

Identification of Parameters of Spencer Model in a Double-Ended Magnetorheological Damper for Different Sizes of Carbonyl Iron Powder for Magnetorheological Fluid

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Mousazadeh M.¹ MSc,

Jahani K.^{*1} PhD,

Abdullahe M.² MSc

How to cite this article

Mousazadeh M, Jahani K, Abdullahe M. Identification of Parameters of Spencer Model in a Double-Ended Magnetorheological Damper for Different Sizes of Carbonyl Iron Powder for Magnetorheological Fluid. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(5):1307-1317.

ABSTRACT

The aim of this paper is identifying the parameters of parametric Spencer model for a double-ended magnetorheological damper with different sizes of iron-carbonyl powders suspended in magnetorheological fluid. There is not any published work in literature about identification of parameters of Spencer model for spherical iron particles with different particle diameters in magnetorheological fluids. Hence, in present work, at first, two different magnetorheological fluids with different diameters of iron particle and same volume percentage are prepared. Then, using a double-ended magnetorheological damper, dynamic displacement tests with harmonic excitation in different frequencies and using different electric currents are conducted. The parametric Spencer model is selected for modeling the damper and identifying its parameters. 10 parameters of this model are identified, using nonlinear least square solver and implementing Sequential Quadratic Programming method for damper; using two different magnetorheological fluids in different frequencies and different electric currents. The appropriate polynomials are extracted for identified parameters that have systematic trends with increasing electric current. With generating theoretical and experimental hysteresis curves in different electric currents, excitation frequencies and different fluids, it is tried to assess the capability of Spencer model in regenerating the experimental counterparts. The comparisons of the hysteresis curves obtained from Spencer model with identified parameters by the experimentally achieved counterparts show that this model has adequate compatibility with experiments in predicting force-velocity hysteresis curves. However, the implemented model has not enough success in predicting the force-displacement hysteresis curves, especially in sharp ends of the curves and force delaying regions.

Keywords Magnetorheological Fluid; Magnetorheological Double-Ended Damper; Iron Particle Size; Parameter Identification; Spencer Parametric Model

¹Mechanical Engineering Department, Mechanical Engineering Faculty, University of Tabriz, Tabriz, Iran

²Manufacturing Engineering Department, Mechanical Engineering Faculty, University of Tabriz, Tabriz, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Faculty, University of Tabriz, 29th Bahman Bulevard, Tabriz, Iran
Phone: +98 (41) 33393060
Fax: +98 (41) 33354153
ka_jahani@tabrizu.ac.ir

Article History

Received: August 27, 2018

Accepted: December 13, 2018

ePublished: May 01, 2019

CITATION LINKS

[1] Magnetorheological fluid dampers: A review of ... [2] Performance tests and mathematical model considering magnetic saturation for ... [3] Advancement in energy harvesting magneto ... [4] A review on the magnetorheological fluid preparation ... [5] Effect of particle shape in ... [6] The influence of particle size on the rheological properties of plate-like iron particle ... [7] Preparation and experimental study of magnetorheological fluids ... [8] Modeling Secondary Semi Active Suspension System with Magnetorheological dampers to ... [9] Large-scale magnetorheological fluid damper for vibration, mitigation: Modeling ... [10] An evaluation of magneto rheological dampers for ... [11] A seat suspension with a rotary magnetorheological ... [12] A magnetorheological damper with bifold valves for shock ... [13] A novel double-piston magnetorheological damper for space truss ... [14]abricate and testing the novel magnetorheologic ... [15] Bouc-Wen model parameter identification for a MR ... [16] Design and analysis of magnetorheological ... [17] Dynamic modeling of large-scale magnetorheological ... [18] A novel hysteretic model for magnetorheological ... [19] Parameter identification of modified Bouc-Wen model ... [20] Preparation of magnetorheological fluids using different ... [21] An experimental investigation of iron based ... [22] Preparation of magnetorheological fluid and study on ... [23] A study of properties, preparation and testing of magneto ... [24] Magnetorheology for suspensions of solid particles ... [25] Performance tests and hysteresis model ... [26] Sequential quadratic programming. In: Cambridge ...

شناسایی پارامترهای مدل اسپنسر در دمپر مگنتورئولوژیکال دو سر متحرک برای قطره‌های متفاوت پودر آهن- کربونیل سیال مگنتورئولوژیک

محمد موسی‌زاده MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

کمال جهانی PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

محمد عبداللہی MSc

گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

هدف این مقاله شناسایی پارامترهای مدل پارامتریک اسپنسر برای یک دمپر مگنتورئولوژیک دوسرمتحرک با قطره‌های مختلف پودر آهن-کربونیل معلق در سیال مگنتورئولوژیک است. تاکنون در ادبیات فن، مطالعه‌ای روی شناسایی پارامترهای مدل اسپنسر برای ذرات کروی شکل آهن با قطره‌های متفاوت در سیال مگنتورئولوژیک گزارش نشده است. بنابراین در این تحقیق ابتدا دو نوع سیال مگنتورئولوژیک با قطره‌های مختلف پودر آهن-کربونیل در درصد حجمی یکسان متناسب با حجم دمپر ساخته می‌شود. سپس با به‌کارگیری یک دمپر مگنتورئولوژیکال دوسرمتحرک، آزمون‌های دینامیک با تحریک هارمونیک در جریان‌ها و فرکانس‌های مختلف انجام می‌شود. مدل پارامتری اسپنسر برای مدل‌سازی دمپر مورد بررسی و شناسایی پارامترها انتخاب می‌شود. ده پارامتر این مدل از طریق حلگر غیرخطی حداقل مربعات غیرخطی و استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی درجه دوم متوالی برای جریان‌ها و فرکانس‌های مختلف در دو سیال مگنتورئولوژیک شناسایی می‌شوند. پارامترهایی از مدل که نسبت به افزایش جریان الکتریکی به‌صورت سیستماتیک و معنی‌دار تغییر می‌کنند، برای حالت‌های مختلف آزمون از طریق برازش منحنی به صورت چندجمله‌ای‌هایی از جریان استخراج می‌شوند. سپس با ترسیم منحنی‌های هیستریزس تئوری و تجربی، در جریان‌ها، فرکانس‌ها و سیال‌های متفاوت سعی می‌شود که میزان توانایی مدل پارامتری اسپنسر در انطباق با منحنی‌های تجربی بررسی شود. مقایسه نتایج حاصل از مدل اسپنسر با پارامترهای شناسایی‌شده با منحنی‌های تجربی حاکی از آن است که این مدل در پیش‌بینی رابطه نیرو- سرعت انطباق مناسبی با منحنی‌های تجربی دارد، ولی برای نیرو- جابه‌جایی، در شناسایی اثر تاخیر نیرو و نقاط تیز منحنی ناموفق است.

کلیدواژه‌ها: سیال مگنتورئولوژیک، دمپر مگنتورئولوژیکال دو سر متحرک، اندازه ذرات پودر آهن، شناسایی پارامتر، مدل پارامتری اسپنسر

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۶/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۲۲

*نویسنده مسئول: ka_jahani@tabrizu.ac.ir

۱- مقدمه

دمپر مگنتورئولوژیکال به‌عنوان یک وسیله هوشمند برای استفاده در سیستم‌های تعلیق نیمه‌فعال، با قابلیت پاسخ‌دهی سریع نسبت به تغییرات شرایط محیطی و مصرف انرژی پایین از جذابیت بالایی برخوردار است. دمپر از طریق تغییر میدان مغناطیسی ایجادشده روی سیال مگنتورئولوژیک سبب تغییر حالت و خواص آن می‌شود و عملاً دمپر، رفتاری غیرخطی در منحنی‌های هیستریزس نیرو- جابه‌جایی و نیرو- سرعت از خود نشان می‌دهد. بنابراین شناسایی رفتار هیستریزس غیرخطی دمپر مگنتورئولوژیکال با استفاده از مدل‌های ریاضی ارائه‌شده در ادبیات فن، قبل از به‌کارگیری و طراحی کنترل‌کننده برای یک سیستم جاذب ارتعاشی اجتناب‌ناپذیر است. از این رو، در تعیین پارامترهای این مدل‌ها عوامل متعددی از جمله نوع دمپر، سیال مگنتورئولوژیک، ساختار دمپر، روش شناسایی و شرایط تست آزمایشگاهی می‌تواند دخیل باشد [1, 2].

سیال مگنتورئولوژیک (MRF) با عکس‌العمل سریع در حضور

میدان مغناطیسی، توانایی تغییر از حالت مایع شبه‌نیوتونی به جامد ویسکوالاستیک را در عرض چند میلی ثانیه دارد. این خاصیت قابلیت کنترل‌پذیری و وفق‌پذیری را به سیال مگنتورئولوژیک، برای به‌کارگیری در تجهیزات با کنترل نیمه‌فعال داده است. این سیال از سه جزء اصلی یعنی ذرات میکرونی با قابلیت مغناطیس‌شوندگی، سیال حامل و افزودنی‌های پایدارکننده تشکیل شده است [3, 4]. فلزات، آلیاژها و ترکیبات سرامیکی که قابلیت مغناطیس‌شوندگی و ظرفیت اشباع مغناطیسی بالا دارند، به‌طور معمول به‌منظور استفاده به‌عنوان ذرات پراکنده سیال مگنتورئولوژیک استفاده می‌شوند. در بررسی‌های به‌عمل‌آمده در این زمینه، به‌منظور انتخاب یک پودر مناسب، تحقیقاتی با هدف شناخت تاثیر شکل ذرات در میزان تغییر ویسکوزیته و تنش برشی سیال [5]، اندازه قطره‌های متفاوت یک نوع پودر در خواص رئولوژیک سیال مگنتورئولوژیک [6] و کسر وزنی یا حجمی ذرات با اندازه‌های متفاوت [7] انجام گرفته است. این بررسی‌ها در نهایت، تاثیر خود را بر چگالی میدان مغناطیسی، تنش برشی و متعاقباً نیروی میرایی ناشی از سیال در یک وسیله مگنتورئولوژیک خواهند گذاشت. در یکی از این تحقیقات، موسی‌زاده و جهانی [8] با ساخت دو نمونه سیال مگنتورئولوژیک با قطره‌های متفاوت از ذرات پودر آهن کربونیل کروی شکل و تست آن در یک دمپر دوسرمتحرک مشاهده کردند، با وجود اینکه اندازه ذرات در دامنه ماکزیم نیروی میرایی، تاثیر چشمگیری ندارد، ولی ذرات با اندازه کوچک‌تر، ظرفیت اتلاف انرژی و نیروی میرایی بزرگ‌تری نسبت به سیال با ذرات بزرگ‌تر دارند. گو و همکاران [7] چند نوع سیال مگنتورئولوژیک با نسبت‌های متفاوت از درصدهای وزنی دو پودر آهن کربونیل با قطره‌های ۳ و ۱۰ میکرومتر را به‌منظور بررسی مدت‌زمان ته‌نشینی، پایداری و خواص رئولوژیک، ویسکوزیته و تنش برشی تهیه کردند. نتایج کار حاکی از آن بود که با افزایش نسبت ذرات پودر آهن ۱۰ میکرومتر در مایع مگنتورئولوژیک، شدت میدان مغناطیسی، نرخ برش و ویسکوزیته در نبود جریان الکتریکی افزایش می‌یابد، ولی در مقابل، به‌دلیل سنگین‌شدن ذرات پودر آهن، پایداری و مدت‌زمان ته‌نشینی کاهش می‌یابد.

دمپر مگنتورئولوژیکال (MRD) با ظرفیت نیرویی بزرگ، قابلیت کنترل‌پذیری نیرو به‌صورت پیوسته و منبع تامین جریان الکتریکی پایین به‌عنوان یک جاذب ارتعاشات سازه‌ای و شوک‌های ناگهانی در وسایل و تجهیزات زیادی استفاده می‌شود. خودرو، مقاوم‌سازی ساختمان‌ها در برابر زلزله، پل‌های کابلی، تجهیزات نظامی و اندام‌های مصنوعی بدن به‌عنوان تجهیزات مجهز به دمپر مگنتورئولوژیکال به‌صورت گسترده مورد مطالعه و استفاده قرار گرفته‌اند [9, 10]. با توجه به نوع کارایی، ظرفیت نیروی میرایی و شرایط مکانی نصب، سه مدل اصلی از دمپرها شامل تک‌لوله‌ای، دولوله‌ای و دوسرمتحرک وجود دارد که با تغییر نوع و اندازه مجرای عبوری سیال، تغییر اندازه و محل کوئل‌های الکتریکی، مدل‌های دیگری با ظرفیت نیروی میرایی متفاوت طراحی می‌شود [10-13].

وانگ و همکاران [13]، مدل جدیدی از یک دمپر دو پیستون در ابعاد کوچک را برای جذب ارتعاش سازه‌های خرابی‌شکل طراحی و تست کردند. نتایج تست نشان داد با وجود اینکه، نیروی میرایی در بیشترین جریان الکتریکی (۲A) معادل ۷۰N خواهد بود، ولی منحنی‌های هیستریزس نیرو- جابه‌جایی و نیرو- سرعت دارای کمترین پدیده تاخیر نیرو هستند. ژو و همکاران [2]، یک دمپر دوسرمتحرک با پنج کوئل الکتریکی در ابعاد بزرگ را برای بررسی دامنه ماکزیم نیروی میرایی و ظرفیت اتلاف انرژی از طریق تغییر تعداد کوئل‌های فعال، طراحی و تست کردند. نتایج این مطالعه،

خشک به‌صورت موازی با المان دمپر ویسکوز است. یکی از عیوب این مدل این است که در تغییرات و نرخ برش کم، قادر به تعریف خواص الاستیک مایع در تجهیزات دینامیکی نیست. همچنین یک سیال مگنتورئولوژیکال بدون حضور میدان مغناطیسی، رفتار یک سیال نیوتونی را از خود نشان می‌دهد که مدل بینگهام در شناسایی این رفتار ناتوان است [9]. یکی دیگر از مدل‌های پارامتری، مدل بوک-ون است که برای طیف گسترده‌ای از رفتار هیستریزیس سیستم دارای پسماند مغناطیسی به کار می‌رود. این مدل با دارابودن قابلیت کنترل پذیری، ظرفیت بالایی در تعیین پارامترهای بزرگ حلقه‌های هیستریزیس منحنی نیرو-جابه‌جایی دارد. مدل بوک-ون برای تخمین این پارامترها و آنالیز پاسخ دمپر مگنتورئولوژیکال نوع دوسرمتحرک، دو پدیده اصطکاک ایستایی و اثر لایه نازک برشی را در نظر می‌گیرد که دقت تشخیص منحنی هیستریزیس را بالا می‌برد. یکی از عیوب این مدل پارامتری با وجود غیرخطی بودن و تشخیص دقیق رفتار منحنی هیستریزیس نیرو-سرعت این است که در ناحیه تسلیم و سرعت‌های کم نمی‌تواند مانند مدل بینگهام عمل کند و دچار خطا می‌شود [16]. یانگ و همکاران [17] با هدف توسعه الگوریتم‌های کنترلی یک وسیله مجهز به دمپر مگنتورئولوژیکال، سعی در ارایه مدل پارامتری دینامیک جدیدی برای تخمین مناسب رفتار غیرخطی ذاتی دمپر بر آمدند. آنها با بررسی ادبیات فن در زمینه شناسایی پارامترهای مدل‌های قبلی، در نهایت با بهبود مدل بوک-ون از طریق اضافه‌نمودن یک المان مکانیکی و یک المان ویسکوز غیرخطی، مدل اسپنسر را ارایه دادند. این مدل، دقت بالایی در کاهش خطای بین داده‌های تجربی و شبیه‌سازی از طریق تشخیص و توصیف محل‌های تیز منحنی هیستریزیس (نقاط به‌هم‌رسیدن سیکل رفت و برگشت) در سرعت‌های پایین داشت. کوک و همکاران [18] مدل پارامتری جدیدی برای دمپر مگنتورئولوژیکال تحت عنوان مدل تانژانت معکوس ارایه دادند. آنها با اعمال الگوریتم تراکم ذرات (PSO) برای شناسایی نشان دادند که برخی پارامترهای مدل ارایه‌شده به‌صورت توابع چندجمله‌ای از جریان الکتریکی و بعضی دیگر به‌صورت عددی ثابت خواهند بود. با وجود سادگی معادلات مدل کوک نسبت به معادلات غیرخطی بوک-ون، این مدل، منحنی‌های هیستریزیس هموارتری را نسبت به منحنی‌های تیز بوک بون نتیجه می‌دهد. ینگ و همکاران [19] با طرح این مسئله که شناسایی رفتار یک دمپر مگنتورئولوژیکال با ابعاد بزرگ به دلیل محدودیت‌های فیزیکی در تست مشکل‌ساز است، یک دمپر مگنتورئولوژیکال تک‌لوله‌ای در ابعاد کوچک را برای شناسایی پارامترهای مدل بهبودیافته بوک-ون تست کردند. نتایج کار نشان داد، پارامترهایی که به‌صورت توابع چندجمله‌ای از جریان الکتریکی هستند، قابل استناد برای شناسایی منحنی‌های هیستریزیس یک دمپر با ابعاد بزرگ است، ولی پارامترهای ثابت با جریان الکتریکی مخصوص، دمپر کوچک‌تر هستند.

با وجود اینکه مطالعات گسترده‌ای به بررسی جداگانه خواص رئولوژیک ذرات سیال مگنتورئولوژیکال، تاثیر طراحی نوع دمپر بر نیروی میرایی و شناسایی پارامترهای مدل‌های دینامیک پرداخته‌اند، ولی تاکنون در ادبیات فن، مطالعه‌ای روی شناسایی پارامترهای مدل پارامتری اسپنسر برای سیال‌های متفاوت انجام نگرفته است. بنابراین در این تحقیق در بخش دوم، ابتدا دو نوع سیال مگنتورئولوژیک براساس اندازه متفاوتی از پودر آهن کربونیل ساخته شد. در بخش سوم و چهارم روی دمپر مگنتورئولوژیکال دوسرمتحرک طراحی‌شده براساس مود برش-جریان در آزمایشگاه

تاثیر چشمگیر افزایش ظرفیت اتلاف انرژی دمپر و نیروی میرایی را با اضافه‌کردن کوئل‌های فعال و افزایش جریان الکتریکی خارجی نشان می‌داد. به‌گونه‌ای که به‌عنوان مثال در جریان الکتریکی ۲۸ با یک کوئل الکتریکی، دامنه ماکزیمم نیروی میرایی ۳۸/۸۱ KN بود و وقتی تعداد کوئل‌ها به پنج عدد اضافه شد، این نیرو در این جریان به ۱۸۶/۲ KN رسید.

ادیبی و همکاران [14] به‌منظور بررسی تاثیر جریان الکتریکی روی سیال مگنتورئولوژیک حاوی نانوذرات پایدارکننده سلیکون، یک دمپر دومخزنه جدیدی را طراحی و ساختند. آنها با بررسی خواص مگنتورئومتری در حالت‌های مختلف برش نشان دادند که بیشینه تنش برشی در بیشترین میدان مغناطیسی حدود ۲۰ کیلوپاسکال بوده و وجود پایدارکننده‌های نانو، کیفیت پایداری سیال را بالا برده است. همچنین با تست دمپر برای این سیال در بیشترین شدت میدان مغناطیسی، دامنه نیروی دمپینگ حدود ۵ برابر دامنه نیروی میرایی در جریان الکتریکی صفر است.

مدل‌های توسعه‌یافته ریاضی، برای شناسایی رفتار یک دمپر مگنتورئولوژیکال، برای استفاده از حداکثر کارایی دمپر و کنترل آن در یک سیستم نیمه‌فعال استفاده می‌شود. بنابراین آنچه در انتخاب مدل ریاضی رفتار یک دمپر مگنتورئولوژیکال حایز اهمیت بوده، عبارت از موارد زیر است [1]:

الف- دقت پیش‌بینی: دقت یک مدل ارایه‌شده می‌تواند از مقایسه بین خروجی پیش‌بینی‌شده از مدل و نتایج حاصل از داده‌های تجربی به دست آید.

ب- سادگی معادلات: زمانی که یک مدل ساده برای شناسایی خواص دینامیک یک دمپر مگنتورئولوژیکال ارایه می‌شود، شناسایی پارامترهای آن نیز آسان است و استفاده از آن در یک سیستم نیمه‌فعال نیز یکپارچه‌تر خواهد بود.

ج- قابل اعتماد بودن: تشخیص عدم قطعیت رفتار دمپر مگنتورئولوژیکال و به‌روزرسانی مدل دینامیک، نتیجه قابل اعتماد بودن معادلات دیفرانسیل فرض‌شده، به‌منظور ایجاد ارتباط غیرخطی هیستریزیس بین نیروی میرایی و منحنی‌های جابه‌جایی و سرعت دمپر ارایه شده است.

د- سازگاری: نیروی میرایی یک دمپر مگنتورئولوژیکال تحت تاثیر فاکتورهای مختلف قرار دارد که در زمان کار دمپر دچار تغییر می‌شوند، از این رو سازگاری به‌روز مدل توسعه‌یافته با شرایط جدید از اهمیت بالایی برخوردار است. براساس این خواص، مدل‌هایی ارایه شدند که هر کدام قسمتی از این ویژگی‌ها را در نظر گرفته بودند و به‌صورت عمده به سه دسته اصلی مدل شبه‌استاتیک و مدل‌های دینامیک، مدل‌های پارامتری دینامیک و غیرپارامتری دینامیک و دسته سوم، مدل دینامیک معکوس تقسیم می‌شوند.

مدل‌های پارامتری دینامیک، در واقع مجموعه‌ای از المان‌های خطی و غیرخطی ویسکوز و فنرهای خطی و غیرخطی هستند. پارامترهای مدل به‌روزرسانی‌شده دمپر، برای شناسایی و کنترل رفتار سیستم‌های ارتعاشی متشکل از چندین دمپر مگنتورئولوژیکال در شرایط مختلف کاری، مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای این منظور، شناسایی بهینه‌ترین حالت پارامترهای ثابت و متغیر با جریان الکتریکی این مدل‌ها در هر جریان و فرکانس، از مقایسه مدل ریاضی و نتایج تجربی با استفاده از تکنیک‌های حل و الگوریتم‌های بهینه‌سازی تخمین زده می‌شود [11، 12، 15]. مدل پارامتری بینگهام یکی از نخستین مدل‌های ارایه‌شده برای دمپر مگنتورئولوژیکال با فرض رفتار غیرنیوتونی پلاستیک برای سیال بوده که ترکیبی از المان اصطکاک

سازه‌های هوشمند و وفق‌پذیر، تست‌های دینامیک با تحریک هارمونیک در جریان‌ها و فرکانس‌های مختلف انجام شد. در بخش پنجم، پارامترهای مدل پارامتری اسپنسر برای دو نوع سیال متفاوت با استفاده از حلگر غیرخطی حداقل مربعات غیرخطی و استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی درجه دوم متوالی برای جریان‌ها و فرکانس‌های مختلف شناسایی شد. پارامترهایی از مدل که نسبت به افزایش جریان الکتریکی به‌صورت سیستماتیک و معنی‌دار تغییر می‌کنند، برای حالت‌های مختلف تست از طریق برازش منحنی به‌صورت چندجمله‌ای‌هایی از جریان استخراج می‌شوند. سپس با ترسیم منحنی‌های پیش‌بینی مدل پارامتری اسپنسر با منحنی‌های هیستریزیس تجربی، در جریان‌ها، فرکانس‌ها و سیال‌های متفاوت سعی شد که میزان توانایی مدل پارامتری اسپنسر در انطباق با منحنی‌های تجربی بررسی شود.

۲- ساخت سیال مگنتورئولوژیک

۲-۱- مواد تشکیل‌دهنده

ذرات آهن کربونیل با قطر حدود ۴۰ تا ۶۰ میکرون به بالا در صنعت متالوژی پودر و بازار داخلی به‌صورت رایج‌تر به کار می‌رود و دسترسی به آن نیز آسان‌تر است. همچنین قیمت آن نسبت به قطره‌های ۵ تا ۱۰ میکرون مناسب‌تر و از لحاظ اقتصادی قابل توجه است. بنابراین در این تحقیق، دو نوع پودر آهن کربونیل کروی شکل با قطر ذرات ۴۰ میکرومتر با چگالی ۷/۸۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب و ۶۳ میکرومتر با چگالی ۷/۴۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و خلوص ۹۹/۵٪ برای فاز پراکنده سیال مگنتورئولوژیک با درصد حجمی یکسانی به کار برده می‌شود. در انتخاب نوع سیال مربوط به فاز پیوسته، مطابق آنچه در مطالعات و تحقیقات قسمت مقدمه بیان شده، سیال‌های مختلفی با توجه به اندازه ویسکوزیته و میزان پایداری ذرات آهن در آن، به‌منظور ساخت سیال مگنتورئولوژیک استفاده شده است. بنابراین سعی شد، سیالی انتخاب شود که ویسکوزیته مناسبی در طیف دمایی کاری دمپر مگنتورئولوژیکال داشته باشد و همچنین در بازار مصرفی داخلی، صرفه اقتصادی داشته باشد تا در صورت کارایی مناسب آن در دمپر، جایگزین تقریباً مناسبی برای روغن سلیکون باشد. همچنین اگر ویسکوزیته روغن خیلی بالا باشد، عملاً ویسکوزیته سیال مگنتورئولوژیک نیز فقط تحت تاثیر آن خواهد بود. از طرف دیگر، ویسکوزیته بزرگ‌تر سیال، تضمین‌کننده پایداری سیال مگنتورئولوژیک نیست و گاهی در مطالعاتی^[20] ویسکوزیته بیشتر، کاهش پایداری را به‌دنبال دارد. همچنین چون سیال مگنتورئولوژیک همواره در محیط در حال کار دمپر قرار دارد و در حال ترکیب و اختلاط مجدد بوده، ته‌نشینی آن کم‌رنگ است. براساس مطالعات انجام‌گرفته توسط کیومرثی و همکاران^[21] که در تهیه سیال مگنتورئولوژیک برای بررسی پایداری و ته‌نشینی از روغن هیدرولیک H-68 استفاده کرده‌اند، بنابراین، این تحقیق نیز در فاز پیوسته سیال پایه هیدرولیک H-68 با ویسکوزیته ۶۸Cst در دمای ۴۰°C استفاده می‌نماید. همچنین افزودنی گریس با پایه لیتیم برای پایداری سیال مگنتورئولوژیک در مطالعات زیادی^[20, 22, 23] استفاده شده است و نتایج قابل قبولی را به دست آورده‌اند. بنابراین گریس نسوز ظرفیت فشار بالای پایه لیتیم با نقطه تقطیر ۱۸۳°C (شرکت آترو سبز) با درصد حجمی مشخص به‌منظور افزایش پایداری و جلوگیری از به‌وجودآمدن توده‌های آهن استفاده می‌شود.

۲-۲- سیال مگنتورئولوژیک

در فرآیند ساخت سیال مگنتورئولوژیک، سهم اجزای تشکیل‌دهنده

براساس درصد وزنی یا درصد حجمی از اهمیت بالایی برخوردار است، بنابراین در این زمینه، مقالاتی که سیال مگنتورئولوژیک را برحسب درصد حجمی ساخته‌اند، مناسب‌ترین بازه حجمی برای پودر آهن کربونیل ۲۱/۶ تا ۴۱٪ حجم کل سیال، برای سیال پایه ۵۳ تا ۷۵٪ و مابقی حجم کل سیال پایدارکننده فرض شده‌اند.^[23] با این تفاسیر، مطابق با جدول ۱، برای تهیه ۵۲۰ میلی‌لیتر (حجم مخزن دمپر) سیال از دو نوع پودر، ابتدا پایدارکننده گریس ای‌پی‌جی به روغن هیدرولیک اضافه می‌شود و محلول به‌کمک همزن مکانیکی با دور ۳۰۰۰rpm به مدت یک ساعت در دمای ۲۵°C به هم زده می‌شود. سپس، پودر آهن کربونیل، اضافه و به مدت ۳۰ دقیقه دیگر، محلول نهایی زیر همزن مکانیکی هم زده می‌شود. از آنجایی که هدف این تحقیق، نشان‌دادن تاثیر اندازه ذرات آهن کربونیل با قطره‌های بزرگ در ظرفیت نیروی میرایی و تعیین پارامترهای مدل اسپنسر این دو نمونه سیال است، بررسی گسترده‌ای روی نوع پایدارکننده‌ها و روغن حامل ذرات در میزان پایداری سیال انجام نگرفته است. با علم به اینکه ته‌نشینی یک سیال دوفازی، معادل نسبت ارتفاع قسمت شفاف سیال بعد از گذشت یک مدت‌زمان چندروزه به مجموع قسمت شفاف و کدر آن است، به‌صورت ظاهری مشاهده شد که سیال بعد از حدود ۴ روز به ثبات ته‌نشینی ۱۰٪ می‌رسد. از طرف دیگر، با هر بار تست، دمپر سیال به هم زده می‌شود و در داخل دمپر نیز به دلیل حرکت پیستون و جابه‌جایی سیال بین دو مخزن بالا و پایین ته‌نشینی انجام نمی‌شود. ویسکوزیته از پارامترهای رئولوژیک و ذاتی سیال است که توسط دستگاه سیبولد ویسکومتر، در دمای ۴۰°C اندازه‌گیری شد. روش کار این دستگاه براساس مدت‌زمانی است که طول می‌کشد تا ظرف مندرج ۶۰ میلی‌لیتر با عبور سیال مگنتورئولوژیک از مجرای کنترل به ۴ قطر میلی‌متر پُر شود.

جدول ۱) درصد حجمی ترکیبات با احتساب حجم نهایی سیال^[8]

درصد حجمی مواد تشکیل‌دهنده			نمونه‌های سیال
گریس EPG	روغن H-68	درصد حجمی آهن کربونیل	
۸٪	۶۷٪	۲۵٪	MRF1
۸٪	۶۷٪	۲۵٪	MRF2

MRF1= سیال با ذرات ۴۰ میکرون؛ MRF2= سیال با ذرات ۶۳ میکرون

با تعیین مدت‌زمان ریزش رابطه ۱ برای بازه دمایی ۴۰°C < t < ۲۵°C در دو نمونه سیال برای تعیین لزجت سینماتیک به کار می‌رود:

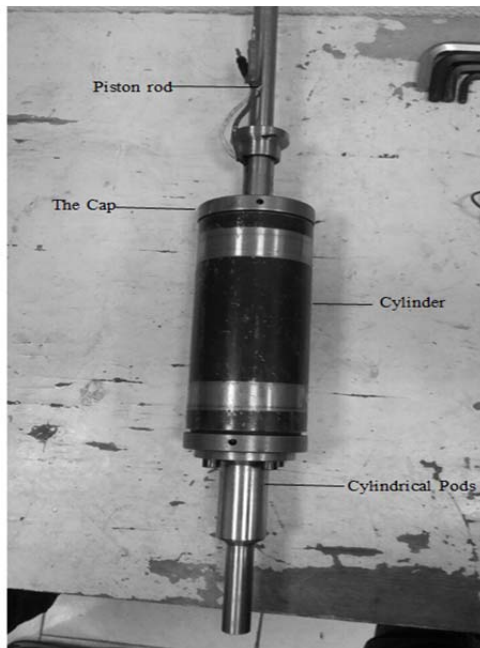
$$v = 0.0224t - \frac{1.84}{t} \quad (1)$$

با ثبت مدت‌زمان ریزش ۵۴/۷ ثانیه برای نمونه ۴۰ میکرومتر با چگالی ۱/۴۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب، لزجت دینامیک ۰.۰۰۱۸۱ (Pa.s) به دست می‌آید. همچنین با ثبت مدت‌زمان ریزش ۶۴/۵ ثانیه در نمونه ۶۳ میکرومتر با چگالی ۱/۳۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب، لزجت دینامیک ۰.۰۰۲۷۳ Pa.s حاصل می‌شود.

۳- ساخت دمپر مگنتورئولوژیکال دوسرمتحرک

شکل ۱، شماتیک دمپر مگنتورئولوژیکال دوسرمتحرک طراحی‌شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. این دمپر توسط پیستون، به دو قسمت محفظه فوقانی و تحتانی تقسیم شده که کاملاً با مایع مگنتورئولوژیکال پُر شده است. زمانی که سیال از مجرای حلقوی با قطر d_c در حال عبور است، میدان مغناطیسی خارجی متغیر با جریان الکتریکی روی سیال اثر می‌گذارد و ذرات پراکنده پودر آهن، محلول مگنتورئولوژیک را براساس جهت میدان مغناطیسی

یکی از میل پیستون‌های متحرک در یک سمت دمپر نصب شده است. از طرف دیگر، هر سه کوئل دمپر در حالت فعال قرار دارند و به صورت همزمان، یک جریان الکتریکی به آنها اعمال می‌شود. شکل ۲، مجموعه پیستون با سه کوئل موازی و دمپر مگنتورئولوژیکال مونتاژ شده را نشان می‌دهد. با بستن کوئل‌ها به صورت موازی، جریان الکتریکی اعمالی از طرف منبع تغذیه به صورت یکسان به هر سه کوئل الکتریکی وارد می‌شود و کشش جریان کمتر خواهد بود.



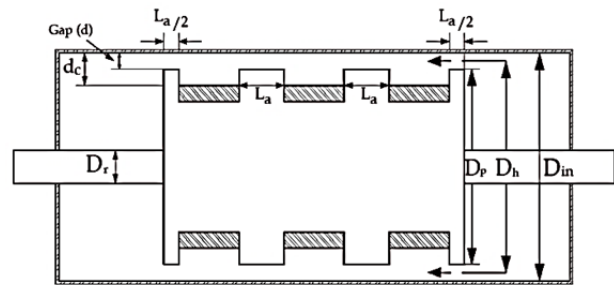
شکل ۲) دمپر مگنتورئولوژیکال

۴- تست دمپر مگنتورئولوژیکال

۴-۱- مجموعه آزمایشگاهی و تست

به منظور بررسی رفتار دینامیک دمپر مگنتورئولوژیکال در حضور میدان مغناطیسی، مجموعه تست آزمایشگاهی مطابق با شکل ۳ که شامل دستگاه تست هیدرولیک دینامیک زویک رول آملر اچ‌ای ۲۵۰ محصول آلمان مجهز به سنسورهای بارگذاری نیرو، سنسور اندازه‌گیری جابه‌جایی، واحد کنترل هیدرولیک نرم‌افزار Workshop 96 برای ثبت داده‌ها و منبع قابل کنترل جریان الکتریکی است. به منظور تست دمپر در دستگاه، میل پیستون آزاد دمپر در فک ثابت مجهز به سنسور نیرو قرار می‌گیرد و فک هیدرولیک متحرک مجهز به سنسور اندازه‌گیری جابه‌جایی، روی غلاف استوانه‌ای قفل می‌شود. در واحد کنترل نرم‌افزار، تحریک هارمونیک سینوسی با تابع $u = X_0 \sin(2\pi f t)$ به دستگاه تست اعمال خواهد شد. X_0 دامنه جابه‌جایی تحریک هارمونیک، معادل ماکزیمم کورس دمپر، در تمام تست‌ها برابر با $15 \pm$ میلی‌متر، f فرکانس‌های بارگذاری ۰/۲۵ هرتز و ۰/۵ هرتز و زمان بارگذاری جابه‌جایی هارمونیک ۲۰ ثانیه است. این تحریک هر بار با جریان‌های الکتریکی صفر، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ آمپر به دمپر مگنتورئولوژیکال اعمال خواهد شد. آنچه واحد کنترل نرم‌افزار Workshop 96 به عنوان خروجی ثبت می‌کند، نیروی میرایی برحسب زمان و نیروی میرایی برحسب جابه‌جایی در هر تست است. در مجموع برای دو سیال مگنتورئولوژیک، ۲۰ تست با دو فرکانس تحریک هارمونیک سینوسی انجام گرفت.

به صورت یک آرایش زنجیروار در می‌آورد.



شکل ۳) شماتیک دمپر مگنتورئولوژیکال دوسر متحرک با سه کوئل الکتریکی

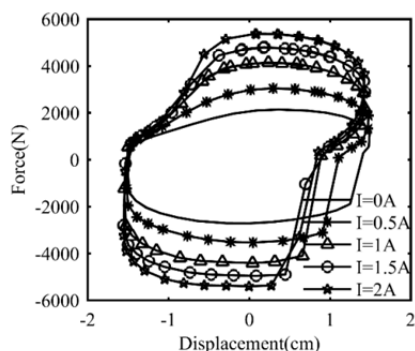
در این مرحله، سیال دچار کرنش برشی و تغییر حالت از سیال نیوتونی به یک سیال غیرنیوتونی می‌شود. این تغییر حالت با افزایش شدت میدان مغناطیسی و تغییر ویسکوزیته سیال تقویت می‌شود و با قطع جریان الکتریکی سیال به حالت اولیه خود بر می‌گردد. در این نوع دمپر بر خلاف مدل یک‌سر متحرک، تغییر حجمی در مایع ایجاد نمی‌شود و در هر سیکل، مایع مگنتورئولوژیک بین دو مخزن جابه‌جا می‌شود. بنابراین ظرفیت نیرویی بزرگ‌تری نسبت به سایر دمپرها دارد. این ظرفیت بالا تابع جنس فلز به کاررفته در ساخت، تعداد کوئل‌ها و قطر کوئل بستگی دارد. در ساخت این دمپر، جنس پیستون و سیلندر که مهم‌ترین عامل در ظرفیت اشباع مغناطیسی دمپر مگنتورئولوژیکال بوده، از فولاد سی‌کا ۴۵ آبکاری شده است. همچنین از سیم مسی به قطر ۰/۸ میلی‌متر برای سیم‌پیچی سه کوئل الکتریکی استفاده شده است. مشخصات طراحی دمپر مگنتورئولوژیکال ساخته شده در آزمایشگاه مواد هوشمند در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲) پارامترهای هندسی دمپر مگنتورئولوژیکال دوسر متحرک

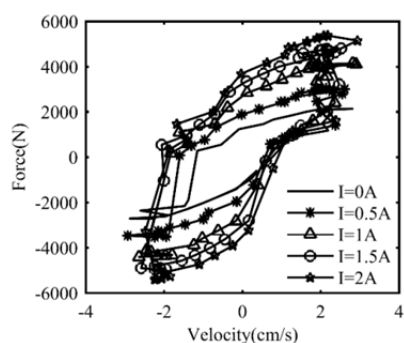
پارامترها	مقادیر
L_m (میلی‌متر)	۱۵
N	۲۷۰
R (Ω)	۱/۲
L (میلی‌متر)	۲۴۰
L_a (میلی‌متر)	۱۵
D (میلی‌متر)	۱
d_c (میلی‌متر)	۲/۸
L_c (میلی‌متر)	۲۲
D_h (میلی‌متر)	۸۸
D_p (میلی‌متر)	۸۷
D_{in} (میلی‌متر)	۸۹
D_r (میلی‌متر)	۳۰

طول سیلندر با مشخصه L و طول کورس دمپر مگنتورئولوژیک از هر طرف را با پارامتر L_m نشان می‌دهند. تعداد دور سیم مسی در هر کوئل با N و مقاومت سیم‌های مسی با R مشخص شده است. همچنین با توجه به مطالعات انجام گرفته در زمینه اثرگذاری تعداد کوئل‌ها در نیروی میرایی^[۲] می‌توان اذعان نمود که هر چقدر تعداد کوئل‌ها بیشتر باشد، نیروی میرایی بیشتری با افزایش جریان الکتریکی تولید می‌شود. از این رو در این تحقیق نیز با هدف تولید حداکثر نیروی ۶۵۰۰ N در ماکزیمم جریان الکتریکی ۲ A، سه عدد کوئل روی پیستون طراحی شده است. به منظور قرارگیری دمپر در داخل فک متحرک دستگاه تست، یک غلاف استوانه‌ای شکل روی

سبب می‌شود که منحنی‌های هیستریزیس نیرو- جابه‌جایی با افزایش جریان در یک سیکل بعد از عبور از نیروی صفر دچار تورفتگی شوند و سپس روند صعودی یا نزولی خود را ادامه دهند. این کاهش حجم منحنی هیستریزیس، در مطالعات یانگ و همکاران [9] نیز مشاهده شده است.

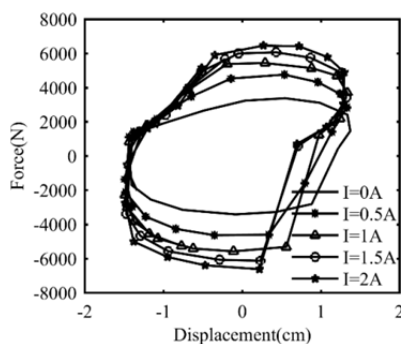


الف

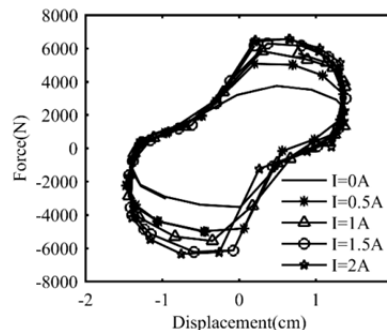


ب

نمودار ۱) منحنی‌های تست هیستریزیس نیرو- جابه‌جایی و نیرو- سرعت در فرکانس ۰/۲۵ هرتز برای سیال MRF1: الف) نیرو- جابه‌جایی، ب) نیرو- سرعت در فرکانس ۰/۲۵ هرتز برای سیال MRF1



الف



ب

نمودار ۲) منحنی‌های تست هیستریزیس نیرو- جابه‌جایی و نیرو- سرعت در فرکانس ۰/۵ هرتز برای سیال MRF1 و MRF2: الف) MRF1، ب) MRF2

۵- شبیه‌سازی مدل اسپنسر

به منظور بررسی رفتار غیرخطی خود دمپر مگنتورئولوژیکال و



شکل ۳) مجموعه تست آزمایشگاهی تست دمپر مگنتورئولوژیکال

۴-۲- منحنی‌های تست آزمایشگاهی

داده‌های نیرو- جابه‌جایی و نیرو- زمان ثبت شده از تست دو نمونه سیال ۴۰ و ۶۳ میکرومتر در جریان الکتریکی صفر تا ۲A و فرکانس ۰/۲۵ و ۰/۵ هرتز، در نرم افزار MATLAB برای ترسیم منحنی‌های تست فراخوانی شدند. در نمودارهای ۱ و ۲ به ترتیب منحنی‌های هیستریزیس نیرو- جابه‌جایی و نیرو- سرعت در فرکانس ۰/۲۵ هرتز برای سیال ۴۰ میکرومتر و منحنی‌های هیستریزیس نیرو- جابه‌جایی برای دو نمونه سیال در فرکانس ۰/۵ هرتز ارائه شده‌اند.

نتایج بررسی عددی و میزان تغییر دامنه نیروی میرایی نسبت به تغییر میدان مغناطیسی خارجی در مقاله موسی‌زاده و همکاران [8] که حاصل تحقیقات اولیه روی دمپر مگنتورئولوژیکال طراحی شده در این تحقیق بوده، به تفصیل بررسی شده است. به صورت خلاصه می‌توان بیان نمود که منحنی‌های هیستریزیس نیرو- جابه‌جایی، اثر افزایش جریان الکتریکی بر نیروی میرایی و ظرفیت اتلاف انرژی در دو نوع سیال را نشان می‌دهند که البته در جریان‌های بالاتر، این افزایش به نسبت جریان‌های ابتدایی کمتر خواهد بود. به عنوان مثال، افزایش نسبی ظرفیت اتلاف انرژی بین دو جریان الکتریکی مجاور در فرکانس ۰/۲۵ هرتز برای سیال MRF1 به ترتیب ۲/۲۷۷/۵۱، ۱۸ و ۱۵/۲٪ است. همچنین برای سیال MRF2 این مقادیر به ترتیب ۲/۱۷۹، ۸/۱۰۸ و ۹/۷٪ است. در این درصدها افزایش چشمگیر ظرفیت اتلاف انرژی نسبت به جریان الکتریکی صفر به ۰/۵ آمپر و سپس کاهش این اختلاف در جریان‌های بالاتر دیده می‌شود. با بررسی به عمل آمده در منحنی‌های هیستریزیس تجربی مشاهده شد که یکی از عیوب ظاهر شده در تست دمپر، پدیده تاخیر نیروی ناشی از دو عامل است که عامل اول، حباب‌های هوای گیرافتاده در زمان پُر کردن دمپر از سیال و عامل دوم، پدیده انسداد به خاطر تنش برشی بسیار بالای سیال در حضور میدان مغناطیسی است. به منظور رفع این پدیده‌ها می‌توان دو روش به کار برد. روش اول، تغییر نحوه پُر کردن دمپر از سیال و روش دوم، به دلیل تنش برشی بالا در مقابل عبور سیال از محفظه‌ای به محفظه دیگر از طریق مجرای حلقوی با قراردادن یک منبع جبران فشار مانند اکومولاتور خارجی قابل کاهش هستند. جمع شدن حباب‌های هوا و وقوع پدیده انسداد در دمپر باعث پدیده کاویتاسیون و ایجاد پدیده تاخیر نیرو می‌شود. همچنین این پدیده

واگرایی مقادیر استفاده می‌شود. مراحل حل عددی به‌منظور تخمین پارامترهای اسپنسر به‌صورت زیر است:

الف- معادله نیروی اسپنسر برحسب داده‌های تست (زمان، جابه‌جایی و سرعت) به‌صورت تابعی از پارامترهای مجهول تعریف می‌شود.

ب- تابع هزینه مورد نظر برحسب نیروی تجربی و نیروی مدل تخمینی از حل معادله اسپنسر و مقدار میانگین نیروی تجربی به‌گونه‌ای تعریف می‌شود که اختلاف خطای داده‌های تجربی و شبیه‌سازی کمینه شود.

ج- مقادیر اولیه برای هر یک از پارامترها در نظر گرفته می‌شود که این مقادیر در هر اجرا به مقادیر اصلی نزدیک‌تر می‌شوند.

د- با استفاده از دستور lsqnonlin در نرم‌افزار MATLAB و الگوریتم بهینه‌سازی درجه دوم متوالی پارامترهای جدید تخمین زده می‌شوند.

روش حداقل مربعات غیرخطی، حالتی از آنالیز حداقل مربعات است که در آن به‌منظور منطبق‌کردن مجموعه‌ای از M داده روی یک مدل غیرخطی دارای N پارامتر نامعلوم ($M > N$) از طریق تخمین این تعداد پارامتر استفاده می‌شود. در واقع از لحاظ نظری، اگر مجموعه نقاطی به‌صورت $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ و تابع مدلی به‌شکل $y = f(x, \xi)$ وجود داشته باشد که علاوه بر متغیر x دارای N پارامتر $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_n$ باشد، آن گاه مقادیر این پارامترها باید طوری تعیین شوند که مجموع حداقل مربعات، خطای تابع هدف کمینه شود [26].

$$r_i = y_i - f(x_i, \xi) \quad (5)$$

$$S = \sum_{i=1}^M r_i \quad (6)$$

که در آن مقدار کمینه S با مساوی صفر قرار دادن مشتق آن نسبت به هر یک از پارامترهای مدل تعیین می‌شود. به‌منظور تعیین گرادیان صفر باید حداقل مربعات غیرخطی مقادیر اولیه را وارد و پارامترهای اولیه را تعیین نمود. سپس این مقادیر از طریق یک تقریب متوالی مطابق با معادله ۷ به‌روزرسانی می‌شود.

$$\varepsilon_j^{k+1} = \varepsilon_j^k + \Delta \varepsilon_j \quad (7)$$

$\Delta \varepsilon$ و K به‌ترتیب بردار تغییر اندازه پارامترها و تعداد تکرارها به‌صورت برداری افزایشی هستند. در تعیین مقادیر پارامترها گاهی واگرایی رخ می‌دهد که به‌معنی دور شدن از آن انطباق بهینه بین داده‌های تجربی و مدل ریاضی است. در این مقاله به‌منظور حل این معضل از الگوریتم بهینه‌سازی درجه دوم متوالی استفاده می‌شود که عملکردی تکراری است. این الگوریتم به‌صورت کمینه‌سازی یک تابع هدف در یک فرآیند تکراری، با اعمال محدودیت‌های خطی و غیرخطی طبق روابط ۱۰-۸ عمل می‌کند [25].

$$f(x) \approx \nabla f(x^k)^T (x - x^k) + \frac{1}{2} (x - x^k)^T H f(x^k) (x - x^k) \quad (8)$$

$$h(x^k) + \nabla h(x^k)^T (x - x^k) = 0 \quad (9)$$

$$g(x^k) + \nabla g(x^k)^T (x - x^k) \leq 0 \quad (10)$$

در رابطه ۸، H ماتریس هسیان است که به‌صورت $\frac{\partial^2 f(x_i, \varepsilon)}{\partial \varepsilon_j \partial \varepsilon_k}$ تعریف می‌شود. پارامتر تخمینی به‌دست‌آمده از این الگوریتم نقطه‌ای ماکزیمم، نزدیک به مقادیر اولیه فرض شده است. پس انتخاب مقادیر اولیه اهمیت بالایی دارد.

مقادیر ۱۰ پارامتر مدل اسپنسر مورد استفاده به‌منظور بررسی دمپر مگنتورئولوژیکال در این تحقیق، شامل $x_0, n, C_0, C_1, K_0, K_1, A, \beta, \delta, \alpha$ هستند که براساس حلگر حداقل مربعات غیرخطی و اعمال

همچنین پیش‌بینی رفتار دینامیک تجهیزات مکانیکی مجهز به این نوع دمپرها، نیاز به به‌کارگیری یک مدل ریاضی برای شبیه‌سازی عددی این وسیله مگنتورئولوژیکال است. مدل پارامتری اسپنسر که به‌بود یافته مدل پارامتری بوک-ون است، به‌خاطر توانایی بالا در شناسایی منحنی‌های هیستریزس دقیق در سرعت‌های بزرگ و کوچک از طریق دو المان ویسکوز، برای بررسی رفتار دمپر دوسرمتحرک در این مقاله استفاده شده است. لذا این تحقیق بر آن است که پارامترهای مدل پارامتریک اسپنسر را برای دمپر دوسرمتحرک در دو سیال متفاوت شناسایی نماید. شناسایی مناسب‌ترین مقادیر برای پارامترهای مدل غیرخطی اسپنسر در هر جریان و فرکانس تحریک، با به‌کارگیری حلگر حداقل مربعات غیرخطی و کمینه‌سازی مقادیر این حلگر با تکیه بر الگوریتم بهینه‌سازی درجه دوم متوالی انجام می‌شود.

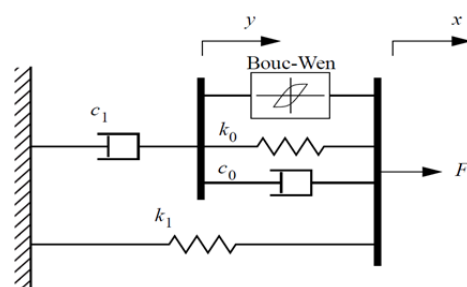
۱-۵ مدل پارامتری اسپنسر

شماتیک مدل پارامتری اسپنسر که ترکیبی از المان‌های مکانیکی فنر، دمپ‌های ویسکوز و المان ویسکوز بوک-ون بوده، در شکل ۴ نشان داده شده است. معادلات حاکم بر این مدل به‌منظور تعیین نیروی میرایی در روابط ۲-۴ آورده شده است [16, 17, 25].

$$F_{mr} = K_1(x - x_0) + C_1 \dot{y} \quad (2)$$

$$\dot{y} = \frac{1}{C_0 + C_1} (\alpha z + C_0 \dot{x} + K_0 x) \quad (3)$$

$$\dot{z} = -\delta |\dot{x} - \dot{y}| z |z|^{n-1} - \beta (\dot{x} - \dot{y}) |z|^n + A (\dot{x} - \dot{y}) \quad (4)$$



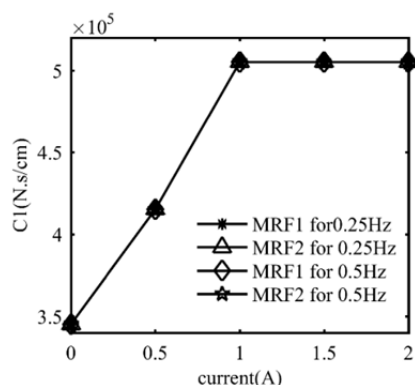
شکل ۴ شماتیک مدل پارامتری اسپنسر

در رابطه ۲، K_1 و C_1 به‌ترتیب سختی فنر و میرایی ویسکوز با تابعی از جریان الکتریکی در سرعت‌های کم برای دمپر مگنتورئولوژیکال هستند. از حل معادله ۳، متغیر داخلی y که یکی از برتری‌های مدل اسپنسر در توانایی نشان‌دادن تیزی‌های منحنی هیستریزس است به دست می‌آید. سه پارامتر α, C_0 و K_0 در این معادله به‌ترتیب برای بیان تنش برشی سیال مگنتورئولوژیکال، میرایی ویسکوز و سختی فنر در سرعت بالا است. المان ویسکوز بوک-ون به‌صورت αz حاصلضرب متغیر تکاملی z با توانایی شناسایی حالت‌های مختلف رفتار هیستریزس، در پارامتر تعریف شده α است. معادله ۴ شامل پارامترهای δ, β و A به‌ترتیب برای نشان‌دادن شیب مثبت و منفی و اندازه حلقه هیستریزس نسبت به سرعت حرکت پیستون تعریف شده‌اند. همچنین مقدار اسکالر n میزان همواری و صافی منحنی هیستریزس در انتقال از حالت الاستیک به پلاستیک سیال مگنتورئولوژیکال را تعریف می‌کند.

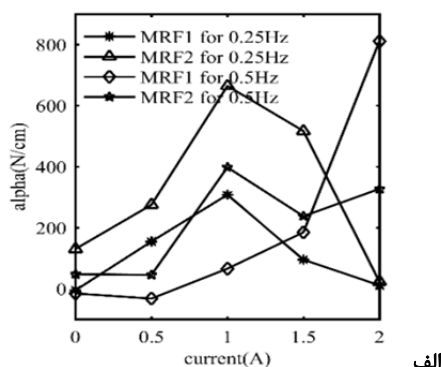
۲-۵ شناسایی پارامترهای مدل اسپنسر

در این مقاله به‌منظور تعیین پارامترهای مدل غیرخطی اسپنسر و روند تغییر این پارامترها نسبت به جریان الکتریکی و فرکانس تحریک، از حلگر حداقل مربعات غیرخطی با تکیه بر الگوریتم بهینه‌سازی درجه دوم متوالی برای کمینه‌سازی و جلوگیری از

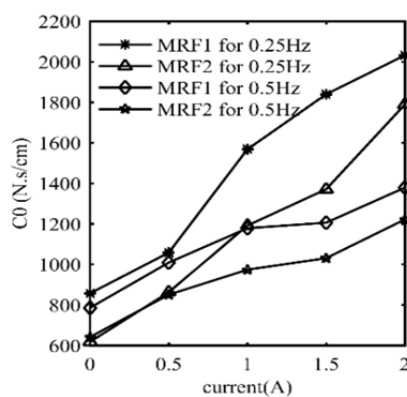
الکتریکی، تغییری نمی‌کنند [15] و در برخی دیگر نیز ثابت هستند [19]. پارامترهایی از مدل که نسبت به افزایش جریان الکتریکی به صورت سیستماتیک و معنی‌دار تغییر می‌کنند، به صورت توابع چندجمله‌ای از جریان الکتریکی با استفاده از روش برازش منحنی برای چهار حالت در نظر گرفته شده تست در جدول ۵ آورده شده است.



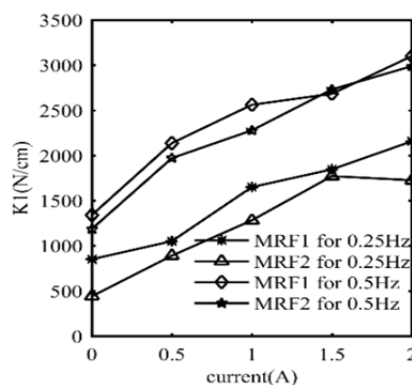
نمودار ۳) منحنی شناسایی پارامتر C_1 نسبت به جریان، فرکانس و نوع سیال



الف



ب



ج

نمودار ۴) شناسایی پارامتر: منحنی‌های تغییر پارامترها نسبت به فرکانس، جریان و نوع سیال: پارامتر α ، پارامتر C_0 و پارامتر K_1 : الف) پارامتر α ، ب) پارامتر C_0 ، ج) پارامتر K_1

الگوریتم بهینه‌سازی درجه دوم متوالی در جعبه ابزار بهینه‌سازی نرم‌افزار MATLAB تعیین می‌شود. تابع هزینه فرض شده به صورت معادله ۱۱ است.

$$J = \frac{\sum (f_{exp} - f_{pre})^2}{\sum (f_{exp} - f_{ave})^2} \quad (11)$$

در رابطه ۱۱، f_{ave} ، f_{exp} ، f_{pre} به ترتیب نیروی مدل پیش‌بینی شده از حل معادله اسپنسر، نیروی میرایی تجربی و میانگین نیروی تجربی هستند. پارامترهای مدل در هر جریان الکتریکی و فرکانس تحریک با حل معادلات غیرخطی مدل با استفاده از رانک‌کوئی‌ای مرتبه ۴، توسط حلگر حداقل مربعات غیرخطی و بهینه‌سازی آنها با الگوریتم تعریف شده شناسایی می‌شود.

۳-۵ ارزیابی نتایج شناسایی

نتایج حاصل از شناسایی تجربی پارامترها شامل چهار حالت براساس فرکانس تحریک، نوع سیال مگنتورئولوژیک و جریان الکتریکی به صورت جدول ۳ است.

جدول ۳) حالت‌های شناسایی پارامترهای اسپنسر برای دو نمونه سیال در شرایط مختلف

حالت‌های شناسایی پارامترها	نمونه‌های سیال	فرکانس (هرتز)	کوریس جابه‌جایی (میلی‌متر)	جریان الکتریکی (A)
حالت اول	MRF1	۰/۲۵	۱۵	۰/۵؛ ۲
حالت دوم	MRF1	۰/۵	۱۵	۰/۵؛ ۲
حالت سوم	MRF2	۰/۲۵	۱۵	۰/۵؛ ۲
حالت چهارم	MRF2	۰/۵	۱۵	۰/۵؛ ۲

۲/۰/۵؛ ۲ برابر است با صفر، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲

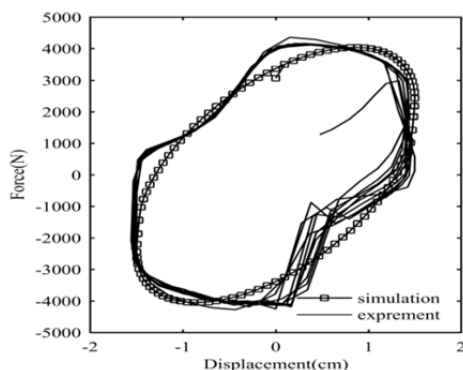
یکی از پارامترهای مدل پارامتری اسپنسر، C_1 است که مطابق با نمودار ۳، نتایج شناسایی این پارامتر نشان می‌دهد که نسبت به نوع سیال و فرکانس تحریک تغییر نمی‌کند.

نمودار ۴، منحنی‌های تغییر پارامترهای α ، C_0 و K_1 را در هر یک از حالت‌های فوق نشان می‌دهد. پارامتر α برای سیال ۳ میکرومتر در هر دو فرکانس تحریک، مقادیر بزرگ‌تری نسبت به سیال ۴۰ میکرومتر دارد، ولی نسبت به فرکانس، روندی نزولی دارد؛ یعنی با افزایش فرکانس، مقادیر آن کاهش می‌یابد. البته این تعریف برای جریان الکتریکی ۲A کاملاً برعکس شد و این پارامتر افزایش یافت. پارامتر C_0 با روندی افزایشی نسبت به زیاد شدن جریان الکتریکی، برای سیال MRF1 در هر دو فرکانس تحریک، مقادیر بزرگ‌تری نسبت به سیال با ذرات کوچک‌تر MRF2 دارد. ولی مقادیر این پارامتر با فرکانس تحریک، رابطه معکوسی دارد، به گونه‌ای که با افزایش فرکانس به ۲ برابر، مقادیر C_0 در هر دو سیال ساخته شده کاهش می‌یابد.

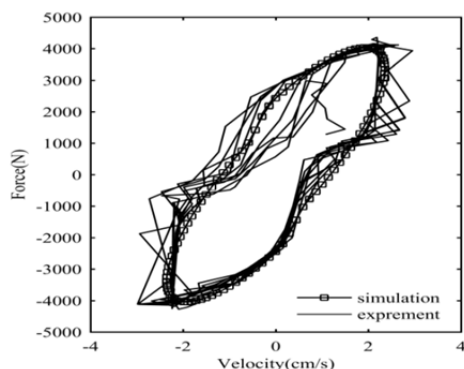
پارامتر K_1 با افزایش جریان الکتریکی افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، با افزایش فرکانس به ۰/۵ هرتز، مقادیر آن با اختلاف زیادی نسبت به فرکانس ۰/۲۵ هرتز افزایش می‌یابد. این پارامتر همانند پارامتر C_0 برای سیال با ذرات مغناطیس‌شونده کوچک‌تر افزایش می‌یابد. با این مقادیر به دست آمده، از آنجایی که نیروی میرایی سیال ۴۰ میکرومتر بیشتر از سیال ۳ میکرومتر است، دو پارامتر K_1 و C_0 تصدیق‌کننده این امر هستند و در عوض، مقادیر پارامتر α با افزایش اندازه قطر ذرات پودر آهن کربونیل کاهش می‌یابد.

پارامترهای باقیمانده از مدل اسپنسر که هیچ گونه تغییری نسبت به جریان الکتریکی، فرکانس و نوع سیال نداشتند، در جدول ۴ آورده شده است. چهار پارامتر C_1 ، C_0 ، α ، K_1 در اکثر مطالعات به صورت توابعی از جریان الکتریکی هستند [15, 16, 19]، ولی مقادیر پارامترهای جدول ۴ در برخی از مطالعات نسبت به جریان

شناسایی پارامترهای مدل اسپنسر در دمپر مگنتورئولوژیکال دو سر متحرک برای قطره‌های... ۱۳۱۵
هیستریزیس نیرو- جابه‌جایی نخواهند بود. از طرف دیگر، مدل فرض شده برای شناسایی پارامترها، تا حد زیادی به نوع دمپر مگنتورئولوژیکال و مشخصات هندسی آن بستگی دارد.

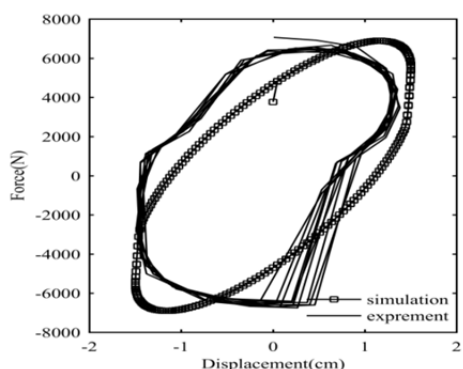


الف

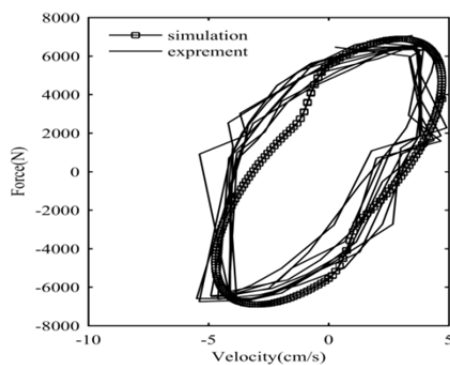


ب

نمودار ۵) مقایسه منحنی‌های شبیه‌سازی و تجربی حاصل از شناسایی پارامترهای مدل اسپنسر، جریان ۰/۵A، فرکانس ۰/۲۵Hz و سیال MRF2: الف) نیرو- جابه‌جایی، ب) نیرو- سرعت



الف



ب

نمودار ۶) مقایسه منحنی‌های شبیه‌سازی و تجربی حاصل از شناسایی پارامترهای مدل اسپنسر، جریان ۲A، فرکانس ۰/۵Hz و سیال MRF1: الف) نیرو- جابه‌جایی، ب) نیرو- سرعت

جدول ۴) پارامترهای ثابت با جریان الکتریکی و فرکانس مدل اسپنسر

پارامترها	MRF1	MRF2
β (1/cm ²)	۲۰	۲۰
γ (1/cm ²)	۲۰	۲۰
A	۵۳/۵	۵۳/۵
N	۲/۴	۲/۴
x_0 (cm)	۱/۴	۱

جدول ۵) پارامترهای متغیر با جریان الکتریکی در مدل اسپنسر تحت شرایط مختلف

حالت‌های شناسایی پارامترها	پارامترهای متغیر با جریان الکتریکی مدل اسپنسر
حالت اول	$K_1 = 1537 + 538.6I - 32.25I^2$ $C_0 = 626.3 + 844.3I$ $\alpha = 314e^{-\left(\frac{I-0.937}{0.512}\right)^2}$
حالت دوم	$K_1 = 1349 + 545.7I - 159.3I^2$ $C_0 = 595.9 + 570.2I$ $\alpha = 701e^{-\left(\frac{I-1.106}{0.6372}\right)^2}$
حالت سوم	$K_1 = 2516 + 673I - 159.3I^2$ $C_0 = 834.7 + 276.6I$ $\alpha = 5.112 \times 10^5 e^{-\left(\frac{I-8.28}{2.123}\right)^2}$
حالت چهارم	$K_1 = 2361 + 621.4I - 141.8I^2$ $C_0 = 675.1 + 268.2I$ $\alpha = 341.1e^{-\left(\frac{I-1.547}{1.085}\right)^2}$

همچنین پارامتر C_1 نیز در تمام حالت‌ها به صورت رابطه ۱۲ است:

(۱۲)

$$C_1 = 3.403 \times 10^5 + 2.314 \times 10^5 I - 67.51 \times 10^5 I^2$$

در این معادلات نیز اثر نیروی میرایی بزرگ‌تر برای نوع سیال و افزایش فرکانس تحریک را می‌توان در ضرایب پارامترهای تابع جریان مشاهده نمود. به عنوان مثال، از مقایسه حالت سوم و چهارم برای دو پارامتر K_1 و C_0 مشاهده می‌شود، سیال ۴۰ میکرومتر که نیروی میرایی بزرگ‌تری دارد، ضرایب چندجمله‌ای‌های جریان الکتریکی این دو پارامتر نیز برای این سیال با افزایش جریان الکتریکی و فرکانس تحریک، مقادیر بزرگ‌تری می‌شود.

به منظور ارزیابی نتایج حاصل از پیش‌بینی رفتار غیرخطی دمپر مگنتورئولوژیکال از طریق شناسایی پارامترهای مدل اسپنسر، منحنی‌های مقایسه‌ای بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی ترسیم می‌شوند. برای این کار با اعمال پارامترهای تابع جریان و شبیه‌سازی مدل غیرخطی اسپنسر از طریق رانکوتای مرتبه ۴، منحنی‌های شبیه‌سازی و هیستریزیس تجربی، نیرو- سرعت و نیرو- جابه‌جایی برای جریان‌ها و فرکانس‌های مختلف ترسیم شد. به دلیل گستردگی تعداد منحنی‌ها، تعدادی از آنها به عنوان مثال ترسیم شده‌اند. نمودارهای ۵ و ۶، منحنی‌های هیستریزیس نیرو- جابه‌جایی و نیرو- سرعت را برای دو سیال ۴۰ و ۶۳ میکرومتر به ترتیب در جریان ۰/۵A، فرکانس ۰/۲۵هرتز و جریان ۲A، فرکانس ۰/۵هرتز نشان می‌دهند. در تمامی منحنی‌ها، تخمین پارامترهای شناسایی شده برای منحنی‌های نیرو- سرعت شبیه‌سازی شده، انطباق خوبی با منحنی‌های تجربی دیده می‌شود. به گونه‌ای که در سرعت‌های کم که تاخیر نیرو اتفاق می‌افتد و نقاط تیز منحنی در سرعت‌های بالا، اختلاف کمی بین مدل پیش‌بینی شده و داده‌های تجربی وجود دارد. ولی با این وجود، در منحنی‌های هیستریزیس نیرو- جابه‌جایی، پیش‌بینی انجام گرفته براساس مدل اسپنسر در شناسایی نقاط تیز منحنی نتوانسته است انطباق مناسبی را ایجاد کند. در مطالعات انجام گرفته [1، 19] نیز اذعان شده است که با وجود مدل‌های متعددی که برای شناسایی رفتار غیرخطی دمپر وجود دارد، ولی هیچ کدام قادر به شناسایی کامل رفتار تمام منحنی‌های

خطای معیار^[25] منحنی‌های مقایسه‌ای، بین نیروی مدل تخمین زده شده توسط معادله اسپنسر و نیروی اندازه‌گیری شده از تست دمپر مگنتورئولوژیکال مطابق با رابطه ۱۱ در شرایط فرکانس‌ها و جریان‌های مختلف برای دو نمونه سیال مگنتورئولوژیک در جدول ۶ آورده شده است. نتایج بیانگر این است که اکثر خطاهای معیار کمتر از ۰/۱ هستند و در برخی حالات، خطاها حدود ۰/۲ هستند. همچنین از تحلیل این جدول می‌توان به موارد زیر نیز اشاره کرد:

۱- در فرکانس ۰/۲۵ هرتز نسبت به فرکانس ۰/۵ هرتز، میزان خطای معیار در پیش‌بینی نیروی میرایی در مجموع کمتر است.

۲- در فرکانس ۰/۲۵ هرتز، اندازه خطای پیش‌بینی مدل اسپنسر سیال مگنتورئولوژیک یک نسبت به سیال مگنتورئولوژیک ۲ با وجود بیشتر بودن خطا در جریان الکتریکی صفرآمپر، در مجموع کمتر است.

۳- در فرکانس ۰/۵ هرتز، خطای نمونه سیال مگنتورئولوژیک یک بیشتر از سیال مگنتورئولوژیک ۲ است. ولی در کل، خطای معیار پیش‌بینی شده برای دو نمونه سیال غیر از دو جریان صفر و ۲ آمپر از دقت مناسبی برخوردار است.

جدول ۶ خطای معیار بین نیروی مدل پارامتری اسپنسر و نتایج تجربی در شرایط مختلف

نمونه‌های سیال	فرکانس‌های تحریک (هرتز)	کورس جابه‌جایی (میلی‌متر)	I=۰	I=۰/۵	I=۱	I=۱/۵	I=۲
			A	A	A	A	A
MRF1	۰/۲۵	۱۵	۰/۱۹۴۸	۰/۰۵۷۳	۰/۰۴	۰/۰۴۱	۰/۰۲۸۱
	۰/۵	۱۵	۰/۰۵۹۹	۰/۱۶۹۳	۰/۱۸۵۱	۰/۱۹۳۲	۰/۲۳۸۱
MRF2	۰/۲۵	۱۵	۰/۰۲۸۴	۰/۰۶۲۶	۰/۰۶۱۸	۰/۰۷۳۴	۰/۱۱۳۲
	۰/۵	۱۵	۰/۲۶۳۱	۰/۱۳۸۸	۰/۰۱۱۳	۰/۱۳۸۱	۰/۰۹۳۴

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، پارامترهای مدل پارامتریک اسپنسر برای یک دمپر مگنتورئولوژیک دو سر میله با دو سایز قطر ذرات آهن کربونیل با استفاده از تست‌های تجربی شناسایی شد.

مدل پارامتری دینامیک اسپنسر با مجموعه‌ای از المان‌های مکانیکی و ویسکوز خطی و غیرخطی در مجموع دارای ۱۰ پارامتر بود. از آنجایی که این مدل دارای معادلاتی غیرخطی است، بنابراین برای حل آن از روش رانک‌کوتای مرتبه ۴ استفاده شد و به منظور شناسایی پارامترهای مدل از حلگر حداقل مربعات غیرخطی که یک روش تکراری برای شناسایی پارامترها بین داده‌های تجربی و مدل شبیه‌سازی است، با تکیه بر الگوریتم بهینه‌سازی درجه دوم متوالی استفاده شد. پارامترهای شناسایی شده در چهار حالت مورد بررسی قرار داده شدند و پارامترهایی که به صورت تابعی از جریان الکتریکی هستند، از طریق برازش منحنی به صورت چندجمله‌ای‌هایی از جریان الکتریکی نوشته شدند. پارامترهای شناسایی شده نتایج زیر را نشان داد:

۱- پارامتر C_0 به صورت چندجمله‌ای مرتبه اول از جریان الکتریکی است که با جریان الکتریکی، رابطه‌ای افزایشی دارد، ولی با افزایش فرکانس به ۲ برابر، مقادیر آن کاهش می‌یابد. همچنین این پارامتر برای سیال ۴۰ میکرومتر در هر دو فرکانس، مقادیر بزرگ‌تری نسبت به سیال میکرومتر ۶۳ دارد.

۲- پارامتر K_1 تابعی درجه ۳ از جریان الکتریکی است که در هر دو فرکانس تحریک و هم با افزایش جریان الکتریکی برای سیال ۴۰ میکرومتر، مقادیر بزرگ‌تری از سیال ۶۳ میکرومتر دارد

۳- پارامتر α به صورت تابعی گاوسی از جریان الکتریکی است که این پارامتر برای سیال ۶۳ میکرومتر در هر دو فرکانس تحریک، مقادیر بزرگ‌تری از سیال ۴۰ میکرومتر دارد. همچنین این پارامتر با افزایش جریان الکتریکی و فرکانس، رابطه‌ای معکوس دارد، یعنی مقادیر آن کاهش می‌یابد.

۴- پارامتر C_1 به صورت چندجمله‌ای درجه ۳ از جریان الکتریکی نسبت به نوع سیال و فرکانس تغییری نمی‌کند. پارامترهای دیگر مدل اسپنسر نیز هیچ گونه تغییری نسبت به جریان الکتریکی، فرکانس و نوع سیال ندارند.

از مقایسه منحنی‌های هیستریزیس پیش‌بینی شده براساس پارامترهای مدل اسپنسر، با منحنی‌های تجربی مشاهده شد که مدل اسپنسر، توانایی خوبی در انطباق با منحنی‌های نیرو- سرعت تجربی دارد، ولی در تشخیص نقاط تیز منحنی‌های تجربی، نیرو- جابه‌جایی و محل‌هایی که در سرعت کم دچار تاخیر نیرو شده است، دقت بالایی ندارد.

تشکر و قدردانی: این کار تحقیقاتی در آزمایشگاه سازه‌های هوشمند و وفق‌پذیر دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز انجام شده است. در ساخت و تست دمپر مگنتورئولوژیکال، نهایت تشکر را به‌خاطر همکاری در انجام تست‌های آزمایشگاهی از آقای مهندس کریمانی (کارشناس آزمایشگاه مقاومت مصالح دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز) داریم.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده است. ضمناً محتویات علمی و ادبی مقاله منتج از فعالیت علمی خود نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج و متن مقاله برعهده نویسندگان است.

تعارض منافع: نویسندگان هیچ گونه تعارض منافع برای این اثر ندارند.

سهم نویسندگان: محمد موسی‌زاده (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۴۰٪)؛ کمال جهانی (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/نگارنده بحث (۴۰٪)؛ محمد عبداللهی (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی (۲۰٪)

منابع مالی: منابع مالی این تحقیق را دانشگاه و نویسندگان مقاله تأمین نموده‌اند.

۷- پی‌نوشت

علام

A	پارامتر ثابت مدل اسپنسر
D	قطر مجرای دمپر (میلی‌متر)
C_1	پارامتر ویسکوز مدل اسپنسر (N.s/cm)
C_0	پارامتر ویسکوز مدل اسپنسر (N.s/cm)
J	تایع هزینه
H	ماتریس هویساید
K	تعداد تکرار تعیین پارامترها
K_0	پارامتر ثابت مدل اسپنسر
K_1	پارامتر فنریت مدل اسپنسر (N/cm)
M	تعداد داده‌ها
N	تعداد پارامترهای نامعلوم
n	پارامتر ثابت مدل اسپنسر
S	مجموع حداقل مربعات غیرخطی
D_b	قطر پیستون تا وسط مجرا (میلی‌متر)
D_p	قطر پیستون (میلی‌متر)
D_r	قطر میل پیستون (میلی‌متر)
D_{in}	قطر داخلی سیلندر (میلی‌متر)
d_c	ارتفاع سر پیستون تا وسط کوپل‌ها (میلی‌متر)

and vibration mitigation. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2007;18(12):1227-1232.

13- Wang Q, Ahmadian M, Chen Z. A novel double-piston magnetorheological damper for space truss structures vibration suppression. *Shock and Vibration*. 2014;2014:864765.

14- Adibi H, Yarali E, RamezanShams AH. Design, fabricate and testing the novel magnetorheologic damper involving stabilizer nanoparticles of silicone. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;17(8):252-258. [Persian]

15- Kwok NM, Ha QP, Nguyen MT, Li J, Samali B. Bouc-Wen model parameter identification for a MR fluid damper using computationally efficient GA. *ISA Transactions*. 2007;46(2):167-179.

16- Lau YK, Liao WH. Design and analysis of magnetorheological dampers for train suspension. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail and Rapid Transit*. 2005;219(4):261-276.

17- Yang G, Spencer BF, Jung HJ, David Carlson J. Dynamic modeling of large-scale magnetorheological damper systems for civil engineering applications. *Journal of Engineering Mechanics*. 2004;130(9):1107-1114.

18- Kwok NM, Ha QP, Nguyen TH, Li J, Samali B. A novel hysteretic model for magnetorheological fluid dampers and parameter identification using particle swarm optimization. *Sensors and Actuators A Physical*. 2006;132(2):441-451.

19- Peng Y, Yang J, Li J. Parameter identification of modified Bouc-Wen model and analysis of size effect of magnetorheological dampers. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2018;29(7):1464-1480.

20- Kamble VG, Kolekar Sh, Madivalar Ch. Preparation of magnetorheological fluids using different carriers and detailed study on their properties. *American Journal of Nanotechnology*. 2015;6(1):7-15.

21- Kiyumarsi E, Jalali A, Norouzi M, Ghatee M. An experimental investigation of iron based magnetorheological fluid stability and rheology. *Modares Mechanical Engineering*. 2016;16(2):301-308. [Persian]

22- Kolekar Sh. Preparation of magnetorheological fluid and study on its rheological properties. *International Journal of Nanoscience*. 2014;13(2):1450009.

23- Sonawane AV, More CS, Bhaskar SS. A study of properties, preparation and testing of magneto-rheological (MR) fluid. *International Journal for Innovative Research in Science and Technology*. 2016;2(9):82-86.

24- López-López MT, Kuzhir P, Lacis S, Bossis G, González-Caballero F, Durán JD. Magnetorheology for suspensions of solid particles dispersed in ferrofluids. *Journal of Physics Condensed Matter*. 2006;18(38):S2803.

25- Li ZX, Xu LH. Performance tests and hysteresis model of MRF-04K damper. *Journal of Structural Engineering*. 2005;131(8):1303-1306.

26- Boggs PT, Tolle JW. Sequential quadratic programming. In: Cambridge University Press. *Acta Numerica*. 4th Volume. Cambridge: Cambridge University Press;1995.

L_a	فاصله بین دو کوئل (میلی‌متر)
L_c	طول کوئل (میلی‌متر)
x_0	جابه‌جایی اولیه دمپر (میلی‌متر)

علامه یونانی

ε	اندازه پارامترها
ξ	مجموعه نقاط
δ	پارامتر ثابت مدل اسپنسر
α	پارامتر ثابت مدل اسپنسر
β	پارامتر ثابت مدل اسپنسر

زیرنویس‌ها

exp	تجربی
ave	مقدار متوسط
pre	پیش‌بینی

منابع

1- Wang DH, Liao WH. Magnetorheological fluid dampers: A review of parametric modelling. *Smart Materials and Structures*. 2011;20(2):023001.

2- Xu ZD, Jia DH, Zhang XC. Performance tests and mathematical model considering magnetic saturation for magnetorheological damper. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2012;23(12):1331-1349.

3- Ahamed R, Ferdaus MM, Li Y. Advancement in energy harvesting magneto-rheological fluid damper: A review. *Korea-Australia Rheology Journal*. 2016;28(4):355-379.

4- Ashtiani M, Hashemabadi SH, Ghaffari A. A review on the magnetorheological fluid preparation and stabilization. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2015;374:716-730.

5- De Vicente J, Vereda F, Segovia-Gutiérrez JP, Del Puerto Morales M, Hidalgo-Álvarez R. Effect of particle shape in magnetorheology. *Journal of Rheology*. 2010;54(6):1337-1362.

6- Shah K, Choi SB. The influence of particle size on the rheological properties of plate-like iron particle based magnetorheological fluids. *Smart Materials and Structures*. 2014;24(1):015004.

7- Guo YQ, Xu ZD, Chen BB, Ran CS, Guo WY. Preparation and experimental study of magnetorheological fluids for vibration control. *International Journal of Acoustics and Vibration*. 2017;22(2):194-201.

8- Mousazadeh M. Modeling secondary semi active suspension system with magnetorheological dampers to control vibration of sensitive payloads in commercial vehicle [Dissertation]. Tabriz: University of Tabriz; 2018 [Persian]

9- Yang G. Large-scale magnetorheological fluid damper for vibration, mitigation: Modeling, testing and control [Dissertation]. Notre Dame: University of Notre Dame; 2001.

10- Ahmadian M, Poynor JC. An evaluation of magneto rheological dampers for controlling gun recoil dynamics. *Shock and Vibration*. 2001;8(3-4):147-155.

11- Sun SS, Ning DH, Yang J, Du H, Zhang SW, Li WH. A seat suspension with a rotary magnetorheological damper for heavy duty vehicles. *Smart Materials and Structures*. 2016;25(10):105032.

12- Mao M, Hu W, Choi YT, Wereley NM. A magnetorheological damper with bifold valves for shock