

Introducing the modified Kwok model for magnetorheological dampers

Mehdi Rashidi Meybodi¹, Arash Bahar^{2*}

1- Ph.D. Candidate in Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

ABSTRACT

The present multidisciplinary study focuses on providing a model for magnetorheological dampers. First, it presented a brief look at the existing models of such dampers, and then to achieve an invertible, efficient, and at the same time simple model, the Kwok model has been selected and has changed appropriately. A new identification algorithm based on meta-heuristic methods has been proposed to identify the model, which has used periodic excitation. This algorithm has high detection capability with the minimum necessary tests. To evaluate the proposed model and identification method, a large-scale magnetorheological damper, which is placed as a black box model in the benchmark base-isolated building introduced by the US Structural Control Committee, has been used as a virtual laboratory. The whole process has been investigated in the Simulink environment of MATLAB. The performance of the proposed model was compared with the original one under seven near-fault earthquakes. The results show that the modified Kwok model is more accurate than the original one. It can predict force-displacement and force-velocity behaviors correctly. Also, since the proposed model is invertible, it is easily applicable in practical issues of structural control. It provides the possibility of managing control devices, so is superior to the Kwok model.

ARTICLE INFO

Receive Date: 29 July 2021

Revise Date: 27 October 2021

Accept Date: 25 November 2021

Keywords:

Magnetorheological dampers
Identification
Meta-heuristic optimization
Base Isolated benchmark
building
Inverse model

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2021.296654.2513>

*Corresponding author: Arash Bahar.
Email address: bahar@guilan.ac.ir

معرفی مدل کوآک اصلاح شده برای میراگرهای حاوی سیال مغناطیسی

مهدی رشیدی میبیدی^۱، آرش بهار^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری مهندسی سازه، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۲- استادیار، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

چکیده

مطالعه چند وجهی حاضر، بر ارائه مدلی برای میراگرهای حاوی سیال مغناطیسی متمرکز شده است. از این رو نخست نگاهی اجمالی به مدل های موجود اینگونه میراگرها شده و سپس برای دستیابی به مدلی وارون پذیر، کارآمد و در عین حال ساده برای آنها، مدل کوآک انتخاب و تغییراتی در آن اعمال شده است. نهایتاً برای شناسایی پارامترهای تشکیل دهنده مدل، الگوریتم شناسایی جدیدی، بر اساس روش های فراابتکاری، ارائه گردیده است که از تحریکات متناوب در روند شناسایی خود بهره می گیرد. برای ارزیابی آنچه پیشنهاد شده، از یک میراگر حاوی سیال مغناطیسی بزرگ- مقیاسی، که به صورت یک مدل جعبه سیاه در ساختمان معیار کف- جدای ارائه شده توسط کمیته کنترل سازه آمریکا معرفی شده است، به عنوان آزمایشگاهی مجازی استفاده شده. مسئله در محیط سیمولینک نرم افزار متلب اجرا شده است. رفتار مدل پیشنهادی تحت هفت زلزله نزدیک گسل بررسی و با مدل اصلی مقایسه شد. نتایج نشان می دهد که مدل پیشنهادی نسبت به مدل اصلی کوآک دارای دقت بیشتری است و به خوبی می تواند رفتار نیرو- تغییرمکان و نیرو- سرعت میراگر را پیش بینی کند. همچنین با توجه به اینکه مدل پیشنهادی دارای قابلیت وارون پذیری است، امکان استفاده در مسائل عملی و اجرایی کنترل سازه را داشته و از این نظر نیز نسبت به مدل کوآک برتری دارد.

کلمات کلیدی: میراگرهای حاوی سیال مغناطیسی، شناسایی، بهینه سازی فراابتکاری، سازه کف- جدای معیار، مدل وارون پذیر.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2021.296654.2513	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2021.296654.2513	۱۴۰۱/۰۶/۳۱	۱۴۰۰/۰۸/۰۴	۱۴۰۰/۰۹/۰۴	۱۴۰۰/۰۸/۰۵	۱۴۰۰/۰۵/۰۷
				*نویسنده مسئول:		
				پست الکترونیکی:		
				آرش بهار		
				bahar@guilan.ac.ir		

۱- مقدمه

ابزارهای کنترل نیمه فعال در کنترل پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها مناسب عمل می‌کنند. آنها انرژی ارتعاشی را، بدون آنکه آن را در سازه بازتوزیع کنند، جذب و یا حذف کرده، و به این ترتیب از اثرات نامطلوب ناپایداری در سازه جلوگیری می‌کنند. همچنین، ترکیبی از ویژگی‌های مثبت ابزارهای فعال و غیرفعال، یعنی وفق‌پذیری و قابلیت اعتماد را با هم دارند. یکی از موفق‌ترین ابزارهای این گروه از نیمه فعال‌ها، میراگر حاوی سیال مغناطیسی^۱ است. این میراگر شامل سیالی است که ذرات بسیار ریز کربونیل‌های آهن در آن معلق‌اند. چنانچه میدان مغناطیسی به این سیال حاوی ذرات معلق اعمال شود، می‌تواند از حالت روان، با ویسکوزیته خطی، به حالت نیمه جامد، تبدیل شود [۱]. به دلیل این خاصیت، میراگر حاوی سیال مغناطیسی دارای رفتاری به شدت غیرخطی است، در نتیجه، شبیه‌سازی و توصیف مشخصات دینامیکی آن بوسیله معادلات ریاضی با دشواری زیادی مواجه است. در طراحی کنترلر برای این میراگرها، مدل دینامیکی انتخاب شده می‌تواند بر عملکرد مطلوب آنها در کاهش ارتعاشات سازه بسیار تأثیرگذار باشد. برای سیال مغناطیسی، از جمله مهم‌ترین متغیرهایی که طی فرآیند رئولوژیکی بر نیروی استهلاکی تولیدی میراگر اثرگذار است می‌توان به پارامترهایی مانند شدت میدان مغناطیسی اعمالی، مقدار جابجایی و سرعت میراگر، خصیصه دینامیک داخلی آن و عاملی که شدت میدان مغناطیسی اعمالی را تنظیم کند، مانند ولتاژ یا شدت جریان، اشاره کرد. از اینرو در این مقاله، ابتدا مدل‌های مختلف این میراگر که تاکنون معرفی شده‌اند به صورت جامع و مختصر توضیح داده می‌شوند و سپس به یکی از مدل‌های ساده و دقیق آن یعنی مدل کوآک^۲ [۲] پرداخته خواهد شد. مدل میراگر، علاوه بر دو خاصیت ذکر شده یعنی دقت و سادگی، باید وارون‌پذیر باشد تا امکان کاربرد در منطق‌های کنترلی پیوسته را ممکن سازد. یکی از مراحل کلیدی و غالباً پیچیده در یک الگوریتم منسجم کنترل، مدیریت ابزار کنترل برای اعمال نیرویی معادل نیروی کنترل بهینه در لحظه است. بسیاری از مطالعات، با چشم‌پوشی از این امر و با فرض عملکرد کاملاً ایده‌آل برای ابزار، محدودیت‌های ناشی از کاربرد عملی ساختار کنترل در بهبود عملکرد ساختمان‌ها را نادیده می‌گیرند. برای رفع این اشکال بنیادین، لازم است تا در الگوریتم پیشنهادی و همزمان با محاسبه نیروی کنترل بهینه، روش مدیریت ابزار کنترل برای بازتولید لحظه‌ای این مقدار نیرو ارائه گردد و نشان داده شود که انحراف معقولی بین مقدار درخواستی نیروی کنترل و مقدار تولیدشده در ابزار وجود دارد. برای انجام این مهم، الگوریتم‌های کنترلی که هدف آنها، مدیریت لحظه‌ای و پیوسته ابزار است و از روش‌های ساده روشن - خاموش استفاده نمی‌کنند، نیازمند ارائه مدلی دوم برای ابزار هستند که ارتباط پارامتر اصلی مدیریت ابزار (ولتاژ یا شدت جریان) را با مقدار نیروی درخواستی کنترل و پارامترهای حرکتی ابزار (سرعت، جابجایی و شتاب) مشخص سازد. این مدل را اصطلاحاً مدل وارون گویند. در این پژوهش، با استفاده از تغییراتی مطلوب، ابتدا مدل کوآک، اصلاح شده و سپس، مدل وارون آن نیز پیشنهاد شده است. در روند شناسایی مدل میراگر و برای دستیابی به مدل اصلاح شده، از تحریکات متناوب^۳ استفاده شده. هم چنین، الگوریتم بهینه‌سازی جدیدی پیشنهاد شده که از توانایی بالایی در تعیین پارامترهای مجهول مدل برخوردار است. آزمون‌های عددی بر روی یک میراگر حاوی سیال مغناطیسی بزرگ - مقیاس^۴ انجام شده‌اند. این میراگر به عنوان یک مدل جعبه سیاه در ساختمان معیار کف - جدا^۵ بکار گرفته شده و نقش یک آزمایشگاه مجازی را، در این تحقیق، ایفا می‌کند.

در ادامه، در بخش ۲ به تشریح مدل‌های موجود میراگر حاوی سیال مغناطیسی، با تمرکز بر روی مدل‌های پارامتریک آن، پرداخته خواهد شد. در بخش ۳، مدل کوآک و ساختارش شرح داده می‌شود. بخش ۴، روند دستیابی به مدل کوآک اصلاح شده و تحلیل نتایج و مقایسه بین مدل‌های اولیه و اصلاح شده را تشریح می‌کند. همچنین تحریک متناوب مورد استفاده و الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی برای شناسایی پارامترهای مدل، توصیف می‌شوند. بخش ۵ مربوط به استخراج مدل وارون میراگر است. در بخش ۶ نیز نتیجه‌گیری ارائه شده است.

¹ Magnetorheological damper

² Kwok

³ T-periodic

⁴ Large-scale

⁵ Base-isolated benchmark building

۲- مدل های میراگر حاوی سیال مغناطیسی

به منظور شبیه سازی رفتار میراگر حاوی سیال مغناطیسی، مدل های متنوعی تاکنون پیشنهاد شده است و بسیاری از آنها نیز توسعه یافته اند. مدل ها را می توان به دو دسته کلی مدل های شبه استاتیکی و مدل های دینامیکی تقسیم کرد. مدل های شبه استاتیکی، عمدتاً بر اساس مطالعه تنش تسلیم غیرنیوتنی جریان سیال با استفاده از مدل هایی مانند مدل بینگهام^۶ شکل می گیرند. این مدل ها تنها رفتار نیرو- تغییر مکان میراگر را می توانند توصیف کنند و عموماً از بیان مناسب رابطه هیستریزس نیرو- سرعت آنها ناتوانند [۳]. مدل های دینامیکی به دو دسته مدل های دینامیکی پارامتریک و غیر پارامتریک تقسیم می شوند. مدل های شبکه عصبی [۴]، فازی [۵] و مدل های چند جمله ای [۶] از انواع مدل های غیر پارامتریک هستند که بسیار پیچیده اند [۷]. تمرکز این مقاله بر روی مدل های دینامیکی پارامتریک است. در ادامه مروری جامع و البته با رعایت اختصار، به آنها خواهد شد.

۲-۱ ساختارهای مبتنی بر مدل بینگهام

در این نوع مدل سازی، اغلب از نمودار تنش- کرنش مدل ویسکو پلاستیک بینگهام برای توصیف رفتار سیال مغناطیسی استفاده می شود [۸] و در آن چنانچه تنش τ از تنش تسلیم وابسته به حوزه τ_y بزرگتر باشد، سیال موجود در میراگر با معادله بینگهام به صورت رابطه (۱) توصیف می شود:

$$\tau = \tau_y + \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

که در آن، η ویسکوزیته سیال و $\dot{\gamma}$ نرخ کرنش برشی است. برای تنش های کمتر از تنش تسلیم، مصالح به صورت ویسکوالاستیک رفتار می کنند. مدل های مبتنی بر مدل بینگهام بطور خلاصه از این قرارند:

- **مدل بینگهام استاندارد:** اسپنسر^۷ و همکاران [۱۹] مدل مکانیکی ایده آل شده ای را که استن وی^۸ و همکاران [۹] برای بیان رفتار یک میراگر حاوی سیال الکتریکی^۹ استفاده کرده بودند، پیشنهاد کردند.
- **مدل گاموتا^{۱۰} و فیلپسکو^{۱۱}:** گاموتا و فیلپسکو [۱۰] بسطی از مدل بینگهام را برای پیش بینی رفتار سیالات الکتریکی پیشنهاد کردند که این مدل ویسکوالاستیک- پلاستیک توسط اسپنسر و همکاران [۸] برای میراگر حاوی سیال مغناطیسی معرفی و آزمایش شد.
- **مدل پلاستیک بینگهام:** ورلی^{۱۲} و همکاران [۱۱] مدل پلاستیک بینگهام را معرفی کردند که مشابه مدل بینگهام استاندارد بود.
- **مدل بینگهام اصلاح شده:** ژو^{۱۳} و کیو^{۱۴} [۱۲] مدل بینگهام اصلاح شده ای را پیشنهاد کردند که ترکیبی از مدل بینگهام استاندارد و یک فنر است.
- **مدل بهبود یافته بینگهام:** اوکیوزی^{۱۵} و همکاران [۱۳] مدلی را بر اساس مدل بینگهام پیشنهاد دادند که در آن، ضریب میرایی ویسکوز به صورت خطی با سرعت تغییر نمی کند و رابطه غیرخطی بین آنها وجود دارد.
- **مدل هیستریزس بینگهام غیرخطی:** ژانگ^{۱۶} و هوآنگ^{۱۷} [۱۴] یک مدل هیستریزس غیرخطی را بر اساس مدل بینگهام پیشنهاد کردند.

⁶ Bingham

⁷ Spencer

⁸ Stanway

⁹ Electrorheological

¹⁰ Gamota

¹¹ Filisko

¹² Wereley

¹³ Zhou

¹⁴ Qu

¹⁵ Occhiuzzi

¹⁶ Zhang

¹⁷ Huang

- مدل بینگهام تنظیم‌شده هیستریزیس: با استفاده از مدل بینگهام استاندارد، سلطان^{۱۸} و همکاران [۱۵] با بهره‌گیری از تکنیک منظم‌سازی^{۱۹} [۱۶]، مدل بینگهام تنظیم‌شده هیستریزیس را معرفی کردند که دارای یک پارامتر تنظیم است و می‌تواند به صورت نمایی رشد نیروی میرایی را کنترل کند.

۲-۲ ساختارهای مبتنی بر مدل بوک-ون^{۲۰}

معادله بوک-ون عبارتی است که به‌طور گسترده برای مدل‌سازی سیستم‌های هیستریزیس استفاده می‌شود. این مدل در ابتدا بوسیله بوک [۱۷] پیشنهاد شد، و سپس بوسیله ون [۱۸] تعمیم داده شد. نیروی تولید شده بوسیله این مدل برای سیستم‌های هیستریزیس غیرخطی از رابطه (۲) پیروی می‌کند:

$$f(x, \dot{x}) = g(x, \dot{x}) + \alpha Z \quad (2)$$

(x, \dot{x}) مؤلفه غیر هیستریزیس رفتار است و می‌تواند شامل عبارات الاستیک، ویسکوز یا هر دو به‌طور همزمان باشد. x و \dot{x} متناظراً تغییر مکان و سرعت دوسر میراگر هستند. α ضریب مقیاسی است برای ترم هیستریزیس مدل. Z نیز مؤلفه هیستریزیس مدل است که به تاریخچه زمانی تغییر مکان وابسته بوده و از رابطه (۳) حاصل می‌شود:

$$\dot{Z} = -\gamma Z |\dot{x}| |Z|^{n-1} - \beta \dot{x} |Z|^n + A \dot{x} \quad (3)$$

در این عبارت، β ، γ ، n و A پارامترهایی هستند که شکل چرخه هیستریزیس را مشخص می‌کنند. مدل‌های شکل گرفته از مدل بوک-ون برای میراگر حاوی سیال مغناطیسی بطور خلاصه عبارتند از:

- **مدل بوک-ون استاندارد:** اسپنسر و همکاران [۱۹] این مدل را بر اساس مدل بوک-ون پیشنهاد دادند که علاوه بر عبارت هیستریزیس، عبارت‌های الاستیک و ویسکوز نیز دارد.
- **مدل بوک-ون اصلاح‌شده یا فنومنولوجیکال:** مدل بوک-ون استاندارد نتوانست رفتار هیستریزیس میراگر حاوی سیال مغناطیسی را در منحنی نیرو-سرعت به‌خوبی نشان دهد. از اینرو، اسپنسر و همکاران [۱۹] نمونه اصلاح‌شده‌ای از آنرا پیشنهاد کردند.
- **مدل بوک-ون در مود برشی میراگر:** یی^{۲۱} و همکاران [۲۰] مدلی را برای میراگر حاوی سیال مغناطیسی در مود برشی (میراگر دارای صفحات موازی) به جای حالت سیلندری متداول پیشنهاد کردند.
- **مدل بوک-ون اصلاح‌شده با المان جرم:** این مدل که به‌وسیله یانگ^{۲۲} و همکاران [۲۱] برای یک میراگر بزرگ-مقیاس پیشنهاد شده بود، پدیده لرزش سیال الکترومغناطیسی و اثر نازک شدن برشی و اینرسی سیال را در نظر می‌گیرد.
- **مدل بوک-ون وابسته به جریان:** دومینگوئز^{۲۳} و همکاران [۲۲] مدل بوک-ون‌ای را که در آن جریان به عنوان یک متغیر در مدل لحاظ می‌شود، پیشنهاد کردند.

¹⁸ Soltan

¹⁹ Regularization

²⁰ Bouc-Wen

²¹ Yi

²² Yang

²³ Dominguez

- مدل بوک- ون وابسته به جریان- دامنه- فرکانس : مدل معرفی شده [۲۲] برای جریان‌های پایین تر نتوانست رفتار میراگر را به خوبی توصیف کند. بنابراین دومینگوئز و همکاران [۲۳] مدل دیگری را بر اساس مدل بوک- ون پیشنهاد کردند که در آن جریان، فرکانس و دامنه تحریک به عنوان متغیر در مدل داخل می‌شوند.
- مدل بوک- ون اصلاح شده سیگموئید^{۲۴} : ما^{۲۵} و همکاران [۲۴] دریافتند که نیروی میرایی می‌تواند در یک فرم کلی، شامل دو تابع مستقل، تابع توصیف کننده رفتار هیستریزس و تابع جریان از نوع سیگموئیدی، توصیف شود.
- مدل بوک- ون نامتقارن^{۲۶} : از آنجا که ممکن است رفتار هیستریزس نامتقارن در پاسخ نیرو- سرعت بعضی از میراگرهای حاوی سیال مغناطیسی دیده شود، کوآک و همکاران [۲۵] مدل نامتقارنی از مدل بوک- ون را ارائه کردند.
- مدل بوک- ون نرمال شده نسخه ۱ : در مدل بوک- ون اصلی، تعدادی از پارامترهای مدل غیر مستقل اند. به منظور حذف این افزونگی^{۲۷}، یک فرم نرمال شده از این مدل در [۲۶-۲۹] ارائه شده است.
- مدل بوک- ون نرمال شده نسخه ۲ : در مدل معرفی شده به وسیله دومینگوئز و همکاران [۲۳] تعداد پارامترهای مدل بسیار زیاد است. این امر باعث پیچیده شدن روند شناسایی و مدل سازی میراگر حاوی سیال مغناطیسی می‌شود. از این رو، آنها [۳۰] بر اساس همان مدل، مدل جدیدی با تعداد پارامترهای کمتر و دقت بیشتر ارائه کردند.
- مدل فنونولوجیکال نرمال شده : بای^{۲۸} و همکاران [۳۱] از طریق ادغام مفهوم نرمال کردن مدل بوک- ون اصلاح - شده [۸] مدل فنونولوجیکال (پدیده شناسانه) نرمال شده را معرفی کردند.
- مدل بازسازی شده : این مدل را نیز بای و همکاران [۳۱] پیشنهاد دادند، که الهام گرفته از مدل فنونولوجیکال بوک- ون است.

۳-۲ مدل های دومیرایی^{۲۹}

این مدل‌ها رفتار میراگر را در دو ناحیه پیش از تسلیم و پس از آن، همانند رابطه (۴)، بیان می‌کنند که به صورت خلاصه در ادامه آورده شده‌اند.

$$f(x, \dot{x}) = \begin{cases} C_{post}\dot{x} + F_y \\ C_{pre}\dot{x} \\ C_{post}\dot{x} - F_y \end{cases} \quad (4)$$

در این عبارات، C_{pre} و C_{post} به ترتیب ضرایب میرایی پیش و پس از تسلیم و F_y نیروی متناظر با تسلیم میراگر است.

- مدل دومیرایی غیرخطی : ورلی و همکاران [۳۲-۳۴] مدل دو میرایی غیرخطی را بر اساس فرض استنوی و همکاران [۹] پیشنهاد کردند و در آن به جای فرض اینکه مصالح در وضعیت پیش از تسلیم صلب در نظر گرفته شوند، فرض کردند که مصالح در هر دو وضعیت پیش از تسلیم و پس از تسلیم به صورت پلاستیک باشند.
- مدل دومیرایی هیستریزس غیرخطی : این مدل که توسط ورلی و همکاران [۳۲-۳۶] پیشنهاد شد بسطی از مدل دو میرایی غیرخطی است که اصلاحی در ناحیه پیش از تسلیم آن انجام شده است.

²⁴ Sigmoid

²⁵ Ma

²⁶ Sigmoid

²⁷ Redundancy

²⁸ Bai

²⁹ Bi-viscous

- مدل آرک تانژانت^{۳۰} هیستریزیس غیرخطی: انگ^{۳۱} و همکاران [۳۷] از تابع آرک تانژانت در روابط توصیف میراگر در مدل چند قطعه‌ای خود استفاده کردند.
- مدل پارامتر متمرکز از جریان سیال: این مدل به‌وسیله سیمز^{۳۲} و همکاران [۳۸] پیشنهاد شد. در این مدل، حرکت سیال به‌وسیله یک مدل پارامتریک متمرکز، که مستقیماً وابسته به هندسه ابزار است، می‌تواند توصیف شود.

۲-۴ مدل‌های ویسکوالاستیک - پلاستیک

نتایج مطالعه ویز^{۳۳} [۳۹] و جلی^{۳۴} [۴۰] بیان می‌کند که سیال مغناطیسی در ناحیه پیش از تسلیم به‌صورت ویسکوالاستیک رفتار می‌کند و در ناحیه پس از تسلیم دارای رفتار ویسکوپلاستیک است. بر این اساس، مدل‌های ویسکوالاستیک-پلاستیک پدید آمده‌اند که انواع آن به صورت خلاصه ذکر شده‌اند.

- مدل ویسکوالاستیک-پلاستیک غیرخطی: کاما^{۳۵} و ورلی [۴۱ و ۴۲] این مدل را در ابتدا برای میراگرهای حاوی سیال الکتریکی پیشنهاد کردند و سپس به میراگرهای حاوی سیال مغناطیسی بسط دادند [۳۳].
- مدل ویسکوالاستیک-پلاستیک ورلی و همکارانش: ورلی و همکاران [۴۳ و ۴۴] مکانیزم‌های پیش از تسلیم و پس از تسلیم که در مدل ویسکوالاستیک-پلاستیک وجود داشت را با تغییر در چگونگی انتقال از ناحیه پیش از تسلیم به ناحیه پس از تسلیم، اصلاح کردند و برای میراگر حاوی سیال مغناطیسی پیشنهاد دادند.
- مدل ویسکوالاستیک-پلاستیک لی و همکاران: لی^{۳۶} و همکاران [۴۵] نیز مشابه مدل ورلی و همکاران، در نواحی پیش از تسلیم و پس از تسلیم مدل ویسکوالاستیک-پلاستیک غیرخطی اصلاحاتی را انجام دادند و آنرا برای میراگر حاوی سیال مغناطیسی پیشنهاد کردند.

۲-۵ مدل‌های جبری

با توجه به اینکه مدل‌های معرفی شده برای میراگر حاوی سیال مغناطیسی عمدتاً پیچیده و از نظر محاسباتی سنگین هستند، مدل‌های ساده‌تری نیز ارائه شده‌اند. در این مدل‌ها، رفتار هیستریزیس میراگر با استفاده از عبارات جبری ساده بیان می‌شود. این مدل‌ها به صورت خلاصه عبارتند از:

- مدل ونگ^{۳۷} و همکاران: در این مدل [۴۹-۴۷] رفتار هیستریزیس میراگر حاوی سیال مغناطیسی به وسیله عبارت جبری آرک تانژانت شبیه‌سازی شده است.
- مدل ونگ اصلاح‌شده ۱: کسمکی^{۳۸} و اینجین^{۳۹} [۵۰] یک عبارت اینرسی را به مدل ونگ اضافه کردند تا عملکرد مدل را بهبود دهند.
- مدل ونگ اصلاح‌شده ۲: مترد^{۴۰} و همکاران [۵۱] برای بهبود عملکرد مدل ونگ، عبارات دامنه و فرکانس تحریک را در آن وارد نمودند.

³⁰ Arc tangent

³¹ Ang

³² Sims

³³ Weiss

³⁴ Jolly

³⁵ Kamath

³⁶ Li

³⁷ Weng

³⁸ Cesmeci

³⁹ Engin

⁴⁰ Metered

- **مدل ونگ اصلاح شده سیگموئیدی** : بالامورگان^{۴۱} و همکاران [۵۲] پیشنهاد کردند که نیروی میراگر در یک فرم کلی شامل دو تابع مستقل ولتاژ مدیریت کننده ابزار، و نیروی هیستریزس بیان شود. تابع ولتاژ به وسیله یک تابع سیگموئیدی غیرمتقارن در نظر گرفته شده است.
- **مدل کوآک و همکاران** : کوآک و همکاران [۲] از تابع تانژانت هیپربولیک برای نشان دادن عبارت هیستریزس میراگر حاوی سیال مغناطیسی استفاده کردند.
- **مدل تانژانت هیپربولیک** : این مدل [۵۳] از دو مجموعه المان فنرو المان میراکننده تشکیل شده است که به وسیله یک المان جرم به یکدیگر مرتبط شده‌اند.
- **مدل یانگ^{۴۲} و همکاران** : یانگ و همکاران [۵۴] اثر پس‌افتادگی اصطکاکی را در میراگرهای حاوی سیال مغناطیسی بررسی کردند و برای آن مدلی پیشنهاد دادند.
- **مدل جادویی** : از فرمولاسیون جادویی^{۴۳} [۵۵] که تقریبی موفق برای منحنی‌های غیرخطی است، در تولید مدلی مناسب برای میراگر حاوی سیال مغناطیسی استفاده شده است. این فرمولاسیون ترکیبی از چند تابع مثلثاتی است.

۲-۶ ساختارهای مبتنی بر مدل دال^{۴۴}

مدل دال متعلق به اولین نسل مدل‌های اصطکاکی است و برای میراگر حاوی سیال مغناطیسی معرفی شده است. کاربردهای متعارف این مدل عبارتند از:

- **مدل دال اصلاح شده** : در این مدل که توسط ژو^{۴۵} و همکاران [۵۶ و ۵۷] پیشنهاد شد، اپراتور دال برای توصیف رفتار هیستریزس میراگر استفاده شده است.
- **مدل ویسکوز دال** : اخوان^{۴۶} و همکاران [۵۸] مدل ویسکوز دال را برای توصیف مشخصات دینامیکی میراگر در مود برشی پیشنهاد دادند.
- **مدل دال نامتقارن** : گارسیا-بانوس^{۴۷} و همکاران [۵۹] اثر عدم تقارن را در رفتار میراگر حاوی سیال مغناطیسی با اصلاحی در مدل ویسکوز دال در نظر گرفتند.

۲-۷ مدل‌های دیگر

علاوه بر مدل‌های ذکر شده، مدل‌های سامان یافته از اپراتور لوگره^{۴۸} [۶۰]، مدل‌هایی بر اساس تابع سیگموئید [۶۱] و مدل‌های دیگری [۴۸] نیز برای میراگر حاوی سیال مغناطیسی پیشنهاد شده‌اند که نسبت به مدل‌های شرح داده شده، اهمیت و کاربرد کمتری دارند.

۳- مدل کوآک

کوآک و همکاران [۲] مدلی را برای میراگر حاوی سیال مغناطیسی پیشنهاد کردند که در آن از تابع تانژانت هیپربولیک برای نشان دادن خاصیت هیستریزس میراگر استفاده شده است. شماتیک این مدل در شکل ۱ نشان داده شده است.

⁴¹ Balamurgan

⁴² Yang

⁴³ Magic

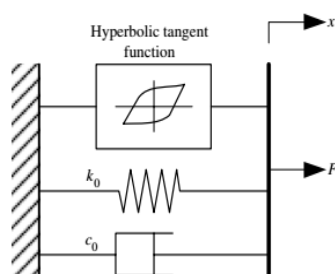
⁴⁴ Dahl

⁴⁵ Zhou

⁴⁶ Ikhoulane

⁴⁷ Garcia-Banos

⁴⁸ LuGre



شکل ۱: مدل مکانیکی میراگر حاوی سیال مغناطیسی بر اساس تابع تانژانت هیپربولیک [۲]

نیروی تولید شده توسط این مدل برای میراگر از رابطه (۵) حاصل می‌شود.

$$F(t) = k_0 x(t) + c_0 \dot{x}(t) + \alpha z(t) + f_0 \quad (5)$$

در این رابطه x و \dot{x} به ترتیب تغییر مکان و سرعت، c_0 و k_0 به ترتیب ضرایب میرایی و سختی هستند. در بسیاری از نمونه‌های میراگرهای این خانواده، هنگامی که تحت آزمایش قرار می‌گیرند، منحنی‌های نیرویی حاصل نسبت به محور افقی متقارن نیستند، برای منظور داشت این مشخصه از پارامتر f_0 به عنوان نیروی عامل انحراف (پسماند) استفاده می‌شود. این پارامتر نیروی ثابتی را نمایندگی می‌کند که غیروابسته به جابجایی و سرعت است. α ضریب مقیاسی برای عبارت هیستریزس و Z متغیر هیستریزس مدل است که با رابطه (۶) بیان می‌شود.

$$z(t) = \tanh[\beta \dot{x}(t) + \delta \operatorname{sgn}(x(t))] \quad (6)$$

که در آن، β شیب چرخه هیستریزس را مشخص می‌کند و ضریب δ عرض چرخه هیستریزس را از طریق رابطه $\delta \operatorname{sgn}(x(t))$ معین می‌کند.

۳-۱ روند انجام شناسایی و تخمین پارامترها در مدل کوآک

آزمایشات انجام گرفته در مرجع [۲] بر روی یک میراگر حاوی سیال مغناطیسی کوچک-مقیاس انجام شده است و تخمین پارامترهای میراگر بر اساس تحریک ورودی سینوسی با دامنه و فرکانس و جریان (و یا ولتاژ) ثابت حاصل شده‌اند. بر این اساس، کوآک و همکاران از شش ترکیب دامنه و فرکانس برای شش جریان مختلف استفاده کردند، در نتیجه لازم بوده که ۳۶ آزمایش انجام گیرد. برای شناسایی پارامترها نیز از الگوریتم فراابتکاری^{۴۹} ازدحام ذرات (PSO) استفاده شده است. در روند شناسایی هر قدر خطای میانگین مجذور مربعات یا RMSE (رابطه (۷)) کمتر باشد، شناسایی دقیق‌تر انجام شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_{exp}^i - F_{sim}^i)^2} \quad (7)$$

در محاسبه خطا توسط رابطه بالا، n تعداد نمونه‌ها، F_{exp} نیروی اندازه‌گیری شده میراگر حاوی سیال مغناطیسی در آزمایشگاه و F_{sim} نیروی تخمین زده شده به وسیله مدل کوآک است. به عقیده نویسندگان این تحقیق، در مدل معرفی شده به وسیله کوآک و همکاران [۲]، اشکالاتی بر خود مدل و روش شناسایی پارامترهای آن وارد می‌شود که به شرح زیر است؛

۱- در شناسایی انجام گرفته، پارامتر δ تابعی خطی از شدت جریان ورودی به میراگر تخمین زده شده است. این امر باعث می‌شود که مدل کوآک وارون‌پذیر نباشد، چون در عبارت هیستریزس آن، پارامتری وابسته به حوزه مغناطیسی میراگر وجود دارد. از این رو

⁴⁹ Metaheuristic

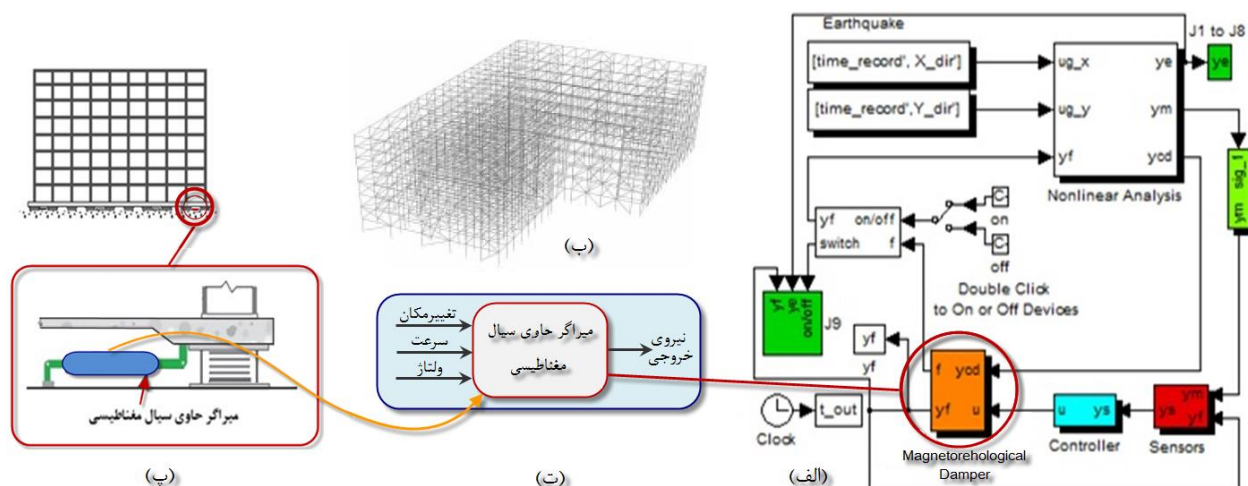
برای دستیابی به فرم وارون آن، یعنی تابعی که مقدار شدت جریان لازم برای تامین مقدار مشخصی از نیروی استهلاکی را بدست دهد، باید آن را ایده‌آل‌سازی کرد. این مسئله دقت مدل را برای کاربرد در الگوریتم‌های کنترل کاهش می‌دهد.

۲- برای انجام آزمایش، از تحریکات سینوسی با دامنه‌ها و فرکانس‌های متغیر استفاده شده‌است. تجربه نشان داده که این روش باعث طولانی شدن و سخت شدن روند آزمایشات می‌شود، و با توجه به حجم داده‌های آزمایشگاهی بدست آمده، عملیات برازش منحنی را با دشواری مواجه کرده و باعث کاهش دقت مدل می‌گردد.

۳- برای انجام شناسایی، از الگوریتم فراابتکاری PSO استفاده شده‌است. در حوزه الگوریتم‌های فراابتکاری، هر اندازه الگوریتم ساده‌تر باشد و در پرهیز از افتادن به دام پاسخ‌های محلی چابکتر عمل کند، توانمندتر خواهد بود. از این رو با بکارگیری روشی توانمندتر امکان بهبود عملکرد روند شناسایی وجود خواهد داشت.

۴- روش تحقیق و پیشنهاد مدل اصلاح شده

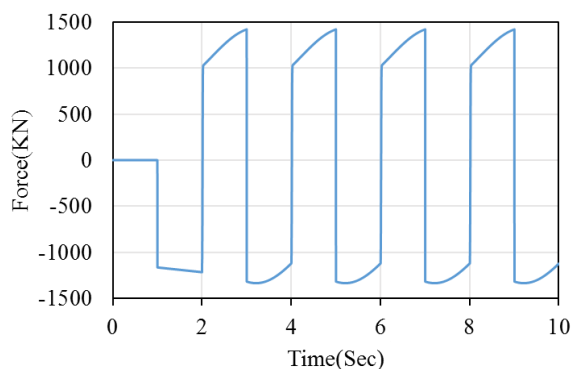
در این تحقیق، از یک میراگر حاوی سیال مغناطیسی بزرگ-مقیاس مجازی برای انجام آزمایشات عددی استفاده شده است. این میراگر به‌عنوان بخشی از برنامه ساختمان کف-جدا معیار [۶۲] که از طرف کمیته کنترل سازه آمریکا، معرفی شده، استخراج شده و به صورت یک بلوک از مجموعه سیمولینک برنامه مرجع جدا و به عنوان یک آزمایشگاه مجازی مورد استفاده واقع شده است (شکل ۲-ت). با بهره‌گیری از روند شناسایی مورد نظر و بر مبنای ضرائب مدل کوآک، پارامترهای مدل به شکلی تعیین خواهند شد که همزمان با تامین دقت مورد نظر، ظرفیت استخراج مدل وارون را داشته باشد. سپس نتایج حاصل، اعتبارسنجی شده، مورد راستی آزمایی قرار خواهند گرفت.



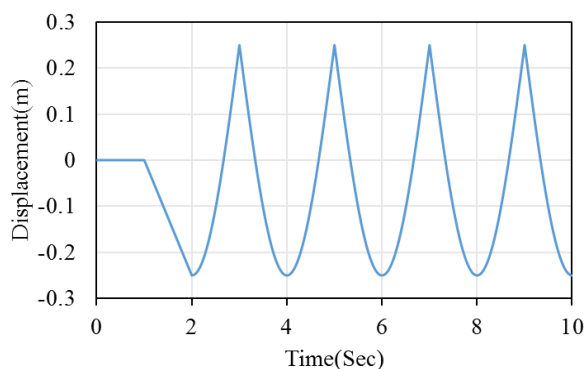
شکل ۲: (الف) سیمولینک ساختمان معیار [۶۲]، (ب) مدل سه بعدی از ساختمان مدل شده [۶۲]، (پ) موقعیت نصب میراگر حاوی سیال مغناطیسی در ساختمان معیار [۶۲]، (ت) آزمایشگاه مجازی در محیط سیمولینک

۲-۴ تحریک متناوب

به‌منظور جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز برای شناسایی مدل میراگر، از تحریک تغییرمکانی متناوب [۲۷] (شکل ۳-الف)) استفاده شده و نمونه‌ای نیز از نیروی خروجی میراگر، در حضور ولتاژ ثابت، در شکل (۳-ب) ارائه شده است. همانطور که در قسمت قبل بیان شد، کوآک و همکاران [۲] از تحریکات سینوسی با دامنه‌ها و فرکانس‌های مختلف استفاده کرده‌اند. آنها از شش ترکیب دامنه و فرکانس استفاده کرده‌اند، که در مقایسه با تحریک متناوب این پژوهش، تعداد آزمایشات لازم را شش برابر می‌کند. به این معنا که اگر برای ۲۱ ولتاژ ثابتی که مورد نظر این پژوهش است، همان روند دنبال می‌شود، ۱۲۶ آزمایش مختلف برای شناسایی پارامترهای مدل لازم می‌بود. این درحالی است که با استفاده از تحریک متناوب ذکر شده، تنها ۲۱ آزمایش (تحت ۲۱ ولتاژ ثابت) برای شناسایی کافی بوده است.



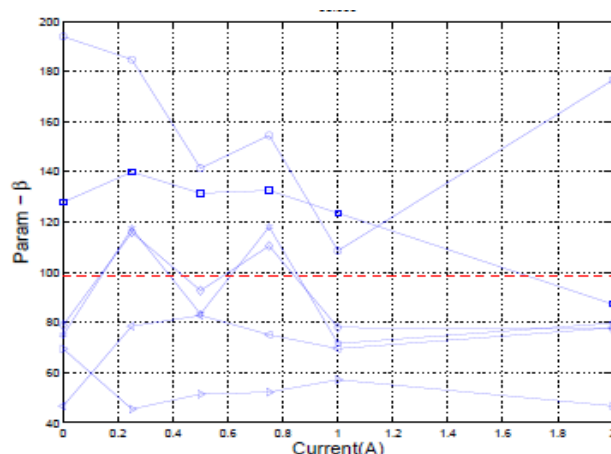
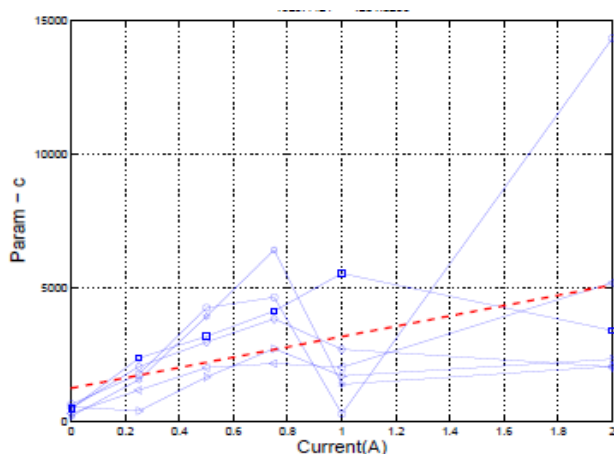
(ب)



(الف)

شکل ۳: تحریک متناوب تغییر مکان (الف) و نیروی خروجی متناظر در میراگر (ب)

افزون بر این، پراکندگی داده‌های حاصل از آزمایشات متعدد باعث کاهش دقت در روند برازش منحنی پارامترهای مدل می‌شود که در مقاله اصلی کوآک و همکاران [۲] مطابق شکل ۴ به‌وضوح مشخص است.



شکل ۴: نمونه‌ای از پراکندگی داده‌های شناسایی شده در مقاله کوک و همکارانش [۲]

۳-۴ الگوریتم شناسایی

در مقاله مرجع [۲]، از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)، [۶۳] برای شناسایی پارامترهای مدل میراگر استفاده شده است. در این پژوهش، الگوریتم شناسایی جدیدی بنام "بهینه‌ساز وابسته به تکرار" یا IDO^{۵۰}، که در دسته الگوریتم‌های هوش ازدحامی قرار می‌گیرد و توسط نویسندگان این پژوهش ابداع و در این مقاله ارائه شده، برای شناسایی پارامترهای مدل میراگر استفاده شده است. الگوریتم بهینه‌ساز وابسته به تکرار، از یک جمعیت اولیه، که در آن هر یک از افراد گروه در هر گام زمانی، با استفاده از رابطه (۸)، موقعیت خود را به لحظه^{۵۱} می‌کند، استفاده می‌کند.

$$X_t = (T - t/T)^n \cdot (X_{best} - X_t) + rand \cdot X_{best} + \alpha \cdot u \quad (8)$$

در این عبارت، T و t به ترتیب حداکثر تعداد تکرار و شماره تکرار جاری می‌باشند. X_{best} بهترین موقعیت به دست آمده فعلی است و X_t موقعیت به لحظه شده هر عضو است که به صورت غیرخطی به سوی بهترین پاسخ در حرکت است. پارامتر n ، میزان غیرخطی بودن

⁵⁰ Iteration-Dependent-Optimizer

⁵¹ Update

سیر حرکت را کنترل می‌کند. برای $n = 2$ حرکت به صورت سهمی خواهد بود. $rand$ یک عدد تصادفی یکنواخت در بازه $[0,1]$ بوده و u عددی است تصادفی از توزیع یکنواخت $[-\mu, \mu]$. μ از رابطه (۹) حاصل می‌شود:

$$\mu = 0.05(X_{max} - X_{min}) \quad (9)$$

که X_{min} و X_{max} کران‌های بالا و پایین بازه اعداد هستند. α نیز ضریب مقیاسی برای u است که برای برقراری تعادل بین دو فاز اکتشاف^{۵۲} و بهره‌وری^{۵۳} الگوریتم طراحی شده است. جدول ۷ نتایج بدست آمده از الگوریتم‌های PSO و IDO را برای تعدادی از توابع معیار استاندارد، برای مقایسه ظرفیت روش پیشنهادی، آورده شده است. برای حل مسائل انتخاب شده در جدول ۷، برای هر دو الگوریتم، جمعیت اولیه ۳۰ عضو و حداکثر تکرار برای هر مسأله برابر ۵۰۰ اختیار شده است. به منظور افزایش دقت نتایج موجود در جدول، هر تابع به صورت جداگانه ۳۰ بار آزمایش شدند. Avg و Std به ترتیب نشان دهنده میانگین و انحراف معیار داده‌هاست. مقایسه‌ها در جدول ۷ نشان می‌دهند که اگرچه الگوریتم IDO ساختار بسیار ساده‌تری نسبت به PSO دارد، اما دقت بسیار بیشتری در پیدا کردن نقاط بهینه داشته و می‌تواند در روند شناسایی پارامترهای مدل میراگر حاوی سیال مغناطیسی مورد مطالعه در این پژوهش مؤثرتر عمل کرده، پاسخ‌های دقیق‌تری را به دست آورد.

جدول ۷: نتایج حاصل از بهینه‌سازی برای توابع معیار از دو روش PSO و IDO

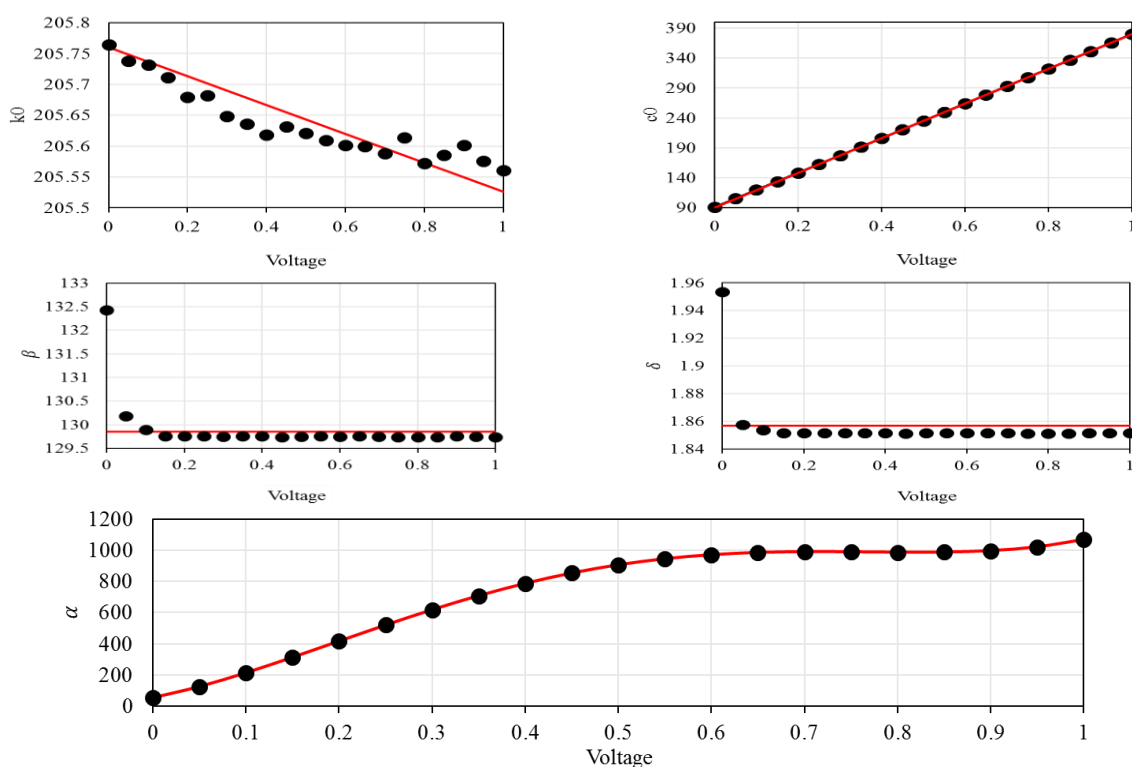
Function name	Formulation	Dimension	Range	Optimal value	PSO		IDO	
					Avg	Std	Avg	Std
Sphere	$f_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2$	30	[-100, 100]	0	0.000136	0.000202	0	0
Rastrigin	$f_2(x) = \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10]$	30	[-5.12, 5.12]	0	-46.70423	11.62938	0	0
Griewank	$f_3(x) = 1/4000 \sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos(x_i/\sqrt{i}) + 1$	30	[-600, 600]	0	0.009215	0.007724	0	0
Rosenbrock	$f_4(x) = \sum_{i=1}^{n-1} [100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2]$	30	[-30, 30]	0	96.71832	60.11559	0.016868	0.016599
Ackley	$f_5(x) = -20 \exp\left(-0.2\sqrt{1/n \sum_{i=1}^n x_i^2}\right) - \exp(1/n \sum_{i=1}^n \cos[(2\pi x_i)] + 20 + e]$	30	[-32, 32]	0	0.276015	0.50901	8.8818E-16	0
Schwefel	$f_6(x) = \sum_{i=1}^n x_i \prod_{i=1}^n x_i $	30	[-100, 100]	0	0.42144	0.045421	2.39E-260	0
Penalized	$f_7(x) = 0.1\{\sin^2(3\pi x_1) + \sum_{i=1}^n (x_i - 1)^2 [1 + \sin^2(3\pi x_n)] + (x_n - 1)^2 [1 + \sin^2(2\pi x_n)]\} + \sum_{i=1}^n u(x_i, 5, 100.4)$	30	[-50, 50]	0	0.006675	0.008907	2.73214E-05	2.26778E-05

۴-۴ جزئیات شناسایی مدل

با اعمال تحریک متناوب به میراگر حاوی سیال مغناطیسی موجود در ساختمان معیار به عنوان نمونه مجازی آزمایشگاهی، نیرویی مشابه شکل (۳-ب) در میراگر تولید می‌شود. این روند برای ۲۱ ولتاژ ثابت مختلف، در بازه صفر تا یک، انجام شده است. با استفاده از رابطه (۵) و روش شناسایی بهینه‌ساز IDO، پارامترهای مجهول مدل، مطابق نمودارهای شکل ۵، شناسایی شده‌اند. همانگونه که از شکل ۵ پیداست، برای پارامترهای β و δ ، در ولتاژهای متفاوت، با دقت مناسبی مقادیر ثابتی حاصل شده. باید توجه داشت که برای این میراگر، از آنجا که نمودارهای نیرو-سرعت و نیرو-تغییر مکان میراگر از نقطه صفر شروع شده‌اند، پارامتر f_0 که نماینده نیروی پسماند است و موجب انحراف قائم نمودار می‌شود، لحاظ نشده است. با بررسی نوع تغییرات مقادیر عددی پارامترها نسبت به تغییر ولتاژ اعمال شده، ساده‌ترین روابط برای نمایش این وابستگی بکار رفته است.

⁵² Exploration

⁵³ Exploitation



شکل ۵: پارامترهای شناسایی شده مدل کوآک اصلی با استفاده از الگوریتم IDO

بر این اساس روابط (۱۰) تا (۱۴) پیشنهاد می‌شود.

$$k_0(v) = k_{01} + k_{02}v \quad (10)$$

$$c_0(v) = c_{01} + c_{02}v \quad (11)$$

$$\beta(v) = \beta \quad (12)$$

$$\delta(v) = \delta \quad (13)$$

$$\alpha(v) = \alpha_1 + \alpha_2 v + \alpha_3 v^2 + \alpha_4 v^3 + \alpha_5 v^4 \quad (14)$$

که در آنها $k_1, k_2, c_1, c_2, \beta, \delta, \alpha_1$ تا α_5 ضرایب ثابت شناسایی شده‌اند و مقادیر آنها مطابق جدول ۸ تعیین شده‌اند.

جدول ۸: مقادیر شناسایی شده پارامترهای مجهول

Parameter		Value
k_0	k_{01}	205.76
	k_{02}	-0.2343
c_0	c_{01}	90.084
	c_{02}	290.26
β		129.91
δ		1.8568
α	α_1	54.348
	α_2	1206.1
	α_3	4951.3
	α_4	-10684
	α_5	5540.7

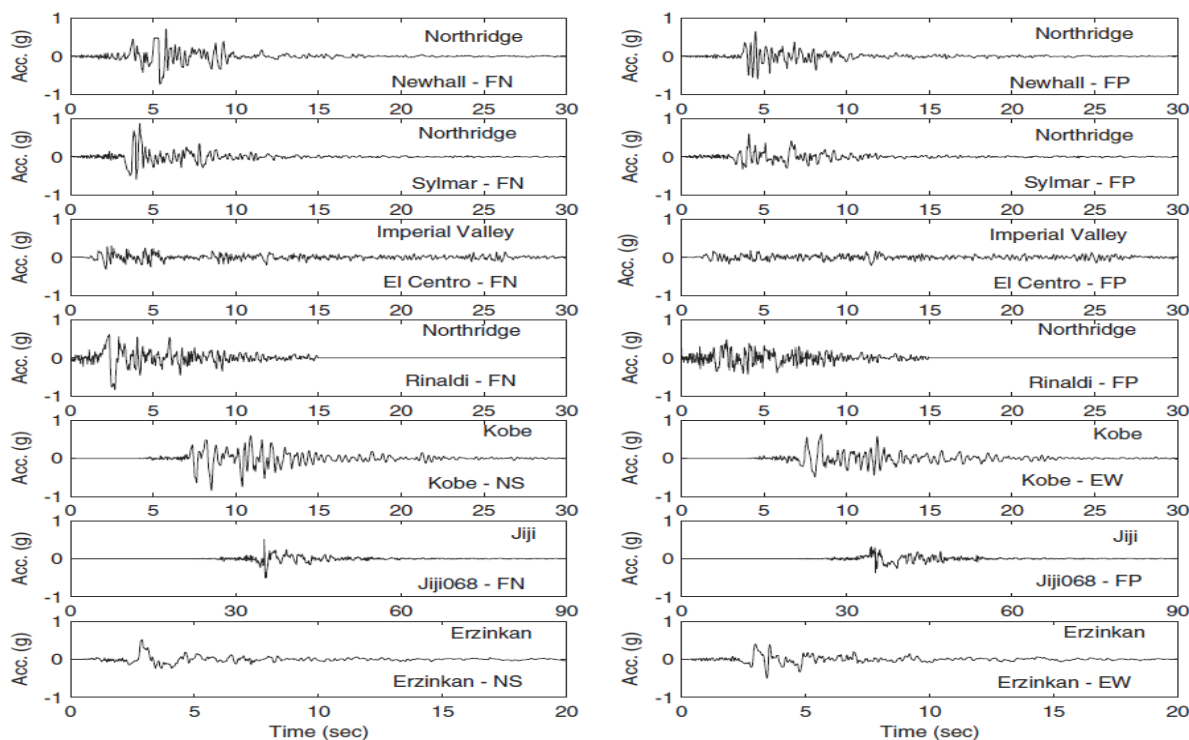
۴-۵ اعتبارسنجی مدل

غالباً در مدل‌های شناسایی شده‌ای که در مقالات مختلف ارائه می‌شوند، هم آزمایشات و هم اعتبارسنجی‌ها، تحت ولتاژ/ جریان ثابت انجام می‌گیرد. اما از آنجا که میراگرهای مغناطیسی به‌عنوان ابزارهای نیمه‌فعال، در سیستم‌های کنترل سازه‌ای بکار می‌روند، مناسب‌تر آن است که مدل شناسایی شده نهایی تحت وضعیت‌هایی مشابه با واقعیت، اعتبارسنجی شود. در شرایط واقعی ابزارهای کنترل سازه‌ای تحت ولتاژ/ جریان‌های متغیر قرار دارند، چرا که زلزله، در هر لحظه، نیروی موثر متغیری به سازه اعمال می‌کند. به این منظور، در این پژوهش برای اعتبارسنجی مدل کوآک اصلاح‌شده پیشنهادی، نخست تحریکات لرزه‌ای به سازه معیار اعمال شده، و سپس، ولتاژ متناظر با این تحریکات استخراج و از آنها به‌عنوان ولتاژهای ورودی به میراگر در آزمایشگاه مجازی استفاده شده است. برای اندازه‌گیری تفاوت بین نیروی خروجی از مدل و نیروی به‌دست آمده از داده‌های اولیه، خطای نرم ۱، با روابط (۱۵) و (۱۶) معرفی می‌شود.

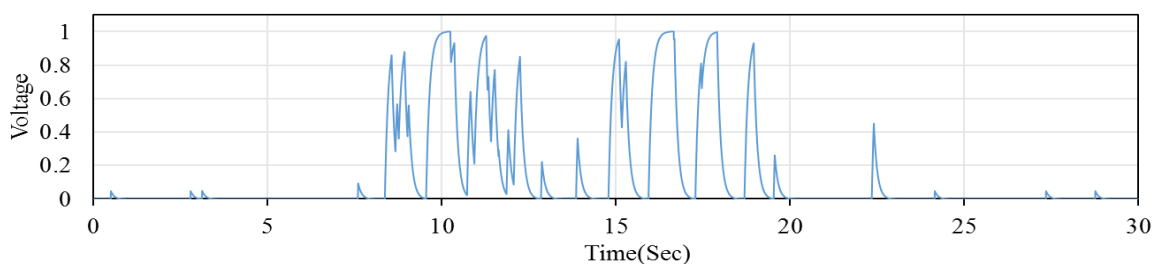
$$\varepsilon = \frac{\|F_{real} - F_{model}\|_1}{\|F_{real}\|_1} \quad (15)$$

$$\|f\|_1 = \int_0^T |f(t)| dt \quad (16)$$

F_{real} نیروی خروجی ناشی از داده‌های اولیه‌ای است که از مدل جعبه سیاه میراگر در سازه معیار به‌دست آمده است و F_{model} نیروی تولید شده به‌وسیله مدل پیشنهادی است. بازه زمانی اعمال هر زلزله با T نشان داده می‌شود. هرچه ε کمتر باشد، نیروی تولید شده به‌وسیله مدل، به نیروی اولیه میراگر نزدیکتر است. برای آنکه دقت مدل کوآک اصلاح‌شده سنجیده شود، از مدل کوآک اصلی [۲] برای مقایسه استفاده شده و هر دو مدل تحت مشخصات حرکتی و ولتاژ مدیریتی میراگر، ناشی از اعمال هفت زلزله پیشنهادی در مسئله ساختمان معیار [۶۲] قرار گرفته‌اند. شکل ۶، رکوردهای اعمال شده را در دو امتداد متعامد، نشان می‌دهد. FP امتداد موازی گسل و FN امتداد عمود بر راستای گسل را نمایندگی می‌کند. شکل ۷ نمونه ولتاژ یک‌گانه شده اعمالی، متناظر با عملکرد سیستم کنترل در خلال زلزله کوبه را نشان می‌دهد.

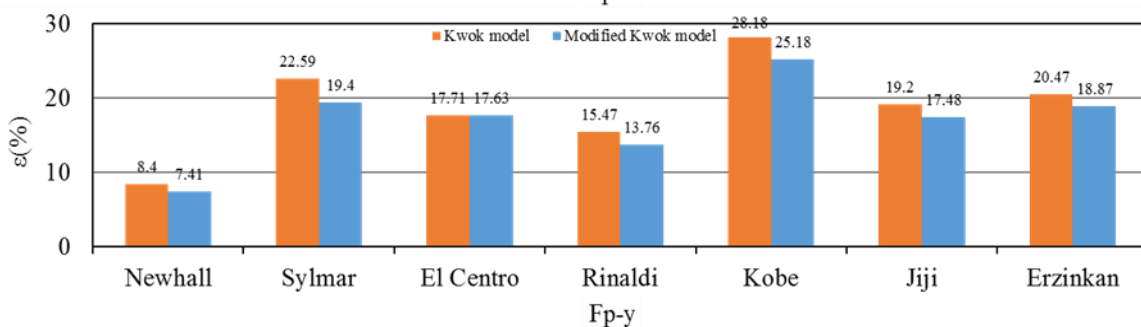
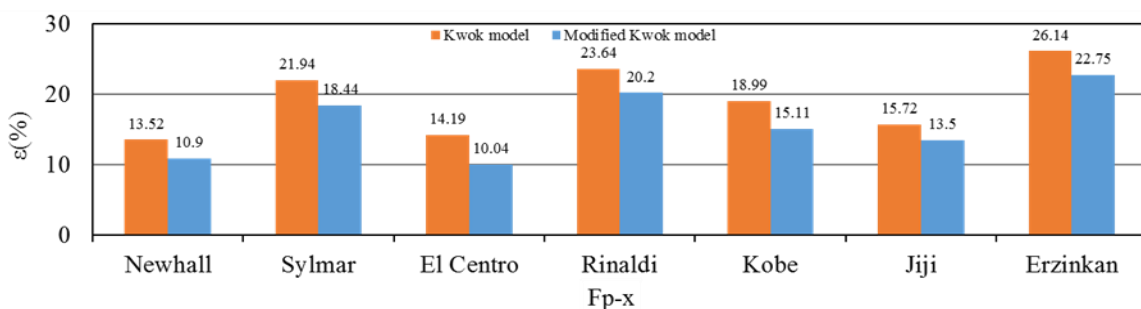


شکل ۶: مشخصات رکوردهای زلزله اعمال شده [۶۲]

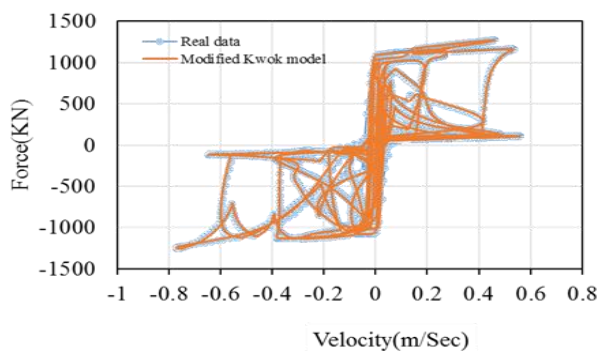


شکل ۷: ولتاژ یکه شده، متناظر با زلزله کوبه، استخراج شده از برنامه ساختمان معیار

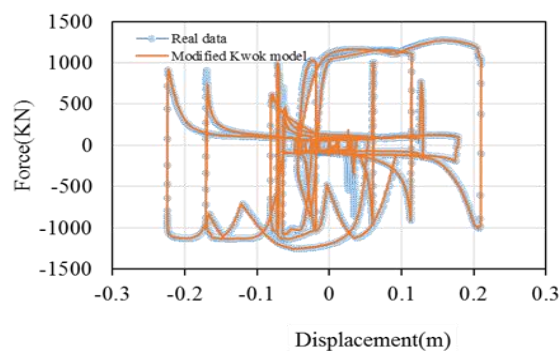
شکل ۸ میزان خطای ε بین مدل‌های کوآک اصلی و اصلاح شده را نشان می‌دهد، که برای هفت زلزله موجود در مسئله سازه معیار و در دو راستای عمود و موازی گسل بدست آمده است. همانگونه که در شکل دیده می‌شود، مدل کوآک اصلاح شده در همه زلزله‌ها، نسبت به مدل کوآک اصلی، دقت بهتری دارد. شکل ۹ نیز مقایسه‌ای است بین نمودارهای نیرو- تغییر مکان و نیرو- سرعت میراگر، برای نیروی میراگر در مدل جعبه سیاه، و نیروی ناشی از مدل کوآک اصلاح شده. همانطور که از شکل پیداست، خطای اندکی بین دو نمودار برای یک میراگر بزرگ- مقیاس وجود دارد. نزدیکی این نمودارها و مطابقت مدل کوآک اصلاح شده به داده‌های اولیه، نشان از قابلیت خوب این مدل ساده دارد.



شکل ۸: مقایسه مدل‌های کوآک اصلی و اصلاح شده در تولید نیروی کنترل تحت هفت زلزله اعمال شده به سازه معیار



(ب)



(الف)

شکل ۹: (الف): نمودار نیرو-تغییر مکان، (ب): نمودار نیرو-سرعت، برای میراگر تحت شناسایی در زلزله کوبه

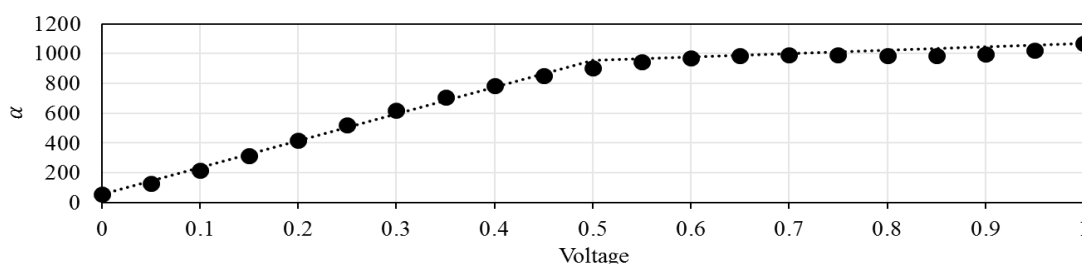
۵- استخراج مدل وارون میراگر

یکی از مراحل کلیدی و غالباً پیچیده در یک الگوریتم منسجم کنترل، مدیریت ابزار بکار رفته است، تا این ابزار، نیرویی همسان با نیروی بهینه کنترل، که در روند پردازش الگوریتم مرکزی برآورد شده، در لحظه به سازه اعمال نماید. بسیاری از مقالات، با چشم‌پوشی از این بخش مهم، و با فرض عملکرد کاملاً ایده‌آل برای ابزار، محدودیت‌های ناشی از کاربرد عملی ساختار کنترل در بهبود عملکرد ساختمان‌ها را نادیده می‌گیرند. برای رفع این اشکال بنیادین، لازم است تا طرح الگوریتم کنترل از انسجام کاملی برخوردار بوده و همزمان با تعیین مقدار نیروی کنترل بهینه، روش مدیریت ابزار کنترل برای بازتولید لحظه‌ای این مقدار نیرو را نیز ارائه دهد، و نشان دهد که انحراف معقولی بین مقدار درخواستی نیروی کنترل و مقدار تولید شده در ابزار وجود دارد. برای انجام این مهم، الگوریتم‌های کنترلی که هدف آنها، مدیریت لحظه‌ای و پیوسته ابزار است و از روش‌های ساده روشن-خاموش استفاده نمی‌کنند، نیازمند ارائه مدلی دوم برای ابزار هستند که ارتباط پارامتر اصلی مدیریت ابزار (ولتاژ یا شدت جریان) را با مقدار نیروی درخواستی کنترل و پارامترهای حرکتی ابزار (سرعت، جابجایی و شتاب) مشخص سازد. این مدل را اصطلاحاً مدل وارون گویند.

برای دستیابی به مدل وارون، مهمترین چالش پیش‌رو، طراحی مدلی ریاضی برای نمایش چگونگی ارتباط بین پارامترهای حرکتی ابزار، پارامتر مدیریتی و نیروی ایجاد شده در ابزار است. به عبارت دیگر می‌باید تبدیل زیر از تابع اصلی شکل گیرد:

$$F = f(x, \dot{x}, z, v), \quad \rightarrow \quad v = h(x, \dot{x}, z, F) \quad (17)$$

تابع $v = h(x, \dot{x}, z, F)$ ، تابع وارون خواهد بود. در مدل اصلاح شده پیشنهادی، برای تامین شرایطی که دسترسی به این تابع را ممکن سازد، پارامتر α به صورت یک تابع دو خطی، ایده‌آل‌سازی شده است (شکل ۱۰).



شکل ۱۰: ایده‌آل‌سازی پارامتر α برای دستیابی به مدل وارون

با ایده‌آل‌سازی صورت‌گرفته، پارامتر α به صورت عبارت رابطه (۱۸) بیان می‌شود:

$$\alpha(v) = \alpha_1 + \alpha_2 v \quad (18)$$

که در آن مقادیر α_1 و α_2 ، برای دو ناحیه تفکیک شده بر اساس مقدار ولتاژ اعمالی، در جدول ۹ تعریف شده اند.

جدول ۹: مقادیر ایده‌آل‌سازی شده برای پارامتر α

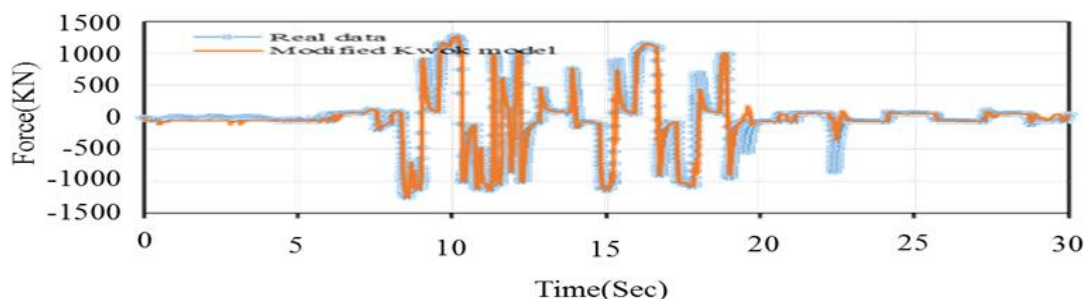
Parameter	Value
α	α_1 $0 \leq v \leq 0.5$ 54.2759
	$0.5 \leq v \leq 1$ 839.6128
α_2	$0 \leq v \leq 0.5$ 1800
	$0.5 \leq v \leq 1$ 229.3262

با جای‌گذاری روابط (۱۰) تا (۱۳) و رابطه (۱۸) در رابطه (۵)، مدل نیرویی و مدل وارون حاصل می‌شود:

$$\begin{aligned} F(t) &= (k_{01} + k_{02}v)x(t) + (c_{01} + c_{02}v)\dot{x}(t) + (\alpha_1 + \alpha_2v)\tanh[\beta\dot{x}(t) + \delta\text{sgn}(x(t))] \\ &= k_{01}x(t) + c_{01}\dot{x}(t) + \alpha_1\tanh[\beta\dot{x}(t) + \delta\text{sgn}(x(t))] \\ &\quad + (k_{02}x(t) + c_{02}\dot{x}(t) + \alpha_2\tanh[\beta\dot{x}(t) + \delta\text{sgn}(x(t))])v \end{aligned}$$

$$\rightarrow v = \frac{F(t) - k_{01}x(t) - c_{01}\dot{x}(t) - \alpha_1 \tanh[\beta\dot{x}(t) + \delta \operatorname{sgn}(x(t))]}{k_{02}x(t) + c_{02}\dot{x}(t) + \alpha_2 \tanh[\beta\dot{x}(t) + \delta \operatorname{sgn}(x(t))]} \quad (19)$$

رابطه اخیر، مقدار ولتاژ لازم برای تامین نیروی کنترل درخواستی را محاسبه و به ابزار اعمال می کند. شکل ۱۱، نمودار تاریخچه زمانی نیروی کنترل درخواستی و نیروی تولید شده بر اساس مدل پیشنهادی میراگر وقتی تحت ولتاژ محاسبه شده از مدل وارون قرار می گیرد را نشان می دهد. از نمودار به روشنی پیداست که دقت نیروی تولید شده بر اساس مدل های پیشنهاد شده مطلوب بوده و مدل وارون به خوبی توانسته نیروی میراگر را نزدیک به آنچه لازم بوده است تولید کند.



شکل ۱۱: نمودار تاریخچه زمانی نیروی کنترل درخواستی و نیروی تولید شده در میراگر

۶- نتیجه گیری

تحقیق چندوجهی حاضر، نخست با نگاهی اجمالی، مدل های متداول میراگرهای حاوی سیال مغناطیسی را ارائه داده است. سپس رابطه ای اصلاح شده برای مدل کوآک پیشنهاد شده که ضمن افزایش دقت در بیان رفتار میراگرهای مغناطیسی بزرگ-مقیاس، شرایط دسترسی به مدل وارون متناظر آنها را نیز داراست. برای شناسایی پارامترهای این مدل، الگوریتم فراابتکاری جدیدی ارائه شده، تا با دقت و سرعت بیشتر، شناسایی انجام گیرد. این الگوریتم که IDO نامیده شده، قادر است تا با تعداد محدودتری از آزمایش نمونه، شناسایی ابزار کنترل را به انجام رساند. نهایتاً، مدل کوآک اصلاح شده، همراه با مدل وارون متناظر در یک ساختار عددی مورد آزمون قرار گرفته اند. مطالعه موردی بر روی یک میراگر مجازی حاوی سیال مغناطیسی بزرگ-مقیاس انجام گرفته. این میراگر به شکل یک مدل جعبه سیاه، از برنامه ساختمان کف-جدای معیار معرفی شده از طرف کمیته کنترل سازه آمریکا، استخراج شد و به عنوان یک آزمایشگاه مجازی مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج حاصل از مطالعه انجام گرفته نشان می دهد که، اولاً مدل اصلاحی پیشنهادی رفتار میراگرهای حاوی سیال مغناطیسی را دقیق تر بیان میکند، همچنین وارون پذیر است و می تواند با تقریب کوچکی، شرایط مدیریت ابزار را فراهم سازد و به یقین کارایی آن را در مدل سازی میراگرهای حاوی سیال مغناطیسی افزایش می دهد. الگوریتم شناسایی نیز در تخمین پارامترهای مدل پیشنهادی بسیار موفق تر از الگوریتم های معروفی چون PSO عمل کرده است.

مراجع

- [1] Bossis, G., Khuzir, P., Lacis, S., Volkova, O. (2003). "Yield behavior of magnetorheological suspensions"; *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 258, 456-458.
- [2] Kwok, N. M., Ha, Q. P., Nguyen, T. H., Li, J., Samali, B. (2006). "A novel hysteretic model for magnetorheological fluid dampers and parameter identification using particle swarm optimization"; *Sensors Actuators A*, 132, 441-451.
- [3] Soltane, S., Montassar, S., Ben-Mekki, O., El-Fatmi, R. (2015). "A hysteretic Bingham model for MR dampers to control cable vibrations"; *Journal of Mechanics and Structures*, 10 (2), 195-206.
- [4] Chang, C., Roschke, P. (1998). "Neural network modeling of a magnetorheological damper"; *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 9, 755-764.
- [5] Kim, H. S., Roschke, P. N., Lin, P. Y., Loh, C. H. (2006). "Neuro-fuzzy model of hybrid semi-active base isolation system with FPS bearings and an MR damper"; *Engineering Structures*, 28 (7), 947-958.
- [6] Costa, A., Martins, J., Branco, F., Lilien, J. (1996). "Oscillations of bridge stay cables induced by periodic motions of deck and/or towers"; *Journal of Engineering Mechanics*, 122 (7), 613-622.

- [7] Spaggiari, A., Dragoni, E. (2012). "Efficient dynamic modelling and characterization of a magnetorheological damper"; *Meccanica*, 47, 2041-2054.
- [8] Carlson, J. D., Jolly, M. R. (2000) "MR fluid, foam and elastomer devices"; *Mechatronics*, 10, 555-569.
- [9] Stanway, R., Sproston, J. L., Stevens, N. G. (1987). "Non-linear modelling of an electro-rheological vibration damper"; *J. Electrostat*, 20, 167-184
- [10] Gamota, D. R., Filisko, F. E. (1991). "Dynamic mechanical studies of electrorheological materials: moderate frequencies"; *J. Rheol*, 35, 399-425.
- [11] Wereley, N. M., Pang, L., Kamath, G. M. (1998). "Idealized hysteresis modeling of electrorheological and magnetorheological dampers"; *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, 9, 642-649.
- [12] Zhou, Q., Qu, W. L. (2002). "Two mechanic models for magnetorheological damper and corresponding test verification"; *Earthq. Eng. Eng. Vib. (in Chinese)*, 22, 144-150.
- [13] Occhiuzzi, A., Spizzuoco, M., Serino, G. (2003). "Experimental analysis of magnetorheological dampers for structural control"; *Smart Mater. Struct.*, 12, 703-711.
- [14] Zhang, Z., Huang, F. (2013). "A new magneticrheological damper nonlinear bingham hysteretic model and ANSYS implementation"; *Applied Mechanics and Materials*, 351-352, 1146-1151.
- [15] Soltane, S., Montassar, S., Ben-Mekki, O., El-Fatmi, R. (2015). "A hysteretic Bingham model for MR dampers to control cable vibrations"; *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 10 (2), 195-206.
- [16] Papanastasiou, T. C. (1987). "Flow of materials with yield"; *Journal of Rheology*, 31, 385-404.
- [17] Bouc, R. (1971). "Mathematical model for hysteresis"; *Acustica*, 24, 16-25.
- [18] Wen, Y. K. (1976). "Method for random vibration of hysteretic systems"; *J. Eng. Mech. Div.-ASCE*, 102, 249-263.
- [19] Spencer, B. F. Jr., Dyke, S. J., Sain, M. K., Carlson, J. D. (1997). "Phenomenological model for magnetorheological dampers"; *J. Eng. Mech. ASCE*, 123, 230-238.
- [20] Yi, F., Dyke, S. J., Caicedo, M. (1999). "Seismic Response Control Using Smart Dampers"; In: *Proceedings of the American Control Conference*. City: San Diego, California, 1022-1026.
- [21] Yang, G., Spencer, B. F. Jr., Jung, H. J., Carlson, J. D. (2004). "Dynamic modeling of large-scale magnetorheological damper systems for civil engineering applications"; *J. Eng. Mech. ASCE*, 130, 1107-1114.
- [22] Dominguez, A., Sedaghati, R., Stiharu, I. (2004). "Modelling the hysteresis phenomenon of magnetorheological dampers"; *Smart Mater. Struct.*, 13, 1351-1361.
- [23] Dominguez, A., Sedaghati, R., Stiharu, I. (2006). "A new dynamic hysteresis model for magnetorheological dampers"; *Smart Mater. Struct.*, 15, 1179-1189.
- [24] Ma, X., Rakheja, S., Su, C-Y. (2007). "Development and Relative Assessments of Models for Characterizing the Current Dependent Hysteresis Properties of Magnetorheological Fluid Dampers"; *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 18, 487-502.
- [25] Kwok, N. M., Ha, Q. P., Nguyen, M. T., Li, J., Samali, B. (2007). "Bouc-Wen model parameter identification for a MR fluid damper using computationally efficient GA"; *ISA Trans.*, 46, 167-179.
- [26] Ismail, M., Ikhouane, F., Rodellar, J. (2009). "The Hysteresis Bouc-Wen Model, a Survey"; *Arch. Comput. Methods Eng.*, 16, 161-188.
- [27] Ikhouane, F., Rodellar, J. (2005). "On the Hysteretic Bouc-Wen Model. Part I: Forced Limit Cycle Characterization"; *Nonlinear Dynamics*, 42, 63-78.
- [28] Ikhouane, F., Rodellar, J. (2005). "On the Hysteretic Bouc-Wen Model. Part II: Robust Parametric Identification"; *Nonlinear Dynamics*, 42, 79-95.
- [29] Bahar, A., Pozo, F., Acho, L., Rodellar, J., Barbat, A. (2010). "Parameter identification of large-scale magnetorheological dampers in a benchmark building"; *Computers and Structures*, 88, 198-206.
- [30] Dominguez, S., Stiharu, I., Sedaghati, R. (2013). "Practical hysteresis model for magnetorheological dampers"; *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 0 (0), 1-13.
- [31] Bai, X., Chen, P., Qian, L. (2015). "Principle and validation of modified hysteretic models for magnetorheological dampers"; *Smart Materials and Structures*, 24, 1-12.
- [32] Wereley, N. M., Pang, L., Kamath, G. M. (1998). "Idealized hysteresis modeling of electrorheological and magnetorheological dampers"; *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, 9, 642-649.
- [33] Pang, L., Kamath, G. M., Wereley, N. M. (1998). "Analysis and testing of a linear stroke magnetorheological damper"; *Proc. AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Forum*, CP9803, 2841-2856.
- [34] Snyder, R. A., Kamath, G. M., Wereley, N. M. (2001). "Characterization and analysis of magnetorheological damper behavior under sinusoidal loading"; *AIAA J.*, 39, 1240-1253.
- [35] Liu, H., Teng, J. (2004). "Modeling of Smart Dampers for Vibration Control"; In: *Proceedings of the 2004 International Conference on Intelligent Mechatronics and Automation*. City: Chengdu, Chin, 177-188.

- [36] Seong, M. S., Choi, S. B., Kim, C. H. (2013). "Damping force control of frictionless MR damper associated with hysteresis modeling"; *Journal of Physics: Conference Series (13th Int. Conf. on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions)*, 412, 1-7.
- [37] Ang, W. L., Li, W. H., Du, H. (2004). "Experimental and modelling approaches of a MR damper performance under harmonic loading"; *J. Inst. Eng.*, 44, 1-14.
- [38] Sims, N. D., Holmes, N. J., Stanway, R. (2004). "A unified modelling and model updating procedure for electrorheological and magnetorheological dampers"; *Smart Mater. Struct.*, 13, 100-121.
- [39] Weiss, K. D., Carlson, J. D., Nixon, D. A. (1994). "Viscoelastic properties of magneto- and electro-rheological fluids"; *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, 5, 772-775.
- [40] Jolly, M. R., Carlson, J. D., Munoz, B. C. (1996). "A model of the behaviour of magnetorheological materials"; *Smart Mater. Struct.*, 5, 607-614.
- [41] Kamath, G. M., Wereley, N. M. (1997). "Nonlinear viscoelastic-plastic mechanisms-based model of an electrorheological damper"; *J. Guid. Control Dyn.*, 20, 1125-1132.
- [42] Kamath, G. M., Wereley, N. M. (1997). "A nonlinear viscoelastic-plastic model for electrorheological fluids"; *Smart Mater. Struct.*, 6, 351-359.
- [43] Wereley, N. M., Kamath, G. M., Madhavan, V. (1999). "Hysteresis modeling of semi-active magnetorheological helicopter dampers"; *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, 10, 624-633.
- [44] Kamath, G. M., Wereley, N. M., Jolly, M. R. (1999). "Characterization of magnetorheological helicopter lag dampers"; *J. Am. Helicopter Soc.*, 44, 234-248.
- [45] Li, W. H., Yao, G. Z., Chen, G., Yeo, S. H., Yap, F. F. (2000). "Testing and steady state modeling of a linear MR damper under sinusoidal loading"; *Smart Mater. Struct.*, 9, 95-102.
- [46] Li, Z., Ni, Y., Dai, H., Ye, S. (2013). "Viscoelastic plastic continuous physical model of a magnetorheological damper applied in the high speed train"; *Sci. China Tech Sci*, 56, 2433-2446.
- [47] Weng, J. S., Hu, H. Y., Zhang, M. K. (2000). "Experimental modeling of magnetorheological damper"; *J. Vib. Eng. (in Chinese)*, 13, 616-620.
- [48] Wang, D. H., Liao, W. H. (2011). "Magnetorheological fluid dampers: a review of parametric modelling"; *Smart Mater. Struct.*, 20, 1-34.
- [49] Guo, D., Hu, H. (2005). "Nonlinear Stiffness of a Magneto-Rheological Damper"; *Nonlinear Dynamics*, 40, 241-249.
- [50] Cismeci, S., Engin, T. (2010). "Modeling and testing of a field-controllable magnetorheological fluid damper"; *International Journal of Mechanical Sciences*, 52, 1036-1046.
- [51] Metered, H., Mostafa, S., El-Demerdash, S., Hammad, N., El-Nashar, M. (2013). "Testing, Modelling and Analysis of a Linear Magnetorheological Fluid Damper under Sinusoidal Conditions"; *SAE Technical Paper*, 2013-01-0996, Available at: URL [https://doi.org/10.4271/2013-01-0996].
- [52] Balamurugan, L., Jancirani, J., Eltantawie, M. A. (2014). "Generalized Magnetorheological (MR) Damper Model and its Application in Semi-Active Control of Vehicle Suspension System"; *International Journal of Automotive Technology*, 15 (3), 419-442.
- [53] Bass, B. J., Christenson, R. E. (2007). "System Identification of a 200 kN Magneto-Rheological Fluid Damper for Structural Control in Large-Scale Smart Structures"; In: *Proceedings of the 2007 American Control Conference Marriot Marquis Hotel at Times Square*. City: New York City, USA, 2690-2695.
- [54] Yang, M., Chen, Z., Hua, X. (2011). "An experimental study on using MR damper to mitigate longitudinal seismic response of a suspension bridge"; *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31, 1171-1181.
- [55] Pan, W., Yan, Z., Lou, J., Zhu, S. (2018). "Research on MRD Parametric Model Based on Magic Formula"; *Hindawi, Shock and Vibration Volume 2018, Article ID 1871846*, 1-10. Available at: URL [https://doi.org/10.1155/2018/1871846].
- [56] Zhou, Q., Nielsen, S. R. K., Qu, W. L. (2006). "Semi-active control of three-dimensional vibrations of an inclined sag cable with magnetorheological dampers"; *J. Sound Vib.*, 296, 1-22.
- [57] Zhou, Q., Qu, W. L. (2002). "Two mechanic models for magnetorheological damper and corresponding test verification"; *Earthq. Eng. Eng. Vib. (in Chinese)*, 22, 144-150.
- [58] Ikhouane, F., Dyke, S. J. (2007). "Modeling and identification of a shear mode magnetorheological damper"; *Smart Mater. Struct.*, 16, 605-616.
- [59] Garcia-Banos, I., Ikhouane, F., Aguirre-Carvajal, N. (2017). "An asymmetric-friction based model for magnetorheological dampers"; *IFAC (International Federation of Automatic Control) Papers Online*, 50-1, 14076-14081. Available at: URL [10.1016/j.ifacol.2017.08.1844].
- [60] Jimenez, R., Alvarez-Icaza, L. (2005). "LuGre friction model for a magnetorheological damper"; *Struct. Control Health Monit.*, 12, 91-116.
- [61] Ma, X. Q., Rakheja, S., Su, C. Y. (2007). "Development and relative assessments of models for characterizing the current dependent hysteresis properties of magnetorheological fluid dampers"; *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, 18, 487-502.
- [62] Narasimhan, S., Nagarajaiah, S., Johnson, E. A., Gavin, H. P. (2006). "Smart base-isolated benchmark building. Part I: problem definition" *Structural Control and Health Monitoring*, 13 (2-3), 573-588.

[63] Kennedy, J., Eberhart, R. (1995). "Particle swarm optimization, in Neural Networks"; In: *Proceedings, IEEE international conference on 1995*, 1942-1948.