

ویژگی‌ها و پارامترهای مورد نیاز سیال مگنتورئولوژیک برای استفاده در دمپر هوشمند سامانه تعلیق خودرو

یحیی ربانی، منصور شیروانی*⁺

دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

چکیده: صنعت به قابلیت‌های سیال‌های مگنتورئولوژیک نیاز بسیاری دارد. در بیش‌تر سامانه‌هایی که نیاز به کنترل حرکت به کمک تغییر گرانروی وجود داشته باشد، راه‌حلی بر مبنای فناوری مگنتورئولوژی، منجر به بهبود عملکرد و کاهش هزینه می‌شود. ویژگی‌های یگانه‌ای مانند پاسخ سریع، رابطه ساده توان الکتریکی ورودی و توان مکانیکی خروجی، کنترل پذیری، سادگی و هوشمندی عملکرد، این سیال‌ها را به فناوری دلخواه در سامانه تعلیق خودرو تبدیل کرده است. سیال مگنتورئولوژیک مناسب برای کاربرد در سامانه تعلیق خودرو باید ویژگی‌هایی از جمله گرانروی پایین در نبود میدان مغناطیسی، ویژگی‌های رئولوژیکی مناسب، سرعت پاسخ‌دهی بسیار سریع در حد چند میلی‌ثانیه، پایداری مناسب در برابر تغییرهای دمایی و ته‌نشینی و نداشتن ساینده‌گی تجهیزات را دارا باشد. همچنین یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های یک سیال مگنتورئولوژیک مناسب برای کاربرد در دمپر هوشمند، پایداری در چرخه‌های متوالی کارکرد می‌باشد. یکی از بزرگ‌ترین مشکل‌های سیال‌های مگنتورئولوژیک صنعتی این است که در چرخه‌های متوالی کارکرد، بخشی از ذره‌های مغناطیس‌پذیر و نیز لایه اکسید تشکیل شده بر روی ذره‌ها، ته‌نشین شده و تشکیل یک کیک سخت می‌دهند که کارآمدی سیال را به شدت کاهش می‌دهد. با انتخاب مناسب مواد سازنده و روش تولید بهینه می‌توان تا حد زیادی به پایداری و ویژگی‌های سیال در چرخه‌های متوالی کارکرد دست یافت. برای کاربردهای صنعتی سیال‌های مگنتورئولوژیک باید مواد سازنده و چگونگی تولید سیال مگنتورئولوژیک به گونه‌ای انتخاب شود که پارامترهای یادشده در نمونه پایانی به خوبی تنظیم شده باشند.

واژه‌های کلیدی: سامانه تعلیق خودرو؛ سیال مگنتورئولوژیک؛ دمپر هوشمند؛ دوام در چرخه‌های متوالی کارکرد؛ ویژگی‌های رئولوژی.

KEYWORDS: Vehicle suspension system; Magnetorheological fluid; Smart damper; In use thickening; Rheological properties.

مقدمه

که در همه گروه‌های مواد یافت می‌شود و در هر دسته از مواد مانند کامپوزیت‌ها و پلیمرها، فلزها و سرامیک‌های پیشرفته می‌توان

با رشد و بهبود فناوری اطلاعات طی سالیان گذشته مواد هوشمند ویژه‌ای پیدا کرده‌اند. هوشمند بودن ویژگی است

*عهده دار مکاتبات

+E-mail: shirvani.m@iust.ac.ir

جذب‌کننده شوک [۱۴]، حسگرها [۱۵]، سامانه آب‌بندی [۱۶]، اریفیس‌ها [۱۷] و پولیش‌کاری [۱۸، ۱۹] است. در شکل ۱ به صورت جامع در صنایع گوناگون کاربردهای این سیال ذکر شده است.

سیال‌های مگنتورئولوژیک

در دهه ۱۹۵۰ میلادی جیکوب رابینو اثر سیال‌های مگنتورئولوژیک را در اداره ملی استانداردهای امریکا ثبت کرد [۲۰]. در همان زمان، ویسنلو روی فناوری سیال‌های الکتروئولوژیک کار می‌کرد [۱۷]. از زمان کشف این فناوری‌ها در مقایسه با سیال‌های مگنتورئولوژیک پژوهش‌های بیش‌تری بر روی سیال‌های الکتروئولوژیک صورت گرفت، زیرا تصور می‌شد که وزن و فضای مورد نیاز برای سیم‌پیچ‌های تولیدکننده میدان مغناطیسی، مانع بزرگی در راه استفاده از این سیال‌ها است [۲۱]. ولی یکی از برتری‌های مهم سیال‌های مگنتورئولوژیک این است که تنش تسلیم بالاتری دارند. این امر به دلیل دانسیته انرژی مگنتواستاتیک بالاتر سیال‌های مگنتورئولوژیک در مقایسه با سیال‌های الکتروئولوژیک است. همچنین ولتاژ پایین مورد نیاز و پایداری نسبی در بازه‌ی دمایی گسترده، سیال‌های مگنتورئولوژیک را با اقبال بیش‌تری روبه‌رو کرده است [۲۲]. همچنین برای سیال‌های الکتروئولوژیک به هزاران ولت و چند میلی‌آمپر برای تولید میدان الکتریکی دلخواه نیاز است ولی برای سیال‌های مگنتورئولوژیک به طور معمول بین ۲ تا ۲۴ ولت و چند آمپر برای تولید میدان مغناطیسی مناسب است. فرآورده‌هایی که با سیال‌های مگنتورئولوژیک کار می‌کنند، در مقایسه با فرآورده‌هایی که به سیال‌های الکتروئولوژیک متکی هستند، ۲۰ تا ۵۰ برابر قدرت کنترل‌پذیری بیش‌تری دارند. همچنین پایداری سیال‌های مگنتورئولوژیک بیش‌تر است [۲].

اثر سیال‌های مگنتورئولوژیک برگشت‌پذیر است یعنی زمانی که میدان مغناطیسی حذف شود، مایع به شرایط اولیه‌اش برمی‌گردد. میدان مغناطیسی لازم برای کنترل این اثر، به فرمولاسیون سیال به‌ویژه به کیفیت و کمیت ذره‌های فلزی بستگی دارد. برای افزایش میزان تنش تسلیم، باید درصد ذره‌های فلزی افزایش یابد و نیز اندازه آن‌ها بزرگ‌تر شود تا ساختار زنجیری به دست آید [۱۷] سیال‌های مگنتورئولوژیک ویژگی‌های چشمگیری از خود نشان می‌دهند که از تغییر سریع، ایده‌آل و برگشت‌پذیر در حضور میدان مغناطیسی به دست می‌آید. نوع سیال استفاده شده و یا حالت عملیاتی

موادی را یافت که با اعمال مجموعه‌ای از فرایندها، ویژگی‌های هوشمند بودن را پیدا کنند. مواد هوشمند مانند مواد رئولوژیکی هستند که رفتار فیزیکی آن‌ها در مواجهه با محرک خارجی تغییر چشمگیری می‌کند. این مواد با قرار گرفتن در معرض انرژی‌های الکتریکی، مغناطیسی، گرمایی، شیمیایی، مکانیکی و یا تابش فوتون تغییر شکل فیزیکی می‌دهند و اثر سودمندی از خود بر جای می‌گذارند. اثر سودمند به معنای تغییر ناگهانی در مقدار یکی از پارامترهای فیزیکی است که به‌سادگی بتوان آن را بررسی و برای تولید تابعی ویژه استفاده کرد. یکی از مهم‌ترین جنبه‌های اثرهای سودمند، برگشت‌پذیری است، بدین معنا که اثر سودمند را می‌توان با تغییر در شرایط محیطی، به سادگی کنترل نمود. از جمله این مواد هوشمند می‌توان به مواد پیزوالکتریک، ترموالکتریک، فتوکرومیک، فلئوئورسنت، فسفرسنت، دستگاه‌های محرک فیبر نوری، میکرو ماشین‌های الکترومکانیکی، آلیاژهای حافظه‌دار، پلیمرهای رسانا و سیال‌های هوشمند اشاره کرد [۱].

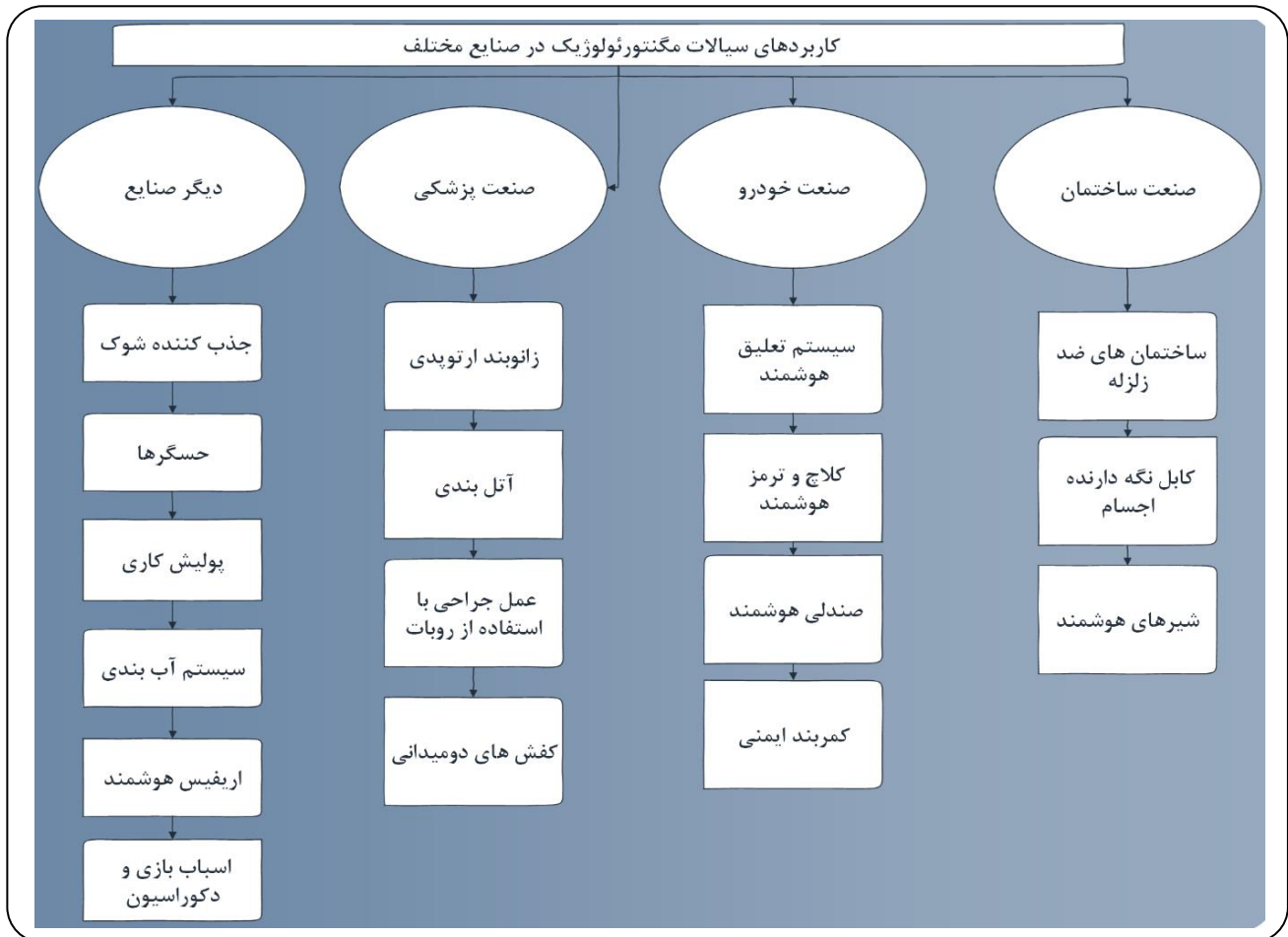
به‌طور کلی سیال‌های هوشمند بر مبنای محرک و پاسخ آن‌ها به دسته‌های گوناگونی تقسیم می‌شوند. تاکنون انواع گوناگونی از مواد هوشمند شناسایی شده‌اند که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از: سیال‌های الکتروئولوژیک (ER)^(۱)، سیال‌های مگنتورئولوژیک (MR)^(۲)، سیال‌های آهن‌دار^(۳). استفاده از این مواد در بسیاری از شاخه‌های مهندسی به تولید در مقیاس تجاری منجر شده است. یکی از مهم‌ترین سیال‌های هوشمند، سیال‌های مگنتورئولوژیک است که به علت برتری‌های بسیار زیادی که بر سیال‌های الکتروئولوژیک و سیال‌های آهن‌دار دارد، درباره آن‌ها مطالعه و بررسی بسیاری شده است. این سیال‌ها ویژگی‌های یگانه‌ای دارند که از جمله آن‌ها می‌توان به موردهای زیر اشاره کرد: کنترل‌پذیری به کمک میدان مغناطیسی، پایداری به نسبت مناسب، فرایند برگشت‌پذیری بسیار سریع، تولید آسان و بسیاری موردهای دیگر [۳، ۲].

از زمان کشف سیال‌های MR تاکنون، کاربردهای فراوانی از این سیال‌های بهره‌گرفته شده است. عمده کاربردهای سیال‌های مگنتورئولوژیک در صنعت ساختمان (ضد زلزله کردن ساختمان [۴]، کابل‌های نگه‌دارنده اجسام و شیرهای هوشمند [۵، ۶])، در صنعت خودرو (سامانه تعلیق [۷]، کلاچ [۸] و ترمز [۹، ۱۰])، صندلی و کمربند ایمنی، در صنعت پزشکی (زانوبند ارتوپدی [۱۱])، آتل‌بندی [۱۲]، ربات جراحی [۱۳] و کفش دومیدانی) و در صنایع دیگر

(۱) Electrorheologic fluids

(۲) Magnetorheologic fluids

(۳) Ferrofluids



شکل ۱- کاربردهای سیال‌های مگنتورئولوژیک در صنایع گوناگون.

به مقاومت ایجادشده در برابر حرکت سیال با تنش تسلیم^(۲) مشخص می‌شود [۲۶، ۲۵]. در شکل ۲ شمایی از زنجیره شدن ذره‌ها در حضور میدان مغناطیسی نشان داده شده است.

سیال پایه

سیال پایه می‌تواند قطبی و یا غیرقطبی باشد و به طور معمول با توجه به ویژگی‌های رئولوژیکی و پایداری دمایی دلخواه، تعیین می‌شود. برخی از پارامترهایی که در انتخاب سیال پایه باید در نظر گرفته شود، عبارت‌اند از: سازگاری با ذره‌های مغناطیس‌پذیر، پایداری شیمیایی، کشش سطحی و غیره. برخی از رایج‌ترین سیال‌های به کار رفته در تولید سوسپانسیون‌های مگنتورئولوژیک به قرار زیر می‌باشد: روغن‌های نفتی^(۳)، روغن‌های معدنی و سیلیکونی،

به ویژگی‌های دستگاه و کاربرد مدنظر بستگی دارد. بنابراین، بررسی رفتار سیال‌های مگنتورئولوژیک در شرایط برشی، تراکمی و کششی موضوع بسیار جالبی برای پژوهشگران است [۲۳، ۲۴].

سیال مگنتورئولوژیک از سه بخش شامل سیال پایه، ذره‌های فلزی و مواد افزودنی تشکیل شده است. ذره‌های فلزی که مهم‌ترین تأثیر را بر اثر مگنتورئولوژیک می‌گذارند، در سیال پایه پخش شده‌اند. مواد افزودنی، موادی هستند که به بهبود پایداری ذره‌های فلزی در سیال پایه کمک می‌کنند. در میدان مغناطیسی، ذره‌های فلزی موجود در سیال‌های مگنتورئولوژیک، در راستای خط‌های میدان مغناطیسی جهت‌گیری می‌کنند. در نتیجه این جهت‌گیری، مقاومتی در برابر حرکت سیال به وجود می‌آید که منجر به افزایش گرانیوی سیال می‌شود. این پدیده با نام اثر مگنتورئولوژیک^(۱) شناخته شده

(1) Magnetorheological Effect

(۳) Petroleum-based Oil

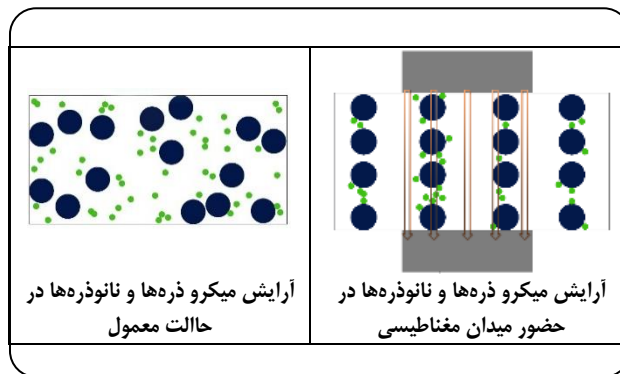
(۲) Yield Stress

مغناطیسی و به‌ویژه ویژگی‌های مگنتورئولوژیکی آن‌ها به شدت تحت تأثیر رفتار مغناطیسی ذره‌های پراکنده در سیال حامل است، مطالعه دقیق رفتار این ذره‌های مغناطیس‌پذیر اهمیت زیادی دارد [۳۱]. موادی که برای ساخت سیال‌های مگنتورئولوژیک به کار می‌روند، به طور معمول ذره‌های فرومگنتیک با اندازه‌های بین ۰/۱ تا ۱۰ میکرون هستند. زمانی که اندازه ذره‌های کوچک‌تر شود، حرکت براونی ذره‌ها از ته‌نشینی جلوگیری می‌کند و منجر به کاهش تنش تسلیم می‌شود. از سوی دیگر، ذره‌های بزرگ‌تر از ۱۰ میکرومتر از تولید سیال‌های مگنتورئولوژیک پایدار جلوگیری می‌کند. با توجه به افزایش تنش تسلیم با افزایش اندازه ذره‌ها، بهتر است ذره‌هایی با اندازه و توزیع مقبول انتخاب شود [۳۲].

در گذشته ذره‌های مگنتیت $(\text{Fe}_3\text{O}_4)^{(۳)}$ به علت فراوانی و غیرسمی بودن، به طور گسترده برای تولید سیال‌های مگنتورئولوژیک به کار گرفته می‌شد. در مقایسه با فرایند پیچیده اصلاح آهن کربونیل، ذره‌های مگنتیت با دانسیته بسیار کم‌تر ولی با رفتار مغناطیسی مناسب‌تر، وارد بازار رقابت می‌شود. با وجود این، ذره‌های مگنتیت تمایل به جمع شدن در خوشه‌های جدا از هم دارند؛ همچنین پایداری گرمایی و ویژگی ضداکسیدشوندگی کمی دارند. امروزه استفاده از ذره‌های مگنتیت و کامپوزیت‌های آن به دلایل ذکر شده و اشباع مغناطیسی کم، محدود شده است. از سوی دیگر، استفاده از مگنتیت مشکل‌هایی مانند ته‌نشینی و لخته شدن را نیز به همراه دارد [۳۳]. تاکنون ذره‌های آهن کربونیل^(۴) با اندازه متوسط ۴/۲۵ میکرومتر و دانسیته ۷/۹۱ گرم بر سانتی متر مکعب، ماده مغناطیسی اصلی در ساخت سیال مگنتورئولوژیک بوده است [۳۴]. این انتخاب به دلیل نفوذپذیری مغناطیسی زیاد و فراوانی این ماده است. در میان عنصرهای شناخته شده، آهن دارای بالاترین اشباع مغناطیسی با فراوانی مناسب و قیمت به نسبت پایین است. سیال مگنتورئولوژیک معمولی شامل ۲۰ تا ۴۰ درصد حجمی ذره‌های آهن است. آلیاژهای آهن دارای اشباع مغناطیسی بالاتری هستند [۳۵].

افزودنی‌های پایدار کننده

تفاوت دانسیته میان سیال پایه و ذره‌های سنگین فلزی موجب ته‌نشینی ذره‌ها و در نتیجه ناپایداری این سیال‌ها می‌شود. همچنین توزیع دوباره ذره‌های فلزی در سیال پایه دشوار است، در نتیجه در دهه‌های اخیر پژوهش‌های بسیار گسترده‌ای برای بهبود پایداری



شکل ۲- آرایش میکرو ذره‌ها و نانوذره‌ها در حضور میدان مغناطیسی.

پلی‌استر^(۱)، پلی‌اتر^(۲)، آب، روغن‌های هیدروکربنی صنعتی و بسیاری مواد دیگر [۲۷، ۲۸] با توجه به هر کاربرد سیال‌های مگنتورئولوژیک، یک سیال پایه خاص باید انتخاب شود، به گونه‌ای که ویژگی‌های مورد نیاز آن کاربرد را تأمین کند. برای نمونه، با در نظر گرفتن مسئله‌های زیست محیطی، هزینه و ویژگی‌های سطحی که در فرایند پرداخت کاری درگیر می‌شود، آب بهترین گزینه برای سیال فاز پیوسته است [۲۸، ۳].

گرانروی یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های بحث‌برانگیز سیال پایه در سیال‌های مگنتورئولوژیک است که باید با دقت بالایی بررسی شود. سیال مگنتورئولوژیک با ویژگی‌های قابل پذیرش باید دارای سیال پایه‌ای با گرانروی کم بوده و گرانروی آن تقریباً مستقل از دما باشد [۲۹]. همچنین، سیال پایه باید دیگر ویژگی‌های مورد نیاز برای عملکرد در دماهای گوناگون و نیز توزیع مناسب ذره‌ها را دارا باشد. گرانروی کم سیال پایه منجر به ایجاد مشکل‌هایی مانند ناپایداری سیال مگنتورئولوژیک می‌شود. از طرف دیگر، گرانروی بالا موجب افزایش نامطلوب گرانروی در نبود میدان می‌شود. مشخصه مهم دیگر سیال پایه، فشار بخار پایین سیال حامل است، به گونه‌ای که به آسانی تبخیر نشده و توانایی به کارگیری در بازه‌ی گسترده‌ای از دماها را داشته باشد [۳۰]. در سال‌های اولیه کشف این سیال‌ها، پژوهشگران بیش‌تر از روغن‌های هیدروکربنی سبک و یا گریس نیمه‌جامد و در برخی موارد نیز از روغن سیلیکونی استفاده می‌کردند. در حال حاضر، برای سیال‌های مگنتورئولوژیک بیش‌تر از روغن‌های کم‌گرانرو مانند روغن سیلیکون استفاده می‌شود [۲۲].

ذره‌های فلزی پراکنده

از آنجایی که ویژگی‌های فیزیکی سوسپانسیون ذره‌های

(۱) Polyester

(۲) Polyether

(۳) Magnetite

(۴) Carbonyl Iron

۲۰۱۴ میلادی به بررسی اثر دمایی اسید چرب مانند استتاریک اسید بر پایداری و ویژگی‌های رئولوژی سیال‌های مگنتورئولوژیک پرداختند. در این پژوهش از روغن سیلیکون و میکروذره آهن استفاده شد و برای پایداری از استتاریک اسید و پالمیتیک اسید به میزان ۳ درصد وزنی استفاده شد. و رفتار پایداری و رئولوژی این سیال در دماهای گوناگون اندازه‌گیری شد [30]. آشتیانی و همکاران در سال ۲۰۱۴ میلادی، به بررسی اثر افزودنی‌های گوناگون اسیدی پرداختند. بررسی‌های آن‌ها نشان داد که هرچه تعداد اتم زنجیره کربنی اسید چرب بیشتر باشد، ژل تشکیل شده دارای استحکام بیشتری بوده و در نتیجه گرانبوی سیال مگنتورئولوژیک به دست می‌آید نیز بالاتر خواهد بود که این امر باعث افزایش پایداری می‌شود [۳۹]. آشتیانی و همکاران در سال ۲۰۱۴ میلادی، به بررسی اثر افزودن دو نانوذره مغناطیس‌پذیر و غیر مغناطیس‌پذیر به سیال مگنتورئولوژیک پرداختند. مشاهده‌ها بیانگر افزایش چشمگیر اثر مگنتورئولوژیک با افزایش نانوذره‌های مغناطیس‌پذیر و افزایش چشمگیر پایداری با افزودن نانوذره‌های غیرمغناطیس‌پذیر است. افزایش سیلیس به سیال باعث افزایش پایداری می‌شود ولی از سویی نیز باعث افزایش گرانبوی و جامد شدن سیال در نبود میدان مغناطیسی می‌شود [۴۰]. ربانی و همکاران در سال ۲۰۱۸ میلادی، اثر نانوذره‌های آهن کورشل شده با سلولز بر روی پایداری سیال مگنتورئولوژیک بررسی کردند. تمرکز این پژوهش بر روی سنتز نانوذره آهن پایدار برای استفاده در سیال مگنتورئولوژیک بوده است. که پوشش نانوذره‌های آهن با سلولز باعث پایداری نانوذره شده است [۴۱].

همان‌گونه که بیان شد، دو مسئله عمده در راه استفاده گسترده از سیال‌های مگنتورئولوژیک، ناپایداری و اثر مگنتورئولوژیک کم این سیال‌ها است که موضوع بیشتر پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه مگنتورئولوژی در سال‌های اخیر بوده است. در راستای رفع مسئله‌های موجود در فناوری سیال‌های مگنتورئولوژیک، پژوهش‌های بسیاری انجام شده است. در این پژوهش‌ها، از دیدگاه تجربی به بررسی روش‌های پایدارسازی این سیال‌ها و افزایش اثر مگنتورئولوژیک آن‌ها پرداخته شده است [۳۶، ۴۲، ۴۳]. همچنین با تمرکز بر تعیین مواد و ترکیب درصد مناسب اجزای تشکیل دهنده، سیال مگنتورئولوژیکی تولید شد که نه تنها پاسخگوی نیازهای صنعتی این فناوری است، بلکه تولید آن را از نظر اقتصادی نیز توجیه‌پذیر نماید [۴۴، ۴۱، ۴۰، ۳۰]. افزون بر این، پژوهش‌هایی



شکل ۳ - روش‌های پایدارسازی سیال‌های مگنتورئولوژیک [۳۶].

این سیال‌ها و نیز افزایش اثر مگنتورئولوژیک انجام شده است. از جمله این روش‌ها می‌توان به پوشش‌دار کردن ذره‌های فلزی، توزیع سوسپانسیونی از ذره‌های فلزی با اندازه‌های میکرو و نانو، استفاده از سیال پایه با چگالی بیشتر، به کار بردن عامل‌های فعال سطحی^(۱) و مواد افزودنی پایدارکننده، استفاده از ذره‌های سیمی شکل و بسیاری روش‌های دیگر اشاره کرد که در شکل ۳ نمایش داده شده است [۳۶].

تویوتا و همکاران در سال ۲۰۰۸ میلادی، بر روی استفاده از ترکیب‌های پلیمری به عنوان پایدارکننده پژوهش نموده‌اند. در بررسی آن‌ها، ویژگی‌های رئولوژیکی محلولی از ذره‌های مگنتیت مورد مطالعه قرار گرفت که با پلی‌آکرلیک اسید پایدار شده بود. آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که با افزایش مقدار پلی‌آکرلیک اسید، پایداری سوسپانسیون افزایش می‌یابد. افزودن پلیمرها به سیال‌های مگنتورئولوژیک باعث افزایش گرانبوی سیال در نبود میدان مغناطیسی می‌شود که مطلوب استفاده در کاربردهای این سیال نیست [۳۷]. کیم و همکاران در سال ۲۰۱۲ میلادی سیال مگنتورئولوژیک نوینی از توزیع ذره‌های آهن کربونیل در محلول پلیمری پلی اتیلن اکسید در آب تولید کردند. گرانبوی پلی اتیلن اکسید از روغن‌های مرسوم که در تولید سوسپانسیون‌های مگنتورئولوژیک به کار گرفته می‌شود، بیشتر بوده و در نتیجه باعث افزایش دلخواه پایداری و افزایش ناخواسته گرانبوی سیال در نبود میدان مغناطیسی می‌شود [۳۸]. ربانی و همکاران در سال

(۱) Surfactant

سامانه تعلیق خودرو [۵۵]، سامانه تعلیق موتورسیکلت [۵۶] و ... مورد استفاده هستند. زمانی که این دمپرها در ساختمان‌ها به کار می‌روند، نوسان‌ها و موج‌های مخرب را جذب می‌کنند این ویژگی‌ها، ساختمان‌ها را در برابر زلزله مقاوم کرده است. وابستگی تنش تسلیم سیال‌های مگنتورئولوژیک به میدان اعمالی را می‌توان به خوبی در دستگاه‌های کنترل نیمه فعال دمپرها تولید و استفاده کرد. برتری‌های چنین دستگاه‌های عبارت است از: سامانه دائمی کنترل‌پذیر دمپر، عملکرد بی‌صدا، سادگی ترکیب‌بندی، توان مصرفی کم و کنترل پایداری [۵۷].

دمپرها مگنتورئولوژیک در سامانه‌های کنترلی لرزشی در ساختمان [۵۸]، کنترل اعضای مصنوعی [۵۹]، ماشین لباسشویی [۶۰] و نیز در کنترل لرزش ناشی از باد در پل‌های معلق و کابل [۶۱] کاربرد دارد.

این سیال‌ها برای استفاده در ضربه‌گیرهای خطی که به طور عموم در وسایل نقلیه استفاده می‌شود بسیار مناسب است. ضربه‌گیرهای معمولی، انرژی را بر مبنای گرانروی سیال عامل و هندسه‌ی پیستون مهار می‌کنند. با توجه به تغییر سریع و آبی در سیال مگنتورئولوژیک می‌توان، عملکرد ضربه‌گیر را متناسب با بار اعمالی بر روی آن، توسط میدان خارجی تنظیم نمود [۶۳، ۶۲].

دمپرها به کاررفته در خودروهای قدیمی دارای مشکل‌های بسیاری بودند. در نتیجه پژوهشگران و صنعتگران به جستجوی فناوری دیگری پرداختند که این مشکل‌ها را برطرف کند. از جمله این مشکل‌ها عبارت است از: پیچیدگی سامانه، الزامات fail-safe، مصرف بالای انرژی، وزن این سامانه‌ها و مشکل‌های دیگری که ناشی از نبود انطباق این سامانه‌ها برای جاده‌های هموار و ناهموار است. دمپرها مگنتورئولوژیک پاسخ مناسبی برای فراهم آوردن قابلیت‌های مورد نیاز رانندگی و سادگی می‌باشند. این دمپرها دارای قدرت ضربه‌گیری (دمپینگ) قابل تنظیم هستند. همچنین تغییر در قدرت دمپینگ آن‌ها به اندازه کافی سریع است که در زمان رانندگی به موقع صورت پذیرد. از سوی دیگر، دمپر مگنتورئولوژیک به خوبی قادر به تغییر عملکرد خود در جاده‌های صاف و هموار و در جاده‌های ناهموار و پردست‌انداز است [۶۲، ۱۰].

سیال‌های مگنتورئولوژیک به عنوان سریع‌ترین سوسپانسیون‌های واکنشی در جهان شناخته می‌شوند. این سیال‌ها لرزش‌ها، ارتعاش‌ها، سروصدا و تکان‌های سرنشینان در کلیه سرعت‌هایی که وسیله نقلیه قادر به دستیابی به آن است را کاهش می‌دهند. همچنین دمپرها

نیز در زمینه مدل‌سازی و شبیه‌سازی برای پیش‌بینی ویژگی‌های رئولوژیکی سیال به منظور توسعه کاربردهای این سیال در تجهیزهای گوناگون انجام شده است [۴۶، ۴۵، ۳۰].

از سوی سیال مگنتورئولوژیک با توجه به این که در چه صنعتی به کار گرفته خواهد شد، باید دارای ویژگی‌های خاصی باشد. بررسی‌های دانشگاهی و آزمایشگاهی بر روی ارزیابی و تعیین گرانروی سیال مگنتورئولوژیک، تنش برشی و تنش تسلیم و نیز پایداری سیال به طور عموم تمرکز دارند [۴۸، ۴۷] درحالی که سیال مگنتورئولوژیک که برای کاربردهای صنعتی قابل استفاده باشد، باید دارای ویژگی‌های یگانه دیگری نیز باشد [۵۰، ۴۹]. از سوی دیگر، برخی از این ویژگی‌ها در برخی از کاربردها، از اهمیت بیش‌تر و در برخی دیگر، از اهمیت کم‌تری برخوردار است. به عنوان نمونه، سیالی که در ضربه‌گیر خودرو به کار گرفته می‌شود، نیازی به پایداری چشمگیر ندارد، زیرا حرکت خود سامانه در هنگام استفاده منجر به هم زده شدن سیال می‌شود. این امر منجر به افزایش طول عمر سیال در چرخه‌های کاربرد آن می‌شود. از سوی دیگر این سیال باید الزامات مورد نیاز و استانداردهای خودروسازی را فراهم آورد [۵۲، ۵۱]. همچنین سیالی که در سامانه‌های ضدزلزله به کار گرفته می‌شود، بایستی دارای پایداری بسیار بالا باشد [۴]. هدف اصلی در این مقاله، بررسی پارامترهای تعیین‌کننده سیال برای استفاده در دمپر مگنتورئولوژیک و سپس بررسی ویژگی‌های عمومی این سیال برای استفاده در دمپرها مگنتورئولوژیک است. که با توجه به پژوهش‌های انجام شده در دنیا و پژوهش‌های پیشین این گروه پژوهشی هر یک از موارد به طور جداگانه مورد بحث و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

دمپرها مگنتورئولوژیک (۱)

دمپرها مگنتورئولوژیک، یکی از دستگاه‌های مورد استفاده در کاهش نوسان‌ها به صورت هوشمند است. چنین دمپری، یک دستگاه کنترلی نیمه فعال می‌باشد که توانایی تولید نیرویی مطابق با جریان الکتریکی اعمال شده را دارا می‌باشد. انرژی الکتریکی مورد نیاز این دمپر، ناچیز (در حدود چند وات) می‌باشد، درحالی که اتلاف انرژی می‌تواند به صدها وات برسد. سرعت پاسخ آن، در حدود میلی ثانیه می‌باشد. دمپرها مگنتورئولوژیک، کاربردهای متفاوتی دارند و در حال توسعه و گسترش هستند [۵۴، ۵۳]. این دمپرها به طور گسترده در صنایع با کاربردهایی مانند دمپر کابین اپراتور، دمپر موتورهای سنگین،

(۱) Magnetorheological Fluid Damper

به مطالعه دمپ‌های مگنتورئولوژیک به‌عنوان کاهش‌دهنده لرزش در سامانه‌های نقلیه و پل‌های معلق پرداختند. چوی و همکاران [۵۳] در سال ۲۰۰۸ میلادی حل دقیق جریان سیال مگنتورئولوژیک از درون یک فضای حلقوی^(۲) را ارائه کردند و حل خود را با آنالیز دینامیک سیال‌های محاسباتی اعتبارسنجی نمودند. آن‌ها همچنین یک مدل ریاضی برای دمپ دو لوله‌ای با استفاده از حل جریان حلقوی و تراکم‌پذیری سیال توسعه دادند. مطالعه‌ی احمدیان، آنالیز تجربی دمپ‌های مگنتورئولوژیکال، تحت ضربه و شوک را انجام داده است [۶۷]. سان و همکاران در سال ۲۰۱۵ میلادی مدل نوینی از یک نوع دمپ ترکیبی بر اساس سیال‌های مگنتورئولوژیک ارائه دادند و آزمون‌های عملکردی و هیدرولیکی برای دمپینگ انجام دادند و مدل ریاضی رو برای مقدار دمپ و متغیر سفت‌شوندگی ارائه دادند [۶۸].

ساختار و انواع دمپ‌های مگنتورئولوژیک

در طول چند سال اخیر دمپ‌های مگنتورئولوژیک برپایه سامانه کنترلی نیمه فعال در کاربردهای گوناگون توسعه داده شده است. شمای سامانه نیمه فعال دمپ مگنتورئولوژیک در شکل ۴ نشان داده شده است. هدف این سامانه کاهش لرزش در یک ساختار با تأمین نیروی دمپینگ^(۳) است. نیروی دمپینگ به صورت لحظه‌ای با حسگر سرعت/جابجایی تنظیم می‌شود. با ارزیابی مقدار سرعت/جابجایی ساختار، سرور خروجی موردنیاز را به دمپ برای دمپ انرژی لرزش فراهم می‌کند [۶۹].

شکل ۴ ساختار ساده‌ای از سامانه کنترلی را نشان می‌دهد. این ساختار توسط پژوهشگران گوناگون و به صورت هوشمند توسعه داده شده است [۷۰، ۷۱]. در کنار توسعه سامانه کنترلی برای سامانه‌های گوناگون، مدل‌های گوناگونی از دمپ‌های مگنتورئولوژیک توسعه داده شده است. رحمان و همکاران در سال ۲۰۱۲ میلادی به دسته بندی انواع دمپ‌های مگنتورئولوژیک پرداختند. که از نظر مقیاس کاربردی به مقیاس‌های بزرگ و کوچک و از منظر حرکت پیستون به چرخشی و خطی طبقه‌بندی کردند و سپس برای هر بخش نوع‌های گوناگون ذکر کردند که در شکل ۵ نمایش داده شده است [۷۲].

اعمال میدان مغناطیسی باعث زنجیره‌شدن ذره‌ها و تغییر مقدار گرانیوی سیال می‌شود. بنابراین این تغییر گرانیوی سیال

مگنتورئولوژیک توان مصرفی بسیار پایینی دارند (در حدود ۵ وات انرژی الکتریکی) [۶۴].

جنرال موتورز آمریکا با همکاری شرکت دلفی، فناوری دمپ مگنتورئولوژیک را برای کاربرد در خودرو توسعه دادند و برای اولین بار در خودرو کادیلک (کلیه خودروهای Seville STS تولیدشده از سال ۲۰۰۲ میلادی با کد PO F55 به‌عنوان MagneRide) و خودرو سواری شورلت (کلیه Corvette‌های تولیدشده از سال ۲۰۰۳ میلادی با کد F55) به‌عنوان بخشی از سامانه رانندگی با کنترل مغناطیسی^(۱) به کار گرفتند. تولیدکنندگان دیگر نیز با پرداخت هزینه مربوطه از این سامانه در خودروهای خود استفاده نموده‌اند که تعدادی از آن‌ها عبارت‌اند از:

Acura MDX; Audi TT and R8; Buick Lucerne; Cadillac CTS-V; DTS, XLR, SRX, STS; Chevrolet Corvette; Camaro ZL1; Ferrari 458 Italia; Ferrari 599GTB; Ferrari F12; Berlinetta and Holden HSV Commodore.

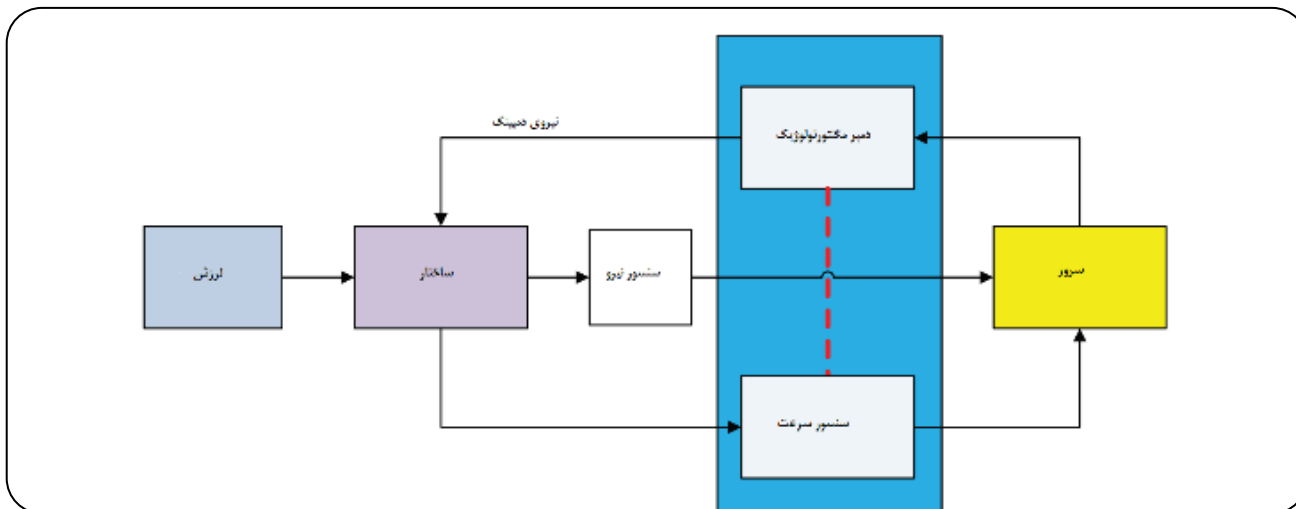
پیش‌تر این سامانه‌ها توسط شرکت دلفی تولید می‌شد ولی در حال حاضر توسط گروه BWI و لرد با عنوان MagneRide تولید می‌شود. از سال ۲۰۰۷ میلادی، شرکت BMW با استفاده از دمپ مگنتورئولوژیک تولیدی این شرکت، خودروهای خود را روانه بازار کرد. در همین زمان شرکت‌های آئودی و فراری از سامانه MagneRide شرکت دلفی در بسیاری از مدل‌های خود استفاده نمودند. شرکت پورشه، سامانه موتور مگنتورئولوژیک خود را بر روی پورشه‌های GT2 و GT3 تولید سال ۲۰۱۰ میلادی معرفی نمود. چنین سامانه‌ای نه تنها قادر به تنظیم شرایط خودرو در چند میلی‌ثانیه است، بلکه به راننده این امکان را می‌دهد که بین رانندگی راحت‌تر و رانندگی ورزشی‌تر انتخاب کند. دمپ‌های مگنتورئولوژیک از آنجایی که قادر به اعمال نیروی دمپینگ گوناگون به سوسپانسیون هستند و از دیدگاه الکترونیکی، ذاتاً fail-safe هستند، بسیار توسعه‌یافته‌اند. اگر مشکلی در سامانه به وجود بیاید، دمپ مگنتورئولوژیک قادر است تا همچنان به‌عنوان سامانه دمپینگ انفعالی با پارامترهای عملیاتی مشخص که به ویژگی‌های سیال مگنتورئولوژیک درون آن در نبود میدان بستگی دارد، عمل کند [۵۷].

عملکرد سیال‌های مگنتورئولوژیکال و الکتورئولوژیکال در فشارهای ضربه‌ای اعمال‌شده، توسط الواحد و همکاران بررسی شده است [۶۵]. اسلم و همکاران [۶۶] در سال ۲۰۰۶ میلادی

(۱) Magnetic selective ride control

(۳) Damping force

(۲) Annular



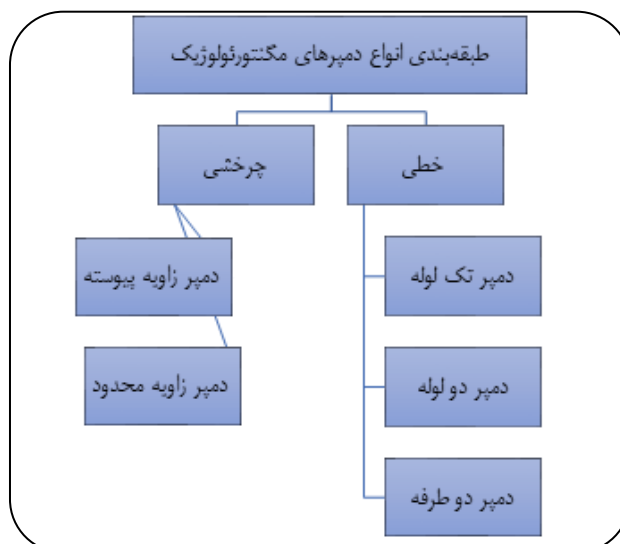
شکل ۴- ساختار سامانه کنترلی نیمه فعال دمپ‌های مگنتورئولوژیک [۶۹].

در دمپر باعث تغییر نیروی مورد نیاز برای جابه‌جایی پیستون در محل سیال مگنتورئولوژیک می‌شود. به عبارتی سیال مگنتورئولوژیک در اریفیس با حضور میدان مغناطیسی مقاومتی را متناسب با مقدار میدان مغناطیسی در برابر حرکت پیستون نسبت به حالت بدون میدان مغناطیسی ایجاد می‌کند در شکل ۶ عملکرد سیال در محفظه دمپر نمایش داده شده است [۷۲].

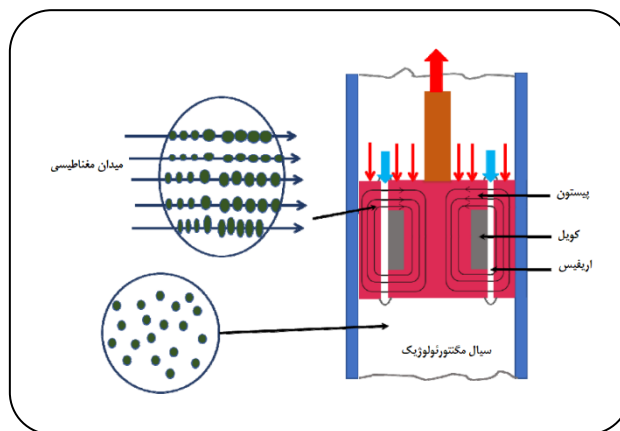
در طرح‌های اولیه از دمپ‌های مگنتورئولوژیک، بایکا و همکاران دمپری را با میدان مغناطیسی خارجی ساختند. که این دمپر شامل یک کوئل مغناطیسی خارجی بر روی سیال موجود در سامانه دمپر معمولی مطابق با شکل ۷ است [۷۳].

به طور کلی طرح‌های دمپر مگنتورئولوژیک، به طور معمول کوئلی را در سر پیستون قرار می‌دهد. دمپر مگنتورئولوژیک شامل یک مجموعه‌ی میرایی شامل سیلندر، پیستون، میله پیستون، سیم‌پیچ و ... است. در شکل زیر ساختار کلی یک دمپر مگنتورئولوژیک نشان داده شده است [۶۹].

در مطالعه روزن فیلد و ورلی، کوئل دو انتهای دمپر منتقل شده است. ناحیه‌های فعال، روی دو طرف سیلندر درونی دمپر هستند. پیستون در سیلندر حرکت می‌کند و جریان سیال را از طریق دو شیر مگنتورئولوژیک، از اتاقک اول به اتاقک دوم منتقل می‌کند. بنابراین، با استفاده از تنها دو کوئل، چهار حجم فعال ایجاد شده است. و دو هدف طراحی، نیروی بالا و فشردگی به دست آمده است. آزمایش‌ها نشان داده است که این دمپر مگنتورئولوژیک، توانایی فراهم آوردن نیروی میرایی بالا در فرکانس بالا (حدود ۲ Hz) را



شکل ۵- روش طبقه بندی انواع دمپ‌های مگنتورئولوژیک [۷۲].



شکل ۶- نظریه عملکرد دمپ‌های مگنتورئولوژیک [۷۲].

گرانروی به عنوان داده‌های ورودی شبکه در نظر گرفتند و مقدار میدان مغناطیسی مورد نیاز با توجه به این پارامترها را مدل‌سازی و پیش‌بینی کردند [۷۸]. همچنین برای به دست آوردن یک نیروی دمپینگ بالا با اندازه محوری محدود، یک دمپر مگنتورئولوژیک جدید سیال چند کاناله به صورت سری در سامانه تعلیق وسیله نقلیه توسط هیو و همکاران توسعه داده شد [۷۹]. همچنین ماچادک و همکاران به بررسی افزایش بازه نیروی دینامیک دمپر با حذف نیروی اصطکاک در پیستون دمپر پرداختند. و طراحی تازه‌ای از دمپر را با حذف نیروی اصطکاک ارائه دادند [۸۰].

برای تعیین مسیر پیش رو و اینکه بتوان به یک سامانه تعلیق هوشمند دست‌یافت باید توجه داشت که یکی از کلیدی‌ترین نکته‌ها در طراحی این سامانه تولید سیال مگنتورئولوژیک پایدار و کارآمد برای این سامانه است که در ادامه به ذکر پارامترهای تعیین‌کننده و ویژگی‌های مورد نیاز سیال مگنتورئولوژیک برای کاربرد در دمپر هوشمند پرداخته می‌شود.

پارامترهای تعیین‌کننده سیال مورد نیاز دمپر

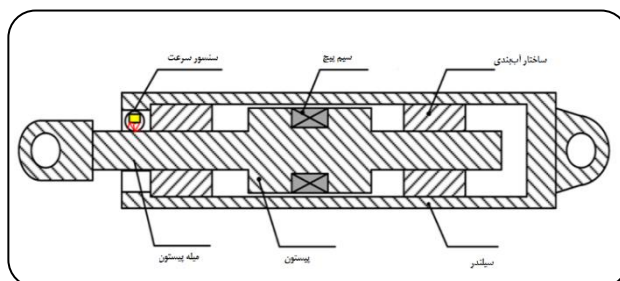
ویسکومتری

گرانروی یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های بحث‌برانگیز سیال پایه در سیال‌های مگنتورئولوژیک است که باید با دقت بالایی بررسی شود. سیال مگنتورئولوژیک با ویژگی‌های قابل‌پذیرش باید دارای سیال پایه‌ای با گرانروی کم بوده و گرانروی آن به تقریب مستقل از دما باشد [۸۱]. همچنین، سیال پایه باید دیگر ویژگی‌های مورد نیاز برای عملکرد در دماهای گوناگون و نیز توزیع مناسب ذره‌ها را داشته باشد. گرانروی کم سیال پایه منجر به ایجاد مشکل‌هایی مانند ناپایداری سیال مگنتورئولوژیک می‌شود. از سوی دیگر، گرانروی بالا موجب افزایش ناخواسته گرانروی در نبود میدان می‌شود. مشخصه مهم دیگر سیال پایه، فشار بخار پایین سیال حامل است، به گونه‌ای که به آسانی تبخیر نشده و توانایی به‌کارگیری در بازه گسترده‌ای از دماها را داشته باشد [۳۰]. در سال‌های اولیه کشف این سیال‌ها، پژوهشگران بیش‌تر از روغن‌های هیدروکربنی سبک و یا گریس نیمه‌جامد و در برخی موارد نیز از روغن سیلیکونی استفاده می‌کردند. در حال حاضر، برای سیال‌های مگنتورئولوژیک بیش‌تر از روغن‌های کم‌گرانرو مانند روغن سیلیکون استفاده می‌شود [۲۲].

تعیین گرانروی سیال مگنتورئولوژیک در شدت‌های گوناگون میدان مغناطیسی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های سیال مگنتورئولوژیک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همچنین گرانروی سیال



شکل ۷- دمپر با سوسپانسیون مگنتورئولوژیکال. ۱- بدنه دمپر، ۲- کویل، ۳- محور پیستون، ۴- اجزای سفت‌کننده [۷۳].



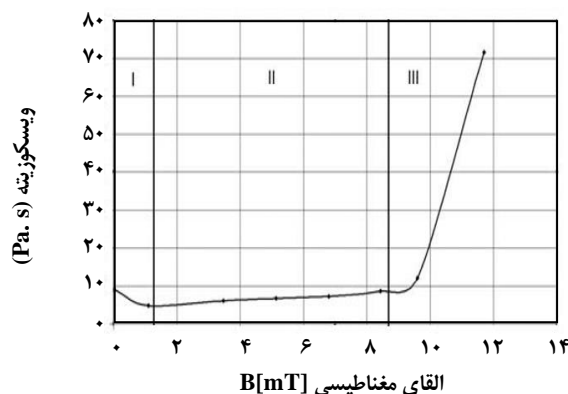
شکل ۸- ساختار دمپر مگنتورئولوژیک [۶۹].

دارا می‌باشد [۷۴]. گلینلی و همکاران نیز در سال ۲۰۱۵ میلادی، طرحی تازه از دمپر مگنتورئولوژیک رو ارائه دادند که در آن سامانه فشار داخلی برای کنترل حرکت دمپر به سامانه دمپر افزوده شده بود [۷۵].

پژوهش‌های گوناگونی بر روی بهینه‌سازی و مدل‌سازی دمپرهای مگنتورئولوژیک انجام شده است. ژو و همکاران در مقاله مروری به بررسی انواع ساختارهای دمپر و آنالیز بهینه‌سازی‌های که در هر بخش دمپر توسط پژوهشگران گوناگون انجام شده، پرداخته‌اند [۵۴]. در پژوهشی با استفاده شبیه‌سازی دینامیک سیال‌های محاسباتی به بهینه‌سازی یک نوع دمپر با استفاده از روش المان محدود پرداختند [۷۶]. پژوهش‌های تازه بای و همکاران در سال ۲۰۱۸ میلادی برای بررسی رفتار کنترلی دمپرهای مگنتورئولوژیک براساس مدل رفتار مقاومت خازنی انجام شد [۷۷]. کارلوس و همکاران در سال ۲۰۱۹ میلادی به مدل‌سازی یک نوع ویژه از دمپرهای مگنتورئولوژیک با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی پرداختند و پارامترهای مانند مقدارهای سرعت، جابه‌جایی، طول پیستون، گپ پیستون، مساحت پیستون، تنش تسلیم و

و جامد شدن سیال باعث مختل شدن حرکت دمپر در زمان حرکت خواهد شد.

در بیش‌تر پژوهش‌های دانشگاهی و صنعتی، گرانروی سیال در نبود میدان آنالیز شده و مورد بررسی پژوهشگران قرار گرفته است [۴۷، ۸]. شاید یکی از دلایل این توجه گسترده پژوهشگران به گرانروی سیال مگنتورئولوژیک در نبود میدان مغناطیسی ناشی از اهمیت روانی سیال در نبود میدان مغناطیسی باشد. ورلی [۱] در کتاب "مگنتورئولوژی"، بر تعیین گرانروی سیال مگنتورئولوژیک در نبود میدان مغناطیسی به‌عنوان یک پارامتر حیاتی برای توسعه استفاده از سیال‌های مگنتورئولوژیک صحنه گذاشت.



شکل ۹- تغییر گرانروی با شدت میدان مغناطیسی [۸۲].

آزمون‌های دوام در چرخه‌های متوالی کارکرد (IUT)^(۱)

سیال مگنتورئولوژیک به کار گرفته شده در تجهیزهای هوشمند، به طور عموم باید قادر به کارایی در بیش از چند صد چرخه تکرار باشد؛ به‌گونه‌ای که ویژگی‌های آن تغییر چشمگیری نکند. اغلب سیال‌های مگنتورئولوژیک سنتز شده در مقیاس آزمایشگاهی و با رویکرد دانشگاهی، آنالیزهای مربوط به دوام در چرخه‌های متوالی را نگذرانده‌اند. درحالی‌که پدیده سخت‌شدگی در اثر کارکرد تجهیز یکی از مشکل‌هایی است که منجر به کاهش کارایی سیال مگنتورئولوژیک پس از چند چرخه استفاده می‌باشد [۸۵ - ۸۳].

روپک و همکاران [۸۵] رفتار سیال مگنتورئولوژیک در زمان انجام آزمون‌های دوام و پایداری را مورد بررسی قرار داده‌اند. بررسی‌های آن‌ها که در ادامه مطالعه‌های کارلسون [۸۴] بود، نشان داد که نیروی پس‌ران با افزایش تعداد چرخه‌های به‌کارگیری دمپر مگنتورئولوژیک افزایش می‌یابد. این پدیده به نام دوام در چرخه‌های متوالی نام‌گذاری شد. کارلسون و اولسینی [۸۳] در پژوهش‌های جداگانه‌ای نشان دادند که اکسایش ذره‌ها یکی از دلایل ایجاد دوام در چرخه‌های متوالی است. لایه اکسید (نیتريد، کربید و آهن‌اکسید) ایجاد شده بر روی ذره‌ها، سخت و شکننده است. به دلیل برهم‌کنش ذره‌ها در هنگام حرکت سیال مگنتورئولوژیک، نانو ذره‌های اکسید از این لایه اکسید شده جدا می‌شوند. به‌عبارت‌دیگر، زمانی که تنش بین ذره‌ای چشمگیری به این سامانه اعمال شود، این لایه‌های سطحی می‌شکنند و قطعه‌های کوچکی را تشکیل می‌دهند که از ذره اصلی جدا هستند. این ذره‌های بسیار ریز نانومتری، دارای نسبت سطح به حجم بسیار بالایی بوده و رئولوژی کل سیال مگنتورئولوژیک را به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند. این نانو ذره‌ها منجر به افزایش

در نبود میدان مغناطیسی نیز یکی از مسئله‌های چالش‌برانگیز در بسیاری از کاربردهای سیال مگنتورئولوژیک است. بررسی‌های روزکوسکی و همکاران [۸۲] نشان داده است که گرانروی سیال مگنتورئولوژیک در بازه‌ی گسترده‌ای از شدت میدان مغناطیسی، به‌صورت خطی تغییر می‌کند که نتیجه‌های آن در نمودار شکل ۲ ارائه شده است. در این بررسی، سیال مگنتورئولوژیک تولیدی شرکت لرد (MRF-140CG) به کار گرفته شده است.

با توجه به موارد ذکر شده، لازم است که بازه‌ی شدت مغناطیسی مناسب در بررسی تغییر گرانروی، سیال مگنتورئولوژیک موردنظر به‌گونه‌ای تعیین شود که تغییرهای گرانروی سیال با تغییرهای شدت میدان مغناطیسی قابل پیش‌بینی و کنترل باشد. همچنین، با توجه به سادگی کار در بازه‌ی تغییرهای خطی (ناحیه II)، اگر گرانروی سیال با شدت میدان مغناطیسی به‌صورت خطی تغییر کند بهتر است. از سوی دیگر، با توجه به اهمیت گرانروی سیال مگنتورئولوژیک در نبود میدان مغناطیسی، لازم است نوع و ترکیب درصد مواد سازنده سیال به‌گونه‌ای انتخاب شوند که گرانروی سیال در نبود میدان تا حد امکان بالا نباشد (ناحیه I) و در بازه‌ی مجازی باشد که این مهم، با توجه به نوع کاربرد خاص سیال مانند دمپر اهمیت پیدا می‌کند. اختلاف مقدار گرانروی در حضور میدان مغناطیسی با زمان بدون اعمال میدان مغناطیسی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که این مقدار در شکل ۲ در میدان ۱۲ میلی‌تسلا به ۷۰ برابر مقدار بدون اعمال میدان رسیده است. همچنین در میدان‌های مغناطیسی بالا (ناحیه III) تغییرهای گرانروی به‌شدت زیاد و سیال به سمت شبه جامد بودن تمایل پیدا می‌کند که در طراحی دمپر باید لحاظ شود، زیرا این افزایش بالای گرانروی

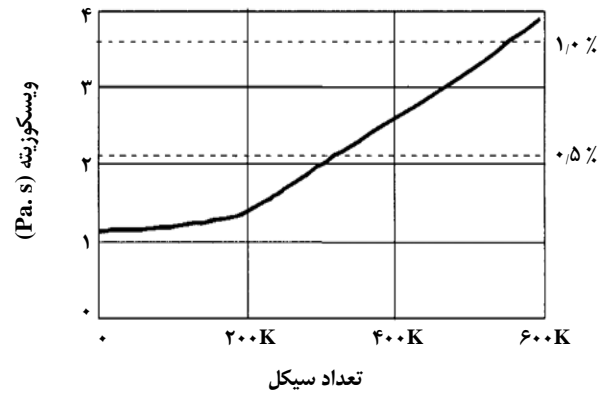
(۱) In Use Thickening

به‌طور کلی روش‌های پایداری سیال‌های مگنتورئولوژیک به ۶ دسته تقسیم می‌شوند: پوشش‌دهی ذره‌های مغناطیس پذیر، استفاده از نانو ذره‌های سیمی شکل، استفاده از نانو ذره‌های کروی، افزودنی‌های پایدارساز، استفاده از سیال پایه چگال‌تر و روش‌های مکانیکی [۳۶].

افزایش اختلاف دانسیته میان ذره‌ها و سیال حامل و نیز اندازه ذره‌ها موجب می‌شود تا زمانی که از سیال استفاده نمی‌شود، ذره‌ها بیش‌تر مستعد ته‌نشینی باشند. زمانی که ته‌نشینی اتفاق می‌افتد، جاذبه ناشی از پسماند مغناطیسی، توزیع دوباره ذره‌ها را دشوار می‌کند. پژوهش‌های بسیاری برای حل این مشکل انجام شده است. به‌طور معمول می‌توان تا حد زیادی با استفاده از مواد تیکسوتروپیک و سورفکتانت‌هایی مانند کربوسیلیک اسید، استئارات، ژل سیلیکا و ... از ته‌نشینی جلوگیری به عمل آورد. استئارات‌ها، شبکه‌ای از رشته‌های متورم ایجاد می‌کنند که باعث به دام افتادن ذره‌ها و جمع کردن آن‌ها می‌شود. همچنین از رشته‌های نازک کربن برای این هدف استفاده شده است [۸۹].

تاکنون افزودنی‌های پایدارساز گوناگونی به‌منظور افزایش پایداری سیال‌های مگنتورئولوژیک توسط پژوهشگران گوناگون، به‌کاررفته است. باین‌وجود، متأسفانه بیش‌تر این پایدارکننده‌ها منجر به کاهش ناخواسته اثر مگنتورئولوژیک و افزایش گرانیوی سیال در نبود میدان می‌شود. لویز-لویز و همکاران [۹۰] با پراکنده کردن میکرو ذره‌های آهن کربونیل در کروسن، سیال مگنتورئولوژیک ساختند. آن‌ها برای پایدارسازی از آلومینیوم استئارات استفاده کردند. جذب آلومینیوم استئارات بر روی ذره‌ها به توزیع بهتر آن‌ها در راستای میدان کمک کرده و در نتیجه انرژی برهم‌کنش مغناطیسی میان ذره‌ها افزایش یافته و سیال دارای آلومینیوم استئارات دارای اثر مگنتورئولوژیک بیش‌تری می‌باشد. بررسی‌ها نشان داده، افزودن اسیدهای آب‌گریزی با بیش از ۱۴ اتم کربن به سیال مگنتورئولوژیک معمولی، منجر به افزایش چشمگیر پایداری و اثر مگنتورئولوژیک می‌شود. در نتیجه پژوهش‌های بسیاری برای اثر افزودن اسیدهای چرب، نانو ذره‌های فلزی و غیرفلزی بر روی پایداری سیال مگنتورئولوژیک انجام شده است [۹۱، ۴۴، ۴۲، ۴۱].

برای بررسی میزان پایداری در دماهای گوناگون، می‌توان نمونه‌های سنتز شده را در دماهای گوناگون در حمام آب قرارداد و سپس در فاصله‌های زمانی مشخص، از نمونه‌ها عکس‌برداری کرد. سپس به‌وسیله پردازش تصویر، ارتفاع و در نتیجه حجم هر فاز



شکل ۱۰- گرانیوی در نبود میدان مغناطیسی [۸۴].

گرانیوی ظاهری سیال در نبود میدان مغناطیسی می‌شوند. همچنین در پژوهش‌های دیگری، سانکارا و همکاران [۸۶]، رابطه کاهش تنش تسلیم با افزایش اکسیداسیون را ارائه دادند. کارلسون و همکاران [۸۴]، افزایش گرانیوی سیال در نبود میدان مغناطیسی را با افزایش تعداد چرخه‌های استفاده‌شده بررسی کردند که نتیجه‌های آن در شکل ۳ نشان داده شده است.

با یک روش ساده می‌توان اثر چگال‌تر شدن سیال در چرخه‌های مداوم را بررسی کرد. هر آزمون مگنتورئومتری در دستگاه رئومتر را می‌توان یک چرخه عملکردی در نظر گرفت و عملکرد سیال مگنتورئولوژیک را در چرخه‌های یادشده مورد بررسی قرارداد. تغییرهای رفتار گرانیوی سیال برحسب تعداد آزمون انجام شده در دستگاه رئومتر، در نبود میدان قابل تشخیص است و می‌توان چرخه استفاده سیال را افزایش داد تا بازه‌ی افزایش گرانیوی سیال مشخص شود. با توجه به مستندهای موجود از آنالیزهای انجام گرفته بر روی نمونه دمپرهای صنعتی، بازه‌ی مجاز افزایش گرانیوی سیال در چرخه‌های عملکردی (همانند با شکل ۳) معین است که لازم است دوام در چرخه‌های متوالی نمونه تولیدی در بازه‌ی قابل پذیرش باشد.

آزمون‌های پایداری (مقاومت در ته‌نشینی)

تفاوت گرانیوی میان سیال پایه و ذره‌های سنگین مغناطیس‌پذیر موجب ته‌نشینی این ذره‌ها و در نتیجه کاهش پایداری و اثر مگنتورئولوژیک می‌شود. همچنین توزیع دوباره ذره‌های مغناطیس‌پذیر در سیال پایه به علت تشکیل یک سخت مشکل‌ساز است [۸۷]. در نتیجه در دهه‌های اخیر پژوهش‌های بسیار گسترده‌ای برای بهبود پایداری این سیال‌ها صورت گرفته است [۸۸].

توزیع یکنواخت و پایدار است. در این راستا، هدف اصلی بهبود ویژگی‌های جریان، کاهش سرعت ته‌نشینی ذره‌ها و لخته‌شدگی است. به عبارت دیگر، دو عامل مهم در ارزیابی سیال‌های مگنتورئولوژیک، ته‌نشینی و بیش‌ترین تنش تسلیم قابل‌دستیابی می‌باشد. با توجه به تفاوت دانسیته میان ذره‌های مغناطیسی و سیال پایه، ته‌نشینی ذره‌ها به علت نیروی وزن مشکلی اساسی در استفاده از سیال‌های مگنتورئولوژیک است [۱].

از جمله موردهایی که ویژگی‌های رئولوژیکی، پایداری و توزیع دوباره سیال‌های مگنتورئولوژیک را تحت تأثیر قرار می‌دهد، عبارت‌اند از: اندازه، شکل، دانسیته و توزیع اندازه ذره‌ها، شدت مغناطیس اشباع، میدان پس ماند^(۳)، ویژگی‌های سیال پایه، سورفکتانت‌ها و مواد ضد خوردگی، میدان مغناطیسی اعمالی و دما. وکا و همکاران [۹۶] در سال ۲۰۰۲ میلادی به بررسی اثر ترکیب شیمیایی سیال و برهم‌کنش‌های دوقطبی میان ذره‌ها بر روی ویژگی‌های جریان پرداختند و دیدند که ویژگی‌های جریان بیش‌تر تحت تأثیر ترکیب شیمیایی مواد قرار دارد. در نتیجه برای چیره شدن بر مشکل‌های پیش روی استفاده صنعتی از سیال‌های مگنتورئولوژیک باید به مواد سازنده این سیال‌ها توجه ویژه‌ای داشت.

بازه‌ی تنش دینامیکی یکی از مهم‌ترین پارامترها است به این معنی که سیال باید دارای مقدار بالای تنش تسلیم در حضور میدان و دارای کم‌ترین مقدار در عدم حضور میدان باشد. پژوهش‌های بسیاری به بررسی اثر ترکیب درصد و نوع مواد به‌کاررفته در سنتز سال مگنتورئولوژیک بر روی تنش برشی و تنش تسلیم سیال پرداخته‌اند. در این پژوهش‌ها با مطابقت دادن نتیجه‌های تجربی با مدل‌های گوناگون رئولوژیکی مانند بینگهام، هرشل بالکلی و غیره به توصیف رفتار سیال‌های مگنتورئولوژیک در حضور میدان مغناطیسی پرداخته شده است [۹۷].

بیش‌تر نتیجه‌های پژوهش‌ها بیانگر این است که تنش تسلیم پیشینه سیال مگنتورئولوژیک دارای تابعیت نمایی از دمای عملیاتی و میدان مغناطیسی است. به‌عنوان نمونه کلارک و همکاران [۹۸] با سوسپانسیون کردن ذره‌های آهن کربونیل در روغن سیلیکون و بررسی رفتار رئولوژیکی سیال نشان دادند که تنش تسلیم پیشینه در دمای ثابت دارای رابطه توانی با شدت میدان مغناطیسی است. همچنین در پژوهش پیشین رابطه جامعی برای تابعیت تنش تسلیم از میدان و دما و نرخ برش ارائه شد [۳۰].

که نمایانگر دو فاز شدن سوسپانسیون است، تعیین می‌شود. همچنین از آزمون کدورت‌سنجی نیز می‌توان به‌عنوان روش جایگزین استفاده کرد. سیال مورد استفاده در دمپر نیاز به پایداری ۱۰۰ درصد در بازه زمانی طولانی مدت نیست و بازه‌ی ۸۰-۹۰ درصد پایداری در بازه زمانی یک تا دو ماهه برای پایداری قابل‌پذیرش است.

آزمون‌های تنش برشی^(۱) و تنش تسلیم^(۲) (مگنتورئومتری)

مهم‌ترین ویژگی سیال‌های مگنتورئولوژیک، مقاومت در برابر حرکت در حضور میدان مغناطیسی است. هرچه سیال مگنتورئولوژیک، تنش تسلیم بالاتری داشته باشد، از نظر عملکردی مناسب‌تر است. در همین حال بیش‌تر سوسپانسیون‌های مگنتورئولوژیک در نبود میدان مغناطیسی نیز دارای گرانروی بالایی هستند که برای بیش‌تر کاربردهای صنعتی نامطلوب است [۹۲].

در حضور میدان مغناطیسی، ذره‌های مغناطیس‌پذیر در کنار یک‌دیگر زنجیره‌ای را تشکیل می‌دهند که تا بازه‌ی معینی از تنش برشی در برابر شکستن مقاومت می‌کنند و در نتیجه موجب ایجاد ساختاری شبه‌جامد می‌شوند. زمانی که تنش برشی از یک مقدار حدی بیش‌تر شود، این ساختار زنجیری شکسته شده و سیالیت برقرار می‌شود. این تنش برشی حدی، تنش تسلیم ظاهری سیال نامیده می‌شود [۹۳].

سیال مگنتورئولوژیک در بازه‌ای از شدت میدان مغناطیسی، تنش تسلیم ۱۰ تا ۱۰۰ کیلوپاسکال از خود نشان می‌دهد. در کاربردهای صنعتی سیال‌های مگنتورئولوژیک، تنش تسلیم عامل بسیار مهمی به شمار می‌رود. تنش تسلیم به شکل، اندازه و توزیع ذره‌های مغناطیسی، درصد حجمی ذره‌ها، میدان مغناطیسی اعمالی، برهم‌کنش‌های ذره‌ها و نیز تشکیل کلوخه‌ها بستگی دارد [۹۴].

سیال‌های مگنتورئولوژیک برای حضور در بازار رقابت کاربردهای مهندسی باید دارای ویژگی‌هایی باشند که از جمله آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: عملکرد در بازه‌ی دمایی گسترده، پایداری شیمیایی، پایداری در برابر ته‌نشینی و اشباع مغناطیسی بالا. افزون بر این، سیال مگنتورئولوژیک باید در حضور میدان مغناطیسی، تنش تسلیم بالا و در نبود میدان مغناطیسی، گرانروی ظاهری کمی داشته باشد [۹۵].

یکی از اصلی‌ترین مشکل‌های پیش روی ساخت سیال‌های مگنتورئولوژیک، چیره شدن بر نیروی جاذبه و اندروالس میان ذره‌ها و نیز

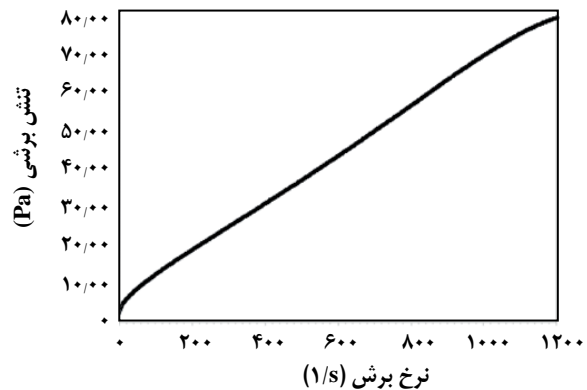
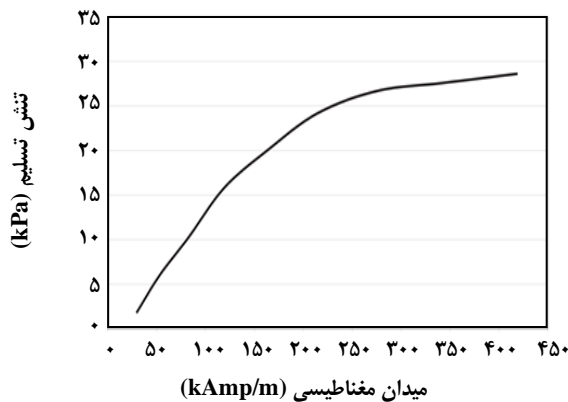
(۱) Shear stress

(۳) Coercive field

(۲) Yield stress

جدول ۱ - مدل‌های رئولوژیکی سیال‌های مگنتورئولوژیک.

مرجع	معادله	مدل رئولوژیکی
[۱۰۱]	$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma} \quad \text{for } \tau > \tau_0$ $\dot{\gamma} = 0 \quad \text{for } \tau < \tau_0$	پلاستیک بینگهام
[۱۰۲]	$\tau = \tau_0 + \eta (\dot{\gamma})^n \quad \text{for } \tau > \tau_0$ $\dot{\gamma} = 0 \quad \text{for } \tau < \tau_0$	هرشل بالکلی
[۱۰۳]	$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + \sqrt{\eta \dot{\gamma}} \quad \text{for } \tau > \tau_0$ $\dot{\gamma} = 0 \quad \text{for } \tau < \tau_0$	کیسون
[۱۰۴]	$\tau = \begin{cases} \eta_r \dot{\gamma}; & \tau \leq \tau_1 \\ \tau_0 + \eta \dot{\gamma}; & \tau > \tau_1 \end{cases}$	دو گرانروی
[۱۰۴]	$\tau = \begin{cases} \tau_1 + \eta_r \dot{\gamma}; & \tau \leq \tau_r \\ \tau_0 + \eta \dot{\gamma}; & \tau > \tau_r \end{cases}$	بینگهام دو گرانروی
[۱۰۵]	$\tau(\dot{\gamma}) = \tau_N(\dot{\gamma})W_N(\dot{\gamma}) + \tau_{nN}(\dot{\gamma})W_r(\dot{\gamma})$	پاپاناستاسیو



شکل ۱۲- تنش تسلیم برحسب میدان مغناطیسی سیال تجاری [۹۹MRF 122 ED LORD].

شکل ۱۱- تنش برشی برحسب نرخ برش سیال MRF 122 ED [۹۹].

می‌توان از دستگاه مگنتورئومتر به‌عنوان نمونه MCR300 استفاده کرد. گرانروی و تنش برشی نمونه‌ها در سرعت‌های برشی گوناگون، میدان مغناطیسی گوناگون و در بازه دمایی گوناگون را می‌توان اندازه‌گیری کرد. بیش‌تر سیال‌های مگنتورئولوژیک که بدون افزودنی‌های تغییردهنده ساختار سیال پایه هستند، در نبود میدان مغناطیسی رفتار نیوتنی دارند؛ ولی به‌طور عموم سیال‌های مگنتورئولوژیک رفتار غیر نیوتنی دارند و از مدل‌های ویسکوالاستیک پیروی می‌کنند [۱۰۰]. بیش‌تر مدل‌هایی که برای توصیف رفتار سیال‌های مگنتورئولوژیک استفاده می‌شود در جدول ۱ آورده شده است.

نکته مهم بررسی تجاری این سیال‌ها این است که تنش برشی و تنش تسلیم در برگه‌های فنی که شرکت لرد به‌صورت تجاری به بازار عرضه می‌کند، ارایه می‌شود. در شکل ۴ نمودار تنش برشی بر نرخ برش ارایه‌شده در برگه فنی سیال تولیدشده توسط شرکت لرد ارایه‌شده است. همچنین نمودار تنش تسلیم ارایه‌شده در برگه فنی در میدان‌های گوناگون در شکل ۵ ارایه‌شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، تنش تسلیم با افزایش شدت میدان مغناطیسی افزایش می‌یابد و پس از رسیدن به میزان مغناطیس اشباع ذره‌ها، به تقریب ثابت می‌شود. برای اندازه‌گیری ویژگی‌های رئولوژیکی سوسپانسیون‌های مگنتورئولوژیک

توان نمایی در مدل دیده می‌شود. در پژوهش پیشین اثر دما بر ویژگی‌های رئولوژی سیال مگنتورئولوژیک سنتز شده بررسی شد و نشان داده شد که تنش تسلیم بیشینه سیال با افزایش دما در میدان‌های مغناطیسی گوناگون متفاوت است [۸۱]. در شکل ۶ کاهش تنش تسلیم بیشینه با افزایش دما در میدان‌های مغناطیسی گوناگون نشان داده شده است. همچنین رابطه‌هایی برای تغییر ویژگی‌های رئولوژی سیال با افزایش دما توسعه داده شد که این رابطه‌ها را می‌توان برای طراحی دمپرها لحاظ کرد.

همان‌گونه که بیان شد اثر دما بر پایداری و ویژگی‌های مگنتورئومتری و رئولوژی قابل دیدن است. همچنین، با توجه به این که بررسی مقاومت دمایی در دمپر از اهمیت به سزایی برخوردار است در نتیجه باید اثر دما در همه پارامترها و ویژگی‌های تأثیرگذار سیال لحاظ شود.

آزمون مغناطیس پذیری

ذره‌های آهن کربونیل که از تجزیه گرمایی پنتا آهن کربونیل تولید می‌شوند، دارای بیش‌ترین مغناطیس پذیری بوده و به‌طور گسترده‌ای برای تولید سیال‌های مگنتورئولوژیک به کار می‌روند. به کمک حلقه هیستریزس ویژگی‌های مغناطیسی مواد تعیین می‌شود. حلقه هیستریزس رابطه مقدار مغناطیس‌پذیر بودن (M) و میدان مغناطیسی (H) را در ماده نشان می‌دهد [۲۶]. که در شکل ۷ به صورت شمایی نشان داده شده است.

منحنی مغناطیس‌پذیری تنها مقدار اندکی مغناطیس باقی‌مانده را نشان می‌دهد. میزان بالای مغناطیس اشباع ذره‌های آهن کربونیل استفاده از این ذره‌ها را در تولید سیال مگنتورئولوژیک صنعتی امکان‌پذیر می‌سازد. در برگه فنی سیال تجاری شده لرد نمودار مغناطیس‌پذیری ارائه شده است؛ که در شکل ۸ نمایش داده شده است. شکل بیانگر پایین بودن مقدار مغناطیس باقی‌مانده یا پس ماند است. ویژگی‌های مغناطیسی ذره‌های آهن کربونیل با استفاده از دستگاه مغناطیس‌سنج نمونه ارتعاشی (VSM) قابل اندازه‌گیری است. به‌طور معمول برای بالا بودن مغناطیس‌پذیری ذره‌ها از آهن کربونیل در سیال‌های مگنتورئولوژیک استفاده می‌شود که مقدار مغناطیس اشباع این ذره‌ها در میدان ۸ kOe برابر با ۱۶۵ emu/g است.

ویژگی‌های عمومی سیال مگنتورئولوژیک

افزون بر موارد ذکر شده در قسمت پیشین که از عامل‌های تعیین‌کننده ویژگی‌های یک سیال مناسب برای استفاده در دمپرها

رفتار کلی سیال مگنتورئولوژیک تولید شده بیش‌تر از مدل هرشل-بالکلی [۱۰۲] پیروی می‌کند. ولی به دست آوردن پارامترهای مدل در نرخ برش پایین مشکل‌هایی دارد و قابلیت پیش‌بینی مدل را ندارد. در نتیجه برخی از پژوهشگران از مدل بینگهام [۱۰۱] برای نتیجه‌های تجربی در نرخ برش بالا استفاده کردند و تنش تسلیم را گزارش کرده‌اند. هرچند در برخی از مطالعه‌های این مدل نیز راهگشا نبوده است [۱۰۶].

نتیجه‌های آزمایشگاهی و پژوهش‌های پیشین نشان داده است که وجود یک مدل که به کمک آن رفتار سیال در تمامی نرخ برش‌ها قابل پیش‌بینی باشد ضروری است. در نتیجه در کنار مدل‌های نظری از مدل‌های هوش مصنوعی مانند شبکه عصبی و برازش بردار پشتیبان نیز می‌توان استفاده کرد. این‌گونه مدل‌ها قابلیت پیش‌بینی اثر پارامترهای گوناگون مانند دما، میدان و غیره را دارند [۴۵].

آزمون مقاومت دمایی

سیالی، دلخواه است که در بازه دمایی گسترده‌تر عملکرد دلخواه و موردنیاز را داشته باشد. آزمون مقاومت دمایی در کاربرد برای کمک‌فناوری اتومبیل مهم است. در نتیجه همان‌گونه که در آزمون‌های پیشین نیز بیان شد با توجه به اهمیت دما در دمپرها اثر دما باید بر کلیه پارامترهای تأثیرگذار بر ویژگی‌های سیال بررسی شود. گرانشی ظاهری سوسپانسیون‌های مگنتورئولوژیک در میدان‌های القایی بزرگ افزایش می‌یابد که این افزایش گرانشی می‌تواند سبب افزایش چشمگیر انرژی از طریق اتلاف ویسکوزی شود. تنش تسلیم میدان القایی برای سیال‌های مگنتورئولوژیک در میدان‌های بزرگ تا میزان 10^5 پاسکال گزارش شده است. برای نرخ برشی به مقدار 10^3 s^{-1} شدت انرژی تا حد 10^8 Wm^{-3} می‌رسد. این چنین شدت تولید انرژی باعث افزایش چشمگیر دما در داخل سیال‌ها و تجهیزها می‌شود [۱۰۷].

رفتار سیال‌های مگنتورئولوژیک بستگی به دما دارد. در هر نوع از این سیال‌ها در نبود میدان اعمالی، گرانشی سیال با دما تغییر می‌کند. آریف و همکاران [۱۰۸] با بررسی فرولوید متشکل از نانو کلاسترهای کبالت-نیکل با قطر ۴۵۰ نانومتر و ۲۰ درصد پودر آلیاژ در روغن کرچک و بررسی اثر دماهای ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درجه سلسیوس نشان دادند که با افزایش دما ثابت موجود در مدل هرشل بالکلی، کاهش و تنش تسلیم تغییری نمی‌کند. همچنین آن‌ها نشان دادند که با افزایش میدان مغناطیسی، ثابت افزایش و کاهش غیریکنواخت

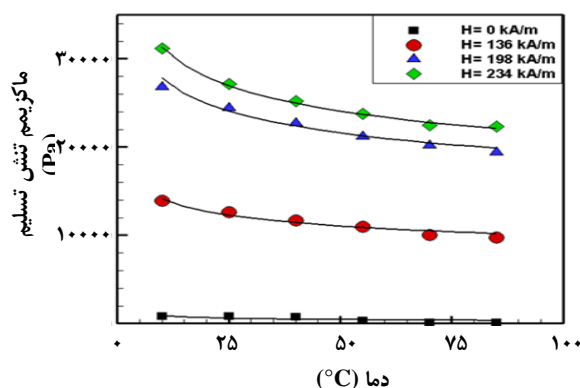
مگنتورئولوژیک است، ویژگی‌های عمومی تری نیز برای یک سیال کارآمد مگنتورئولوژیک در پژوهش‌های گوناگون ذکر شده است. در بسیاری از مقاله‌ها که به طراحی دمپر پرداخته‌اند، ویژگی‌های عمومی و مورد نیاز سیال بیان شده است که به عنوان نمونه /ولابی و همکاران [۲] در ساخت و طراحی دمپر هوشمند در سال ۲۰۰۷ میلادی از یک نمونه سیال ساخته شده شرکت لرد استفاده کرده‌اند که ویژگی‌های همانند جدول ۲ در آن برای سیال استفاده شده ارائه شده. همچنین شرکت لرد نیز در برگه فنی سیال‌های تجاری ارائه شده به بازار، ویژگی‌های عمومی نمونه‌های گوناگون سیال را بیان کرده است که در جدول ۳ ویژگی‌های نمونه تجاری MRF 132 ED آورده شده است.

افزون بر موردهای ذکر شده می‌توان به موردهای دیگری به عنوان ویژگی‌های کلی سیال اشاره کرد.

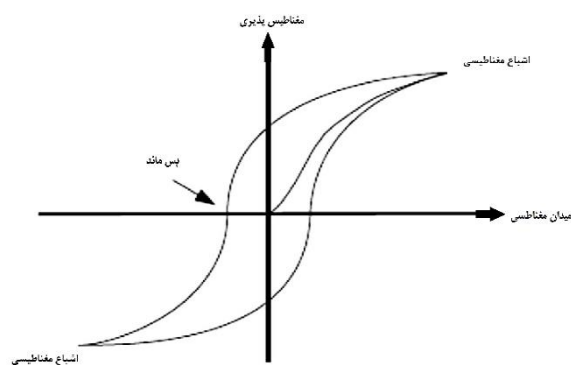
ویژگی‌های میکرو/نانو ذره‌ها

در سنتز سیال‌های مگنتورئولوژیک از میکروذره‌ها و نانوذره‌ها استفاده می‌شود که بایستی دارای ویژگی‌های ویژه‌ای باشند. میکرو ذره‌ها باید دارای ویژگی‌های مغناطیسی مناسبی باشند که در بخش پیشین به آن پرداخته شد. همچنین باید توزیع اندازه ذره‌ها، شکل و اندازه ذره‌ها برای تولید سیال مگنتورئولوژیک مناسب باشد. بر طبق مطالعه‌های رایینو، کارلسون و بسیاری پژوهشگران دیگر، اندازه ذره‌های مغناطیسی باید کمتر از ده میکرون باشد [۱۱۲-۱۰۹]. ذره‌های آهن کربونیل پرکاربردترین ذره‌ها در تولید سیال‌های مگنتورئولوژیک هستند. افزون بر این ذره‌ها از آلیاژهای نیکل-آهن، کبالت-آهن و فولاد ضدزنگ مغناطیس‌پذیر نیز استفاده شده است [۱۱۵-۱۱۳]. توجه به مغناطیس‌پذیری و مغناطیس اشباع این میکروذره‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است در نتیجه پژوهشگران گوناگون در پژوهش‌های خود از درجه‌های گوناگون میکروذره‌های کربونیل ایرون استفاده کرده‌اند که در جدول ۴ به صورت خلاصه اطلاعاتی از این درجه‌ها و مقدار مغناطیس اشباع توسط پژوهشگران گوناگون آورده شده است.

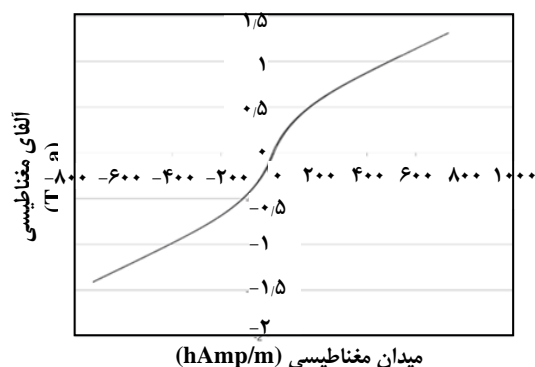
از سوی دیگر نانو ذره‌هایی که در سنتز سیال مگنتورئولوژیک به کار گرفته می‌شوند نیز بایستی دارای اندازه بسیار کوچک بوده و توزیع اندازه ذره‌های مناسبی داشته باشند. همچنین در صورتی که از نانو ذره‌های مغناطیسی در سنتز سیال استفاده می‌شود باید دارای ویژگی‌های مغناطیسی چشمگیری باشند. هاتو و همکاران [۱۲۰] اثر افزودن نانوذره‌های اورگانوکیلی به سیال مگنتورئولوژیک را



شکل ۱۳- تغییر تنش تسلیم بیشینه با میدان مغناطیسی در دماهای ۱۰ تا ۸۵ درجه سلسیوس [۸۱].



شکل ۱۴- نمودار مغناطیس پذیری [۲۶].



شکل ۱۵- نمودار مغناطیس‌پذیری ذره‌های آهن به کار رفته در سیال لرد [۹۹].

جدول ۲- یک نمونه از ویژگی‌های سیال استفاده شده در دمپر [۲].

ویژگی	بازه/ مقدار
رنگ	خاکستری تیره
کد سیال مگنتورئولوژیک	MRF-140CG
سیال پایه	هیدروکربن
گرانروی (Pa.s @ 40°C)	0.0280±0.070
دانسیته (g.cm ⁻³)	3.54 تا 3.74
محتوای جامد برحسب درصد وزنی	85.44
نقطه اشتعال	>150
دمای عملکردی (°C)	130 تا -40

جدول ۳- ویژگی‌های عمومی سیال تجاری لرد MRF 132 ED [۹۹].

ویژگی	مقدار/ بازه‌ی
شکل ظاهری	مایع خاکستری تیره
گرانروی (Pa.s @ 40°C)	0.112 ± 0.02
دانسیته	2.95-3.15 g.cm ³
درصد وزنی فاز جامد	۸۰/۹۸
نقطه اشتعال	بیشتر از ۱۵۰ درجه سلسیوس
دمای عملیاتی	از ۴۰- تا ۱۳۰ درجه سلسیوس

جدول ۴- ویژگی‌ها و مقدار مغناطیس اشباع درجه‌های گوناگون کربونیل ایرون.

نوع درجه کربونیل ایرون	دانسیته (g/cm)	اندازه متوسط ذره‌ها (میکرومتر)	پوشش	مقدار مغناطیس اشباع (emu/g)	مرجع
CC	۸	۴.۵	0.1 % SiO ₂	۲۱۰	[۱۱۶]
CM	۷.۸۶	۹	بدون پوشش	۲۰۰	[۱۱۷]
HQ	۷.۸۶	۲	بدون پوشش	-	[۱۱۸]
HS	۷.۸۶	۲.۵	بدون پوشش	۱۳۹	[۱۱۹]

بازگشت‌ناپذیر سوسپانسیون می‌شود و در نتیجه اثر مگنتورئولوژیک تضعیف می‌شود. عملیات فرآوری سطحی از جمله روش‌هایی است که برای افزایش عمر مفید سیال‌های مگنتورئولوژیک مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است [۹۸]. خوردگی^(۱) یکی دیگر از مشکل‌هایی است که ناشی از اصطکاک تماسی ذره‌ها در حرکت با تجهیز ایجاد شده و کاربرد گسترده این سیال‌ها را محدود کرده است. و باعث خوردگی بالا در تجهیزات هیدرولیکی هوشمند می‌شود [۱۲۲]. خوردگی باعث سفت شدن^(۲) بازگشت‌ناپذیر سوسپانسیون شده و عملکرد سیال‌های مگنتورئولوژیک را کاهش می‌دهد. در نتیجه برای افزایش عمر مفید سیال‌های مگنتورئولوژیک، توجه به فرایندهای اصلاح سطح ذره‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۹۸، ۱۲۳]. از طرف دیگر، در نظر گرفتن اکسید شدن ذره‌ها به علت اثر آن بر کاهش اشباع مغناطیسی و در نتیجه کاهش اثر مگنتورئولوژیک، اهمیت بالایی دارد [۱۲۴].

مشکل خوردگی ذره‌های کربونیل آهن زمانی که به عنوان سیال پولیش‌کاری استفاده می‌شود را می‌توان تا حدی با استفاده از

مورد بررسی قرار دادند و متوجه شدند که افزودن ۱ درصد وزنی اورگانوکی موجب بهبود پایداری و تسهیل توزیع دوباره ذره‌ها در سوسپانسیون می‌شود. در یک پژوهش همانند، لیم و همکاران [۱۲۱] از نانوذره‌های اورگانوکلاسی برای پایداری سوسپانسیونی از ذره‌های آهن کربونیل استفاده کردند. مشاهده‌های آن‌ها نشان داد که افزودن اورگانوکی بدون تغییر چشمگیر در اثر مگنتورئولوژیک موجب بهبود پایداری سوسپانسیون می‌شود. برای بررسی ویژگی‌های ذره‌های به کاررفته در سنتز سیال مگنتورئولوژیک می‌توان از آنالیزهای SEM، XRD، VSM، DLS و BET استفاده کرد.

نبود ساینده‌گی و خوردگی

ساینده‌گی یکی دیگر از مشکل‌هایی است که به علت اصطکاک ذره‌ها به یکدیگر در زمان حرکت ایجاد شده و کاربرد سیال‌های مگنتورئولوژیک را محدود کرده است. ذره‌های آهن کربونیل، ساختاری پیاپی مانند دارند؛ در نتیجه به سادگی در اثر اصطکاک و یا شوک، دچار تغییر ساختار می‌شوند. این ساینده‌گی منجر به غلیظ شدن

(1) Erosion

(2) Thickening

تغییر آرایش داده و باعث تغییر ویژگی‌های رئولوژی این سیال می‌شود. بیش‌تر کاربردهای سیال‌های مگنتورئولوژیک در صنعت ساختمان (ضد زلزله کردن ساختمان، کابل‌های نگه‌دارنده اجسام و شیرهای هوشمند)، در صنعت خودرو (سامانه تعلیق، کلاچ و ترمز، صندلی و کمربند ایمنی)، در صنعت پزشکی (زانوبند ارتوپدی، آتل‌بندی، ربات جراحی و کفش دومیدانی) و در صنایع دیگر (جذب‌کننده شوک، حسگرها، سامانه آب‌بندی، اریفیس‌ها و پولیش‌کاری) است. دمپرهای مگنتورئولوژیک، یکی از دستگاه‌های مورد استفاده در کاهش نوسان‌های به‌صورت هوشمند است. چنین دمپری، یک دستگاه کنترلی نیمه فعال می‌باشد که توانایی تولید نیرویی مطابق با جریان الکتریکی اعمال شده را دارا می‌باشد.

با توجه به بیش‌تر پژوهش‌های انجام شده، یک سیال مگنتورئولوژیک خوب و کارآمد، سیالی است که دارای گرانشی پایین در نبود میدان مغناطیسی باشد و این سیال باید دارای پایداری بالا و اثر مگنتورئولوژیک قوی باشد. درحالی‌که برای کاربردهای صنعتی این سیال‌ها مانند دمپرهای مگنتورئولوژیک افزون بر موردهای یادشده پارامترهای دیگری مانند پایداری در چرخه‌های متوالی کارکرد، قابلیت عملکرد در دماهای گوناگون، زمان پاسخ‌دهی مناسب، عدم سایندگی سیال و بسیاری پارامترهای دیگری باید در نظر گرفته شود.

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های سیال مگنتورئولوژیک برای کاربرد در سامانه تعلیق خودرو، دوام و پایداری آن در چرخه‌های متوالی عملکرد است. در بیش‌تر سیال‌های مگنتورئولوژیک در اثر استفاده چندباره، ذره‌های سنگین مغناطیس‌پذیر ته‌نشین شده و کیک سختی را تشکیل می‌دهد به‌گونه‌ای که اختلاط مجدد این سیال در موردهایی امکان‌ناپذیر است. همچنین ممکن است بخش‌هایی از ذره‌های جداشده و رئولوژی سیال را به‌شدت تحت تأثیر قرار دهد. این امر باعث کاهش کارآمدی سیال و نیز افت شدید اثر مگنتورئولوژیک می‌شود. برای چیره شدن بر این مشکل باید مواد سازنده سیال مگنتورئولوژیک به‌گونه‌ای انتخاب شود که میزان جدایش لایه‌های اکسیدشده از سطح ذره‌ها کمینه شود و نیز پایداری سیال در سطح دلخواهی باشد.

یک سیال مگنتورئولوژیک مناسب برای استفاده در دمپرهای مگنتورئولوژیک بایستی گرانشی به نسبت پایینی در نبود میدان مغناطیسی داشته باشد. همچنین تنش برشی این سیال در حضور میدان مغناطیسی افزایش چشمگیری داشته باشد، به‌طوری‌که تنش تسلیم مناسبی در حد چند کیلوپاسکال در شدت‌های قوی میدان مغناطیسی

آب یون‌زدایی شده حل کرد ولی در صورت تغییر محیط سیال از خنثی به اسیدی این روش موثر نخواهد بود. ولی سرعت خوردگی ذره‌های کربونیل ایرون در روغن‌های هیدرولیکی را می‌توان با اعمال لایه‌های محافظ خوردگی گوناگون بر روی سطح ذره‌ها کاهش داد. سرعت خوردگی ذره‌های کربونیل ایرون را می‌توان با اعمال لایه‌های نازک محافظ خوردگی بر روی سطح ذره‌ها کاهش داد. این موضوع باید مورد توجه قرار بگیرد که اعمال لایه‌های محافظ خوردگی بر روی کربونیل ایرون باعث کاهش ویژگی مغناطیسی سیال مگنتورئولوژیک می‌شود. کاربرد این پوشش‌ها می‌تواند باعث بهبود پایداری، پخش پذیری و افزایش مقاومت خوردگی و اکسیداسیون می‌شود [۱۲۵]. فرمولاسیون سیال باید طوری باشد که باعث سایندگی و خوردگی تجهیز نشود. برای بررسی نبود سایندگی سیال از آزمون چهار گلوله بر اساس استاندارد ASTM D-2783 استفاده می‌شود.

زمان پاسخ‌دهی

عکس‌العمل سیال و زمان زنجیره شده سیال در حضور میدان و زمان برگشت‌پذیری را زمان پاسخ‌دهی می‌گویند. این زمان با توجه به پارامترهایی که توسط دستگاه مگنتورئومتر اندازه‌گیری می‌شود، قابل‌دستیابی است. در بیش‌تر کاربردهای سیال‌های مگنتورئولوژیک به‌ویژه دمپرهای مگنتورئولوژیک، سرعت پاسخ‌دهی سیال به میدان مغناطیسی اعمال‌شده، از اهمیت بالایی برخوردار است. در مورد سامانه‌های آزمایشگاهی به‌طور معمول این زمان با در نظر گرفتن زمان جابه‌جایی پیستون محاسبه می‌شود [۵۴]. اگر مدار الکتریکی مولد میدان مغناطیسی بهینه‌شده باشد، تنش تسلیم سیال مگنتورئولوژیک در حدود چند میلی‌ثانیه دیده می‌شود. در بیش‌تر کاربردهای این سیال‌ها، زمان پاسخ‌دهی سیال از اهمیت بالایی برخوردار است. این زمان بسته به نوع طراحی مدار مغناطیسی در حدود ۱۰ تا ۲۰ میلی‌ثانیه است؛ بنابراین، سیال مگنتورئولوژیک یکی از سریع‌ترین اجزای الکترومکانیکی برای کاربردهای مکانیکی است [۱۲۶].

نتیجه‌گیری

سیال‌های مگنتورئولوژیک از سه بخش شامل: سیال پایه، ذره‌های فلزی و مواد افزودنی تشکیل شده است. ذره‌های فلزی در سیال پایه پخش شده است. مواد افزودنی، موادی هستند که می‌توانند مشکل‌هایی مانند ته‌نشینی، خوردگی و ... را در این سیال‌ها برطرف کنند. با ایجاد محرک میدان مغناطیسی ذره‌های مغناطیسی پراکنده در این سیال

نسبت به میدان‌های مغناطیسی قوی نیز عکس‌العمل مناسب را نشان دهد. میزان مغناطیس باقی‌مانده نیز فاکتور مهم دیگری است که باید تا حدودی کم باشد که سرعت و میزان بازگشت‌پذیری سیال به حالت اولیه خود را تحت تأثیر قرار ندهد. از سوی دیگر، با توجه به عملکرد خودرو در فصل‌های گوناگون سال، بایستی سیال مگنتورئولوژیک قابلیت عملکرد در بازه دمایی بسیار گسترده‌ای را دارا باشد و ویژگی‌های رئولوژیکی آن تا حد امکان تحت تأثیر تغییرهای دمایی قرار نگیرد.

از خود نشان دهد. از سوی دیگر این سیال باید از نظر دینامیکی سرعت پاسخ‌دهی بسیار بالایی داشته باشد و به سرعت نسبت به تغییرهای شدت میدان مغناطیسی پاسخ دهد و با سرعت به حالت اولیه خود برگردد.

افزون بر این، سیال مگنتورئولوژیک به کاررفته در سامانه تعلیق خودرو باید از یک سیال پایه روغنی استفاده کند تا میزان خوردگی و زنگ‌زدگی قطعه‌ها کمینه شود و ذره‌های سازنده سیال باید به گونه‌ای انتخاب شوند که میزان سایش به کمترین مقدار خود برسد.

همچنین باید نوع، اندازه و شکل ذره‌های مغناطیس‌پذیر جوابگوی میزان اثر مگنتورئولوژیک موردنیاز باشد. از سوی دیگر باید مغناطیس اشباع این ذره‌ها به اندازه کافی بالا باشد که بتواند

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸، ۲، ۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸، ۵، ۱۴

مراجع

- [1] Wereley N., *Magnetorheology: Advances and Applications*, ed. H-J Schneider and M Shahinpoor (UK: RSC) (2013).
- [2] Olabi A.G., Grunwald A., *Design and Application of Magneto-Rheological Fluid*, *Materials & Amp; Design*, **28**: 2658–2664 (2007).
- [3] Cheng H Bin, Wang J M, Zhang Q.J., Wereley N.M., *Preparation of Composite Magnetic Particles and Aqueous Magnetorheological Fluids*, *Smart Materials and Structures*, **18**: 85009 (2009).
- [4] Li J., Li Y., Li W., Samali B., *Development of Adaptive Seismic Isolators for Ultimate Seismic Protection of Civil Structures*, 86920H–86920H(2013).
- [5] Böse H., Rabindranath R., Ehrlich J., *Soft Magnetorheological Elastomers as New Actuators For Valves*, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **23**: 989–994(2012).
- [6] Sahin H., Gordaninejad F., Wang X., Liu Y., *Response Time of Magnetorheological Fluids and Magnetorheological Valves Under Various Flow Conditions*, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **23**: 949–957(2012).
- [7] Butz T., von Stryk O., *Modelling and Simulation of Electro- and Magnetorheological Fluid Dampers*, *ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, **82**: 3–20 (2002).
- [8] Bica I., Liu Y.D., Choi H.J., *Physical Characteristics of Magnetorheological Suspensions and their Applications*, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **19**: 394–406 (2013).
- [9] Sarkar C., Hirani H., *Design of a Squeeze Film Magnetorheological Brake Considering Compression Enhanced Shear Yield Stress of Magnetorheological Fluid*, *Journal of Physics: Conference Series*, **412**: 12045 (2013).

- [10] Park E.J., Dilian Stoikov, Luis Falcao da Luz, Suleman A., [A Performance Evaluation of an Automotive Magnetorheological Brake Design with a Sliding Mode Controller](#), *Mechatronics*, **16**: 405–416 (2006).
- [11] Nikitzuk J., Weinberg B., Mavroidis C., [Control of Electro-Rheological Fluid Based Resistive Torque Elements for Use in Active Rehabilitation Devices](#), *Smart Materials and Structures*, **16**: 418- (2007).
- [12] Monaghan J.J., [Extrapolating B Splines for Interpolation](#), *Journal of Computational Physics*, **60**: 253–262 (1985).
- [13] Lanzetta M., Iagnemma K., [Gripping by Controllable Wet Adhesion Using a Magnetorheological Fluid](#), *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, **62**: 21–25 (2013).
- [14] Movassagh-Alanagh F., Bordbar Khiabani A., Salimkhani H., [Improvement in Magnetic and Microwave Absorption Properties of Nano-Fe₃O₄@CFs Composites Using a Modified Multi-Step EPD Process](#), *Applied Surface Science*, **420**: 726–739 (2017).
- [15] Tae-Heon Y., Hyuk-Jun K., Lee S.S., Jinung A., Jeong-Hoi K., Sang-Youn K., Dong-Soo K., ["Conceptual Design of Mniniature Tunable Stiffness Display Using MR Fluids"](#), *Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, 2009. TRANSDUCERS 2009. International* pp 897–899 (2009).
- [16] Sheng R., Flores G.A., Liu J., [In Vitro Investigation of a Novel Cancer Therapeutic Method Using Embolizing Properties of Magnetorheological Fluids](#), *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **194**: 167–175 (1999).
- [17] Grunwald A., Olabi A.G., [Design of Magneto-Rheological \(MR\) Valve](#), *Sensors and Actuators, A: Physical*, **148**: 211–223 (2008)
- [18] Bica I., Liu Y.D., Jin C.H., [Physical Characteristics of Magnetorheological Suspensions and their Applications](#), *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **19**:394–406 (2013).
- [19] Jha S., Jain V.K., [Rheological Characterization of Magnetorheological Polishing Fluid for MRAFF](#), *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **42**: 656–668 (2009).
- [20] Rabinow J, [The Magnetic Fluid Clutch](#), *American Institute of Electrical Engineers* **67** 1308–1315 (1948).
- [21] Bossis G., Volkova O., Laci S., Meunier A., ["Magnetorheology: Fluids, Structures and Rheology"](#), "Ferrofluids" vol 594, ed S Odenbach (Springer Berlin Heidelberg) pp 202–30 (2003).
- [22] Mazlan S.A., Olabi A.G., ["The Behaviour of Magnetorheological Fluids in Squeeze Mode"](#), Dublin City University (2008).
- [23] Mazlan S.A., Ekreem N.B., Olabi A.G., [An Investigation of the Behaviour of Magnetorheological Fluids in Compression Mode](#), *Journal of Materials Processing Technology* **201**: 780–785 (2008).

- [24] Jun J-B., Uhm S-Y., Ryu J-H., Suh K-D., [Synthesis and Characterization of Monodisperse Magnetic Composite Particles for Magnetorheological Fluid Materials](#), *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **260**: 157–164 (2005).
- [25] Sarkar C., Hirani H., [Synthesis and Characterization of nano-Copper-Powder Based Magnetorheological Fluids for Brake](#), *International Journal of Scientific Engineering and Technology*, **4**: 76–82 (2015).
- [26] Kumbhar B.K., Patil S.R., Sawant S.M., [Synthesis and Characterization of Magneto-Rheological \(MR\) Fluids for MR Brake Application](#), *Engineering Science and Technology, An International Journal*, **18**: 432–438 (2015).
- [27] Vicente J.de, Klingenberg D.J., Hidalgo-Alvarez R., [Magnetorheological Fluids: A Review](#), *Soft Matter*, **7**: 3701–3710 (2011).
- [28] Anon, [Viscoelastic Characterization of Semiconducting Dodecylbenzenesulfonic Acid Doped Polyaniline Electrorheological Suspensions](#), *Journal of Applied Polymer Science*, **79**: 108 (2011).
- [29] Wei B., Gong X., Jiang W., Qin L., Fan Y., [Study on the Properties of Magnetorheological Gel Based on Polyurethane](#), *Journal of Applied Polymer Science*, **118**: 2765–2771 (2010).
- [30] Rabbani Y., Ashtiani M., Hashemabadi S.H., [An Experimental Study on the Effects of Temperature and Magnetic Field Strength on the Magnetorheological Fluid Stability and MR Effect](#), *Soft Matter*, **11** (2015).
- [31] de Vicente J., Bossis G., Laci S., Guyot M., [Permeability Measurements in Cobalt Ferrite and Carbonyl Iron Powders and Suspensions](#), *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **251**: 100–108 (2002).
- [32] Jun J-B., Uhm S-Y., Ryu J-H., Suh K-D., [Synthesis and Characterization of Monodisperse Magnetic Composite Particles for Magnetorheological Fluid Materials](#), *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **260**: 157–164 (2005).
- [33] Wei J.H., Leng C.J., Zhang X.Z., Li W.H., Liu Z.Y., Shi J, [Synthesis and Magnetorheological Effect of Fe₃O₄-TiO₂ Nanocomposite](#), *Journal of Physics: Conference Series*, **149**: 012083 (2009).
- [34] Fang F.F., Choi H.J., Jhon M.S., [Magnetorheology of Soft Magnetic Carbonyl Iron Suspension With Single-Walled Carbon Nanotube Additive and Its Yield Stress Scaling Function](#), *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **351**:46–51 (2009).
- [35] Wang X., Gordaninejad F., [Study of Magnetorheological Fluids at High Shear Rates](#), *Rheologica Acta*, **45**: 899–908 (2006).
- [36] Ashtiani M., Hashemabadi S.H., Ghaffari A., [A Review on the Magnetorheological Fluid Preparation and Stabilization](#), *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **374**: 716–730 (2015).
- [37] Viota J.L., Delgado A.V., Arias J.L., Durán J.D.G., [Study of the Magnetorheological Response of Aqueous Magnetite Suspensions Stabilized by Acrylic Acid Polymers](#), *Journal of Colloid and Interface Science*, **324** 199–204 (2008).

- [38] Kim M.S., Liu Y.D., Park B.J., You C.-Y., Choi H J, [Carbonyl Iron Particles Dispersed in a Polymer Solution and their Rheological Characteristics Under Applied Magnetic Field](#), *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **18**: 664–667(2012)
- [39] Ashtiani M., Hashemabadi S.H., [An Experimental Study on the Effect of Fatty Acid Chain Length on the Magnetorheological Fluid Stabilization and Rheological Properties](#), *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **469**: 29–35 (2015).
- [40] Ashtiani M., Hashemabadi S.H., [The Effect of Nano-Silica and Nano-Magnetite on the Magnetorheological Fluid Stabilization and Magnetorheological Effect](#), *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, (2015)
- [41] Rabbani Y., Hajinajaf N., Tavakoli O., [An Experimental Study on Stability and Rheological Properties of Magnetorheological Fluid Using Iron Nanoparticle Core–Shell Structured by Cellulose](#), **11**: (2014).
- [42] Ashtiani M., Hashemabadi S.H., ["The Effect of Adding Nano-Silica and Nano-Magnetite on the Magnetorheological Fluids Stabilization and MR Effect"](#) *14th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions (ERMR2014)* (Granada, Spain) (2014).
- [43] Ashtiani M., Hashemabadi S.H., ["Experimental Study on Determination of Threshold limit of Adding Fumed-Silica Nanoparticles to Magnetorheological Fluid"](#), *14th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions (ERMR2014)*, Granada, Spain (2014).
- [44] Ashtiani M., Hashemabadi S.H., Shirvani M., ["Experimental Study of Stearic Acid Effect on Stabilization of Magnetorheological Fluids \(MRFs\)"](#), *The 8th International Chemical Engineering Congress & Exhibition (IChEC 2014)*, Kish, Iran (2014).
- [45] Rabbani Y., Shirvani M., Hashemabadi S.H., Keshavarz M., [Application of Artificial Neural Networks and Support Vector Regression Modeling In Prediction of Magnetorheological Fluid Rheometry](#), *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **520**: (2017).
- [46] Ghaffari A., Hashemabadi S.H., Ashtiani M., [A Review on the Simulation and Modeling of Magnetorheological Fluids](#), *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **26**:881–904 (2015).
- [47] Kiyumarsi E., Jalali A., Norouzi M., Ghatee M., [An Experimental Investigation of Iron Based Magnetorheological Fluid Stability and Rheology](#), *Modares Mechanical Engineering*, **16(2)**: 301-308 (2016).
- [48] Shokrollahi H., [The Effect of the Volume Fraction and Viscosity on the Compression and Tension Behavior of the Cobalt-Ferrite Magneto-Rheological Fluids](#), *Engineering Science and Technology, An International Journal*, **19**: 604–609 (2016).
- [49] Wahid S.A., Ismail I., Aid S., Rahim M.S.A., ["Magneto-Rheological Defects and Failures: A Review"](#), *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **14**: 12101 (2016).

- [50] Goncalves F.D., "Characterizing the Behavior of Magnetorheological Fluids at High Velocities and High Shear Rates", Blacksburg, Virginia (2005).
- [51] Bandyopadhyay J., "QS-9000 Handbook: A Guide to Registration and Audit", Taylor & Francis (1996).
- [52] Bandyopadhyay J.K., Quality Systems Requirements In Supply Chain Management: The Implementation of QS-9000 by United States Automakers, *International Journal of Management*, **18**: - (2001).
- [53] Chooi W.W., Oyadiji S.O., Design, Modelling and Testing of Magnetorheological (MR) Dampers Using Analytical Flow Solutions, *Computers & Structures*, **86**: 473–482 (2008).
- [54] Zhu X., Jing X., Cheng L., Magnetorheological Fluid Dampers: A Review on Structure Design and Analysis, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **23**: 839–873 (2012).
- [55] Kanarachos S., Savitski D., Lagaros N., Fitzpatrick M.E., Automotive Magnetorheological Dampers: Modelling and Parameter Identification Using Contrast-Based Fruit Fly Optimisation, *Soft Computing*, **22**: 8131–8149 (2018).
- [56] Chen C., Chan Y.S., Zou L., Liao W.H., Self-Powered Magnetorheological Dampers for Motorcycle Suspensions, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, **232**: 921–935 (2018).
- [57] Hong S.R., Wereley N.M., Choi Y.T., Choi S.B., Analytical and Experimental Validation of a Nondimensional Bingham Model for Mixed-Mode Magnetorheological Dampers, *Journal of Sound and Vibration*, **312**: 399–417 (2008).
- [58] Cesmeçi S., Gordaninejad F., Ryan K.L., Eltahawy W., A Liquid Spring–Magnetorheological Damper System Under Combined Axial and Shear Loading for Three-Dimensional Seismic Isolation of Structures, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **29**: 3517–3532 (2018).
- [59] Nguyen T., Bapat S., Wang X., "Modelling of a Magnetorheological Fluid Knee in a Prosthetic Leg", *Proceedings of the ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition* p V04AT05A022 (2016).
- [60] Ulasyar A., Lazoglu I., Design and Analysis of a New Magneto Rheological Damper for Washing Machine, *Journal of Mechanical Science and Technology*, **32**: 1549–1561 (2018).
- [61] Wang Z., Chen Z., Gao H., Wang H., Development of a Self-Powered Magnetorheological Damper System for Cable Vibration Control, *Applied Sciences* **8**:118- (2018).
- [62] Park E.J., da Luz L.F., Suleman A., Multidisciplinary design optimization of an automotive magnetorheological brake design *Computers & Structures*, **86**: 207–216 (2008).
- [63] Peelamedu S.M., Ciocanel C., Naganathan N.G., Impact Detection for Smart Automotive Damage Mitigation Systems, *Smart Materials and Structures*, **13**: 990- (2004).
- [64] Costa E., Branco P.J.C., 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* **155**: 82–88 (2009).

- [65] El Wahed A.K., Sproston J.L., Schleyer G.K., [Electrorheological and Magnetorheological Fluids in Blast Resistant Design Applications](#), *Materials and Design* **23**:391–404 (2002).
- [66] Muhammad A., Yao X., Deng Z., [Review of Magnetorheological \(MR\) Fluids and Its Applications in Vibration Control](#), *Journal of Marine Science and Application*, **5**:17–29 (2006).
- [67] Ahmadian M., Norris J.A., [Experimental Analysis of Magnetorheological Dampers When Subjected to Impact and Shock Loading](#), *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, **13**: 1978–1985 (2008).
- [68] Sun S., Yang J., Li W., Deng H., Du H., Alici G., [Development of a Novel Variable Stiffness and Damping Magnetorheological Fluid Damper](#), *Smart Materials and Structures*, **24**: 85021 (2015).
- [69] Guan X., Ru Y., Huang Y., [A Novel Velocity Self-Sensing Magnetorheological Damper: Design, Fabricate, and Experimental Analysis](#), *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **30**: 497–505 (2019).
- [70] Zamani A-A., Tavakoli S., Etedali S., Sadeghi J., [Adaptive Fractional Order Fuzzy Proportional–Integral–Derivative Control of Smart Base-Isolated Structures Equipped with Magnetorheological Dampers](#), *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **29**: 830–844 (2018).
- [71] He M., Zheng Z., He B., Zhu H., [Optimising Intelligent Control of a Highway Bridge with Magnetorheological Dampers](#), *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, 1–8 (2018)
- [72] Rahman M., Ong Z.C., Julai S., Ferdaus M.M., Ahamed R., [A Review of Advances in Magnetorheological Dampers: their Design Optimization and Applications](#), *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, **18**: 991–1010 (2017).
- [73] Bica I, [Damper with Magnetorheological Suspension](#), *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **241**: 196–200 (2002).
- [74] Milecki A., Hauke M., [Application of Magnetorheological Fluid in Industrial Shock Absorbers](#), *Mechanical Systems and Signal Processing*, **28**: 528–541 (2012).
- [75] Dyke S.J., Spencer Jr B., [Design of a Novel Magnetorheological Damper with Internal Pressure Control](#), *2nd International Workshop on Structural Control*, **32**: 13–23 (2015).
- [76] Parlak Z., Engin T., Çallı İ., [Optimal Design of MR Damper Via Finite Element Analyses of Fluid Dynamic and Magnetic Field](#), *Mechatronics*, **22**: 890–903 (2012).
- [77] Bai X.X., Cai F.L., Chen P., [Resistor-Capacitor \(RC\) Operator-Based Hysteresis Model for Magnetorheological \(MR\) Dampers](#), *Mechanical Systems and Signal Processing*, **117**: 157–69 (2019).
- [78] Duchanoy C.A., Moreno-Armendáriz M.A., Moreno-Torres J.C., Cruz-Villar C.A., [A Deep Neural Network Based Model for a Kind of Magnetorheological Dampers](#), *Sensors (Switzerland)*, **19**: 1–18 (2019).

- [79] Hu G., Liu H., Duan J., Yu L., [Damping Performance Analysis of Magnetorheological Damper With Serial-Type Flow Channels](#), *Advances in Mechanical Engineering*, **11**: 1–12 (2019).
- [80] Macháček O., Kubík M., Strecker Z., Roupec J., Mazůrek I., [Design of a Frictionless Magnetorheological Damper with a High Dynamic Force Range](#), *Advances in Mechanical Engineering*, **11**: 1–8 (2019).
- [81] Rabbani Y., Ashtiani M., Hashemabadi S.H., [An experimental Study on the Effects of Temperature and Magnetic Field Strength on the Magnetorheological Fluid Stability and MR Effect](#), *Soft Matter*, **11**: (2015).
- [82] Roszkowski A., Bogdan M., Skoczynski W., Marek B., [Testing Viscosity Of MR Fluid in Magnetic Field](#), *Measurement Science Review*, **8**: 58–60 (2008).
- [83] Ulicny J.C., Balogh M.P., Potter N.M., Waldo R.A., [Magnetorheological Fluid Durability Test-Iron Analysis](#), *Materials Science and Engineering A*, **443**:16–24 (2007).
- [84] Carlson J.D., [What Makes a Good MR Fluid?](#) *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **13**:431–435 (2002).
- [85] Roupec J., Mazůrek I., Strecker Z., Klapka M., [The Behavior of the MR Fluid During Durability Test](#), *Journal of Physics: Conference Series* **412** (2013)
- [86] Sunkara S.R., Root T.W., Ulicny J.C., Klingenberg D.J., [Iron Oxidation and its Impact on MR Behavior](#), *Journal of Physics: Conference Series*, **149**: 012081 (2009).
- [87] Rosenfeld N., Wereley N.M., [Behavior of Magnetorheological Fluids Utilizing Nanopowder Iron](#), *International Journal of Modern Physics B*, **16**: 2392–2398 (2002).
- [88] Sedlacik M., Pavlinek V., Vyroubal R., Svrčinova P., Filip P., Stenicka M., ["Dimorphic Magnetorheological Fluid with Improved Oxidation and Chemical Stability Under Oscillatory Shear"](#), *13th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions* (2012).
- [89] Ulicny MI), Smith, Anthony L. (Troy, MI), Golden, Mark A. (Washington, MI), Mcdermott, Brian L. (Walled Lake, MI), Chapaton, Thomas J. (Sterling Heights, MI) J C (Oxford.), ["Magnetorheological Fluids with an Additive Package"](#), (2004).
- [90] López-López M., Kuzhir P., Bossis G., Mingalyov P., [Preparation of Well-Dispersed Magnetorheological Fluids and Effect of Dispersion on Their Magnetorheological Properties](#), *Rheologica Acta*, **47**: 787–796 (2008).
- [91] Rabbani Y., Ashtiani M., Hashemabadi S.H., [An Experimental Study on The Effects of Temperature and Magnetic Field Strength on the Magnetorheological Fluid Stability and MR Effect](#), *Soft Matter*, **11**: 4453–4460 (2015).
- [92] Kim J.E., Choi H.J., [Magnetic Carbonyl Iron Particle Dispersed in Viscoelastic Fluid and Its Magnetorheological Property](#) *Magnetics*, *IEEE Transactions on*, **47**: 3173–3176 (2011).
- [93] Balmforth N.J., Frigaard I.A., Ovarlez G., [Yielding to Stress: Recent Developments in Viscoplastic Fluid Mechanics](#), *Annual Review of Fluid Mechanics*, **46**: 121–146 (2014).

- [94] Hojjat Y., Kakavand K., Ghodsi M., Maddah A.A., [Study on the Transient State Behavior of Magneto Rheological Fluid in Magnetic Coupling](#), *Modares Mechanical Engineering*, **14**:156–62 (2014).
- [95] Piao S.H., Bhaumik M., Maity A., Choi H.J., [Polyaniline/Fe Composite Nanofiber Added Softmagnetic Carbonyl Iron Microsphere Suspension and its Magnetorheology](#), *Journal of Materials Chemistry C*, **3**: 1861–1868 (2015).
- [96] Vékás L., Bica D., Potencz I., Gheorghe D., Bălău O., Raça M., [Concentration and Composition Dependence of Rheological and Magnetorheological Properties of Some Magnetic Fluids, "Adsorption and Nanostructure" vol 117, ed I Dékány \(Springer Berlin Heidelberg\) pp 104–109 \(2002\).](#)
- [97] Hato M.J., Choi H.J., Sim H.H., Park B.O., Ray S.S., [Magnetic Carbonyl Iron Suspension with Organoclay Additive and Its Magnetorheological Properties](#), *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **377**: 103–109 (2011).
- [98] Claracq J., Sarrazin J., Montfort J-P., [Viscoelastic Properties of Magnetorheological Fluids](#), *Rheologica Acta*, **43**: 38–49 (2004).
- [99] Janet., [Lord MR Flid 122 ED](#), ed L Corporation(2006).
- [100] López-López M.T., Kuzhir P., Laciš S., Bossis G., González-Caballero F., Durán J.D.G., [Magnetorheology for Suspensions of Solid Particles Dispersed in Ferrofluids](#), *Journal of Physics: Condensed Matter*, **18**: S2803 (2006).
- [101] Bingham E.C., ["An Investigation of the Laws of Plastic Flow, by Eugene C. Bingham"](#), Washington: Government Printing Office (1916)
- [102] Herschel W., Bulkley R., [Konsistenzmessungen von Gummi-Benzollösungen](#), *Kolloid-Zeitschrift*, **39**: 291–300 (1926).
- [103] Mitsoulis E., [Flows of Viscoplastic Materials: Models And Computations](#), *Rheology Reviews*, 135–78 (2007)
- [104] Goldasz J., Sapinski B., [Nondimensional Characterization of Flow-Mode Magnetorheological/Electrorheological Fluid Dampers](#), *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **23**: 1545–1562 (2012).
- [105] Papanastasiou T.C., [Flows of Materials with Yield](#), *Journal of Rheology*, **31**: 385–405 (1987).
- [106] Farjoud A., Vahdati N., Yap Fook Fah., [Mathematical Model of Drum-Type MR Brakes Using Herschel-Bulkley Shear Model](#), *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **19**:565–572 (2008).
- [107] Song X., [Decomposition Approach to Model Smart Suspension Struts](#), *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, **13**: 1695–1705 (2008).
- [108] Arief I., Sahoo R., Mukhopadhyay P.K., [Effect of temperature on Steady Shear Magnetorheology of CoNi Microcluster-Based MR Fluids](#), *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **412**: 194–200 (2016).

- [109] Zubieta M., Elejabarrieta M., Bou-Ali M., [A Numerical Method for Determining the Shear Stress of Magnetorheological Fluids Using the Parallel-Plate Measuring System](#), *Rheologica Acta*, **48**: 89–95 (2009).
- [110] Carlson D., "Magnetorheological Fluids" in Smart Materials" ed M Schwartz, CRC Press (2009).
- [111] Choi H.J., Jang I.B., Lee J.Y., Pich A., Bhattacharya S., Adler H.J., [Magnetorheology of Synthesized Core-Shell Structured Nanoparticle Magnetics](#), *IEEE Transactions on*, **41**: 3448–50 (2005).
- [112] Chaudhuri A., Wereley N.M., Kotha S., Radhakrishnan R., Sudarshan T.S., [Viscometric Characterization of Cobalt Nanoparticle-Based Magnetorheological Fluids Using Genetic Algorithms](#), *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **293**: 206–214 (2005).
- [113] Kagarise C.D., [Rheological Characterization and Modeling of Micro- and Nano-Scale Particle suspension](#) (The Ohio State University)(2009).
- [114] Wang G., Ma Y., Dong X., Tong Y., Zhang L., Mu J., Bai Y., Hou J., Che H., Zhang X., [Facile Synthesis And Magnetorheological Properties of Superparamagnetic CoFe₂O₄/GO Nanocomposites](#), *Applied Surface Science*, **357**:2131–2135 (2015).
- [115] Daimaru .T, Yamasaki A., Yanagisawa Y., [Effect of Surfactant Carbon Chain Length on Hydrate Formation Kinetics](#), *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **56**: 89–96 (2007).
- [116] Quan X., Chuah W., Seo Y., Choi H.J., [Core-Shell Structured Polystyrene Coated Carbonyl Iron Microspheres and their Magnetorheology](#), *IEEE Transactions on Magnetics*, **50**: - (2014).
- [117] Jang I.B., Kim H.B., Lee J.Y., You J.L., Choi H.J. Jhon M.S., [Role of Organic Coating on Carbonyl Iron Suspended Particles in Magnetorheological Fluids](#), *Journal of Applied Physics*, **97**: 8–11 (2005).
- [118] Ruiz López J.A., ["Squeeze Flow and Polydispersity Effects in Magnetorheology"](#), University of De Granada (2015),
- [119] Sedlacik M., Pavlinek V., Saha P., Svrčinova P., Filip P., ["Polymer Coated Carbonyl Iron Particles and their Magnetorheological Suspensions"](#), in "Recent Researches in Geography", Geology, Energy, Environment and Biomedicine, 289–93 (2011).
- [120] Hato M.J., Choi H.J., Sim H.H., Park B.O., Ray S.S., [Magnetic Carbonyl Iron Suspension with Organoclay Additive and its Magnetorheological Properties](#), *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **377**: 103–109 (2011).
- [121] Sung Taek L., Hyounng Jin C., Jhon M.S., [Magnetorheological Characterization of Carbonyl Iron-Organoclay Suspensions Magnetics](#), *IEEE Transactions* **41**: 3745–3747 (2005).
- [122] Rankin P.J., Horvath A.T., Klingenberg D.J., [Magnetorheology in Viscoplastic Media](#), *Rheologica Acta*, **38**: 471–477 (1999).
- [123] Shen R., Shafrir S N, Miao C., Wang M., Lambropoulos J.C., Jacobs S.D., Yang H., [Synthesis and corrosion study of zirconia-coated carbonyl iron particles](#), *Journal of Colloid and Interface Science* **342** 49–56(2010)

- [124] Mrlík M., Ilčíková M., Pavlínek V., Mosnáček J., Peer P., Filip P., [Improved Thermooxidation and Sedimentation Stability of Covalently-Coated Carbonyl Iron Particles with Cholesteryl Groups and Their Influence on Magnetorheology](#) *Journal of Colloid and Interface Science*, **396**:146–151 (2013).
- [125] Esmaeilzare A., Rezaei S.M., Ramezanzadeh B., [Corrosion and Magnetic Properties of Encapsulated Carbonyl Iron Particles in Aqueous Suspension by Inorganic Thin Films for Magnetorheological Finishing Application](#), *Applied Surface Science*, **436**: 1200–1212 (2018).
- [126] Genç S., Phulé P.P., [Rheological Properties of Magnetorheological Fluids](#), *Smart Materials and Structures*, **11**: 140 (2002).