



Experimental Study of the Effects of Iron Particles Size on Damping Force and Energy Dissipation of a Double-Ended Magnetorheological Damper

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Mousazadeh M.¹ MSc,
Jahani K.*¹ PhD,
Samadani Aghdam S.S.¹ PhD

How to cite this article

Mousazadeh M, Jahani K, Samadani Aghdam S.S. Experimental Study of the Effects of Iron Particles Size on Damping Force and Energy Dissipation of a Double-Ended Magnetorheological Damper. Modares Mechanical Engineering, 2019;19(9): 2129 -2138.

ABSTRACT

In this paper, the effects of particles size of Magnetorheological Carbonyl iron powder on damping force and energy dissipation capacity for a Magnetorheological double ended type damper is investigated experimentally. Despite of the considerable researches on the effects of particles size on the viscosity of Magnetorheological fluids, sedimentation of fluids and electromagnetic field intensity in damper, there is no a published work about the effects of iron particles size on the damping force amplitude and energy dissipation capacity of double-ended Magnetorheological damper. Therefore, in the present research, two different Magnetorheological fluids were prepared with the same volumetric percentage of % 35 from two different sizes of Iron particles i.e. 40 μm and 63 μm and filled into a double ended type damper. The double-ended damper had three electric coils and was tested in different frequencies, different electric currents and 15 mm displacement stroke. The effects of Magnetorheological fluid particles on produced damping force and energy dissipation capacity were analyzed by extracting force-displacement and force-time curves from experiments. The results showed that the maximum amplitude of damping force is increased with increasing the applied electric current on the damper and the amount of this force for fluid with 63 μm particles size is slightly higher than that for the fluid with 40 μm particles size. However, the energy dissipation capacity of the investigated damper in all excitation frequencies with the all applied electrical currents for fluid with 63 μm particles size was considerably higher than that for fluid with 40 μm particles size.

Keywords Magnetorheological Fluids; Magnetorheological Double-Ended Damper; Iron Particle Size; Amplitude Damping Force; Energy Dissipation Capacity

CITATION LINKS

[1] Advancement in energy harvesting magneto-rheological fluid damper: A review [2] A review on the magnetorheological fluid preparation and stabilization [3] Physical characteristics of magnetorheological suspensions and their applications [4] Preparation of composite magnetic particles and aqueous magnetorheological fluids [5] Wind turbine performance under ... [6] Effect of particle shape in magnetorheology [7] The influence of particle size on the rheological properties of plate-like iron particle based magnetorheological fluids [8] Performance tests and hysteresis model of MRF-04K damper [9] A novel double-piston magnetorheological damper for space truss structures vibration suppression [10] Dynamic modeling of large-scale magnetorheological damper systems for civil engineering applications [11] Large-scale magnetorheological fluid damper for vibration mitigation: Modeling, testing and control [Dissertation] [12] Preparation and experimental study of magnetorheological fluids for vibration control [13] Preparation of magnetorheological fluids using different carriers and detailed study on their properties [14] Magnetorheology for suspensions of solid particles dispersed in ferrofluids [15] A study of properties, preparation and testing of Magneto-Rheological (MR) fluid [16] Properties and applications of commercial magnetorheological fluids [17] Applications of electro-rheological fluids in vibration control: A survey [18] Magnetorheological fluid dampers: A review of parametric modelling [19] H1 control performance of a full-vehicle suspension featuring magnetorheological dampers [20] A new vibration isolation bed stage with magnetorheological dampers for ambulance vehicles [21] Design and analysis of magnetorheological dampers for train suspension [22] Design of a novel magnetorheological damper with internal pressure control [23] Performance tests and mathematical model considering magnetic saturation for magnetorheological damper

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

*Correspondence

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

Article History

Received: August 6, 2018
Accepted: February 4, 2019
ePublished: September 01, 2019

بررسی تجربی تأثیر اندازه ذرات پودر آهن در نیروی میرایی و ظرفیت اتلاف انرژی یک دمپر مگنتورئولوژیکال دوسرمتحرک

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

سیدصد صمدانی‌ا قدم PhD

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

چکیده

هدف این مقاله، بررسی تجربی تأثیر اندازه ذرات پودر آهن کربونیل به‌عنوان ذرات مغناطیس‌شونده سیال مگنتورئولوژیکال در نیروی میرایی و ظرفیت انرژی اتلافی دمپر مگنتورئولوژیکال دوسرمتحرک است. با وجود اینکه مطالعات بسیاری به بررسی تأثیر اندازه ذرات پودر آهن در خواص رئولوژیک، میزان ته‌نشینی، پایداری و چگالی میدان مغناطیسی سیال مگنتورئولوژیکال پرداخته‌اند، ولی تأثیر اندازه ذرات کروی شکل آهن کربونیل روی دامنه ماکزیمم نیروی میرایی و ظرفیت اتلاف انرژی دمپر دوسرمتحرک تاکنون در ادبیات فن گزارش نشده است. به دلیل اهمیت بالای خواص رئولوژیک سیال مگنتورئولوژیکال و اندازه ذرات مغناطیس‌شونده سیال در میرایی دمپر، در این مقاله دو نوع سیال با درصد حجمی یکسان ۳۵٪ از ذرات کروی شکل پودر آهن کربونیل با قطرهای ۴۰ و ۶۳ میکرومتر ساخته شد و در دمپر دوسرمتحرک با سه کوئل الکتریکی در فرکانس‌های مختلف و دامنه ۱۵ میلی‌متر برای جریان‌های مختلف امتحان شد. با ترسیم منحنی‌های نیرو-جابجایی و نیرو-زمان، اثر نوع سیال بر نیروی میرایی و ظرفیت اتلاف انرژی در جریان‌های مختلف مورد آنالیز قرار گرفت. نتایج نشان داد که دامنه ماکزیمم نیروی میرایی دمپر با جریان الکتریکی و فرکانس تحریک، روندی افزایشی دارد. همچنین مقدار این نیرو برای سیال با اندازه ذرات ۶۳ میکرومتر در حضور میدان مغناطیسی، با اختلاف کمی بزرگتر از سیال با ذرات ۴۰ میکرومتر است که می‌توان گفت قطر ذرات پودر آهن، تأثیر چشم‌گیری در دامنه ماکزیمم نیرو ندارد. ولی ظرفیت اتلاف انرژی دمپر برای سیال با ذرات ۴۰ میکرومتر در تمام جریان‌ها و فرکانس‌ها مقادیر بیشتری از سیال با ذرات ۶۳ میکرومتر دارد.

کلیدواژه‌ها: سیال مگنتورئولوژیکال، دمپر مگنتورئولوژیکال دوسرمتحرک، اندازه ذرات پودر آهن، دامنه نیروی میرایی، ظرفیت اتلاف انرژی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۵/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۱۵

*نویسنده مسئول: ka_jahani@tabrizu.ac.ir

۱- مقدمه

سیال مگنتورئولوژیکال با ترکیبی از دو فاز پیوسته و پراکنده، جزء دسته سیال‌های وفق‌پذیر است که ویسکوزیته آن تحت اثر جهت و اندازه میدان مغناطیسی خارجی تغییر کرده و به دنبال آن نرخ برش به مقدار قابل توجهی تغییر می‌کند. این سیال با عکس‌العمل سریع در حضور میدان مغناطیسی توانایی تغییر از حالت مایع شبه‌نیوتونی به جامد ویسکوالاستیک در عرض چند میلی ثانیه را دارد که تنش تسلیم برشی این سیال غیرنیوتونی از طریق اعمال میدان مغناطیسی قابل کنترل است. این خواص، دلیل کاربرد وسیع آن در انواع مختلف دمپرها، کلاچ‌ها، ترمزها، مفاصل مصنوعی و بسیاری از این قبیل وسایل است^[1]. در یک سیال مگنتورئولوژیکال، آن چیزی که اهمیت فراوانی در مقدار تنش برشی دارد، نوع و مقدار عناصر تشکیل‌دهنده سیال است. سه جزء اصلی این مایع وفق‌پذیر، ذرات مغناطیس‌شونده، سیال پایه و پایدارکننده هستند که ذرات مغناطیس‌شونده به‌صورت معلق در سیال پایه با اعمال میدان مغناطیسی، آرایشی منظم به خود خواهند گرفت. سیال پایه،

رفتاری مانند یک حامل ذرات فلزی معلق در خود را دارد و پایدارکننده نیز به‌منظور غلبه بر ته‌نشینی ذرات فلزی و جلوگیری از به‌وجود آمدن توده‌های برگشت‌ناپذیر در این سیال عمل خواهند کرد. بنابراین برای ساخت یک سیال کارآمد بایستی یک افزودنی پایدارکننده برای همگن‌سازی سیال قبل از افزودن ذرات مغناطیس‌شونده به آن افزوده شود^[2].

در یک سیال مگنتورئولوژیکال، فاز پیوسته به سیال پایه و فاز پراکنده به ذرات مغناطیس‌شونده اطلاق می‌شود. فاز پیوسته با توجه به خواص رئولوژیک، پایداری دما، پایداری شیمیایی و سازگاری به‌صورت مایعی قطبی و غیرقطبی انتخاب می‌شود که معمول‌ترین سیال‌ها، روغن هیدروکربن به‌شکل روغن‌های معدنی و مصنوعی یا ترکیب هر دو، پلی‌استر پلی‌اتر، آب و بسیاری دیگر از این قبیل مواد هستند. روغن سلیکون به دلیل توانایی دستیابی به محدوده دمایی بزرگ، لزجت مناسب و سازگاری با دیگر مواد به‌کاررفته در سیال مگنتورئولوژیکال از علاقه‌مندی بیشتری برخوردار است^[3]. فاز پراکنده شامل فلزات، آلیاژها و ترکیبات سرامیکی از جمله فریت پلیمر، آلیاژ آهن کبالت، آهن کربونیل و فریت نیکل-زینک با آهن است. ذراتی که به‌طور گسترده در سیال به کار می‌رود، آهن کربونیل کروی شکل با قطر ۱۰-۱۰۰ میکرومتر با جاذبه مغناطیسی بالا، ساینده‌گی کمتر و دوام بیشتر و ذراتی با قطر ۱۰۰-۱۰ میکرومتر با ساینده‌گی بیشتر و دوام کمتر و شدت میدان مغناطیسی بیشتر است^[4]. ویسکوزیته سیال مگنتورئولوژیکال به‌عنوان یک پارامتر مؤثر در انتخاب ترکیبات سیال، در حالت بدون میدان مغناطیسی کاملاً متأثر از لزجت سیال حامل است. البته به‌لایه لزجت سیال مگنتورئولوژیکال در حالت عدم حضور میدان مغناطیسی، در بسیاری از کاربردهای این سیال امری نامطلوب به حساب می‌آید. زیرا در این حالت مؤلفه مگنتورئولوژیکال نیروی میرایی دمپر (نیروی ناشی از تنش تسلیم) کاهش می‌یابد^[5].

در بررسی خواص رئولوژیک سیال مگنتورئولوژیکال، شکل ذرات فاز مغناطیس‌شونده محلول، اندازه این ذرات و درصد وزنی یا حجمی آنها در سیال، از اهمیت بالایی در نحوه تغییر ویسکوزیته و تنش برشی دارد. دی‌ویسنه و همکاران^[6] در یک بررسی کلی روی تأثیر شکل ذرات مغناطیس‌شونده در خواص سیال مگنتورئولوژیکال، پودرهای کروی، میله‌ای و صفحه‌ای شکل از آهن، کروی و میله‌ای شکل از مگنتیت و صفحه‌ای شکل همیتیت را با درصد حجمی یکسانی در سیال‌های مگنتورئولوژیکال به کار بردند. نتایج این مطالعه نشان داد که مدول برشی ویسکوالاستیک نسبت به میدان مغناطیسی کوچک تقریباً برای تمام شکل‌های مختلف ذرات مشابه بوده، ولی در میدان مغناطیسی بزرگ این ذرات میله‌ای شکل است که نسبت به همتهای خود یعنی ذرات کروی و صفحه‌ای شکل در یک سیال مگنتورئولوژیکال، مدول برشی و تنش برشی بزرگ‌تری دارند. البته این تحقیق عنوان می‌کند که اهمیت شکل ذرات برای ذرات مغناطیس‌شونده بزرگ یا میدان مغناطیسی بزرگ ناچیز است.

تأثیر اندازه ذرات مغناطیس‌شونده سیال روی خواص رئولوژیک آن از اهمیت بالایی نسبت به شکل ذرات برخوردار بوده، بنابراین در مطالعات کروتی شاه و جوی^[7] اندازه ذرات فاز مغناطیس‌شونده پودر آهن صفحه‌ای شکل در خواص مگنتورئولوژیکال از دو جنبه بررسی شده است. جنبه اول بررسی تأثیر اندازه ذرات روی خواص و جنبه دوم تأثیر ترکیب ذرات با اندازه‌های متفاوت پودر آهن در سیال مگنتورئولوژیکال بود. نتایج این مطالعه حاکی از آن بود که در نبود میدان مغناطیسی ویسکوزیته و تنش برشی سیال، نسبت به

ماکزیمم نیروی میرایی و ظرفیت اتلاف انرژی برای دمپر دوسرمتحرک تاکنون در ادبیات فن گزارش نشده است. از این رو با تکیه بر این موضوع به عنوان نوآوری مقاله حاضر، در بخش دوم، دو نوع سیال حاوی ذرات کروی شکل پودر آهن کربونیل با قطر ۴۰ و ۶۳ میکرومتر و درصد حجمی یکسان ۳۵٪ ساخته می شود و برای این دو سیال، ویسکوزیته و چگالی تعیین می شود. در بخش سوم به بررسی تئوری نیروی میرایی دمپر دوسرمتحرک با مود جریان-برش پرداخته می شود و مشخصه های هندسی طراحی این نوع دمپر برای حداکثر نیروی میرایی در جریان ۲ آمپر تعیین می شود. در بخش چهارم، دمپر مگنتورئولوژیکال ساخته شده در دو فرکانس ۰/۲۵ و ۰/۵ هرتز برای دامنه ۱۵ میلی متر در جریان های مختلف تست می شود. با ترسیم منحنی های هسترزیس نیرو-جابجایی و نیرو-زمان، به بررسی دامنه ماکزیمم نیروی میرایی و ظرفیت اتلاف انرژی پرداخته می شود.

۲- مواد تشکیل دهنده و ساخت سیال

۲-۱- مواد تشکیل دهنده

در این تحقیق دو نوع پودر آهن کربونیل کروی شکل با قطر ذرات ۴۰ میکرومتر با چگالی $7.86 \frac{g}{cm^3}$ و ۶۳ میکرومتر با چگالی $7.45 \frac{g}{cm^3}$ و خلوص ۹۹/۵٪ برای فاز پراکنده سیال مگنتورئولوژیک با درصد حجمی یکسانی به کار برده می شود. در فاز پیوسته از یک سیال پایه، روغن هیدرولیک H-68 با ویسکوزیته ۶۸ سانتی استوکس در دمای ۴۰°C و ۹ سانتی استوکس در دمای ۱۰۰°C به همراه افزودنی گریس نسوز ظرفیت فشار بالا پایه لیتیموم محصول شرکت آترو د سبز با درصد حجمی مشخص برای افزایش پایداری و جلوگیری از به وجود آمدن توده های آهن استفاده می شود.

۲-۲- ساخت سیال مگنتورئولوژیک

لزجت سیال مگنتورئولوژیک در حالتی که میدان مغناطیسی روی آن اعمال نشده باشد، تحت تأثیر مستقیم درصد حجمی یا وزنی پودر آهن کربونیل و پایداری کننده است. بنابراین چون خواص رئولوژیک سیال تحت اثر غلظت پودر آهن کربونیل قرار دارد، بایستی محدودیتی در حداقل و حداکثر درصد حجمی پودر اعمال شود. در مطالعات انجام گرفته روی درصد وزنی ترکیبات سیال مگنتورئولوژیک، سعی شده است که تأثیر وزن پودر آهن، سیال پایه و پایداری کننده روی میزان رسوب گذاری، تنش برشی و ویسکوزیته سیال مگنتورئولوژیک به گونه ای بررسی شود که بازه ای مناسب از اجزای سیال برای بیشترین کارآمدی تعیین شود. این بازه برای پودر آهن ۶۰ تا ۷۲٪ وزن کل، برای سیال پایه ۱۶/۵ تا ۳۳٪ وزن کل و متناسب با باقیمانده افزودنی های پایداری کننده است [5, 12, 13].

در مقالاتی که سیال مگنتورئولوژیک را برحسب درصد حجمی ساخته اند، مناسب ترین بازه حجمی برای پودر آهن کربونیل ۲۱/۶ تا ۴۱٪ از حجم کل سیال، برای سیال پایه ۵۳ تا ۷۵٪ و مابقی حجم کل سیال پایداری کننده است [14, 15]. با این تفاسیر، مطابق جدول ۱، برای تهیه ۵۲۰ میلی لیتر (حجم مخزن دمپر) سیال از دو نوع پودر، ابتدا پایداری کننده گریس EPG را به روغن هیدرولیک اضافه می کنیم و محلول به کمک همزن مکانیکی با دور ۳۰۰۰ دور در دقیقه مطابق شکل ۱، به مدت یک ساعت در دمای ۲۵°C به هم زده می شود. سپس پودر آهن کربونیل را اضافه می کنیم و به مدت ۳۰ دقیقه دیگر، محلول نهایی زیر همزن مکانیکی هم زده می شود. لزجت از پارامترهای رئولوژیک و ذاتی سیال است که توسط دستگاه سیبولد ویسکومتر، در دمای درجه ۴۰°C اندازه گیری شد. روش کار

نرخ برش روندی صعودی دارند، ولی در حضور میدان مغناطیسی ویسکوزیته برای هر دو سیال، روندی نزولی داشت و تنش برشی نیز بعد از کمی افزایش نسبت به نرخ برش ثابت می شود. از لحاظ تأثیر اندازه ذرات، همواره ذرات ریزتر، ویسکوزیته و تنش برشی کمتری دارند، ولی وقتی با درصد بیشتری از ذرات درشت تر در سیال مگنتورئولوژیک ترکیب شوند، مقدار این خواص را افزایش می دهند.

با مشخص شدن خواص سیال، اکنون بایستی نحوه رفتار این سیال در وسیله کاری مگنتورئولوژیکال بررسی شود. مطالعات انجام گرفته در این زمینه، چند مود کاری زیر را برای جریان سیال در نظر گرفته اند که اساس طراحی این نوع تجهیزات مگنتورئولوژیکال هستند:

الف- مود دریچه ای یا جریان: سیال مگنتورئولوژیک در میان کانالی جریان دارد که میدان مغناطیسی به صورت عمود بر عرض آن اعمال می شود. کاربرد این نوع حالت جریان در دمپرهایی است که پیستون در داخل یک غلاف لوله ای شکل پر از سیال حرکت می کند. سیال مگنتورئولوژیک به اجبار از داخل اوریفیس هایی که در اطراف یا داخل پیستون تعبیه شده است حرکت می کند [8, 9].

ب- مود برش: لایه ای نازک از سیال مگنتورئولوژیک میان دو صفحه مقید می شود، سپس نیرویی معادل با اندازه میدان مغناطیسی و مقاومت برشی سیال به یکی از صفحات وارد می شود. این حالت بیشتر در کلاچ ها و ترمزهای مگنتورئولوژیکال کاربرد دارد [1].

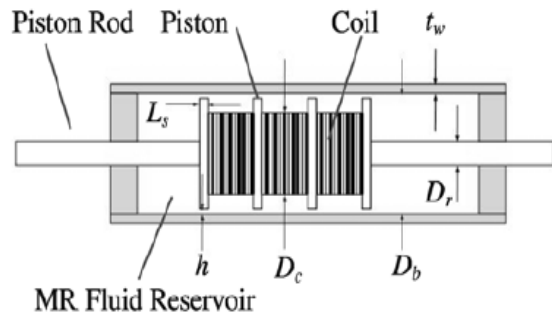
ج- مود فشاری سیال: مابین دو صفحه تحت فشار و کشش با میدان مغناطیسی هم جهت یا خلاف جهت قرار دارد که نیروی بسیار زیادی را برای کاهش دامنه ارتعاشات در حدود چند میلی متر تولید می کند.

حالت های کاری دیگری نیز از ترکیب این مودها به منظور اثرگذاری بیشتر سیال و میدان مغناطیسی در راستای تولید نیروی میرایی بیشتر به وجود آمدند [9]. میراگر مگنتورئولوژیکال، یکی از جدیدترین وسایل قابل اعتماد برای کاهش ارتعاشات سازه ای است، چرا که سادگی مکانیکی، بازه حرکت دینامیکی بالا، توان ورودی مورد نیاز کم و ظرفیت نیرویی بزرگ، عاملی شده اند که این نوع میراگرها در محدوده وسیعی از تجهیزات محافظ در برابر زلزله، انرژی باد، پل ها و شوک های وارده از طرف جاده در وسایل حمل و نقل، کاربری داشته باشد. به عنوان مثال، در یکی از تحقیقات، یانگ و همکاران به طراحی و ساخت دمپر مگنتورئولوژیکال دوسرمتحرک با مود دریچه ای در ابعاد بزرگ برای برنامه های عمرانی پل سازی و ساختمان پرداختند [10].

به منظور محاسبه اثرگذاری اندازه ذرات مغناطیس شونده در نیروی میرایی، بایستی تابع نرخ تنش برشی مشخص شود، چرا که این تابع، اثر چگالی میدان مغناطیسی را نشان می دهد. زمانی که مود کاری براساس نوع مجرای دمپر مگنتورئولوژیکال و حرکت پیستون مشخص شود، تابع تنش برشی مقاوم در برابر گرادین فشار حرکت رفت و برگشتی پیستون، از طریق حل معادلات فشار ناویراستوکس تعیین می شود. براساس اثرات در نظر گرفته شده برای جریان سیال از مجرای فرض شده، مدل های سیال مگنتورئولوژیک ارائه می شوند که مشخص کننده تابع تنش برشی بوده [11].

با وجود اینکه مطالعات بسیاری به بررسی اثر اندازه ذرات پودر آهن در خواص رئولوژیک، میزان ته نشینی، پایداری و چگالی میدان مغناطیسی سیال مگنتورئولوژیک پرداخته اند، ولی تأثیر اندازه ذرات کروی شکل آهن کربونیل در سیال مگنتورئولوژیک روی دامنه

است که نسبت به میدان مغناطیسی تغییر می‌کند. برای تعیین معادلات نیروی میرایی طول فعال دمپر (ناحیه تحت میدان مغناطیسی بین سیلندر و پیستون) به صورت یک محور متقارن در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که فاصله بین سیلندر و پیستون در مقایسه با طول فعال بسیار کوچک است، می‌توان در تعیین معادلات نیرو، سیلندر و پیستون را به صورت دو صفحه موازی نسبت به هم در نظر گرفت که جریان از داخل آنها عبور می‌کند.



شکل ۲) شماتیک دمپر دوسرمتحرک با سه کوئل الکتریکی

به منظور تعیین نیروی میرایی دمپر مگنتورئولوژیکال، بایستی تابع تنش برشی برحسب شدت میدان مغناطیسی مشخص شود. به همین منظور، مدل‌های سیال این توابع براساس نحوه عبور جریان از مجرای دمپر به صورت تابعی از شدت میدان مغناطیسی و ویسکوزیته سیال در جدول ۲ ارائه شده است. مدل بینگهام به عنوان اولین مدل ارائه شده، سیال را ماده‌ای با رفتار پلاستیک و جزء دسته مواد نیوتونی تعریف می‌نماید. بعد از این، مدل غیرخطی پلاستیک بینگهام^[16]، مدل بای ویسکوز^[17] و مدل هرشل-باکلی^[18] که به نسبت دقت بالاتری داشتند ارائه شدند. مدل سیال مگنتورئولوژیک بینگهام، در واقع با صرف نظر کردن از رفتار الاستیک سیال و صرف نظر کردن از تنش برشی در اثر نازک شدن و ضخیم شدن لایه‌ای سیال، معادل مدل هرشل-باکلی با $m=1$ است. این مدل با وجود سادگی در تحقیقات زیادی برای محاسبه نیروی میرایی دمپر مگنتورئولوژیکال استفاده شده است^[11, 19, 20].

جدول ۲) مدل‌ها و معادلات سیال مگنتورئولوژیک

معادلات	نام مدل
$\tau = \tau_y(H) \operatorname{sgn}(\dot{\gamma}) + \eta \dot{\gamma}$ $\tau > \tau_y \quad \tau = G \dot{\gamma}$	غیرخطی پلاستیک بینگهام
$\tau = \tau_y(H) + \eta \dot{\gamma} \quad \tau > \tau_1$ $\tau = \eta_r \dot{\gamma} \quad \tau < \tau_2$	بی ویسکوز
$\tau_y(H) = \tau_1 (1 - \frac{\eta}{\eta_r})$	
$\tau = (\tau_y(H) + p \dot{\gamma} ^{\frac{1}{m}}) \operatorname{sgn}(\dot{\gamma})$	هرشل-باکلی

مدل سیال بینگهام با صرف نظر از اثر تنش برشی نازک و ضخیم شدن لایه‌ای سیال برای تعیین تنش برشی استفاده می‌شود. معادله حاکم بر جریان عبوری مدل صفحه موازی بینگهام به صورت رابطه ۲ است.

$$\frac{dp}{dx} = \frac{d\tau}{dx} \quad \tau(z) = \frac{dp}{dx} z + D \quad (2)$$

ثابت D از شرایط مرزی به دست می‌آید. برای تعیین نیروی تولید شده از دمپر، سه متغیر بی بعد هندسی به صورت روابط ۳-۵ تعریف شده است^[11]:

این دستگاه براساس مدت زمانی است که طول می‌کشد تا ظرف مندرج ۶۰ میلی‌لیتر با عبور سیال مگنتورئولوژیک از مجرای کنترلی به قطر ۴ میلی‌متر پر شود. با تعیین مدت زمان ریزش رابطه ۱ برای بازه دمایی $25^\circ\text{C} < t < 40^\circ\text{C}$ در دو نمونه سیال برای تعیین لزجت سینماتیک به کار می‌رود:

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

با ثبت مدت زمان ریزش ۵۴/۷ ثانیه برای نمونه ۴۰ میکرومتر با چگالی $\frac{1}{47} \frac{g}{cm^3}$ لزجت دینامیکی η ۱/۸۱۱ پاسکال در ثانیه به دست می‌آید، همچنین با ثبت مدت زمان ریزش ۶۴/۵ ثانیه در نمونه ۶۳ میکرومتر با چگالی $\frac{1}{3} \frac{g}{cm^3}$ لزجت دینامیکی ۲/۰۷۳ پاسکال در ثانیه حاصل می‌شود. با وجود اینکه در یک سیال مگنتورئولوژیک، ویسکوزیته بیشتر در حضور میدان مغناطیسی معادل ماکزیمم نیروی میرایی بیشتری است، ولی ذرات درشت‌تر آهن کربونیل با نرخ رسوب گذاری (نسبت ارتفاع سیال شناور به کل مایع مخلوط) بیشتری در مقایسه با سیال با ذرات ریزتر همراه است که این یعنی پایداری کاهش می‌یابد. در بعضی از مقالات به منظور داشتن ویسکوزیته بالاتر و مقابله با کاهش پایداری، درصد وزنی بیشتری پودر با دانه بندی ریزتر را با درصد وزنی مناسبی از پودر درشت‌تر ترکیب می‌نمایند^[5, 12].

جدول ۱) درصد حجمی ترکیبات با احتساب حجم نهایی سیال

نمونه سیال	آهن کربونیل	H-68 روغن	EPG گریس
سیال ۴۰ میکرون	۲۵%	۶۷%	۸%
سیال ۶۳ میکرون	۲۵%	۶۷%	۸%

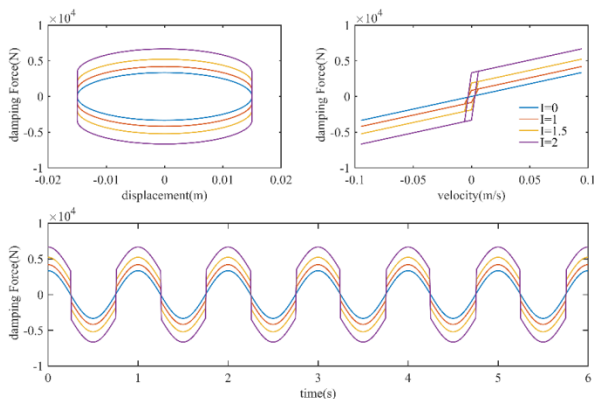


شکل ۱) سیال مگنتورئولوژیک زیر همزن مکانیکی

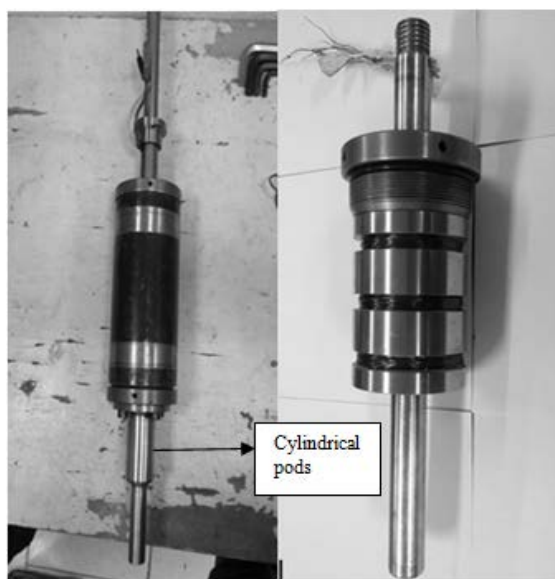
۳- دمپر دوسرمتحرک حالت برش-جریان

شکل ۲، دیاگرام شماتیک دمپر مگنتورئولوژیکال دوسرمتحرک مورد بررسی در این تحقیق را نشان می‌دهد. این دمپر توسط پیستون به دو قسمت محفظه فوقانی و تحتانی تقسیم شده که کاملاً با مایع مگنتورئولوژیکال پر شده است. زمانی که سیال از مجرای حلقوی با قطر h (شکل ۲) در حال عبور است، میدان مغناطیسی متغیر با جریان الکتریکی روی سیال اثر می‌گذارد و آرایش منظمی به ذرات پراکنده پودر آهن محلول مگنتورئولوژیکال می‌دهد. این آرایش منظم ذرات، باعث تشدید اثر تنش برشی بین زنجیره‌های ذرات پودر آهن کربونیل سیال می‌شود و این سهمی از نیروی میرایی کل

از شبیه‌سازی معادلات غیرخطی با ورودی هارمونیک به‌صورت منحنی‌های نمودار ۱ است که این نتایج براساس مناسب‌ترین ابعاد، جهت بازه نیروی میرایی مورد نیاز برای ساخت در آزمایشگاه مواد هوشمند به‌صورت قطر درونی سیلندر $D_b=89$ (میلی‌متر)، طول هر کوئل الکتریکی ۲۲ میلی‌متر، شعاع مجرای حلقوی $h=1$ (میلی‌متر)، تعداد کوئل‌ها $n=3$ ، قطر سیم مسی 0.7 میلی‌متر، قطر پیستون $D_c=87$ (میلی‌متر) و N معادل ۳۰۰ دور، حاصل شده است. این ورودی نیز به آن دلیل انتخاب شده که پروفیل جاده‌ها به‌صورت غالب، ترکیبی از موج‌های هارمونیک است و در صورت حاصل شدن نتیجه مناسب برای این ورودی، نتایج، قابل تعمیم به دیگر ورودی‌ها نیز است. همچنین به‌منظور قرارگیری دمپر در داخل فک متحرک دستگاه تست، یک غلاف استوانه‌ای شکل روی یکی از میل پیستون‌های متحرک در یک سمت دمپر نصب شده است. بنابراین با این کار، میل پیستون داخل غلافی آب‌بندی‌شده با اورینگ برای جلوگیری از نشت سیال حرکت می‌کند. یکی دیگر از ملاحظات طراحی، موازی‌کردن سه کوئل الکتریکی به‌منظور یکسان‌بودن جریان الکتریکی اعمال‌شده از منبع جریان الکتریکی است. شکل ۳، مجموعه پیستون را با سه کوئل موازی و دمپر مگنتورئولوژیکال مونتاژ شده نشان می‌دهد.



نمودار ۱) شبیه‌سازی MR دمپر براساس معادلات غیرخطی بینگهام



شکل ۳) پیستون و دمپر مگنتورئولوژیکال؛ الف) پیستون، ب) دمپر مگنتورئولوژیکال

$$v = -\frac{Wh}{2A_p} \quad (3)$$

$$\mathcal{P} = -\frac{Wh^3}{12\eta A_p V} \frac{dP}{dx} \quad (4)$$

$$\mathcal{T} = \frac{Wh^2 \tau_B}{12\eta A_p V} \quad (5)$$

لازم به ذکر است که مساحت سطح مقطع پیستون (A_p) و محیط مسیر مجرای حلقوی (W) به‌صورت رابطه ۶ محاسبه می‌شوند.

$$A_p = \frac{\pi(D_c^2 - D_r^2)}{4} \quad W = 2\pi(D_b - (D_b - 2h)) \quad (6)$$

رابطه بین این متغیرهای بی‌بعد به‌صورت معادله ۷ است:

$$3(\mathcal{P} - 2\mathcal{T})^2(\mathcal{P}^3 - (1 + 3\mathcal{T} - \mathcal{V})\mathcal{P}^2 + 4\mathcal{T}^3) + \mathcal{T}\mathcal{V}^2\mathcal{P}^2 = 0$$

$$|\mathcal{V}| < 3(\mathcal{P} - 2\mathcal{T})^2 / \mathcal{P}$$

توجه به این نکته حائز اهمیت است که اگر $\mathcal{V} < 0$ باشد، پیستون در جهت مخالف جریان سیال حرکت می‌کند. بنابراین در نهایت نیروی تولیدشده توسط دمپر به‌صورت رابطه ۸ است:

$$F = -\frac{dP}{dx} A_p L = \frac{12\eta A_p^2 L V_0}{Wh^3} \mathcal{P} \quad (8)$$

در نهایت، هندسه دمپر مگنتورئولوژیکال و خواص رئولوژیک متغیر با میدان مغناطیسی، اثر خود را در نیروی میرایی به‌صورت مجموع دو نیروی کنترل‌پذیر و نیروی غیرقابل کنترل نشان می‌دهند. این روابط به‌صورت معادلات ۹-۱۱ خلاصه شده‌اند [11, 19, 21, 22]

$$F = F_\tau + F_\eta \quad (9)$$

$$F_\tau = \left(2.07 + \frac{12Q\eta}{12Q\eta + 0.4Wh^2\tau_B(H_{mrf})} \right) \frac{\tau_B(H_{mrf})L A_p}{h} \operatorname{sgn}(V)$$

$$F_\eta = \left(1 + \frac{WhV}{2Q} \right) \frac{12\eta Q L_t A_p}{Wh^3} \quad (10)$$

در این روابط، نیروی قابل کنترل F_τ در اثر تنش برشی کنترل‌پذیر و نیروی غیرقابل کنترل، معادل نیروی پلاستیک ویسکوز F_η است. تنش برشی τ_y به‌صورت رابطه تجربی ۱۲ تعریف می‌شود که تابعی از شدت میدان مغناطیسی و کسر حجمی ذرات (9) است [22]:

$$\tau_B(H_{mrf}) = 211700 C \vartheta^{1.5392} \tanh(6.33 \times 10^{-6} H_{mrf})$$

کسر حجمی ذرات، ϑ برابر 0.4 و C ضریبی وابسته به سیال حامل در مایع مگنتورئولوژیک است و برای هیدروکربن‌ها مقدار یک است. شدت میدان مغناطیسی نیز برای هر کوئل الکتریکی به‌صورت رابطه ۱۳ تعریف شده که N تعداد دور سیم‌پیچ مسی در هر کوئل است:

$$H_{mrf} = \frac{NI}{2h} \quad (11)$$

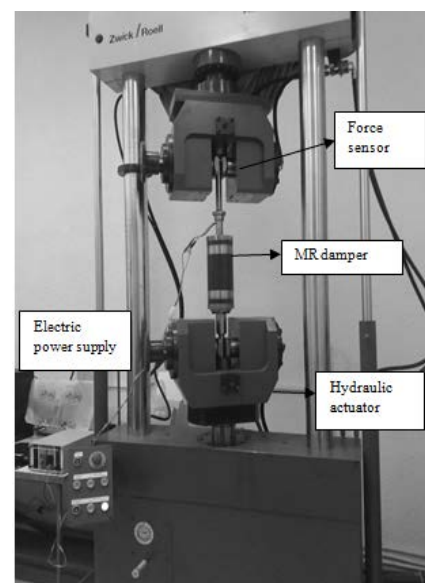
بدین منظور، معادلات بیان‌شده برای شبیه‌سازی و تعیین مشخصه‌های هندسی طراحی دمپر، برای حداقل نیروی میرایی ۲۰۰۰ نیوتن و حداکثر نیروی میرایی ۶۵۰۰۰ نیوتن در بیشترین جریان الکتریکی قابل تحمل یعنی ۲ آمپر استفاده می‌شوند. نتایج حاصل

۴- تست دمپر مگنتورئولوژیکال

۴-۱- مجموعه آزمایشگاهی و تست

به منظور بررسی رفتار دینامیکی دمپر مگنتورئولوژیکال در حضور میدان مغناطیسی، مجموعه تست آزمایشگاهی مطابق شکل ۴ بوده که شامل دستگاه تست هیدرولیک دینامیکی زویک رول آمسler اچ ای ۲۵۰ محصول آلمان، مجهز به سنسورهای بارگذاری نیرو، سنسور اندازه‌گیری جابه‌جایی، واحد کنترل هیدرولیک نرم‌افزار ورک شاپ ۹۶ برای ثبت داده‌ها و منبع قابل کنترل جریان الکتریکی هستند. با قراردادن میل پیستون آزاد دمپر در فک ثابت مجهز به سنسور نیرو، آن گاه فک هیدرولیک متحرک مجهز به سنسور اندازه‌گیری جابه‌جایی را برای ماکزیمم کورس جابه‌جایی ۱۵ میلی‌متر روی غلاف استوانه‌ای قفل می‌شود. در واحد کنترل نرم‌افزار، با وجود اینکه ورودی‌های مثلثی و مربعی به عنوان تحریک وجود داشتند، ولی متناسب با توجیه به عمل آمده در قسمت شبیه‌سازی، 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 در تمام تست‌ها برابر ± 15 میلی‌متر، f فرکانس‌های بارگذاری ۰/۲۵ و ۰/۵ هرتز و $t = 20$ (ثانیه) زمان بارگذاری تحریک 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 به عنوان خروجی ثبت می‌کند، نیروی میرایی بر حسب زمان و نیروی میرایی بر حسب جابه‌جایی در هر تست است.

دمپر مگنتورئولوژیکال در فرکانس‌های بالاتر یک، ۱/۵ و ۲ هرتز نیز تست شد، ولی بنا به محدودیت دستگاه تست در تعداد داده‌برداری در واحد زمان، منحنی‌های به دست آمده ارائه نشده‌اند. همچنین در فرکانس‌های بالا، دمپر با صدای غیرعادی مواجه می‌شود که ناشی از پدیده کاویتاسیون در حباب‌های هوای به دام افتاده در زمان پرکردن دمپر و هنگام تست در حین عبور از مجرای حلقوی است. این پدیده که در تحقیقات یانگ^[11] نیز مشاهده شده است، منجر به تأخیر نیرو در منحنی‌های پاسخ خواهد شد، ولی خللی در افزایش ماکزیمم نیروی میرایی نسبت به فرکانس و جریان ایجاد نمی‌کند که این درستی کار دمپر طراحی شده را با وجود پدیده کاویتاسیون و تأخیر نیرو نشان می‌دهد.



شکل ۴) مجموعه تست آزمایشگاهی تست دمپر مگنتورئولوژیکال

۴-۲- نتایج تست

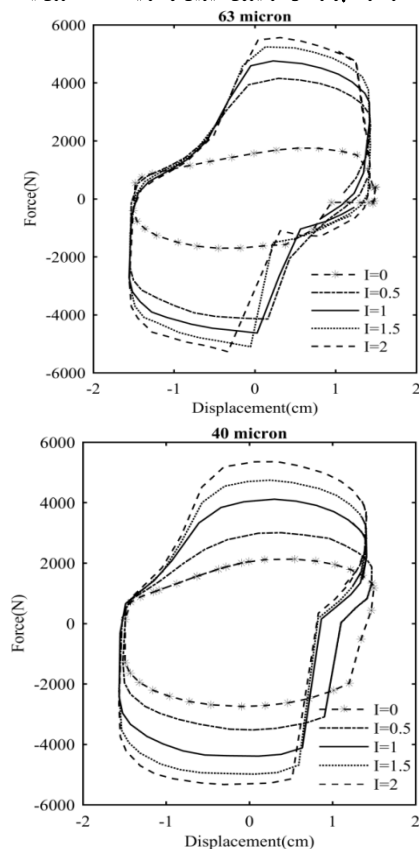
داده‌های نیرو- جابه‌جایی، نیرو- زمان ثبت شده از تست دو نمونه سیال ۴۰ و ۶۳ میکرومتر در جریان الکتریکی صفر تا ۲ آمپر و فرکانس ۰/۲۵ و ۰/۵ هرتز در نرم‌افزار متلب برای ترسیم منحنی‌های تست فراخوانی شدند. به عنوان مثال نمودار ۲، خروجی منحنی نیرو- زمان تحت یک تحریک سینوسی با فرکانس ۰/۲۵ هرتز در جریان‌های الکتریکی مختلف را نشان می‌دهد که نمودار ۲- الف برای سیال با ذرات درشت‌تر آهن کربونیل (۶۳ میکرومتر) بوده و نمودار ۲- ب برای سیال با ذرات کوچک‌تر آهن کربونیل (۴۰ میکرومتر) است. این دو نمودار، اختلاف اثر اعمال جریان الکتریکی را به خوبی نشان می‌دهند، به گونه‌ای که با افزایش جریان الکتریکی، نیروی میرایی افزایش می‌یابد. همچنین اگر منحنی پاسخ نیرو- زمان دمپر از سه منطقه در هر سیکل تشکیل شده باشد، در منطقه اول، منحنی از خط صفر نیروی به نقطه ماکزیمم جهش می‌رسد که معادل حرکت دمپر مگنتورئولوژیکال از نقطه پیش‌تسلیم به نقطه تسلیم است و نیروی فشار ایجاد شده هنگام عبور جریان سیال از مجرا به شدت افزایش می‌یابد. بعد از نقطه ماکزیمم جهش وارد منطقه دوم منحنی شده و معادل زمان کوتاهی است که منحنی در قله باقی می‌ماند. در اینجا نیروی ویسکوز پلاستیک دمپر با سرعت بیشتری نسبت به کاهش نیروی اینرسی افزایش می‌یابد. بعد از آن، دمپر وارد منطقه سوم یا همان نقطه برگشت به سمت نیروی صفر می‌شود که نیروی مقاومت آن نسبت به مناطق اول و دوم کاهش می‌یابد. همچنین در نمودارهای ۳ و ۴، منحنی‌های هسترزیس نیرو- جابه‌جایی برای دو نمونه سیال در دو فرکانس ارائه شده‌اند. در منحنی‌های هسترزیس نیرو- جابه‌جایی نیز اثر افزایش جریان الکتریکی بر نیروی میرایی در دو نوع سیال دیده می‌شود که البته در جریان‌های بالاتر، این افزایش به نسبت جریان‌های ابتدایی کمتر خواهد بود.

با بررسی به عمل آمده در منحنی‌های هسترزیس تجربی مشاهده شد که یکی از عیوب ظاهر شده در تست دمپر، پدیده تأخیر نیروی ناشی از دو عامل است که عامل اول، حباب‌های هوای گیر افتاده در زمان پرکردن دمپر از سیال و عامل دوم، پدیده انسداد به خاطر تنش برشی بسیار بالای سیال در حضور میدان مغناطیسی است. عامل اول را با تغییر نحوه پرکردن دمپر از سیال می‌توان تا حدودی کاهش داد، ولی عامل دوم به دلیل تنش برشی بالا در مقابل عبور سیال از محفظه‌ای به محفظه دیگر از طریق مجرای حلقوی اجتناب‌ناپذیر است. جمع شدن حباب‌های هوا و وقوع پدیده انسداد در دمپر باعث پدیده کاویتاسیون و پایین آوردن عملکرد دمپر با پدیده تأخیر نیرو خواهد شد. همچنین این پدیده سبب می‌شود که منحنی‌های هسترزیس نیرو- جابه‌جایی با افزایش جریان در یک سیکل، بعد از عبور از نیروی صفر دچار تورفتگی شود و سپس روندی صعودی یا نزولی خود را ادامه دهد که مسلماً این کاهش حجم منحنی هسترزیس، در ظرفیت اتلاف انرژی اثر خواهد گذاشت.

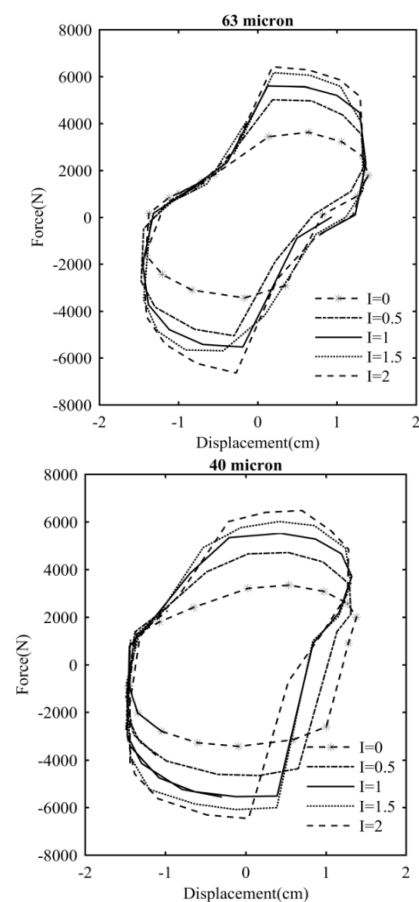
از مقایسه نمودارهای ۳ و ۴، چند نکته زیر قابل بیان است:

الف- اعمال جریان الکتریکی با شدت بیشتری روی نیروی میرایی سیال ذرات بزرگ‌تر نسبت به ذرات کوچک‌تر اثر می‌گذارد، ولی هر چقدر جریان الکتریکی افزایش می‌یابد، این اثر کاهش می‌یابد و اختلاف نیروی بین جریان‌ها کمتر خواهد شد که البته این برای سیال با ذرات ریزتر با شیب ملایم‌تری اتفاق می‌افتد.

ب- افزایش فرکانس روی نیروی میرایی دمپر، اثری مشابه حالت الف دارد.



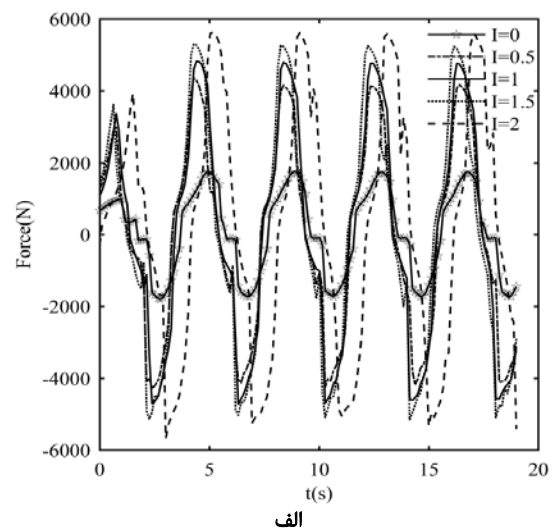
نمودار ۳) منحنی‌های تست هسترزیس نیرو- جابه‌جایی در فرکانس ۰/۲۵ هرتز برای سیال ۴۰ و ۶۳ میکرون



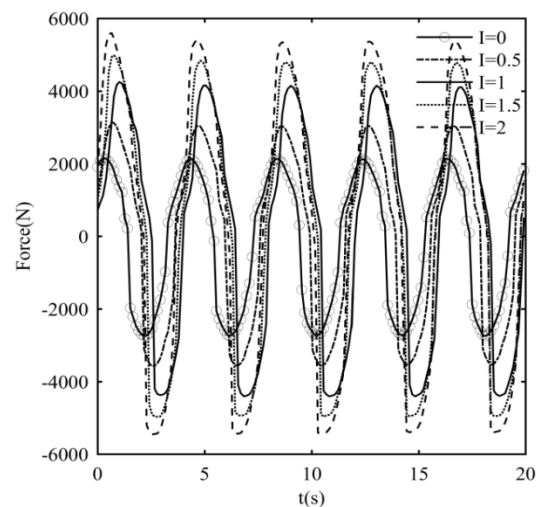
نمودار ۴) منحنی‌های تست هسترزیس نیرو- جابه‌جایی در فرکانس ۰/۵ هرتز برای سیال ۴۰ و ۶۳ میکرون

ج- پدیده تأخیر نیرو در سیال با ذرات بزرگ‌تر همراه با افزایش جریان، افزایش بیشتری نسبت به سیال دیگر دارد و بالا رفتن فرکانس افزایش این پدیده را همراه خواهد داشت، چرا که سرعت بیشتر میزان حباب‌های به‌دام‌افتاده را بیشتر خواهد کرد.

با ارزیابی داده‌های منحنی‌های هسترزیس، مشاهده شد که دامنه ماکزیمم نیروی میرایی در جریان صفر آمپر و فرکانس ۰/۲۵ هرتز برای سیال‌هایی با دانه‌بندی ذرات پودر آهن ۴۰ و ۶۳ میکرومتر به‌ترتیب برابر ۲۴۵۰ و ۱۷۸۴ نیوتن است که با افزایش فرکانس به ۰/۵ هرتز، نیرو نیز به‌ترتیب به مقادیر ۳۷۲۵ و ۳۸۰۱ نیوتن افزایش می‌یابد. با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده، می‌توان به دو نکته اشاره کرد. اول اینکه، اندازه ذرات بزرگ‌تر با وجود ویسکوزیته بیشتر در فرکانس پایین، نیروی میرایی کمتری تولید می‌نماید، ولی وقتی فرکانس به دو برابر افزایش می‌یابد، دامنه ماکزیمم نیرو برای سیال درشت‌تر، بزرگ‌تر از سیال با ذرات کوچک‌تر می‌شود. برای اطمینان از این نتیجه، دمپر در فرکانس‌های بالاتر مورد تست قرار گرفت که مقادیر دامنه ماکزیمم نیروی میرایی جریان صفر برای دو نمونه سیال مورد بررسی، مطابق جدول ۳ تأییدکننده نتیجه فوق‌الذکر است. دوم اینکه، با افزایش فرکانس تحریک هارمونیک اعمالی به دمپر مگنتورئولوژیکال، دامنه ماکزیمم نیروی میرایی دو نوع سیال در میدان مغناطیسی صفر افزایش یافته است.



الف



ب

نمودار ۵) منحنی‌های تست نیرو- زمان در فرکانس ۰/۲۵ هرتز؛ الف) سیال ۶۳ میکرون، ب) سیال ۴۰ میکرون

جدول ۳ دامنه ماکزیمم نیروی میرایی سیال‌های مگنتورئولوژیکال با جریان صفراآمپر در فرکانس‌های مختلف

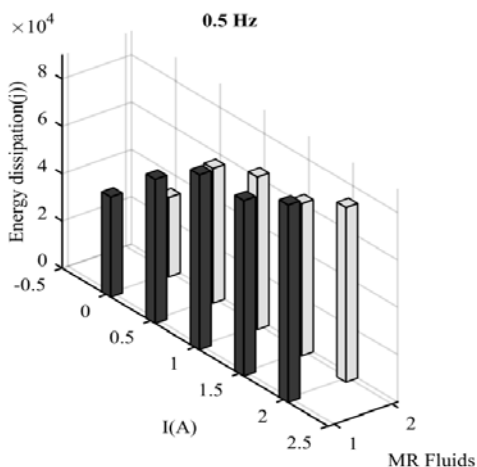
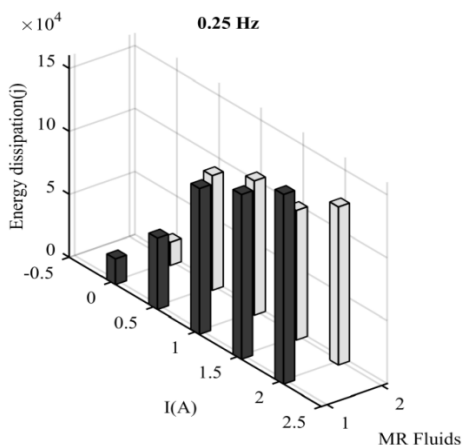
فرکانس تحریک (هرتز)	F_{max} (N)	
	MRF ۴۰ μm	MRF ۶۳ μm
۰/۲۵	۲۴۵۰	۱۷۸۴
۰/۵	۳۷۲۵/۵	۳۷۹۸
۱	۴۱۳۵/۵	۴۲۱۳
۲	۴۳۲۹	۴۴۷۳

انرژی از محاسبه مساحت منحنی‌های هسترزیس نیرو- جابه‌جایی تجربی برای دو سیال مورد آزمایش در فرکانس ۰/۲۵ و فرکانس ۰/۵ هرتز را نشان می‌دهد. در آنالیز نمودارهای مقادیر ظرفیت اتلاف انرژی دمپر مگنتورئولوژیکال، ذکر موارد زیر قابل بیان است:

الف- سیال با ذرات ریزتر در اکثر جریان‌های الکتریکی (به جز جریان ۰/۵ آمپر)، ظرفیت اتلاف انرژی بیشتری نسبت به سیال با ذرات درشت‌تر دارد.

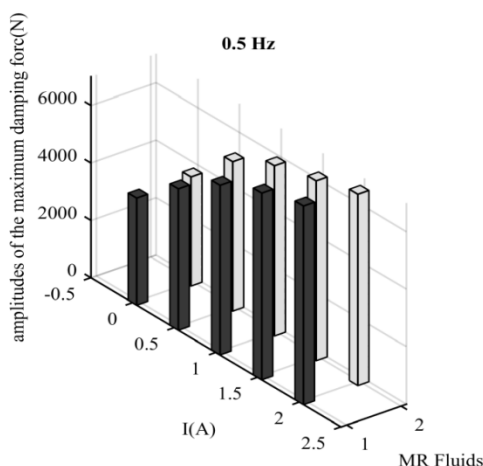
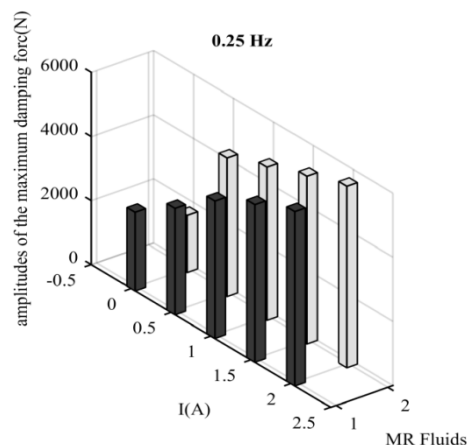
ب- فرکانس ۰/۲۵ هرتز نسبت به فرکانس ۰/۵ هرتز در حضور میدان مغناطیسی و متناسب با افزایش جریان الکتریکی، ظرفیت اتلاف انرژی بیشتری خواهد داشت.

ج- افزایش نسبی ظرفیت اتلاف انرژی بین دو جریان الکتریکی مجاور در فرکانس ۰/۲۵ هرتز برای سیال با ذرات پراکنده آهن کربونیل ۴۰ میکرون به ترتیب ۲۷۷/۲، ۵۱، ۱۸ و ۱۵/۲٪ است. همچنین برای سیال با ذرات پراکنده آهن کربونیل ۶۳ میکرون، این مقادیر به ترتیب ۱۷۹/۲، ۱۰۸/۲، ۷/۹ و ۲/۱٪ است. در این درصدها افزایش چشم‌گیر ظرفیت اتلاف انرژی نسبت به سیال الکتریکی صفر به ۰/۵ آمپر و سپس کاهش این فاصله در جریان‌های بالاتر دیده می‌شود. در فرکانس ۰/۵ هرتز، افزایش نسبی اتلاف انرژی بین دو جریان الکتریکی مجاور با درصد کمتری، مشابه فرکانس ۰/۲۵ هرتز است. نتایج محاسبه‌شده با مقادیر عددی مقاله ژو و همکاران [۲۳] از لحاظ افزایش نسبی ظرفیت اتلاف انرژی بین دو جریان مجاور، روندی مشابه دارد.



نمودار ۱ ظرفیت اتلاف انرژی برای سیال‌های ۴۰ میکرون (محور ۱ MRF) و ۶۰ میکرون (محور ۲ MRF)

حال با آنالیز منحنی‌های هسترزیس نیرو- جابه‌جایی، دامنه ماکزیمم نیروی میرایی در جریان‌های الکتریکی مختلف در دو فرکانس متفاوت به دست می‌آید. نتایج این بررسی به صورت نمودار ۵ بوده که نشان‌دهنده تأثیر افزایش جریان الکتریکی، تغییر فرکانس و نوع سیال در دامنه ماکزیمم نیروی میرایی است. در نمودار ۵، برای فرکانس ۰/۲۵ هرتز، دامنه ماکزیمم نیروی میرایی سیال بعد از عبور از جریان الکتریکی صفراآمپر، در سیال با دانه‌بندی ذرات پودر آهن بزرگ‌تر (محور MR Fluids 2) در مقایسه با دانه‌بندی ذرات پودر آهن کوچک‌تر (محور MR Fluids 1) نسبت به جریان الکتریکی، مقادیر بزرگ‌تری دارد. نمودار ۵، برای فرکانس ۰/۵ هرتز نشان می‌دهد که دامنه ماکزیمم نیروی میرایی دو سیال نسبت به فرکانس اول، مقادیر نزدیک‌تری به هم دارند.



نمودار ۵ منحنی مقادیر دامنه ماکزیمم نیروی میرایی برای سیال‌های ۴۰ میکرون (محور ۱ MRF) و ۶۰ میکرون (محور ۲ MRF)

ظرفیت اتلاف انرژی، یکی دیگر از شاخص‌های ارزیابی عملکرد دمپر مگنتورئولوژیکال است. نمودار ۶، نمودارهای میله‌ای مقادیر اتلاف

h	فاصله مجرای حلقوی (میلی‌متر)
I	جریان الکتریکی (آمپر)
L	مجموع طول فعال کوئل‌ها (میلی‌متر)
m	ثابت تجربی سیال
p	ثابت تجربی سیال (p)
Q	نرخ جریان حجمی (m^3/s)
V	سرعت پیستون (میلی‌متر بر ثانیه)
w	میانگین مساحت مجرای حلقوی (mm^2)
$\mathcal{P}$	متغیر بی‌بعد
ν	متغیر بی‌بعد
$\mathcal{T}$	متغیر بی‌بعد
L_t	طول سیلندر (میلی‌متر)
D_c	قطر پیستون (میلی‌متر)
t_w	ضخامت سیلندر (میلی‌متر)
A_p	مساحت سطح مقطع پیستون (میلی‌متر)
علامه یونانی	
τ_B	تنش برشی (نیوتن بر متر مربع)
τ_0	تنش تسلیم قابل کنترل
$\dot{\gamma}$	نرخ کرنش برشی تسلیم
η	ویسکوزیته پلاستیک (پاسکال در ثانیه)
η_r	خاصیت الاستیک ماده
ξ	ضرایب تجربی
λ	ضرایب تجربی
α	تابع چند جمله‌ای از جریان
ϑ	کسر حجمی ذرات

منابع

- 1- 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.
- 2- 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.
- 3- Bica I, Liu YD, Choi HJ. Physical characteristics of magnetorheological suspensions and their applications. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2013;19(2):394-406.
- 4- Cheng HB, Wang JM, Zhang QJ, Wereley NM. Preparation of composite magnetic particles and aqueous magnetorheological fluids. Smart Materials and Structures. 2009;18(8):085009.
- 5- Kiyumarsi E, Jalali A, Norouzi M, Ghatte M. An experimental investigation of iron based magnetorheological fluid stability and rheology. Modares Mechanical Engineering. 2016;16(2):301-308. [Persian]
- 6- 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.
- 7- 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. 2015;24(1):015004.
- 8- Li ZX, Xu LH. Performance tests and hysteresis model of MRF-04K damper. Journal of Structural Engineering. 2005;131(8):1303-1306.
- 9- Wang Q, Ahmadian M, Chen Z. A novel double-piston magnetorheological damper for space truss structures vibration suppression. Shock and Vibration. 2014;2014:864765.
- 10- Yang G, Spencer BF, Jung HJ, David Carlson J. Dynamic modeling of large-scale magnetorheological

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله با هدف بررسی اثر اندازه ذرات کرومی شکل پودر آهن کربونیل روی نیروی میرایی ظرفیت اتلاف انرژی دمپر مگنتورئولوژیکال دوسرمتحرک با سه کوئل الکتریکی، دو نوع سیال مگنتورئولوژیک با ذرات کرومی شکل آهن با قطرهای ۴۰ و ۶۳ میکرون با درصد حجمی ۳۵٪ ساخته شد. دمپر دوسرمتحرک در مجموعه تست آزمایشگاهی برای فرکانس‌ها و جریان‌های الکتریکی مختلف تست شد و نتایج آنالیز نیروی آن نسبت به زمان، شبه‌سینوسی و نسبت به جابه‌جایی منحنی‌هایی هسترزیس بودند. در تمامی منحنی‌ها اثر فزاینده جریان الکتریکی در دامنه ماکزیمم نیرو و ظرفیت اتلاف انرژی مشاهده شد. در میدان مغناطیسی صفر، سیال با ذرات پودر آهن ۴۰ میکرون در فرکانس ۲۵/هرتز، دامنه ماکزیمم نیروی میرایی بیشتری نسبت به سیال با ذرات پودر آهن ۶۳ میکرون دارد. زمانی که فرکانس تحریک هارمونیک وارده به دمپر دوبرابر می‌شود، این مقدار نیرو با اختلاف کمی برعکس می‌شود. با وجود بزرگ‌تر بودن این نیرو برای سیال با ذرات درشت‌تر، اختلاف نیرو در مقایسه با نیروی میرایی کل سهم کوچکی دارد. بنابراین می‌توان گفت که در فرکانس‌های بالا، اندازه ذرات مغناطیس‌شونده تأثیر چشم‌گیری در دامنه ماکزیمم نیروی میرایی ندارند. با وجود این، زمانی که برای منحنی‌های هسترزیس، ظرفیت اتلاف انرژی که معادل مساحت منحنی هسترزیس است تعیین شد، مشاهده می‌شود که در تمام فرکانس‌ها و جریان‌های الکتریکی سیال با ذرات ۴۰ میکرون، نسبت به سیال ۶۳ میکرون، ظرفیت اتلاف انرژی بیشتری دارد. بنابراین تهیه سیالی با ذرات ریزتر از ماده مغناطیس‌شونده پودر آهن در میزان نیروی میرایی یک وسیله مگنتورئولوژیکال تأثیر مستقیم دارد.

تشکر و قدردانی: این کار تحقیقاتی در آزمایشگاه سازه‌های هوشمند و وقف پذیر دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز انجام شده است. در ساخت و تست دمپر مگنتورئولوژیکال، نهایت تشکر را به خاطر 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 (۳۵٪)؛ کمال جهانی (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/نگارنده بحث (۳۵٪)؛ سیدصمد صمدانی‌اقدم (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی (۳۰٪)

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

۶- پی‌نوشت

علامه

C	ضریب تجربی سیال
D	طیف دینامیکی
f	فرکانس طبیعی (هرتز)
G	مدول برشی (پاسکال)
H	اندازه شدت میدان مغناطیسی (تسلا)

- 1999;10(1):5-13.
- 17- Stanway R, Sproston JL, El-Wahed AK. Applications of electro-rheological fluids in vibration control: A survey. *Smart Materials and Structures*. 1996;5(4):464.
- 18- Wang DH, Liao WH. Magnetorheological fluid dampers: A review of parametric modelling. *Smart Materials and Structures*. 2011;20(2):023001.
- 19- Choi SB, Lee HS, Park YP. H8 control performance of a full-vehicle suspension featuring magnetorheological dampers. *Vehicle System Dynamics*. 2002;38(5):341-360.
- 20- Chae HD, Choi SB. A new vibration isolation bed stage with magnetorheological dampers for ambulance vehicles. *Smart Materials and Structures*. 2015;24(1):017001.
- 21- 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.
- 22- Golinelli N, Spaggiari A. Design of a novel magnetorheological damper with internal pressure control. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2015;9(32):13-23.
- 23- 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.
- damper systems for civil engineering applications. *Journal of Engineering Mechanics*. 2004;130(9):1107-1114.
- 11- Yang G. Large-scale magnetorheological fluid damper for vibration mitigation: Modeling, testing and control [Dissertation]. Notre Dame IN: University of Notre Dame; 2001.
- 12- 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):194-200.
- 13- Kamble VG, Kolekar Sh, Madivalar C. Preparation of magnetorheological fluids using different carriers and detailed study on their properties. *American Journal of Nanotechnology*. 2015;6(1):7-15.
- 14- López-López MT, Kuzhir P, Lacis S, Bossis G, González-Caballero F, Durán JDG. Magnetorheology for suspensions of solid particles dispersed in ferrofluids. *Journal of Physics Condensed Matter*. 2006;18(38):S2803.
- 15- 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 & Technology*. 2016;2(9):82-86.
- 16- Jolly MR, Bender JW, David Carlson J. Properties and applications of commercial magnetorheological fluids. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*.