

مروری بر پارامترهای عملکردی میراگرهای ارتعاشی مغناطیسی

محمدرضا نجفی*

استادیار

دانشگاه جامع امام حسین (علیه السلام)

Najafi.m@ihu.ac.ir

عباس مطلبی

کارشناسی ارشد

دانشگاه صنعتی اصفهان

a.motalebi.f@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۱۵

چکیده

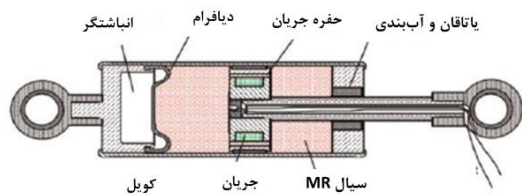
توسعه میراگرهای ارتعاشی مغناطیسی با هدف جلوگیری از اثرات نامطلوب ارتعاشات در سال‌های اخیر مورد توجه محققان و صنعتگران قرار گرفته است. این میراگرها از منظر ساختار فیزیکی معمولاً به سه دسته تک لوله، دو لوله و دوطرفه تقسیم می‌شوند که در حالت‌های مختلف برشی، فشاری، جریانی و ترکیبی مورد استفاده قرار می‌گیرند. سیال‌های مغناطیسی از جمله مواد هوشمند مغناطیسی بوده که در معرض میدان مغناطیسی خواص جریانی متفاوتی نسبت به حالت بدون اعمال میدان مغناطیسی از خود نشان داده و با افزایش میزان وادارندگی، میدان مغناطیسی اعمالی و میزان نیروی لازم برای ایجاد تغییر شکل در سیال افزایش می‌یابد. از میراگرهای ارتعاشی مغناطیسی جهت کاهش ارتعاشات انتقالی به صندلی خودرو، ترمزهای هوشمند در پروتز زانو، میراگرهای مورد استفاده در پل‌ها، صنعت ساختمان‌سازی و صنایع نظامی استفاده می‌شود.

واژگان کلیدی: میراگر ارتعاشی، سیال مغناطیسی، میراگر تک لوله، میراگر دو لوله.

۱. مقدمه

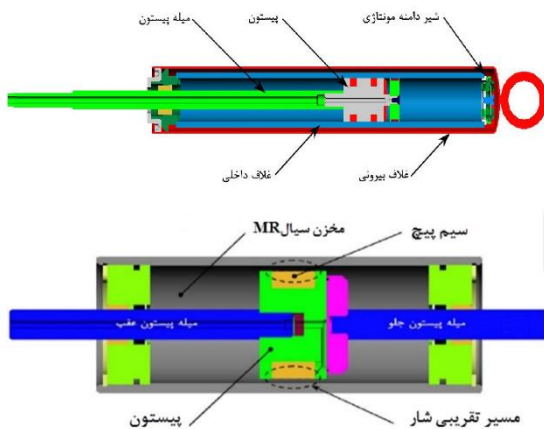
امروزه به‌منظور جلوگیری از اثرات نامطلوب ارتعاشات، استفاده از میراگرهای مغناطیسی^۱ مورد توجه محققان و صنعتگران قرار گرفته است. میراگرهای ارتعاشی از مواد هوشمند متعارفی چون سیالات جریان مغناطیسی^۲ و فرومغناطیس^۳ بهره می‌برند [۱]. قابلیت فعال‌سازی (سریع) و استحکام (کششی) قابل توجه در برابر اعمال نیرو در حضور میدان مغناطیسی از جمله خواص سیالات جریان مغناطیسی (نسبت به فرومغناطیسی) است [۲]. به‌منظور بررسی رفتار مکانیکی (استحکام در نمودارهای تنش-کرنش)، مدل‌های ریاضی مختلفی مانند مدل بوک-وین^۳، مدل هرشل بالکلی^۴

پیشنهاد شده که یکی از مدل‌های متداول، مدل پلاستیک بینگهام^۵ است [۳،۴]. عملکرد میراگرها و رفتار جریانی^۶ سیال با استفاده از مدل پلاستیک بینگهام، مورد بررسی قرار گرفته است [۵،۶]. هنگ و همکاران^۷ اثر عدد بینگهام و نسبت دامنه هیدرولیکی بی‌بعد را روی ضخامت پلاگ^۸ بی‌بعد و ثابت میرایی ویسکوز معادل بررسی نمودند [۷]. چائوچی وانگ و گردانی‌نژاد [۸] نشان دادند که مدل سیال هرشل بالکلی می‌تواند به هنگام بررسی رفتار غیرنیوتنی ناحیه پساتسلیم سیالات جریان مغناطیسی و الکتریکی مورد استفاده قرار بگیرد. غیر از رفتار تنش و کرنش مورد بررسی در سیالات، پارامترهای دیگر نیز مورد بررسی قرار گرفته است. ذوالفقاریان و همکاران [۹، ۱۰]، اثر میدان مغناطیسی، دما و



شکل ۱. میراگر تک لوله‌ای جریان مغناطیسی [۱۵].

میراگر دو لوله‌ای دارای دو مخزن حاوی سیال در درون یکدیگر است که در قسمت بالای شکل ۲ نشان داده شده است. در پیکربندی این میراگر، یک مخزن داخلی و یک مخزن بیرونی وجود دارد. مخزنی که پیستون در آن قرار دارد همان مخزن داخلی که مشابه همان میراگر تک لوله است و از سیال پر شده است. حجمی که بین غلاف داخلی و غلاف بیرونی تعریف شده، شامل یک شیار است که مخزن خارجی نامیده می‌شود. با حرکت میله پیستون سیال در مخزن داخلی و جداره خارجی جریان می‌یابد و با اعمال میدان مغناطیسی سیال تحت فشار قرار می‌گیرد. میراگر دوطرفه نیز معمولاً در مواردی که نیاز است میدان مغناطیسی در دو جهت اعمال شده و عملاً نقش دو میراگر را بازی کند، به کار گرفته می‌شود.



شکل ۲. بالا: میراگر دو لوله جریان مغناطیسی [۱۶] پایین: میراگر

دوطرفه [۱۷]

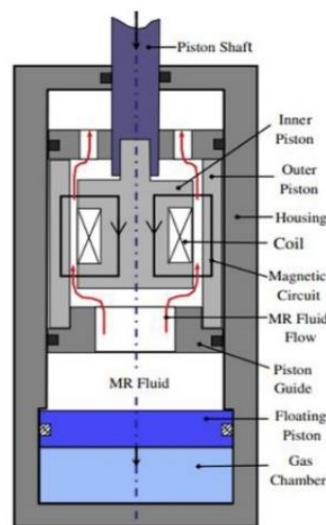
جنس سیال را بر رفتار سیال جریان مغناطیسی بررسی کردند. آنها تأثیر میدان مغناطیسی بر لزجت پلاستیک، تنش برشی در شیار (کنار دیواره) و اینرسی را در نظر گرفتند تا از آن در طراحی میراگرهای جریان مغناطیسی استفاده کنند. پارلاک و همکاران^۹ طراحی بهینه‌ای از نیروی میراگر جریان مغناطیسی و حداکثر چگالی شار مغناطیسی متناظر با آن را به دست آوردند [۱۱]. در میراگرهای جریان مغناطیسی، پاسخ‌دهی سریع (به میدان مغناطیسی) سیال اهمیت دارد [۱۲]. سان^{۱۰}، دامنه حرکتی، ارتعاشات و جریان‌های مختلفی برای یک میراگر دو لوله‌ای جریان مغناطیسی را مورد بررسی قرار داد و ثبات در تولید نیروی میرایی آن را تایید نمود [۱۳]. در این پژوهش مروری بر خواص مغناطیسی و مکانیکی و پارامترهای عملکردی میراگرهای مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. ساختار فیزیکی میراگرهای ارتعاشی مغناطیسی

میراگرهای ارتعاشی مغناطیسی از منظر ساختار فیزیکی عموماً به سه دسته تک لوله، دو لوله و دوطرفه تقسیم می‌شوند [۱۴].

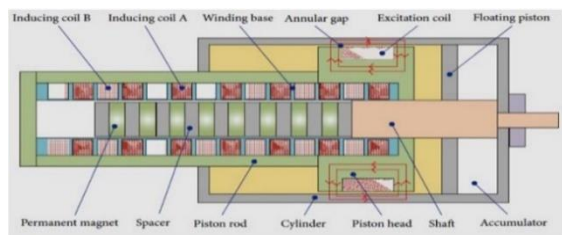
میراگرهای تک لوله مغناطیسی، دارای یک مخزن سیال و یک تنظیم‌کننده جابه‌جایی سیال (تغییر حجم با حرکت میله پیستون‌دار) است. فشار داخل محفظه با استفاده از گاز (نیتروژن) فشرده تنظیم می‌شود و سیال از میان روزنه سری پیستون، که در معرض میدان مغناطیسی قرار دارد، جریان می‌یابد. با تغییر در لزجت سیال جریان مغناطیسی که از روزنه می‌گذرد، اندازه میدان مغناطیسی تغییر می‌کند، که در شکل ۱ قابل ملاحظه است.

در شکل ۳ پیکربندی میراگر مدل RD-8041 که برای مقاومت در برابر لرزش در خودروها استفاده می‌شود، نشان داده شده است.



شکل ۳. پیکربندی میراگر مدل RD-8041 [۱۸، ۱۹]

در شکل ۴ شماتیکی از یک نمونه میراگر مغناطیسی با قابلیت برداشت انرژی نشان داده شده که می‌تواند ۷۵۰ نیوتن را با جریان ۰/۶ آمپر ایجاد نماید [۲۰].



شکل ۴. شماتیک میراگر مغناطیسی با برداشت انرژی [۲۰]

۳. پارامترهای عملکردی میراگرهای ارتعاشی مغناطیسی

۳-۱. مشخصات فنی

در جدول ۱ دامنه ارتعاشات میراگرهای مغناطیسی مورد استفاده در وسایل نقلیه مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۱. ویژگی‌های ارتعاشی میراگرهای مغناطیسی

مرجع	کاربرد	فرکانس (هرتز)	پاسخ زمانی (ms)	نیروی اعمالی (N)	جریان (Amps)	بیشینه دامنه ارتعاشات (mm)	نوع میراگر
[۲۱]	خودرو	۲/۵	-	۳۵۵۸	۵	۳۶	میراگر تک لوله (شرکت فورد)
[۲۱]	خودرو	۲	۱/۵	۸۰۰	۲	۱۵۰	میراگر تک لوله (شرکت لورد ^۱)
[۲۲]	خودرو	۴	-	۶۵۰	۰/۶	۵	میراگر تک لوله
[۲۳]	صندلی خودرو		-		۱/۵	۸۰	میراگر تک لوله
[۲۴]	خودرو سنگین	۵	-	۲۰۰۰	۱/۶	۱۵۶	میراگر تک لوله (RD-1005-3) شرکت لورد
[۲۵]	خودرو	۱۰	-	۶۰۰	۱/۵	۶۳۵	میراگر دو لوله
[۲۶]	تعلیق هواپیما A6-Intruder	۵	۱/۳		۲	۶۴۹.۲	میراگر تک لوله

فشار بین دو صفحه ثابت برای انواع میراگرها مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۷]. حالت برشی به دلیل وجود سیال بین دو صفحه متحرک، اغلب در کلاچ‌ها و ترمزها استفاده می‌شود

۳-۲. نحوه عملکرد

نحوه عملکرد میراگرهای مغناطیسی در حالت‌های مختلف در جدول ۲ آمده است. حالت جریانی به دلیل وجود گرادیان

قرار گرفته و جدا کردن قطبها توسط یک فاصله‌دهنده غیرمغناطیسی انجام می‌شود. در این حالت میدان مغناطیسی غیریکنواخت ایجاد می‌شود [۳۰].

[۲۸]. در حالت فشاری، سیال بین دو صفحه عمود حرکت می‌کند و برای لرزش‌های خفیف به کار می‌رود [۲۹]. در حالت ترکیبی، قطبها به صورت محوری در امتداد مسیر جریان

جدول ۲. نحوه عملکرد میراگرهای مغناطیسی در حالت‌های مختلف

نام حالت	شماتیک نحوه کار	ویژگی‌ها
حالت جریانی		<ul style="list-style-type: none"> - رایج‌ترین حالت - بیشترین نیروی میرایی - دارای میدان مغناطیسی پیچیده [۳۱]
حالت برشی		<ul style="list-style-type: none"> - طراحی مدار مغناطیسی ساده - نیروی میرایی پایین [۳۲]
حالت فشاری		<ul style="list-style-type: none"> - نیروهای میرایی بزرگ - مناسب برای لرزش‌های کم و خفیف [۳۳]
حالت ترکیبی		<ul style="list-style-type: none"> - مناسب برای تغییر نرخ جریان یا ضریب ویسکوز [۳۴]

۳-۳. مدل‌های دینامیکی

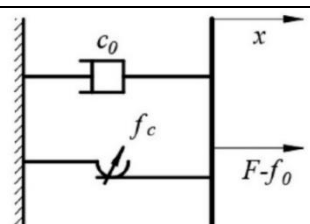
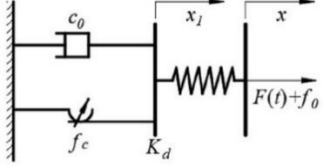
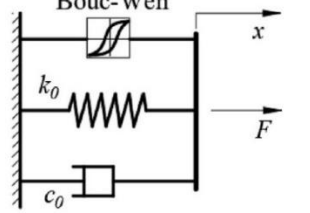
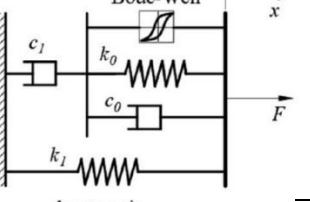
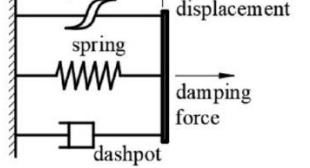
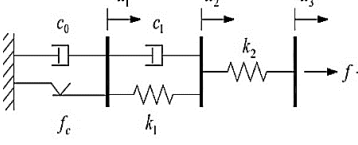
در جدول ۳ مدل‌های دینامیکی پارامتری میراگرهای مغناطیسی به نمایش در آمده است. مدل بینگهام پارامترهای نیرو-جابه‌جایی سیال MR و اتلاف انرژی در میراگر را شرح می‌دهد اما رابطه بین نیروی میرایی و سرعت را نشان نمی‌دهد [۳۶، ۳۵]. در مدل بینگهام اصلاح شده اغلب خصوصیات دینامیکی میراگر با دقت قابل توصیف هستند

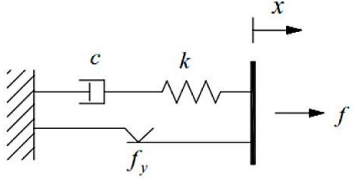
حتی اگر شدت میدان مغناطیسی متغیر باشد اما نیازمند اندازه‌گیری پارامترهای بیشتری است [۳۷، ۳۸]. مدل بوک-وین با وجود آنکه پارامترهای نیرو-جابه‌جایی و نیرو-سرعت را در میراگر توصیف می‌کند اما نمی‌تواند در ناحیه تسلیم و در سرعت‌های با دامنه کوچک چرخش ایجاد کند [۳۹]، درحالی‌که مدل بوک-وین اصلاح شده به خوبی می‌تواند پارامترهای غیرخطی میراگر را در سرعت‌های

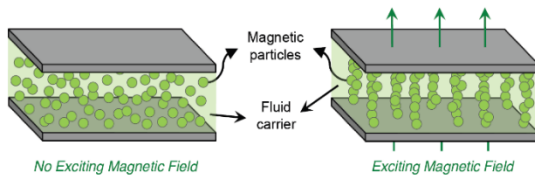
مختلف توصیف کند اما نیازمند اندازه‌گیری پارامترهای بیشتری است [۴۰]. مدل هیستریزیس می‌تواند به‌طور دقیق هیستریزیس مغناطیسی را برای دو حالت مستقل و وابسته تشریح کند

[۴۱] اما برای میراگرهای عمومی این قابلیت را ندارد [۴۲]. مدل‌های گاموتا و فلیسکو و همچنین بینگ مکس نیز به‌عنوان مدل‌های توسعه‌یافته جدید در موارد خاص مورد استفاده قرار می‌گیرند [۴۳، ۴۴].

جدول ۳. مدل‌های دینامیکی پارامتری میراگرهای مغناطیسی

نام مدل	شماتیک مدل	معادله حاکم	مرجع
بینگهام		$F = f_c \operatorname{sgn}(v) + c_0 v + f_0$	[۴۵]
بینگهام اصلاح‌شده		$F = c_0 \dot{x}_1 + f_c(E) \operatorname{sgn}(\dot{x}_1) - f_0$ $= K_d(x - x_1) - f_0$	[۴۶]
بوک-وین		$F = c_0 \dot{x} + k_0(x - x_0) + az$ $\dot{z} = -\gamma x z z ^{n-1} - \beta\dot{x} z ^n + A\dot{x}$	[۴۷]
بوک-وین اصلاح‌شده		$F = c_1 \dot{y} + k_1(x_1 - x_0)$ $\dot{y} = \frac{1}{c_0 + c_1} [az + c_0 \dot{x} + k_0(x - y)]$ $\dot{z} = -\gamma \dot{x} - \dot{y} z ^{n-1}z - \beta(\dot{x} - \dot{y}) z ^n + A(\dot{x} - \dot{y})$	[۴۸، ۴۹]
هیستریزیس		$F = c\dot{x} + kx + az + f_0$ $z = \tanh(\beta\dot{x} + \delta \operatorname{sgn}(x))$	[۵۰، ۵۱]
گاموتا و فلیسکو ^{۱۲}		$f = k_1(x_2 - x_1) + c_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + f_0$ $= c_0\dot{x}_1 + f_c \operatorname{sgn}(\dot{x}_1) + f_0$ $= k_2(x_3 - x_2) + f_0$ } , if $ f > f_c$ $f = k_1(x_2 - x_1) + c_1\dot{x}_2 + f_0$ } , if $ f \leq f_c$	[۵۲]

[۵۳]	$f(t) = k \int_0^t \exp\left(-\frac{t-\tau}{\lambda}\right) \dot{x}(\tau) d\tau + f_y \operatorname{sgn}(x(t))$		بینگ مکس ^{۱۳}
------	---	--	---------------------------



شکل ۶. حالت شکل‌گیری ذرات سیال تحت تأثیر میدان

مغناطیسی [۶۲]

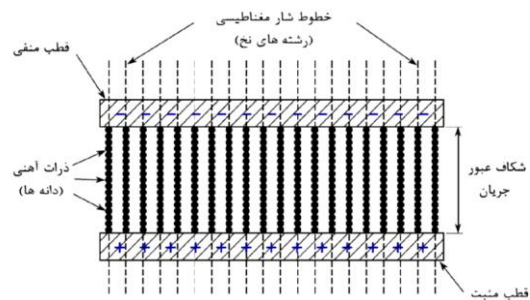
وقتی میدان حذف می‌شود سیال به سرعت به حالت قبل برمی‌گردد [۶۳]. سیال جریان مغناطیسی وقتی تحت میدان مغناطیسی نبوده و فعال نباشد، رفتاری شبیه سیالات نیوتنی دارد [۶۴].

۵. ترکیبات سیال میراگرهای ارتعاشی مغناطیسی

به‌طور کلی، سه جزء پایه‌ای سیال در میراگر وجود دارد. اول سیال پایه که حاوی سه سیال حامل مختلف شامل هیدروکربن بر پایه نفت، روغن سیلیکون و آب است. روغن حامل یک حلال مایع غیرمغناطیسی است که ویژگی‌های روانکاری و تعدیل‌گری را با هم داراست. برای بیشینه کردن اثر جریان مغناطیسی، روغن حامل باید چسبندگی کم داشته و نسبت به تغییرات دما حساس نباشد. دوم ذرات فرومغناطیس است که قرارگیری این ذرات در طول مسیر میدان مغناطیسی باعث ایجاد اثر جریان مغناطیسی می‌شود. افزایش حجم ذرات باعث افزایش محدوده تنش برشی در سیالات جریان مغناطیسی می‌شود [۶۵]. ذرات فرومغناطیس در سیال‌های مگنتورئوژیکال دارای ابعاد در حدود ۱ تا ۱۰ میکرون هستند. همچنین از ذرات مغناطیسی گران‌قیمت‌تر مثل آهن کبالت یا آهن نیکل نیز می‌توان استفاده کرد [۶۶]. اضافه کردن ذرات کروی فرومغناطیس مثل ۲۰٪ الی ۴۰٪

۴. اثر میدان بر سیال میراگرهای ارتعاشی مغناطیسی

خواص جریانی یک سیال، شامل لزجت و الاستیسیته است [۵۴]. خواص جریانی سیال جریان مغناطیسی، با اعمال میدان مغناطیسی تغییر می‌کند [۵۵]. با قرارگیری در معرض میدان، ذرات سیال به صورت دوقطبی‌های منظم مغناطیسی جهت‌گیری کرده و در صورتی که طراحی مدار مغناطیسی به صورت درستی انجام شده باشد، سرعت پاسخگویی در حد چند میلی‌ثانیه طول می‌کشد [۵۶، ۵۷] با مرتب شدن ذرات دوقطبی آهن، یک رشته از دانه‌های میکروسکوپی تشکیل داده و در برابر جابه‌جایی ناشی از جریان یا نیروی اعمالی، مقاومت می‌کند [۵۸، ۵۹] که در شکل ۵ قابل مشاهده است.



شکل ۵. شماتیک رشته‌هایی از دانه‌های موجود در سیال جریان

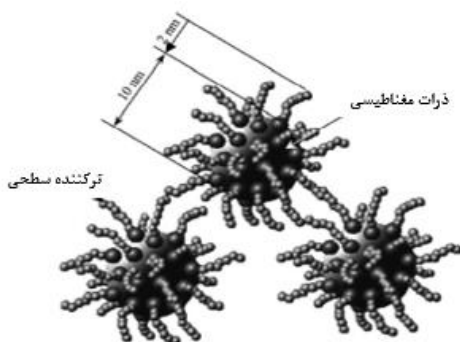
مغناطیسی فعال [۶۰]

با قرارگیری سیال در معرض میدان مغناطیسی، سیال غلیظ شده و ممکن است به یک جامد تبدیل شود [۶۱] حالت سه‌بعدی شکل‌گیری ذرات سیال در شکل ۶ نشان داده شده است.

حجمی از ذرات آهن نرم یا ذرات جامد مغناطیسی تک ممان مانند Fe_3O_4 در ابعاد نانومتری به منظور کاهش کشش سطحی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۶۷]. همچنین می‌توان از ذرات تک ممان مثل اکسید آهن (Fe_3O_4 ، $\gamma - Fe_2O_3$) فریت مگنیز-روی، آهن و کبالت در ابعاد حدود ۵ تا ۱۰ nm استفاده کرد [۶۸]. تفاوت اصلی بین سیالات آهنی (فرومغناطیس) و جریان مغناطیسی در اندازه ذرات قطبی است. سوم افزودنی‌ها هستند که شامل پایدارکننده، نانوذرات، ذرات مغناطیسی پوششی یا نانومغناطیسی هستند.

این افزودنی‌ها ذرات معلق هستند که منجر به بهبود اصطکاک و پایداری بیشتر سیال می‌شوند. شکل ۷ نمادی از ذرات مغناطیس پوشیده شده با مواد فعال سطحی را نشان می‌دهد.

در جدول ۴ اجزای تشکیل‌دهنده سیال‌های مغناطیسی و کاربردشان بررسی شده است. آب و روغن‌های معدنی و سنتزی مانند روغن سیلیکون یا روغن هیدرولیک تشکیل‌دهنده سیال پایه آن است. ذرات کربونیل آهن و آهن نرم تشکیل‌دهنده جزء مغناطیسی سیال میراگرهای ارتعاشی مغناطیسی هستند.



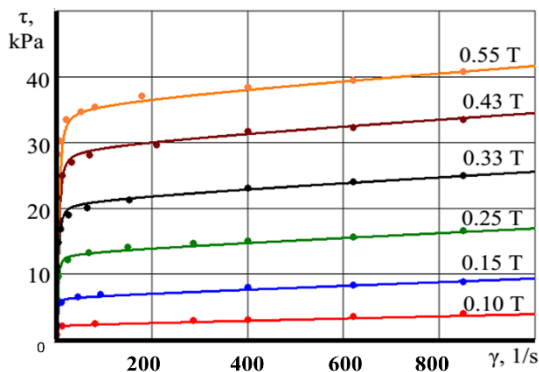
شکل ۷. نمادی از پوشش سطح ذرات مغناطیسی جهت پایداری

فروسیال [۶۹]

جدول ۴. ترکیب سیال‌های میراگرهای ارتعاشی مغناطیسی براساس اجزاء تشکیل‌دهنده آن

مرجع	کاربرد سیال	افزودنی‌ها	ذرات مغناطیسی	سیال حامل
[۲۶]	میراگرهای ارتعاشی	پلی استرها پلی اتر	آهن کربونیل	روغن معدنی روغن سیلیکون روغن هیدروکربنی مصنوعی آب
[۲۵]	میراگرهای ارتعاشی	گلیگول	آهن نرم	روغن‌های معدنی روغن‌های مصنوعی آب
[۷۰]	میراگرهای ارتعاشی کلاچ	گلیگول	کربونیل آهن آهن آلیاژ کبالت آهن آلیاژ نیکل آهن	روغن‌های معدنی روغن‌های هیدروکربنی سنتزی آب
[۷۰]	فوم‌های مغناطیسی	گلیسرول DABCO-33LV ¹⁴ L-568	کربونیل آهن	روغن سیلیکون آب
[۷۰]	الاستومر	روغن سیلیکون پودرهای گرافیت	کربونیل آهن پودر آهن	الاستومر جاذب
[۷۰]	ژل‌های پلیمری مغناطیسی	متیل ۲ پیرولیدون 1-methyl-2-pyrrolidone	آهن کربونیل پودر آهن	روغن‌های معدنی روغن‌های هیدروکربنی سنتزی
[۷۱]	سیال MR	ترکننده سطحی ذرات آهن	پودر آهن	روغن کرچک اسید سولفوریک پتاسیم هیدروکسید
[۷۲]	پرداخت سطحی	گریس AP3	کربونیل آهن	روغن پارافین

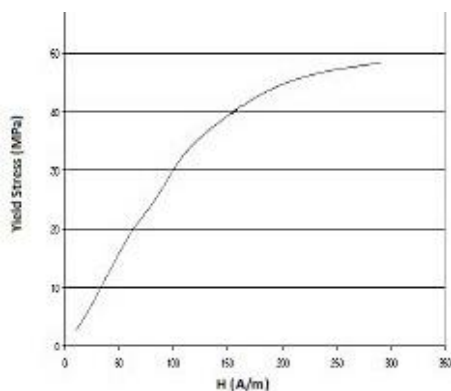
		ذرات کاربید بور		
[۷۳]	سیال MR	پلی اتیلن گلیکول (ترکنده سطحی)	CaFe ₂ O ₄	روغن سیلیکون
[۷۴]	میراگرهای ارتعاشی	گریس پایه لیتیوم (EPG)	آهن کربونیل	روغن هیدرولیک h-68
[۷۵]	میراگرهای ارتعاشی	اسید استتاریک	کربونیل آهن	روغن هیدرولیک کاسپین VG46
[۷۶]	میراگرهای ارتعاشی	اسید استتاریک صمغ گیاه گوار (Guar)	پودر آهن	روغن سیلیکون



شکل ۸. افزایش مقاومت برشی سیال با افزایش قدرت میدان

مغناطیسی اعمالی [۸۰]

معمولاً یک سیال جریان مغناطیسی به وسیله یک جدول که نشان دهنده خواص جریانی و همچنین یک منحنی مشخصه الکترومکانیکی است، عرضه می شود که بیان کننده چگونگی تغییر تنش برشی سیال نسبت به بزرگی میدان مغناطیسی است. شکل ۹ رفتار حالت خاموش سیال میراگر ارتعاشی مغناطیسی شرکت لورد (MRF-132DG) را نشان می دهد.



شکل ۹. تنش تسلیم میراگر ارتعاشی (MRF-132DG) نسبت به

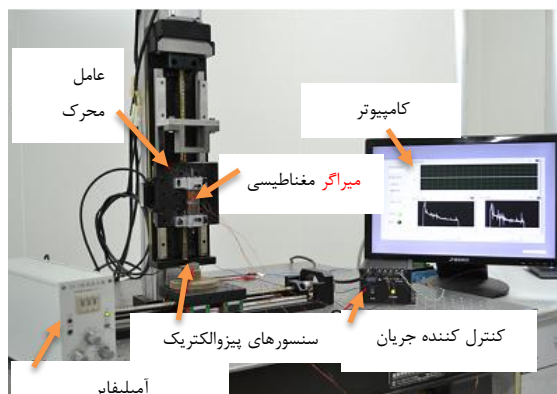
شدت میدان مغناطیسی [۸۱]

۶. خواص سیال میراگرهای ارتعاشی مغناطیسی

پایداری ذرات مغناطیسی درون سیال از اهمیت زیادی برخوردار است، از این رو باید به تفاوت چگالی بین ذرات و سیال توجه شود [۷۷]، چراکه ذرات آهنی به علت اختلاف چگالی که بین این ذرات و سیال حامل وجود دارد، پس از مدتی ته نشین می شوند، لذا می توان از افزودنی هایی استفاده نمود که بر خصوصیات مغناطیسی سیال و مقدار تنش تسلیم ظاهری و کاهش لزجت آن اثرگذار باشد [۷۸]. دمای کاری سیال در محدوده ۴۰- تا ۱۴۸ درجه سانتی گراد است [۷۹]. با اعمال میدان مغناطیسی، ذرات سیال در جهت خطوط شار قرار گرفته و لزجت ظاهری آن تغییر می کند و با قطع میدان، لزجت سیال به حالت قبل برمی گردد.

با افزایش میزان شدت میدان مغناطیسی اعمالی از ۰/۱ به ۰/۵۵ تسلا مقدار تنش برشی از ۵ به ۴۰ کیلوپاسکال افزایش یافته است. این تنش تسلیم که مشهور به تنش تسلیم ظاهری و وابسته به میدان مغناطیسی اعمال شده به سیال است. تنش تسلیم (همانند تنش برشی) تا یک مقدار خاصی زیاد می شود، بعد از آن سیال به اشباع مغناطیسی می رسد و افزایش شار مغناطیسی دیگر اثری بر افزایش مقدار تنش نخواهد داشت که در شکل ۸ قابل مشاهده است.

مقاومت میراگرها در برابر نیروی اعمالی با اعمال میدان مغناطیسی، توسط تجهیزات آزمایشگاهی نیروسنج که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، اندازه‌گیری می‌شود.



شکل ۱۰. تجهیزات اندازه‌گیری میراگر جریان مغناطیسی [۸۲]

۷. کاربردهای میراگرهای ارتعاشی مغناطیسی

سیال‌های جریان مغناطیسی در میراگرهای ارتعاشی در صنایعی همچون اتومبیل‌سازی [۸۳]، صنایع نظامی [۸۴]، ترمزهای مغناطیسی [۸۵، ۸۶]، کلاچ مغناطیسی [۸۷]، میرا نمودن ارتعاشات [۸۸، ۸۹] و کاربردهای پزشکی [۹۰، ۹۱] مورد استفاده قرار گرفته است. از فروسیال‌ها به‌خصوص در کاربردهای پزشکی مانند تصویربرداری MRI [۹۲، ۹۳]،



شکل ۱۱. میراگرهای جریان مغناطیسی به کار رفته در صندلی

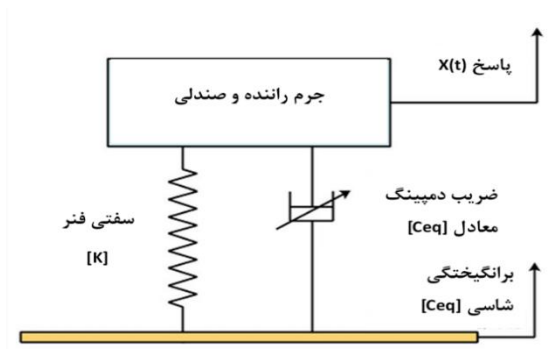
خودرو [۱۰۰]

انتقال دارو [۹۴]، معالجه غده‌های سرطانی [۹۵]، صنایع الکترونیکی [۹۶]، شیمیایی [۹۷] و مکانیکی [۹۸] استفاده می‌شود.

برخی از این کاربردها به‌طور خاص در ادامه بیان شده است.

۷-۱. صنعت خودرو

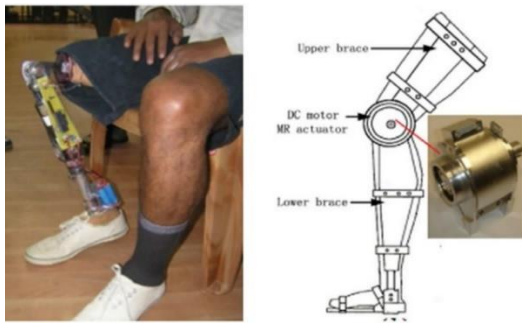
میراگرهای جریان مغناطیسی مورد استفاده در صنعت خودرو اولین بار در سال ۱۹۹۸ در دستگاه‌های تعلیق فعال کامیون‌ها و ماشین‌های مسابقه به کار گرفته شدند و به مرور در وسایل نقلیه معمولی نیز به کار گرفته شد [۹۹]. در شکل ۱۱ شکلی از میراگر تک لوله‌ای که در سیستم تعلیق صندلی استفاده شده مشاهده می‌شود [۱۰۰] که می‌تواند در اعمال نیرویی در حدود ۶۵۰ نیوتن، دامنه ارتعاشات را تا ۵ میلی‌متر کنترل کند. نحوه تعلیق ارتعاشات در سیستم صندلی خودرو به این صورت است که با به کار بردن فنر و میراگر بین صندلی راننده و شاسی خودرو مانند شکل ۱۲ از انتقال ارتعاشات ناشی از شاسی خودرو جلوگیری می‌شود [۱۰۲]. از سیال جریان مغناطیسی در سیستم‌های کلاچ وسایل نقلیه نیز استفاده می‌شود [۱۰۳].



شکل ۱۲. شمایی از سیستم تعلیق صندلی در خودرو [۱۰۲]

۲-۷. صنعت پزشکی

و با اندازه کوچک و باراندمان مناسب بودند و مصرف برق کمی داشتند [۱۰۵]. نمونه‌ای از کاربرد این ترمزها در پروتز زانو در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



در سال ۱۹۹۵ برای اولین بار سیال‌های MR در سیستم ترمز استفاده شدند [۱۰۴]. این ترمزها کم‌هزینه، بی‌سروصدا

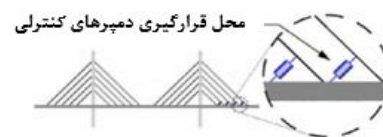


شکل ۱۳. زانوی مصنوعی که در آنها از ترمز MR استفاده شده است [۱۰۶-۱۰۸].

۳-۷. صنعت ساختمان‌سازی و پل‌سازی

مهندسی ساختمان‌ها و پل‌ها قابل مشاهده در شکل‌های ۱۴ و ۱۵، استفاده می‌شود [۱۰۹]. این میراگرها در مقیاس بزرگ مثلاً طول ۱ متر و وزن ۲۵۰ کیلوگرم و نیروی ۲۰۰ کیلونیوتن تهیه می‌شوند [۱۱۰]. از سیال هوشمند مغناطیسی در طراحی میراگرهای ارتعاشی مورد استفاده در سازه‌های ساختمانی به‌منظور کاهش نوسانات اعمالی ناشی از باد استفاده می‌شود [۱۱۱].

میراگرهای MR مبتنی بر بسامد رزونانس ساختمان، به جذب امواج ضربه‌ای و ارتعاشات مخرب سازه می‌پردازند، این امر باعث می‌شود که سازه ضد زلزله یا حداقل مقاوم در برابر زلزله شود. میراگرهای جریان مغناطیسی بزرگ (با ظرفیت ۳۰۰ کیلو نیوتن) برای جذب ارتعاشات ناشی از زلزله در



شکل ۱۴. میراگرهای مغناطیسی مورد استفاده در پل‌ها برای کنترل ارتعاشات [۱۱۲، ۱۱۳]

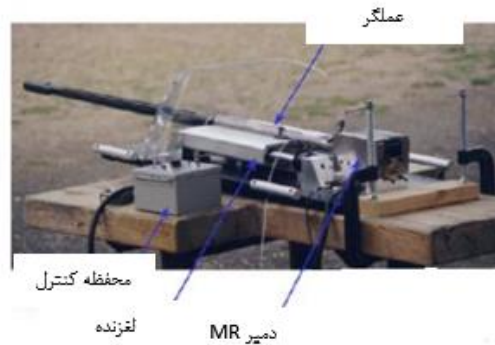


شکل ۱۵. میراگر مغناطیسی مقیاس بزرگ مورد استفاده در ساختمان‌ها [۱۱۴]

همچنین از این میراگرها برای کنترل ارتعاشات ناشی از شلیک گلوله تانک می‌توان استفاده کرد [۶۰].

۷-۴. صنایع نظامی

به دلیل مزیت‌های میراگرهای جریان مغناطیسی، از آنها در ادوات نظامی مثل خمپاره‌اندازها استفاده می‌شود.



شکل ۱۶. استفاده از میراگر جریان مغناطیسی برای مهار لگد اسلحه در صنایع نظامی

مغناطیسی اعمالی بر سیال، میزان نیروی لازم برای ایجاد تغییر شکل در سیال افزایش می‌یابد. از این خاصیت میراگرهای ارتعاشی در صندلی خودرو، ترمزهای هوشمند در پروتز زانو، میراگرهای ارتعاشی مورد استفاده در پل‌ها و صنعت ساختمان‌سازی و صنایع نظامی استفاده می‌شود. متداول‌ترین نوع میراگرهای ارتعاشی از نوع تک لوله و دولوله هستند. برای میراگرهای ارتعاشی تک لوله قابلیت کنترل ارتعاشات تا ۵ میلی‌متر تحت نیروی ۶۰۰ نیوتن گزارش شده است و در صنعت خودروسازی بسیار پرکاربرد هستند.

۸. نتیجه‌گیری

در این مقاله مروری بر پارامترهای عملکردی میراگرهای ارتعاشی مغناطیسی و خواص آنها صورت گرفت. ساختار فیزیکی و نحوه عملکرد این میراگرها و همچنین طریقه مدل‌سازی آنها مورد بررسی قرار گرفت. ترکیبات سیال‌های هوشمند مغناطیسی و خواص هر یک بررسی و مورد تحلیل قرار گرفت.

بررسی‌ها نشان داد با افزایش شدت میدان مغناطیسی میزان استحکام تسلیم و استحکام تسلیم برشی سیال مغناطیسی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش میزان وادارندگی میدان

۹. مأخذ

- [1] Alavi, M. A., and F. Sobhnamayan, "Analysis, Application and Stating Governing Equations of Smart Fluids", In *19th Annual Conference on Mechanical Engineering-ISME2011, 10-12 May, The University of Birjand, Birjand, Iran*. 2011.
- [2] Ebrahimi, Babak, "Development of hybrid electromagnetic dampers for vehicle suspension systems", 2009.
- [3] Kamath, Gopalakrishna M., Melanie K. Hurt, and Norman M. Wereley, "Analysis and testing of Bingham plastic behavior in semi-active electrorheological fluid dampers", *Smart Materials and Structures*, 1996, Vol.5, no.5, p.576.
- [4] Yoo, Jin-Hyeong, and Norman M. Wereley, "Quasi-steady axisymmetric Bingham-plastic model of magnetorheological flow damper behavior", In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2005, Vol.4210, pp.375-380.
- [5] Yoo, Jin-Hyeong, and Norman M. Wereley, "Nondimensional analysis of annular duct flow in magnetorheological/electrorheological dampers", *International Journal of Modern Physics B*, 2005, Vol.19, no.07n09, pp.1577-1583.
- [6] Wang, D. H., H. X. Ai, and W. H. Liao, "A magnetorheological valve with both annular and radial fluid flow resistance gaps", *Smart materials and structures*, 2009, Vol.18, no.11, p.115001.
- [7] Hong, S. R., S. B. Choi, Y. T. Choi, and N. M. Wereley, "Non-dimensional analysis and design of a magnetorheological damper", *Journal of Sound and Vibration*, 2005, Vol.288, no.4-5, pp.847-863.
- [8] Wang, Xiaojie, and Faramarz Gordaninejad, "Field-controllable electro-and magneto-rheological fluid dampers in flow mode using Herschel-Bulkley theory", In *Smart Structures and Materials 2000: Damping and Isolation*, 2000, Vol.3989, SPIE, 2000, pp. 232-243.
- [9] Zolfagharian, Mohammad Mehdi, Mohammad Hassan Kayhani, Mahmood Norouzi, and Amir Jalali, "Parametric investigation of twin tube magnetorheological dampers using a new unsteady theoretical analysis", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2019, Vol.30, no.6, pp.878-895.
- [10] Zolfagharian, Mohammad Mehdi, Mohammad Hassan Kayhani, and Mahmood Norouzi, "Manufacturing and Testing of an Optimized Magneto-Rheological Fluid and Modelling of a Twin Tube Magneto-Rheological Damper Using a Modified Non-Newtonian Model Using Analytical Quasi-Static, Analytical Unsteady, Numerical and Experimental Methods", *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 2021, Vol.53, no.3, pp.1373-1400.
- [11] Parlak, Zekeriya, Tahsin Engin, and İsmail Çallı, "Optimal design of MR damper via finite element analyses of fluid dynamic and magnetic field", *Mechatronics*, 2012, Vol.22, no.6, pp.890-903.
- [12] De Vicente, Juan, Daniel J. Klingenberg, and Roque Hidalgo-Alvarez, "Magnetorheological fluids: a review", *Soft matter* 2011, Vol.7, no.8, pp.3701-3710.
- [13] Sun, Song Jian, "Manufacture and Performance Test of New Type MR Damper", *Applied Mechanics and Materials*, 2013, Vol.256, pp.2771-2774.

- [۱۴] باقری م.، محبوب مقدس س.، مدرس قیصری م.م.، "طراحی و شبیه سازی میراگر "ام آر" برای خودروهای سبک با استفاده از برهم کنش چند فیزیکی"، *مجله صوت و ارتعاش*، ۱۴۰۱، دوره ۱۱، شماره ۲۲، صص. ۱۰۳-۱۲۴.
- [15] Tak, Radhe Shyam Saini, Hemantha Kumar, Sujatha Chandramohan, and Sujatha Srinivasan, "Design of twin-rod flow mode magneto rheological damper for prosthetic knee application", In *AIP Conference Proceedings*, 2019, Vol. 2200, no.1. AIP Publishing.
- [16] El-Aouar, Walid Hassib, "Finite element analysis-based modeling of magneto rheological dampers", PhD diss., Virginia Tech, 2002.
- [۱۷] الهامی م.ر.، نجفی م.ر.، مدرس قیصری م.، "بررسی تحلیلی و عددی اثر اختلاف فشار و تغییر شاخص رفتار در میراگرهای مغناطیسی"، *مجله صوت و ارتعاش*، ۱۳۹۹، دوره ۹، شماره ۱۸، صص. ۱۹-۳۵.
- [18] Ferdous, Mohammad Meftahul, M. M. Rashid, M. M. I. Bhuiyan, and Asan Gani bin Abdul Muthalif, "Design and Performance Evaluation of a Self-Controlled Magneto-Rheological Damper", *International Journal of Robotics and Mechatronics*, 2014, Vol.1, no.2, pp.74-80.
- [19] Hu, Guoliang, Zheng Xie, and Weihua Li., "Optimal design of a double coil magnetorheological fluid damper with various piston profiles", In *World congress on structural and multidisciplinary optimisation*, 2015, pp.2-7.
- [20] Hu, Guoliang, Yun Lu, Shuaishuai Sun, and Weihua Li, "Performance analysis of a magnetorheological damper with energy harvesting ability", *Shock and Vibration*, 2016, pp.1-10.
- [21] Strecker, Zbynek, Jakub Roupec, Ivan Mazurek, Ondrej Machacek, Michal Kubik, and Milan Klapka, "Design of magnetorheological damper with short time response", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2015, Vol.26, no.14, pp.1951-1958.
- [22] Hu, Guoliang, Yun Lu, Shuaishuai Sun, and Weihua Li, "Performance analysis of a magnetorheological damper with energy harvesting ability", *Shock and Vibration*, 2016, pp.1-10.
- [23] Phu, Do Xuan, Jin-Hee An, and Seung-Bok Choi, "A novel adaptive PID controller with application to vibration control of a semi-active vehicle seat suspension", *Applied Sciences*, 2017, Vol.7, no.10, p.1055.
- [۲۴] سلیمی مجرد، ب.، "جداسازی ارتعاشات وارده به محموله های حساس خودروهای باری با استفاده از جداسازهای دربردارنده دمپرهای مگنتورئولوژیکال"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز، ۱۳۹۵.
- [۲۵] غلامی وسمه جانی، ر.، "بررسی تحلیلی ضربه گیرهای سیالی مغناطیسی - رئولوژیکی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه گیلان، ۱۳۸۹.
- [۲۶] مهدیه بروجنی، س.، "به دست آوردن پاسخ دینامیکی هواپیما در لحظه فرود با در نظر گرفتن دمپرهای محتوی سیال MR (Magento Rheological)"، سومین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات، ۱۳۹۲.
- [27] Zhang, Yanjuan, Jiakuan Guo, Jianwei Yang, and Xin Li, "Recent structural developments and applications of magnetorheological dampers (mrd): a review", *Magnetochemistry*, 2023, Vol.9, no.4, p.90.

- [28] De Vicente, Juan, Daniel J. Klingenberg, and Roque Hidalgo-Alvarez, "Magnetorheological fluids: a review", *Soft matter*, 2011, Vol.7, no.8, pp.3701-3710.
- [29] Kolekar, Shreedhar, Krishna Venkatesh, Jong-Seok Oh, and Seung-Bok Choi, "Vibration controllability of sandwich structures with smart materials of electrorheological fluids and magnetorheological materials: a review", *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 2019, Vol.7, pp.359-377.
- [30] Ahamed, Raju, Md Meftahul Ferdous, and Yancheng Li, "Advancement in energy harvesting magneto-rheological fluid damper: A review", *Korea-Australia Rheology Journal*, 2016, Vol.28, pp.355-379.
- [31] Guo-liang, H. U., D. E. N. G. Ying-jun, F. E. N. G. Hai-bo, and L. I. Gang, "Effect of inner magnetorheological valve on dynamic performance of magnetorheological damper", *交通运输工程学报* 21, 2021, no.3, pp.289-299.
- [32] Qi, H.N., Hu, G.L., Yu, L.F., "Analysis on design and damping performance of MR damper with hybrid fluid flow" *J. Mech. Design*, 2022, Vol.39, 58–65. (In Chinese)
- [33] Deng, Zhaoxue, Xinxin Wei, Xingquan Li, Shuen Zhao, and Sunke Zhu, "Design and multi-objective optimization of magnetorheological damper considering vehicle riding comfort and operation stability", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2022, Vol.33, no.9, pp.1215-1228.
- [34] Zuo, Q., Huang, X.F., Yi, F., "Structure Design and Dynamic Performance Analysis of Magnetorheological Damper with Adjustable Damping Gaps", *Nongye Jixie Xuebao*, 2022, Vol.53, 431–440.
- [35] Guo, Shuqi, Shaopu Yang, and Cunzhi Pan, "Dynamic modeling of magnetorheological damper behaviors", *Journal of Intelligent material systems and structures*, 2006, Vol.17, no.1, pp.3-14.
- [36] Singru, Pravin, Ayush Raizada, Vishnuvardhan Krishnakumar, Akhil Garg, K. Tai, and Varun Raj, "Modeling of a magneto-rheological (MR) damper using genetic programming", *Journal of Vibroengineering*, 2017, Vol.19, no.5, pp.3169-3177.
- [37] Guan, X. C., P. F. Guo, and J. P. Ou., "Modeling and analyzing of hysteresis behavior of magneto rheological dampers", *Procedia Engineering*, 2011, Vol.14, pp.2756-2764.
- [38] Rossi, Andrea, Francesco Orsini, Andrea Scorza, Fabio Botta, Nicola Pio Belfiore, and Salvatore Andrea Sciuto, "A review on parametric dynamic models of magnetorheological dampers and their characterization methods", In *Actuators*, 2018, Vol.7, no.2, p.16. MDPI, 2018.
- [39] Zapateiro, M., N. Luo, J. Rodellar, and A. Rodríguez, "Modeling and identification of hysteretic dynamics of MR dampers and application to semiactive vibration control of smart structures", In *The 14th World Conference on earthquake engineering, Beijing, China*. 2008.
- [40] Ahn, Kyoung Kwan, Dinh Quang Truong, and Muhammad Aminul Islam, "Modeling of a magneto-rheological (MR) fluid damper using a self tuning fuzzy mechanism", *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2009, Vol.23, pp.1485-1499.

- [41] Weber, F., "Bouc–Wen model-based real-time force tracking scheme for MR dampers", *Smart Materials and Structures*, 2013, Vol.22, no.4, p.045012.
- [42] Soltane, Selsebil, Sami Montassar, Othman Ben Mekki, and Rached El Fatmi, "A hysteretic Bingham model for MR dampers to control cable vibrations", *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2015, Vol.10, no.2, pp.195-206.
- [43] Spencer Jr, BrnF, S. J. Dyke, M. K. Sain, and JDf Carlson, "Phenomenological model for magnetorheological dampers", *Journal of engineering mechanics*, 1997, Vol.123, no.3, pp.230-238.
- [44] Al-Fahdawi, Omar AS, and Luciana R. Barroso, "Adaptive neuro-fuzzy and simple adaptive control methods for full three-dimensional coupled buildings subjected to bi-directional seismic excitations", *Engineering Structures*, 2021, Vol.232, p.111798.
- [45] Stanway, R. S. J. L., J. L. Sproston, and N. G. Stevens, "Non-linear modelling of an electro-rheological vibration damper", *Journal of Electrostatics*, 1987, Vol.20, no.2, pp.167-184.
- [46] Zhou, Qiang, "Two mechanic models for magneto-rheological damper and corresponding test verification", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2002, Vol.22, no.4, pp.144-150.
- [47] Sarigul-Klijjn, N., I. Lopez, M. Sarigul-Klijjn, and D. Karnopp, "Vibration mitigation using passive active tunable (PAT) system: Experimental aspects", 2007, pp.209-216.
- [48] Gandhi, Farhan, and William A. Bullough, "On the phenomenological modeling of electrorheological and magnetorheological fluid preyield behavior", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2005, Vol.16, no.3, pp.237-248.
- [49] Wang, D. H., and W. Hsin Liao, "Magnetorheological fluid dampers: a review of parametric modelling", *Smart materials and structures*, 2011, Vol.20, no.2, p.023001.
- [50] Kwok, N. M., Q. P. Ha, T. H. Nguyen, Jianchun Li, and Bijan Samali, "A novel hysteretic model for magnetorheological fluid dampers and parameter identification using particle swarm optimization", *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, Vol.132, no.2, pp.441-451.
- [51] Talebian, Soheil, Yousef Hojjat, Mojtaba Ghodsi, Mohammad Reza Karafi, and Shahed Mirzamohammadi, "A combined Preisach–Hyperbolic Tangent model for magnetic hysteresis of Terfenol-D", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, Vol.396, pp.38-47.
- [52] Jin, S., L. Deng, J. Yang, S. Sun, D. Ning, Z. Li, H. Du, and W. H. Li, "A smart passive MR damper with a hybrid powering system for impact mitigation: An experimental study", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2021, Vol.32, no.13, pp.1452-1461.
- [53] Jiang, Min, Xiaoting Rui, Wei Zhu, Fufeng Yang, and Yanni Zhang, "Design and control of helicopter main reducer vibration isolation platform with magnetorheological dampers", *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 2021, Vol.17, pp.345-366.
- [54] Costa, Eduarda, and PJ Costa Branco, "Continuum electromechanics of a magnetorheological damper including the friction force effects between the MR fluid and device walls: analytical modelling and experimental validation", *Sensors and Actuators A: Physical*, 2009, Vol.155, no.1, pp.82-88.

- [55] Jolly, Mark R., Jonathan W. Bender, and J. David Carlson, "Properties and applications of commercial magnetorheological fluids", *Journal of intelligent material systems and structures*, 1999, Vol.10, no.1, pp.5-13.
- [56] Ahmadian, Mehdi, and James A. Norris, "Experimental analysis of magnetorheological dampers when subjected to impact and shock loading", *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2008, Vol.13, no.9, pp.1978-1985.
- [57] Pore, R. H., Jadhav, A. A., Dhat, S.E., Pardeshi, A. B., Khedkar, Y. M. A., "Literature review of MR Damper - Design and Analysis", *AEGAEUM J.* 8, 2020, Vol.6, no.1 pp.583–93.
- [58] Gravatt, John Wilie, "*Magneto-rheological dampers for super-sport motorcycle applications*", PhD diss., Virginia Tech, 2003.
- [59] Khedkar, Yashpal M., Sunil Bhat, and H. Adarsha, "A review of magnetorheological fluid damper technology and its applications", *Int. Rev. Mech. Eng.*, 2019, Vol.13, no.4, pp.256-264.
- [60] Poynor, James Conner, "*Innovative designs for magneto-rheological dampers*", PhD diss., Virginia Tech, 2001.
- [61] Yang, Gary, B. F. Spencer Jr, J. D. Carlson, and M. K. Sain, "Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations", *Engineering structures*, 2002, Vol.24, no.3, pp.309-323.
- [62] Daniel, Grivon, Civet Yoan, Pataky Zoltan, and Perriard Yves, "Bingham-papanastasiou and approximate parallel models comparison for the design of magneto-rheological valves", In *2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 2014, pp.168-173, Ieee, 2014.
- [63] Baranwal, Deepak, and T. S. Deshmukh. "MR-fluid technology and its application-a review", *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2012, Vol.2, no.12, pp.563-569
- [64] Lord, T., "Designing with MR fluids", *Lord Corporation Engineering Note*, 1999.
- [65] Rahman, Mahmudur, Zhi Chao Ong, Sabariah Julai, Md Meftahul Ferdaus, and Raju Ahamed, "A review of advances in magnetorheological dampers: their design optimization and applications", *J. Zhejiang Univ. Sci. A*, 2017, Vol.18, no.12, pp.991-1010.
- [66] Peng, Gangrou, "Novel shear thickening and magnetorheological materials and their application in controllable electrolytes", 2016.
- [67] *Buschow, KH Jürgen. Handbook of magnetic materials. Elsevier, 2003.*
- [69] Odenbach, Stefan, and Steffen Thurm, "Magnetoviscous effects in ferrofluids", In *Ferrofluids: magnetically controllable fluids and their applications*, 2002, pp.185-201. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [70] Ahamed, Raju, Seung-Bok Choi, and Md Meftahul Ferdaus, "A state of art on magneto-rheological materials and their potential applications", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2018, Vol.29, no.10, pp.2051-2095.
- [71] Vinod, Sithara, Reji John, and John Philip, "Magnetorheological properties of sodium sulphonate capped electrolytic iron based MR fluid: a comparison with CI based MR fluid", *Smart Materials and Structures*, 2016, Vol.26, no.2, p.025003.

- [72] Nagdeve, Leeladhar, Ajay Sidpara, V. K. Jain, and J. Ramkumar, "On the effect of relative size of magnetic particles and abrasive particles in MR fluid-based finishing process", *Machining Science and Technology*, 2018, Vol.22, no.3, pp.493-506.
- [73] Wang, Guangshuo, Dexing Zhao, Yingying Ma, Zhixiao Zhang, Hongwei Che, Jingbo Mu, Xiaoliang Zhang, Yu Tong, and Xufeng Dong, "Synthesis of calcium ferrite nanocrystal clusters for magnetorheological fluid with enhanced sedimentation stability", *Powder technology*, 2017, Vol.322, pp.47-53.
- [۷۴] محمد موسی‌زاده، کمال جهانی، و محمد عبداللهی، "شناسایی پارامترهای مدل اسپنسر در دمپر مگنتورئولوژیکال دو سر متحرک برای قطره‌های متفاوت پودر آهن-کربونیل سیال مگنتورئولوژیک"، *مجله مکانیک مدرس*، ۱۳۹۸، دوره ۱۹، شماره ۵.
- [۷۵] ذوالفقاریان، م.م.، کیهانی، م.ح.، نوروزی، م.، "ساخت و آزمایش سیال مگنتورئولوژیکال بهینه و مدلسازی دمپر مگنتورئولوژیکال دو مخزنه با استفاده از مدل غیر نیوتونی اصلاح شده جدید و روش‌های تحلیلی شبه استاتیک، تحلیلی ناپایا، عددی و آزمایشگاهی"، *نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر*، ۱۴۰۰، دوره ۵۳، شماره ۴، صص. ۱۳۷۴-۱۴۰۰.
- [76] Kumar, James Sathya, P. Sam Paul, Girish Raghunathan, and Divin George Alex, "A review of challenges and solutions in the preparation and use of magnetorheological fluids", *International journal of mechanical and materials engineering*, 2019, Vol.14, pp.1-18.
- [77] Klabunde, Kenneth J., and Ravichandra S. Mulukutla, "Chemical and catalytic aspects of nanocrystals", *Nanoscale Materials in Chemistry*, 2001, pp.223-259.
- [78] Baek, Dae-Sung, Seok-Hyun Lee, Ki-Young Kim, and Young-Chul Kwon, "Experimental Study on Physical Characteristics along chemical compositions of MR fluid", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 2013, Vol.14, no.10, pp.4747-4752.
- [79] Cruze, Daniel, G. Hemalatha, S. Vincent Sam Jebadurai, L. Sarala, D. Tensing, and SS Judith Emilian Christy, "A review on the magnetorheological fluid, damper and its applications for seismic mitigation", *Civil Engineering Journal*, 2018, Vol.4, no.12, pp.3058-3074.
- [80] Kazakov, Yu B., N. A. Morozov, and S. A. Nesterov, "Development of models of the magnetorheological fluid damper", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2017, Vol.431, pp.269-272.
- [81] Nordin, NH Diyana, Asan GA Muthalif, M. Khusyaie M. Razali, Abdelrahman Ali, and Ayman Mustafa Salem, "Development and implementation of energy-efficient Magnetorheological Fluid bypass damper for prosthetics limbs using a fuzzy-logic controller", *IEEE Access*, 2022, Vol.10, pp.18978-18987.
- [82] Li, Junhui, Wei Wang, Yang Xia, Hu He, and Wenhui Zhu, "The soft-landing features of a micro-magnetorheological fluid damper", *Applied Physics Letters*, 2015, Vol.106, no.1.
- [83] Malkin, Aleksandr ĪAkovlevich, "Rheology fundamentals", ChemTec publishing, 1994.
- [84] Liu, Xin-yun, Da-lin Wu, and Jian Hou, "Design and analysis of a scheme for the naval gun test shell entering the bore", *Defence Technology*, 2021, Vol.17, no.4, pp.1374-1386.
- [85] Huang, Jin, J. Q. Zhang, Yan Yang, and Y. Q. Wei, "Analysis and design of a cylindrical magneto-rheological fluid brake", *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, Vol.129, no.1-3, pp.559-562.

- [86] Karakoc, Kerem, Edward J. Park, and Afzal Suleman, "Design considerations for an automotive magnetorheological brake", *Mechatronics*, 2008, Vol.18, no.8, pp.434-447.
- [87] Wessling, Lisa, "*Physical modeling of a clutch for heavy vehicles*", 2011.
- [89] Giuclea, Marius, Tudor Sireteanu, Danut Stancioiu, and Charles W. Stammers, "Modeling of magneto rheological damper dynamic behavior by genetic algorithms based inverse method", *The Romanian Academy*, 2004, Vol.5, no.1.
- [90] Carlson, J. David, Wilfried Matthis, and James R. Toscano, "Smart prosthetics based on magnetorheological fluids", In *Smart structures and materials 2001: industrial and commercial applications of smart structures technologies*, 2001, Vol.4332, pp.308-316. SPIE, 2001.
- [91] Guðmundsson, Ketill Heiðar, "Design of a magnetorheological fluid for an MR prosthetic knee actuator with an optimal geometry", 2011.
- [92] Kim, Do Kyung, Maria Mikhaylova, Fu Hua Wang, Jan Kehr, Börje Bjelke, Yu Zhang, Thomas Tsakalakos, and Mamoun Muhammed, "Starch-coated superparamagnetic nanoparticles as MR contrast agents", *Chemistry of Materials*, 2003, Vol.15, no.23, pp.4343-4351.
- [93] Hong, R. Y., B. Feng, L. L. Chen, G. H. Liu, H. Z. Li, Y. Zheng, and D. G. Wei, "Synthesis, characterization and MRI application of dextran-coated Fe₃O₄ magnetic nanoparticles", *Biochemical Engineering Journal*, 2008, Vol.42, no.3, pp.290-300.
- [94] Chertok, Beata, Bradford A. Moffat, Allan E. David, Faquan Yu, Christian Bergemann, Brian D. Ross, and Victor C. Yang, "Iron oxide nanoparticles as a drug delivery vehicle for MRI monitored magnetic targeting of brain tumors", *Biomaterials*, 2008, Vol.29, no.4, pp.487-496.
- [95] Hiergeist, R., W. Andrä, N. Buske, R. Hergt, I. Hilger, U. Richter, and W. Kaiser, "Application of magnetite ferrofluids for hyperthermia", *Journal of magnetism and Magnetic Materials*, 1999, Vol.201, no.1-3, pp.420-422.
- [96] Ban, Shuai, and Vladislav Korenivski, "Pattern storage and recognition using ferrofluids", *Journal of applied physics*, 2006, Vol.99, no.8, p.08R907.
- [97] Vander Wal, Randall L., and Thomas M. Ticich, "Comparative flame and furnace synthesis of single-walled carbon nanotubes", *Chemical Physics Letters*, 2001, Vol.336, no.1-2, pp.24-32.
- [98] Raj, Kuldip, B. Moskowitz, and R. Casciari, "Advances in ferrofluid technology", *Journal of magnetism and magnetic materials*, 1995, Vol.149, no.1-2, pp.174-180
- [99] Carlson JD, "Sproston JL Controllable fluids in 2000-status of ER and MR fluid technology", *Proc. 7th Int. Conf. New Actuators*, 2000, pp.126-30.
- [100] Sun, S. S., Ning, D. H., Yang, J., Du, H., Zhang, S. W. & Li, W. H. (2016). A seat suspension with a rotary magnetorheological damper for heavy duty vehicles. *Smart Materials and Structures*, 25 (10), 105032-1-103032-10.
- [101] Sun, S. S., D. H. Ning, Jian Yang, Haiping Du, S. W. Zhang, and W. H. Li., "A seat suspension with a rotary magnetorheological damper for heavy duty vehicles", *Smart Materials and Structures*, 2016, Vol.25, no.10, p.105032.

- [102] Desai, Rangaraj Madhavrao, Mohibb E. Hussain Jamadar, Hemantha Kumar, Sharnappa Joladarashi, S. C. Rajasekaran, and G. Amarnath, "Evaluation of a commercial MR damper for application in semi-active suspension", *SN Applied Sciences*, 2019, Vol.1, pp.1-10.
- [103] Kieburg, Christoffer, Günter Oetter, Martin Laun, Claus Gabriel, and Herbert Steinwender, "MR all-wheel-drive prototype car driving tests and durability requirements for the MR fluids used", In *11th Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions (ERMR)*, 2008.
- [104] Webb, Gregory M., "Exercise apparatus and associated method including rheological fluid brake", U.S. Patent 5,810,696, issued September 22, 1998.
- [105] Anon, "Brake Cuts Exercise-Equipment Cost", *Design News*, 1995, Vol.39, p.4.
- [106] Nandy, Anup, Soumik Mondal, Pavan Chakraborty, and Gora Chand Nandi, "Development of a robust microcontroller based intelligent prosthetic limb", In *Contemporary Computing: 5th International Conference, IC3 2012, Noida, India, August 6-8, 2012. Proceedings 5*, Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp.452-462.
- [107] Chen, J. Z., and Wei-Hsin Liao, "Design, testing and control of a magnetorheological actuator for assistive knee braces", *Smart materials and structures*, 2010, Vol.19, no.3, p.035029.
- [108] Deffenbaugh, Bruce W., Hugh M. Herr, Gill A. Pratt, and Michael B. Wittig, "Electronically controlled prosthetic knee", U.S. Patent 6,764,520, issued July 20, 2004.
- [109] Weiss, K.D. and Duclos, T.G., 1994. Controllable fluids: the temperature dependence of post-yield properties. *International Journal of Modern Physics B*, 8(20n21), pp.3015-3032.
- [110] Yuan, X., Tian, T., Ling, H., Qiu, T. and He, H., 2019. A review on structural development of magnetorheological fluid damper. *Shock and vibration*, 2019.
- [111] Wang, J. Y., Y. Q. Ni, J. M. Ko, and B. F. Spencer Jr., "Magneto-rheological tuned liquid column dampers (MR-TLCDs) for vibration mitigation of tall buildings: modelling and analysis of open-loop control", *Computers & structures*, 2005, Vol.83, no.25-26, pp.2023-2034.
- [112] Goncalves, Fernando D., "Characterizing the behavior of magnetorheological fluids at high velocities and high shear rates", PhD diss., Virginia Tech, 2005.
- [113] Weber, F., Feltrin, G., Huth, O.J., Swiss federal laboratories for material testing, and D. Research, Switzerland. Guidel Struct Control, 1994.
- [114] LaMalva, K. and Hopkin, D. eds., 2021. *International handbook of structural fire engineering*. Cham: Springer.

پی نوشت

-
- 1 Magneto Rheological
 - 2 Magneto Rheology
 - 3 Bouc-Wen
 4. Herschel-Bulkley
 5. Bingham plastic
 - 6 Rheology
 7. Hong Et al.
 - 8 Plug
 9. Parlak Et al.

-
10. Sun
 - 11 Lord
 - 12 Gamota and Filisko
 - 13 Bing Max
 14. DABCO, also known as triethylenediamine or TEDA, is a bicyclic organic compound with the formula $N_2(C_2H_4)_3$. This colorless solid is a highly nucleophilic tertiary amine base.