در فضاها بزرگ و پیچیده را دارا هستند. این الگوریتم‌ها توانایی خود را در جستجوی پاسخ بهینه در زمینه‌های مختلف نشان داده‌اند. مدل سازی فازی را می‌توان یک مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفت که تابع هدف آن رفتار سیستم و فضای جستجو، پارامترهای سیستم فازی هستند.

سیستم فازی از سه بخش فازی کردن، موتور استنتاج و غیرفازی کردن تشکیل شده است. رفتار سیستم فازی بر اساس یک معیار رفتاری ارزیابی شده و به عنوان تابع شایستگی در اختیار الگوریتم ژنتیک قرار می‌گیرد. اعضای جمعیت الگوریتم ژنتیک در این سیستم پارامترهای سیستم فازی هستند که در یک روند تکاملی بهینه می‌شوند.

بسته به معیارهای مختلف از جمله، اطلاعات و دانش موجود از سیستم، تعداد پارامترها، دسترسی و کامل بودن داده‌های ورودی و خروجی، از الگوریتم‌های ژنتیک به شکل‌های مختلف می‌توان برای تعیین پارامترهای سیستم فازی استفاده کرد. پارامترهای منطقی سیستم فازی معمولاً توسط طراح انتخاب می‌شوند. اما سه گروه دیگر از پارامترهای سیستم فازی را می‌توان با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک تعیین نمود [۱۲].

هانگ و همکاران در سال ۲۰۰۹ برای کنترل سازه با میراگر سیال مغناطیسی از یک مدل بر اساس مدل هیسترتیک بوک-ون برای پیش بینی رفتار تغییرمکان-نیرو و همچنین پاسخ غیرخطی پیچیده نیرو-سرعت استفاده نمودند. با کمک کنترل فازی برای تعیین ولتاژ میراگر، نتایج تحقیق نشان داد پس از بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک پاسخ‌ها کاهش قابل توجهی داشتند [۱۳]. الهامی و همکاران در سال ۲۰۱۱ به مطالعه کنترل نیمه فعال سازه‌های مجهز به میراگر سیال مغناطیسی پرداخته و برای تعیین ولتاژ مناسب میراگر از کنترل فازی و برای بهینه کردن قواعد فازی از الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. بر اساس نتایج آنها در حضور قواعد فازی بهینه شده، دامنه ارتعاشات بشدت کاهش یافت [۱۴].

استفاده از ترکیب سیستم‌های فازی و الگوریتم‌های تکاملی دارای مشکلاتی همچون بیان دوگانه و همگرایی زود هنگام حول هدف نادرست است. هم‌تکاملی مجموعه قوانین و توابع عضویت می‌تواند راهی موثر برای حل مشکلات ذکر شده باشد [۱۵]. در همین راستا در این مقاله به طرح و معرفی کنترل‌کننده فازی هم‌تکاملی همکار پرداخته شده است و از این کنترلر پیشنهادی جهت کاهش مقدار جابه‌جایی طبقه بالای سازه استفاده شده است که در نتیجه منجر به کاهش میزان خسارت به سازه می‌شود.

۳- مدل‌سازی هم‌تکاملی همکارانه فازی^۱

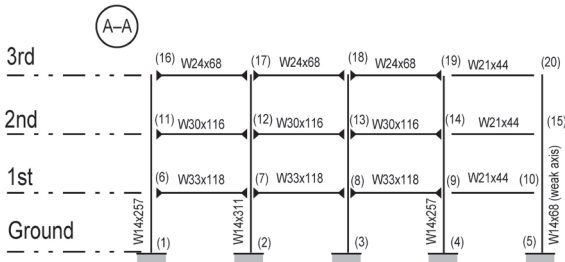
در هم‌تکاملی همکارانه فازی دو گونه هم‌تکاملی تعریف شده است:

$$D = [\{ (\varphi_M - \varphi_y) / (\varphi_u - \varphi_y) \} + \{ \beta / (M_y \varphi_u) \}] \int dE \quad (1)$$

در این رابطه، D شاخص خسارت، φ_M انحنای ماکزیمم (حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی)، φ_u انحنای نهایی ناشی از بار استاتیکی، φ_y انحنای پیشینه حالت الاستیک، M_y لنگر تسلیم عضو، $\int dE$ انرژی جذب شده توسط عضو در خلال حرکات رفت و برگشتی زلزله و β یک ضریب نامنفی می‌باشد که اثر بارهای رفت و برگشتی را بر شاخص خسارت نشان می‌دهد.

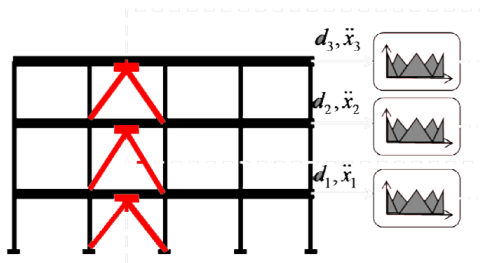
۴- مدل‌سازی عددی و صحت‌سنجی

به منظور ارزیابی کنترل‌کننده معرفی شده در این مقاله از یک سازه معیار غیرخطی که برای بررسی کنترل سازه‌ها در مقابل زلزله معرفی شده‌اند استفاده شده است [۱۹]. این سازه برای منطقه لس‌آنجلس کالیفرنیا طراحی شده و ضوابط طراحی زلزله در آن رعایت شده است. شکل ۳ قاب مینای مورد مطالعه را نشان می‌دهد که برای کنترل سازه از میراگر سیال مغناطیسی استفاده شده است. برای این منظور در هر طبقه از سازه، یک عدد میراگر نصب شده و این محرک‌ها با یک کنترل‌کننده فازی کنترل می‌شوند (شکل ۴). از سه سنسور برای اندازه‌گیری شتاب بهره‌برده شده است که در طبقه اول، دوم و سوم سازه قرار گرفته‌اند.



شکل ۳: قاب مینا برای بررسی در این تحقیق [۱۹]

Fig. 3. Benchmark frame for consideration in this study



شکل ۴: سیستم کنترل سازه و موقعیت استقرار میراگر سیال مغناطیسی

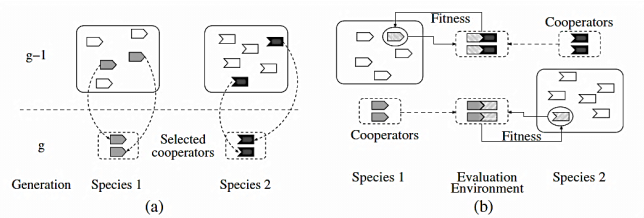
Fig. 4. Structural control system and position of MR damper

```

begin Fuzzy CoCo
g:=0
for each species S
    Initialize populations Ps(0)
    Evaluate population Ps(0)
end for
while not done do
    for each species S
        g:=g+1
        Es(g) = Elite-select[Ps(g - 1)]
        Ps'(g) = select[Ps(g - 1)]
        Ps''(g) = Crossover[Ps'(g)]
        Ps'''(g) = Mutate[Ps''(g)]
        Ps(g) = Ps'''(g) + Es(g)
        Evaluate population Ps(g)
    end for
end while
end Fuzzy CoCo
    
```

شکل ۱: الگوریتم شبه کد فازی هم تکاملی همکار [۱۵]

Fig. 1. Pseudo-code of Fuzzy CoCo.

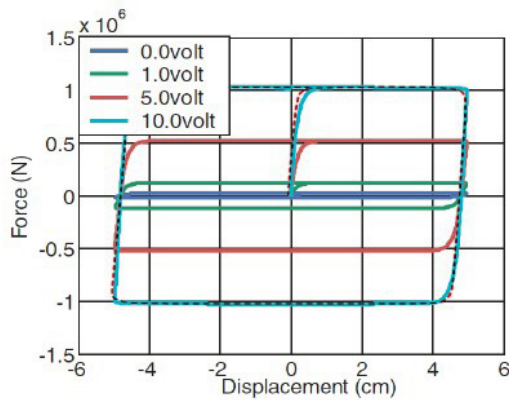


شکل ۲: ارزیابی برازندگی در کنترل فازی هم تکاملی همکار [۱۵]

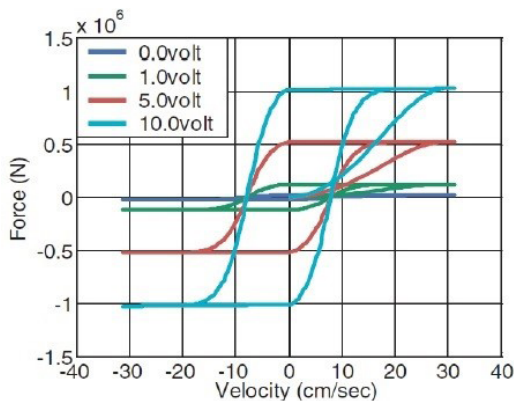
Fig. 2. Fitness evaluation in Fuzzy CoCo

روش فازی هم تکاملی همکار آزادی عمل زیادی در طراحی انواع سیستم‌های فازی به وجود می‌آورد و اجازه می‌دهد تا طراح بتواند تعادل بین رفتار بهینه و تفسیرپذیری سیستم فازی را مدیریت نماید. در این مقاله برای مدل‌سازی فازی هم تکاملی همکار، تابع هدف، کمینه کردن خسارت در سازه می‌باشد. همچنین، کنترل خسارت بر اساس شاخص خسارت پارک و انگ انجام شده و کنترل‌کننده برای کاهش این شاخص طراحی شده است. رابطه شاخص خسارت پارک و انگ به صورت زیر می‌باشد [۱۸].

رابطه حلقوی نیرو-تغییر مکان میراگر مورد استفاده در این تحقیق را برای ولتاژ ۱۰ ولت نشان داده است که با رفتار میراگر مورد استفاده در مرجع [۸] همخوانی دارد.



شکل ۶: نمونه‌ای از روابط حلقوی نیرو-جابجایی میراگر MR (منحنی خط چین قرمز نمودار میراگر این مقاله را نشان می‌دهد)
Fig. 6. An example of force-displacement relationship of MR damper



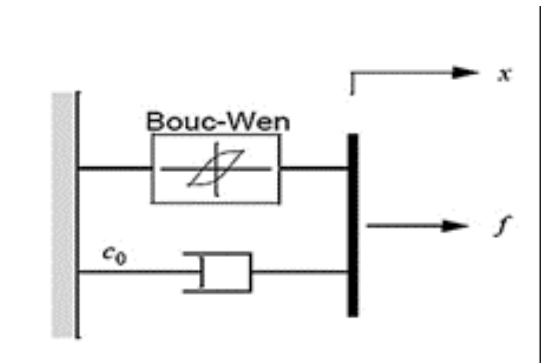
شکل ۷: نمونه‌ای از روابط حلقوی نیرو-سرعت میراگر MR
Fig. 7. An example of velocity-displacement relationship of MR damper

برای مدل‌سازی ساختمان مینا و کنترل‌کننده از نرم افزار متلب^۱ استفاده شده است. به طوری که دیاگرام بلوکی مورد استفاده در نرم افزار سیمولینک^۲ همانند شکل ۸ می‌باشد.

در شکل ۸ در بخش شتاب زمین^۳ اطلاعات مربوط به شتاب نگاشت زلزله‌های مختلف قرار داده می‌شود که با ضرب کردن آن‌ها در هر عدد دلخواه می‌توان شدت آن‌ها را افزایش یا کاهش داد. ساختمان مینای مذکور تحت چهار زلزله با بزرگی‌های مختلف زیر قرار گرفته است:

- 1 MATLAB
- 2 SIMULINK
- 3 Ground Accel

یک مدل ساده از میراگر سیال مغناطیسی که در شکل ۵ نشان داده شده است با نتایج آزمایشگاهی انطباق خوبی داشته [۲۰ و ۲۱] و کرم الدین نیز از آن در کاهش خسارت و جابه‌جایی ساختمان مینا بهره جسته است [۸].



شکل ۵: مدل مکانیکی میراگر سیال مغناطیسی
Fig. 5. Mechanical model of MR damper

معادلات حاکم برای این مدل را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned}
 f &= C_0 \dot{q} + \alpha Z \\
 \dot{Z} &= -\gamma |\dot{q}| |Z|^{(n-1)} - \beta \dot{q} |Z|^n + A \dot{q} \\
 \alpha &= \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u \\
 C_0 &= C_0(u) = C_{0a} + C_{0b} u
 \end{aligned} \tag{2}$$

در این رابطه، q جابه‌جایی نسبی دو سر میراگر و Z یک متغیر تکاملی است که وابستگی پاسخ به تاریخچه آن را نشان می‌دهد. با تنظیم پارامترهای A و γ, β, n می‌توان شیب رفتار خطی و انحنای قسمت گذر از رفتار خطی به تسلیم را مشخص نمود. پارامترهای α و C_0 نیز متغیر بوده و توسط یک کنترل‌کننده قابل تنظیم هستند. در این روابط u خروجی جریان مدار الکتریکی میراگر است که توسط رابطه دینامیکی زیر بر حسب ولتاژ ورودی مدار مشخص می‌شود.

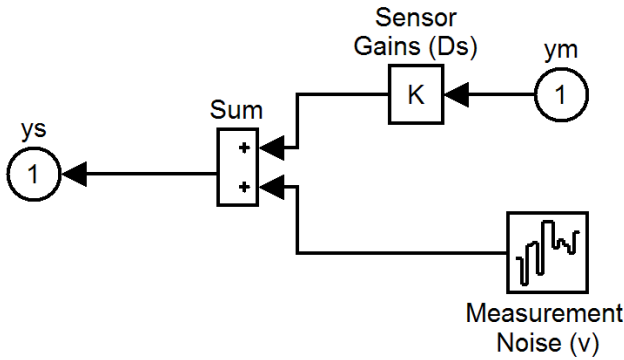
$$\dot{u} = -\eta (u - v) \tag{3}$$

در این مطالعه پارامترهای میراگر طوری انتخاب شده‌اند تا به ازای حداکثر ولتاژ $v = 10$ و ظرفیتی معادل $V_{max} = 1000$ kN داشته باشد:

$$\begin{aligned}
 \alpha_a &= 1.0872 \times 10^5 \text{ (N/cm)}, \quad \alpha_b = 4.9616 \times 10^5 \text{ (N/cm.v)} \\
 \eta &= 50 \text{ sec}^{-1}, \quad C_{0a} = 4.4 \text{ N.sec/cm}, \quad C_{0b} = 44 \text{ N.sec/cm.v} \\
 \gamma &= 3 \text{ cm}^{-1}, \quad \beta = 3 \text{ cm}^{-1}, \quad n = 1, \quad A = 1.2
 \end{aligned}$$

شکل‌های ۶ و ۷ نمونه‌ای از روابط حلقوی نیرو-جابجایی و نیرو-سرعت این میراگر را نشان می‌دهد. این نمودارها پاسخ میراگر را تحت اثر ولتاژ ثابت و جابه‌جایی سینوسی با فرکانس ۱ هرتز و دامنه ۵ سانتیمتر نشان می‌دهند. منحنی خط چین قرمز رنگ که در شکل ۶ مشخص شده است،

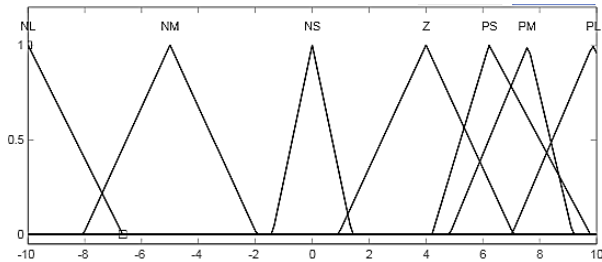
صورت یک خطای گوسی سفید^۶ با گام زمانی ۰/۰۱ ثانیه در نظر گرفته شده است که جذر متوسط مربعات آن برابر ۰/۰۳ ولت می‌باشد.



شکل ۹: نمودار جعبه‌ای حسگر در محیط سیمولینک

Fig. 9. SIMULINK Block Representing the Sensors

طبق شکل‌های ۱۰ و ۱۱ در طراحی کنترل کننده فازی از دو متغیر ورودی هر یک دارای هفت تابع عضویت و یک متغیر خروجی که دارای یازده متغیر خروجی است استفاده شده است. توابع عضویت ورودی پس از طراحی به صورت شکل ۱۰ در آمده‌اند. کنترل کننده فازی در برنامه سیمولینک پیاده‌سازی شده و شتاب دو طبقه مجاور به عنوان ورودی بلوک کنترل کننده فازی در برنامه سیمولینک به کار رفته‌اند. برای ارزیابی شایستگی هر عضو ابتدا کنترل کننده فازی طراحی می‌شود. به دنبال آن سازه تحت اثر زلزله ال سنترو قرار داده شده و در پایان مدت زلزله، شاخص خسارت یک طبقه از سازه ارزیابی می‌شود. این شاخص به صورت نسبت خسارت سازه در حالت کنترل شده به کنترل نشده تعیین شده و از آن برای تعیین شایستگی اعضا استفاده شده است. برای آموزش کنترل کننده‌ها، زلزله ال سنترو با شدت ۲ برابر به کار رفته است.

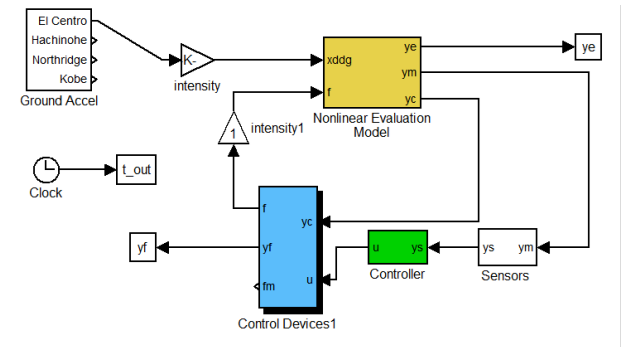


شکل ۱۰: توابع عضویت متغیرهای ورودی

Fig. 10. Membership functions of input variables

- مؤلفه‌ی شمال-جنوب زلزله‌ی ال سنترو^۱ با بزرگی ۰/۵، ۱، ۱/۵.
- مؤلفه‌ی شمال-جنوب زلزله‌ی هاچینو^۲ با بزرگی ۰/۵، ۱، ۱/۵.
- مؤلفه‌ی شمال-جنوب زلزله‌ی نرثریج^۳ با بزرگی ۰/۵، ۱.
- مؤلفه‌ی شمال-جنوب زلزله‌ی کوبه^۴ با بزرگی ۰/۵، ۱.

زلزله‌های ال سنترو و هاچینو از نوع زلزله‌های حوزه دور و زلزله‌های نرثریج و کوبه از نوع حوزه نزدیک به حساب می‌آیند. شتاب ماکزیمم این زلزله‌ها به ترتیب برابر با ۳/۴۱۷، ۲/۲۵۰، ۲/۲۶۷۶ و ۸/۱۷۸۲ متر بر مجذور ثانیه خواهد بود.



شکل ۸: دیاگرام بلوکی مدل‌سازی کنترل ارتعاش

Fig. 8. Block diagram of vibration control modeling

۵- بررسی نتایج عددی

بلوک مدل ارزیابی غیرخطی^۵ با تحلیل ساختمان تحت اثر تحریکات لرزه‌ای و بردار نیروی کنترل سه بردار پاسخ ارائه می‌دهد: بردار مربوط به خروجی‌های اندازه‌گیری شده برای کنترل کننده و محاسبه‌ی نیروی کنترل مورد نیاز، بردار مربوط به پاسخ‌های سازه که برای بررسی عملکرد سیستم به کار می‌رود و بردار پاسخ‌های سازه در محل نصب وسیله‌ی کنترل کننده که به عنوان ورودی برای وسیله کنترل کننده می‌باشد (شکل ۹).

مدل ریاضی ابزار به صورت یک رابطه استاتیکی ساده به شکل زیر نوشته می‌شود:

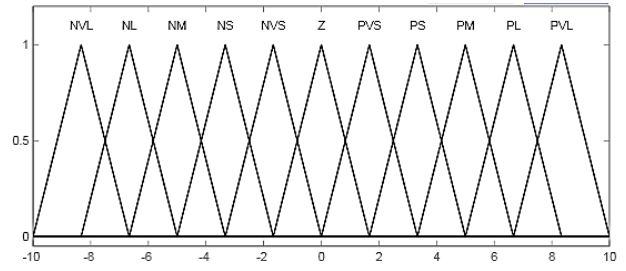
$$y^s = D_s y_m + v \quad (۴)$$

در این رابطه، D ضریب حساسیت ابزار نامیده می‌شود که پاسخ سازه را به ولت تبدیل می‌کند. در این تحقیق حساسیت شتاب‌سنج‌ها برابر $(1g=9.81 \text{ m/s}^2)$ در نظر گرفته شده است. خطای اندازه‌گیری نیز به

- 1 El Centro
- 2 Hachinohe
- 3 Northridge
- 4 Kobe
- 5 Model Nonlinear Evaluation

6 White Gaussian Noise

مقادیر زبانی مورد استفاده در توابع عضویت ورودی به ترتیب شامل منفی بزرگ (NL)، منفی متوسط (NM)، منفی کوچک (NS)، صفر (Z)، مثبت کوچک (PS)، مثبت متوسط (PM) و مثبت بزرگ (PL) و خروجی به ترتیب کوچک کوچک (SS)، کوچک متوسط (SM)، کوچک بزرگ (SL)، متوسط کوچک (MS)، متوسط متوسط (MM)، متوسط بزرگ (LM)، بزرگ کوچک (LS)، بزرگ متوسط (LM)، بزرگ بزرگ (LL) و خیلی بزرگ (VL) می‌باشد. پایگاه قواعد در جدول ۱ مشخص



شکل ۱۱: توابع عضویت متغیرهای خروجی

Fig. 11. Membership functions of output variables

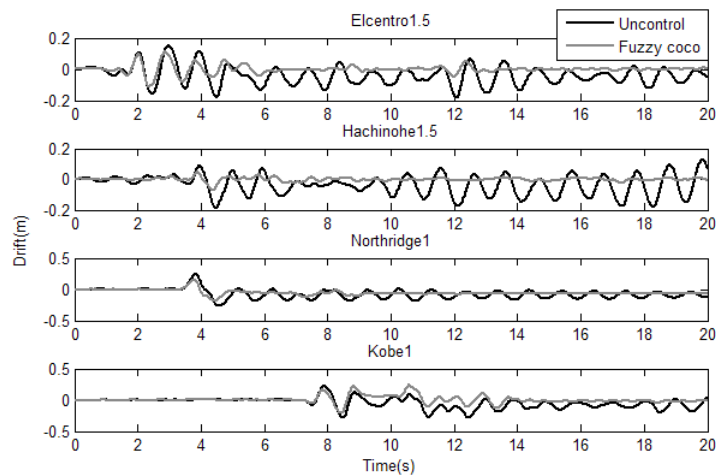
جدول ۱: پایگاه قواعد مورد استفاده در توابع عضویت ورودی

Table 1. The rules base used in the input membership functions

		شتاب						
		NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
قاعده	NL	LL	VL	SS	VL	ML	LM	VL
	NM	ML	MM	VL	ML	LL	MM	VL
	NS	ML	LM	LL	VL	LS	LL	LS
	Z	ML	MM	LL	ZR	LS	LL	VL
	PS	LL	VL	VL	VL	LM	MM	SL
	PM	MM	VL	SL	LS	LM	ML	VL
	PL	LM	LM	LS	LM	LS	LL	LL

برای اینکه بتوان عملکرد کنترل کننده را مورد بررسی قرار داد نسبت خسارت سازه در حالت کنترل شده به کنترل نشده به صورت جدول ۲ می‌باشد.

شده است. اثر کنترل کننده فازی در کاهش جابه‌جایی بام سازه نسبت به حالت کنترل نشده در شکل ۱۲ نشان داده شده است که کنترل کننده فازی هم‌تکاملی همکار باعث کاهش قابل ملاحظه‌ای در میزان تغییرشکل‌های ماندگار سازه شده است.



شکل ۱۲: اثر کنترل کننده فازی هم‌تکاملی همکار در کاهش جابه‌جایی بام سازه

Fig. 12. Effect of Fuzzy logic controller cooperative evolutionary in reducing structural roof displacement

۶- نتیجه گیری

در این مقاله کنترل خسارت سازه‌ها در مقابل زلزله به روش کنترل نیمه‌فعال با کنترل‌کننده فازی هم‌تکاملی همکار میراگر سیال مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس نتایج این مطالعه، کنترل‌کننده فازی هم‌تکاملی همکار اثر قابل توجهی در کاهش خسارت سازه داشته است به طوری که باعث شده میزان خسارت سازه تحت زلزله‌های ال‌سنترو با بزرگی ۰/۵ و ۱، هاچینو با بزرگی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ و نرتریج با بزرگی ۰/۵، برابر، به کلی صفر گردد و برای زلزله‌های ال‌سنترو با بزرگی ۱/۵، نرتریج با بزرگی ۱ و کوبه با بزرگی ۰/۵ و ۱ برابر به ترتیب ۵۱/۷، ۴۲/۱، ۳۸/۸ و ۳۷/۷ درصد کاهش خسارت داشته باشد. همچنین کنترل‌کننده فازی هم‌تکاملی همکار باعث کاهش قابل ملاحظه‌ای در میزان تغییرشکل‌های ماندگار سازه شده است. از مقایسه کنترل‌کننده فازی هم‌تکاملی همکار با سایر کنترل‌کننده‌های بررسی شده در این تحقیق مشاهده گردید که کنترل‌کننده مورد مطالعه به طور محسوسی سبب کاهش خسارت شده است.

مراجع

- [1] G.W. Housner, L.A. Bergman, T.K. Caughey, A.G. Chassiakos, R.O. Claus, S.F. Masri, R.E. Skelton, T. Soong, B. Spencer, J.T. Yao, Structural control: past, present, and future, *Journal of engineering mechanics*, 123(9) (1997) 897-971.
- [2] C.H. Loh, L. Wu, P. Lin, Displacement control of isolated structures with semiactive control devices, *Structural Control and Health Monitoring*, 10(2) (2003) 77-100.
- [3] B. Samali, M. Al-Dawod, Performance of a five-storey benchmark model using an active tuned mass damper and a fuzzy controller, *Engineering Structures*, 25(13) (2003) 1597-1610.
- [4] M. Al-Dawod, B. Samali, K. Kwok, F. Naghdy, Fuzzy controller for seismically excited nonlinear buildings, *Journal of Engineering Mechanics*, 130(4) (2004) 407-415.
- [5] B. Samali, M. Al-Dawod, K.C. Kwok, F. Naghdy, Active control of cross wind response of 76-story tall building using a fuzzy controller, *Journal of engineering mechanics*, 130(4) (2004) 492-498.
- [6] D.G. Reigles, M.D. Symans, Supervisory fuzzy control of a base-isolated benchmark building utilizing a neuro-fuzzy model of controllable fluid viscous dampers, *Structural Control and Health Monitoring*, 13(2-3) (2006) 724-747.
- [7] S. Pourzeynali, H. Lavasani, A. Modarayi, Active control of high rise building structures using fuzzy logic and genetic algorithms, *Engineering Structures*, 29(3) (2007) 346-357.

جدول ۲: نسبت خسارت سازه در حالت کنترل شده به کنترل نشده

Table 2. Structural damage ratio in controlled to uncontrolled mode

زلزله	شدت	خسارت کنترل نشده	Fuzzy CoCo		درصد کاهش
			نسبت خسارت	کنترل شده	
ال سنترو	۰/۵	۰/۱۱	۰	۰	۱۰۰
	۱	۰/۱۶۶۶	۰	۰	۱۰۰
هاچینو	۰/۵	۰	۰	۰	۱۰۰
	۱	۰/۱۵۸۶	۰	۰	۱۰۰
کوبه	۰/۵	۰/۲۱۳۱	۰/۱۳۰۴	۰/۶۱۲	۳۸/۸
	۱	۰/۴۲۶۴	۰/۲۶۵۶	۰/۶۲۳	۳۷/۷
نرتریج	۰/۵	۰/۲۵۷۷	۰	۰	۱۰۰
	۱	۰/۳۷۹۴	۰/۲۱۹۶	۰/۵۷۹	۴۲/۱

جدول ۳ مقایسه‌ای بین کنترل‌کننده فازی هم‌تکاملی همکار با کنترل‌کننده‌های طراحی شده توسط کرم‌الدین [۸] انجام شده است که این کنترل‌کننده به طور محسوسی سبب کاهش خسارت شده است. در روش GFRl پارامترهای توابع عضویت انتخاب و پارامترهای بخش نتیجه قوانین توسط ژنتیک الگوریتم آموزش داده شده‌اند. در GFMRL علاوه بر آموزش پارامترهای بخش نتیجه قوانین، تعدادی از پارامترهای توابع عضویت متغیرهای ورودی و خروجی هم تعیین می‌شوند و در GFSL به طور همزمان پارامترهای بخش مقدمه و نتیجه قوانین و پارامترهای توابع عضویت توسط الگوریتم ژنتیک آموزش داده شده‌اند.

جدول ۳: مقایسه خسارت کنترل‌کننده فازی هم‌تکاملی همکار با

کنترل‌کننده‌های طراحی شده توسط کرم‌الدین [۸]

Table 3. Damage ratio comparison under different earthquakes

زلزله	شدت	Fuzzy CoCo	GFRl	GFMRL	GFSL
ال سنترو	۰/۵	۰	۰	۰	۰
	۱	۰	۰	۰	۰
	۱/۵	۰/۴۸۳	۰/۵۶۴	۰/۵۱۲	۰/۵۱۲
هاچینو	۰/۵	۰	۰	۰	۰
	۱	۰	۰	۰	۰
	۱/۵	۰	۰/۴۰۱	۰	۰
کوبه	۰/۵	۰/۶۲۳	۰/۹۴	۰/۸۵۴	۰/۷۳۴
	۱	۰/۶۱۲	۰/۶۵۷	۰/۶۴۴	۰/۶۶۹
	۱/۵	۰	۰	۰	۰
نرتریج	۰/۵	۰	۰	۰	۰
	۱	۰/۵۷۹	۰/۷۱۳	۰/۶۷۵	۰/۶۹۵

- Genetic Algorithm (GA), in: Advances in computer, communication, control and automation, Springer, 2011, pp. 583-590.
- [15] C.A. Pena-Reyes, M. Sipper, Fuzzy CoCo: A cooperative-coevolutionary approach to fuzzy modeling, IEEE Transactions on fuzzy systems, 9(5) (2001) 727-737.
- [16] M.A. Potter, The design and analysis of a computational model of cooperative coevolution, Citeseer, 1997.
- [17] M.A. Potter, K.A.D. Jong, Cooperative coevolution: An architecture for evolving coadapted subcomponents, Evolutionary computation, 8(1) (2000) 1-29.
- [18] M.S. Williams, R.G. Sexsmith, Seismic damage indices for concrete structures: a state-of-the-art review, Earthquake spectra, 11(2) (1995) 319-349.
- [19] Y. Ohtori, R. Christenson, B. Spencer Jr, S. Dyke, Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings, Journal of Engineering Mechanics, 130(4) (2004) 366-385.
- [20] S. Dyke, B. Spencer Jr, M. Sain, J. Carlson, Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction, Smart materials and structures, 5(5) (1996) 565.
- [21] G. Yang, B. Spencer Jr, J. Carlson, M. Sain, Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations, Engineering structures, 24(3) (2002) 309-323.
- [8] A. Khajekaramodin, Earthquake damage control of structures using genetic fuzzy algorithms, Ferdowsi University, 2010 (In persian: "کنترل خسارت: کرم الدین، عباس؛" رساله دکتری، دانشگاه سازه ها در برابر زلزله به روش ژنتیک فازی"، (فردوسی مشهد، 1388).
- [9] Karamodin, Irani, Baghban, The effect of fuzzy controller on reducing the damage to structures, in: Sixth National Congress on Civil Engineering, 2011 (In persian: "کرم الدین، عباس؛ ایرانی، فریدون؛ باغبان خیابانی، امیر؛" اثر کنترل کننده فازی بر کاهش میزان خسارت سازه ها"، ششمین کنگره ملی مهندسی (عمران، 1390).
- [10] M.E. Uz, M.N. Hadi, Optimal design of semi active control for adjacent buildings connected by MR damper based on integrated fuzzy logic and multi-objective genetic algorithm, Engineering Structures, 69 (2014) 135-148.
- [11] T.J. Ross, Fuzzy Logic with Engineering Applications, (2004).
- [12] C. Oscar, H. Francisco, H. Frank, Genetic Fuzzy Systems: Evolutionary tuning and learning of fuzzy knowledge bases, World Scientific, 2001.
- [13] Z.-S. Huang, C. Wu, D.-S. Hsu, Semi-active fuzzy control of mr damper on structures by genetic algorithm, Journal of Mechanics, 25(1) (2009) N1-N6.
- [14] M.R. Elhami, C. Daneshdoost, D. Madady, Semi-active Control of Structure Vibrations with MR Damper Using Fuzzy Control System (FLC) and Optimization through

Please cite this article using:

H. Akramizadeh, S.M. Zahrai, M.S. Bozorgvar, Cooperative Coevolution fuzzy Control of MR Damper for Damage Reduction of Structures. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 49(4) (2018) 769-778.

DOI: 10.22060/ceej.2017.11240.4992

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



