

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده‌ی مهندسی مکانیک

گروه تبدیل انرژی

طراحی و ساخت دمپر هوشمند با روغن هیدرولیکی مگنتورئولوژیکال

دانشجو: صادق محمدی

استاد راهنما:

دکتر محمود نوروزی

استاد مشاور:

دکتر مجتبی قطعی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه‌ی کارشناسی ارشد

ماه و سال انتشار:

شهریور ۱۳۹۳



دانشگاه شهید بهشتی

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۶)

باسمه تعالی

شماره:

تاریخ:

ویرایش:

فرم صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) نتیجه ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای صادق محمدی رشته مکانیک گرایش تبدیل انرژی تحت عنوان طراحی و ساخت دمپر هوشمند با روغن هیدرولیکی مگنتورئولوژیکال که در تاریخ ۱۳۹۳/۶/۲۳ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

☐ مردود	☐ دفاع مجدد	☒ قبول (با درجه: بسیار خوب - امتیاز: ۱۸/۹۴)
--------------------------------	------------------------------------	---

۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

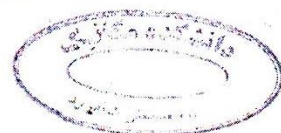
۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	دکتر محمود نوروزی	استادیار	
۲- استاد مشاور	دکتر مجتبی قطعی	استادیار	
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر علی خالقی	استادیار	
۴- استاد ممتحن	دکتر محسن نظری	استادیار	
۵- استاد ممتحن	دکتر علی جباری مقدم	استادیار	

رئیس دانشکده: محمد محسن شاه مردان

امضاء



تقدیم

این اثر تقدیم شد به تمام کسانی که در امور علمی بدون هیچ چشم‌داشتی به کمک و راهنمایی دیگران می‌پردازند.

تشکر و قدردانی

پروردگارا، سپاسگزارم که به من نعمت حیات عطا فرمودی تا لذت بندگی تو را بچشم. بارالها، تو مرا از تاریکی‌های نفسم نجات ده و با نور خود روشن‌گر میسر باش.

با تشکر از پدر بزرگوار و مادر عزیزم و همسر مهربانم که با حمایت‌های معنوی و مادی‌شان زمینه‌ی رشد و تحصیل را برای اینجانب فراهم آوردند. قطعاً گذشتن از این مسیر پر فراز و نشیب تنها بخش کوچکی از حمایت‌های کانون گرم خانواده‌ی عزیزم می‌باشد. از صمیم قلبم از تمامی اعضای خانواده‌ام سپاسگزارم.

از استاد راهنمایم جناب آقای دکتر نوروزی و همچنین استاد مشاورم جناب آقای دکتر قطعی سپاسگزارم. قطعاً اینجانب با راهنمایی‌های ایشان در این زمینه توانسته‌ام گام بردارم و به پیش بروم. در انتها از کلیه‌ی دوستان به ویژه مهندس داوری سپاسگزارم که در این مدت کمک‌های شایانی به اینجانب داشته‌اند.

صادق محمدی

تعهدنامه

اینجانب صادق محمدی دانشجوی دوره‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی مکانیک-گرایش تبدیل انرژی دانشکده‌ی مهندسی مکانیک دانشگاه شاهرود نویسنده‌ی پایان‌نامه‌ی طراحی و ساخت دمپر هوشمند با روغن هیدرولیکی مگنتورئولوژیکال، تحت راهنمایی دکتر محمود نوروزی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.

- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.

- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.

- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه شاهرود» و یا «Shahrood University» به چاپ خواهد رسید.

- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.

- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.

- در کلیه‌ی مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه‌ی اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه‌ی حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

هدف از این پژوهش طراحی و ساخت دمپر هوشمند با روغن هیدرولیکی مگنتورئولوژیکال می-باشد. در این پژوهش نخست سیال مگنتورئولوژیکال مورد نیاز برای دمپر مگنتورئولوژیکال ساخته شده و تست ته‌نشینی و تست رئومتری در دو مد برشی و نوسانی روی آن انجام می‌گیرد. از مدل کاریو-یاسودا برای مدل‌سازی نتایج بدست آمده از تست رئومتری استفاده شده است؛ همچنین نتایج تست رئومتری جهت بدست آوردن ضرایب مدل تغییر یافته‌ی ماکسول بکار گرفته شده‌اند. در گام بعدی به کمک نتایج تست رئومتری سیال و مشخصات کم‌فتر جلو خودروی تیب، دمپر مگنتورئولوژیکال طراحی شده و پارامترهای هندسی، هیدرولیکی آن مستخرج می‌گردد. جهت یافتن پارامترهای مغناطیسی مورد نیاز جهت ساخت دمپر از نرم‌افزار شبیه‌سازی Ansys Maxwell کمک گرفته شده است. در مرحله‌ی ساخت دمپر نقشه‌های دو بعدی تمامی قطعات به کمک نرم افزار SolidWorks(2013) تهیه شده و با دقت زیاد هر کدام از قطعات ساخته می‌شوند. تست‌های نیرویی دمپر مگنتورئولوژیکال با همکاری شرکت ایندامین سایپا در دو سرعت 0.05 m/s و 0.1 m/s برای سه حالت: بدون اعمال جریان الکتریکی، با اعمال جریان ۳ آمپر به سیم‌پیچ دمپر و جریان ۴ آمپر صورت می‌پذیرد. نتایج این تست‌ها نشان می‌دهد که دمپر مگنتورئولوژیکال ساخته شده نیروی میرایی را نسبت به کم‌فتر معمولی خودروی تیب در سرعت 0.05 m/s برای جریان ۳ آمپر به میزان ۲۶٪ و در جریان ۴ آمپر به میزان ۷۰٪ و در سرعت 0.1 m/s برای جریان ۳ آمپر به میزان ۹۳٪ و در جریان ۴ آمپر به میزان ۱۵۰٪ افزایش می‌دهد.

واژگان کلیدی: سیال مگنتورئولوژیکال، مدل کاریو-یاسودا، مدل تغییر یافته‌ی ماکسول، دمپر

مگنتورئولوژیکال

مطالب

فصل ۱ (مقدمه).....	۱
۱-۱ پیش‌گفتار.....	۲
۲-۱ سیالات هوشمند.....	۲
۳-۱ کاربردهای سیالات MR.....	۶
۴-۱ چالشهای فناوری MR.....	۷
۵-۱ منشأ مغناطیسی.....	۷
۶-۱ مواد مغناطیسی.....	۱۱
۱-۶-۱ حلقه پسماند.....	۱۱
۷-۱ دمپر MR.....	۱۳
۱-۷-۱ انواع دمپرهای MR.....	۱۴
۸-۱ عملکرد دمپر MR.....	۱۶
۹-۱ پیشینه پژوهش.....	۱۸
۱۰-۱ معرفی تحقیق حاضر.....	۲۴
۱۱-۱ ضرورت تحقیق.....	۲۴
۱۲-۱ نوآوریهای تحقیق.....	۲۵
فصل ۲ (طراحی و ساخت).....	۲۷
۱-۲ پیش‌گفتار.....	۲۸
۲-۲ ترکیبات سیال MR.....	۲۸

۲۸	 ۱-۲-۲ فاز پراکنده فعال مغناطیسی
۲۹	 ۲-۲-۲ عامل پایدارکننده
۳۱	 ۳-۲-۲ سیال حامل
۳۱	 ۳-۲ ساخت سیال MR
۳۳	 ۴-۲ ساخت دمپر
۳۳	 ۱-۴-۲ طراحی هندسه دمپر MR
۳۵	 ۱-۱-۴-۲ تعیین پهنای شیار و طراحی هیدرولیکی
۳۵	 ۱-۱-۱-۴-۲ نیروی قابل کنترل و محدوده دینامیکی
۳۷	 ۲-۴-۲ طراحی مدار مغناطیسی
۳۷	 ۱-۲-۴-۲ شبیه سازی میدان مغناطیسی به کمک نرم افزار ANSYS Maxwell
۳۷	 ۱-۱-۲-۴-۲ آشنایی با ANSYS Maxwell
۴۶	 ۵-۲ نقشه ها
۵۵	 فصل ۳ (نتایج آزمایشگاهی)
۵۶	 ۱-۳ تست ته نشینی
۵۷	 ۲-۳ دستگاه تعیین خواص سیال MR
۵۹	 ۳-۳ نتایج تست های رئومتری
۵۹	 ۱-۳-۳ مد برشی
۶۱	 ۲-۳-۳ مد نوسانی
۶۴	 ۴-۳ مدل سازی رفتار سیال MR

۶۴	 ۱-۴-۳ مدل سازی ویسکوزیته
۶۵	 ۲-۴-۳ مدل سازی رفتار سیال در مد نوسانی
۶۶	 ۵-۳ نتایج تست های نیرویی دمپر
۷۱	 فصل ۴ (نتیجه گیری و پیشنهادات)
۷۲	 ۱-۴ پیشگفتار
۷۲	 ۲-۴ جمع بندی نتایج
۷۳	 ۳-۴ پیشنهادات
۷۴	 پیوست ها
۸۹	 منابع

شکل‌ها

- شکل ۱-۱ نحوه تشکیل زنجیره ذرات مغناطیسی در حضور میدان مغناطیسی ۴
- شکل ۲-۱ دمپر MR (۱) میلی‌ستون (۲) پیستون (۳) کوئل مغناطیسی (۴) سیلندر (۵) سیم تغذیه جریان ۷
- شکل ۳-۱ چگالی شار مغناطیسی بر حسب شدت میدان مغناطیسی ۱۲
- شکل ۴-۱ حلقه پسماند برای مواد مغناطیسی نرم و سخت ۱۳
- شکل ۵-۱ دمپر MR تک مخزنه ۱۴
- شکل ۶-۱ دمپر MR دو مخزنه ۱۵
- شکل ۷-۱ دمپر MR دو سر متحرک ۱۶
- شکل ۸-۱ نمودار نیرو بر حسب سرعت دمپر خطی ۱۷
- شکل ۹-۱ نمودار نیرو بر حسب سرعت دمپر دوخطی و نامتقارن ۱۷
- شکل ۱۰-۱ نمودار نیرو بر حسب سرعت دمپر ایده آل ۱۸
- شکل ۱-۲ فرآیند تولید پودر آهن کربونیل ۲۸
- شکل ۲-۲ تصویر SEM از پودر آهن کربونیل ۲۹
- شکل ۳-۲ دسته بندی فعال کننده های سطح ۳۰
- شکل ۴-۲ آسیاب گلوله ای ۳۲
- شکل ۵-۲ فلوچارت ساخت سیال MR ۳۲
- شکل ۶-۲ تنش تسلیم بر حسب میدان مغناطیسی برای سیال MR ۳۴
- شکل ۷-۲ ویسکوزیته بر حسب نرخ کرنش برشی برای سیال MR ۳۵
- شکل ۸-۲ محدوده دینامیکی بر حسب پهنای شیار عبور سیال ۳۷
- شکل ۹-۲ نمای کلی از محیط نرم افزار ANSYS Maxwell ۳۸
- شکل ۱۰-۲ پانل اختصاصی material ۳۹

- شکل ۱۱-۲ چگالی شار مغناطیسی برای ضخامت شیار ۱ میلیمتر (a) کانتور چگالی شار مغناطیسی پیستون (b) کانتور چگالی شار مغناطیسی بین دو سیم پیچ (c) چگالی شار مغناطیسی برحسب فاصله از هسته بین دو سیم پیچ ۴۱
- شکل ۱۲-۲ چگالی شار مغناطیسی برای ضخامت شیار ۱/۵ میلیمتر (a) کانتور چگالی شار مغناطیسی پیستون (b) کانتور چگالی شار مغناطیسی بین دو سیم پیچ (c) چگالی شار مغناطیسی برحسب فاصله از هسته بین دو سیم پیچ ۴۳
- شکل ۱۳-۲ چگالی شار مغناطیسی برای ضخامت شیار ۲ میلیمتر (a) کانتور چگالی شار مغناطیسی پیستون (b) کانتور چگالی شار مغناطیسی بین دو سیم پیچ (c) چگالی شار مغناطیسی برحسب فاصله از هسته بین دو سیم پیچ ۴۴
- شکل ۱۴-۲ نمای انفجاری از دمپر MR ۴۷
- شکل ۱۵-۲ مهره انتهایی (قطعه شماره ۱) ۴۸
- شکل ۱۶-۲ هسته پیستون (قطعه شماره ۲) ۴۹
- شکل ۱۷-۲ میل پیستون (قطعه شماره ۳) ۵۰
- شکل ۱۸-۲ نگهدارنده (قطعه شماره ۴) ۵۱
- شکل ۱۹-۲ برگرداننده شار (قطعه شماره ۵) ۵۲
- شکل ۲۰-۲ سیلندر (قطعه شماره ۶) ۵۳
- شکل ۲۱-۲ پیستون دمپر MR ۵۴
- شکل ۲۲-۲ دمپر MR مونتاژ شده ۵۴
- شکل ۱-۳ نمای شماتیک نحوه اندازه گیری نسبت ته نشینی ۵۶
- شکل ۲-۳ پیکربندی های مختلف رئومتر ۵۷
- شکل ۳-۳ (a) رئومتر مدل MCR 300 (b) مکانیزم عملکرد رئومتر ۵۸
- شکل ۴-۳ منحنی تنش برشی برحسب نرخ برش در میدان های H مختلف ۵۹

- شکل ۳-۵ منحنی ویسکوزیته بر حسب نرخ برش در میدان های H مختلف ۶۰
- شکل ۳-۶ منحنی G' و G'' بر حسب فرکانس زاویه ای در میدان $H=38\text{ kA/m}$ ۶۱
- شکل ۳-۷ منحنی G' و G'' بر حسب فرکانس زاویه ای در میدان $H=75\text{ kA/m}$ ۶۲
- شکل ۳-۸ منحنی G' و G'' بر حسب فرکانس زاویه ای در میدان $H=112\text{ kA/m}$ ۶۳
- شکل ۳-۹ منحنی ویسکوزیته ی مرکب بر حسب فرکانس زاویه ای در میدان های مختلف ۶۳
- شکل ۳-۱۰ دستگاه تست مواد ۶۷
- شکل ۳-۱۱ منحنی نیرو بر حسب جابجایی برای جریانهای مختلف در سرعت 0.05 m/s ۶۸
- شکل ۳-۱۲ منحنی نیرو بر حسب جابجایی برای جریانهای مختلف در سرعت 0.1 m/s ۷۰

جداول

جدول ۱-۱ خواص سیالات ER و MR	۵
جدول ۲-۱ انواع مختلف مواد مغناطیسی	۱۰
جدول ۱-۲ مشخصات روغن هیدرولیکی VG46	۳۱
جدول ۲-۲ پارامترهای مدار هیدرولیکی و مغناطیسی دمپر MR	۴۶
جدول ۱-۳ نتایج تست ته نشینی سیال MR ساخته شده	۵۶
جدول ۲-۳ پارامترهای مدل کاریو-یاسودا برای میدانهای مختلف	۶۴
جدول ۳-۳ گستره رهایی از تنش براساس مدل تغییر یافته ماکسول برای میدان $H=38kA/m$	۶۶
جدول ۴-۳ محدوده نیروی میرایی کمک فنر جلو خودرو تیا	۶۹
جدول ۵-۳ ضریب میرایی دمپر MR ساخته شده	۷۰

علائم

τ	تنش برشی
τ_y	تنش تسلیم برشی
$\dot{\gamma}$	نرخ کرنش برشی
η	ویسکوزیته پلاستیک
G^*	مدول مختلط
γ	کرنش برشی
B	چگالی شار مغناطیسی
H	شدت میدان مغناطیسی
v_p	سرعت پیستون دمپر
ΔP	افت فشار در امتداد شیار عبور سیال
ΔP_η	افت فشار ویسکوز در امتداد شیار عبور سیال
ΔP_τ	افت فشار ناشی از تنش تسلیم در امتداد شیار عبور سیال
A_p	مساحت سطح مقطع پیستون دمپر
R_m	شعاع میانگین پیستون
h	ضخامت شیار عبور سیال
L	طول سیم‌پیچ مغناطیسی
A_g	مساحت
A_{R_m}	مساحت سطح مقطع میانگین
F	نیروی مقاوم دمپر
F_η	نیروی مقاوم ویسکوز دمپر
F_τ	نیروی مقاوم ناشی از تنش تسلیم دمپر
D	محدوده دینامیکی
F_{uc}	نیروی غیرقابل کنترل
F_f	نیروی اصطکاک
ω	فرکانس زاویه‌ای
G'	مدول ذخیره‌ای
G''	مدول اتلافی
η^*	ویسکوزیته‌ی مختلط

η_{∞}	ویسکوزیته‌ی سیال به ازای نرخ‌های برش بزرگ
η_0	ویسکوزیته‌ی سیال در نرخ برش صفر
λ	زمان مشخصه
a	پارامتر مدل کاریو-یاسودا
n	ضریب توانی
λ_i	زمان رهایی از تنش
η_i	ضریب ویسکوزیته‌ی مدل ماکسول

فصل ۱ (مقدمه)

۱-۱ پیش‌گفتار

در این فصل ابتدا شرحی مختصر بر سیالات مگنتورئولوژیکال^۱ بیان می‌گردد و سپس به کاربردهای گوناگون این سیالات اشاره می‌شود و پس از آن چالش‌های پیشروی این فناوری بیان می‌گردد. در ادامه در مورد منشاء خاصیت مغناطیسی در مواد بحث کوتاهی ارائه می‌شود. سپس درباره‌ی مواد مغناطیسی و انواع آنها مطالبی بیان می‌گردد و بعد از آن توضیح مختصری در مورد حلقه‌ی پسماند^۲ داده می‌شود.

در بخش بعدی، ساختمان دمپر MR^۳ و اجزای آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. در پایان، در مورد عملکرد دمپر MR مطالبی بیان می‌گردد.

۱-۲ سیالات هوشمند

سیالات هوشمند به خانواده‌ای از سیالات تعلق دارند که خواص آنها، به شدت میدان مغناطیسی یا الکتریکی وابسته است. این خانواده از سیالات شامل سیالات فرو^۴، سیالات الکتروئولوژیکال^۵ (ER) و سیالات مگنتورئولوژیکال می‌شود [۱].

سیالات فرو (ملزner^۶ و همکاران) [۲] سوسپانسیون‌های کلئیدی^۷ با ذرات مغناطیسی کوچکتر از ۱۰ nm (اغلب ساخته شده از مگنتایت) هستند که در یک سیال حامل مناسب مانند آب، هیدروکربن ها، اترها و... شناور می‌باشند. در حضور یک میدان مغناطیسی خارجی ویسکوزیته‌ی این سیالات افزایش پیدا می‌کند، ویسکوزیته با شدت موضعی میدان مغناطیسی متناسب است.

-
1. Magnetorheological Fluids
 2. Hysteresis Loop
 3. MR Damper
 4. Ferrofluids
 5. Electrorheological Fluids
 6. Melzner
 7. Colloidal Suspensions

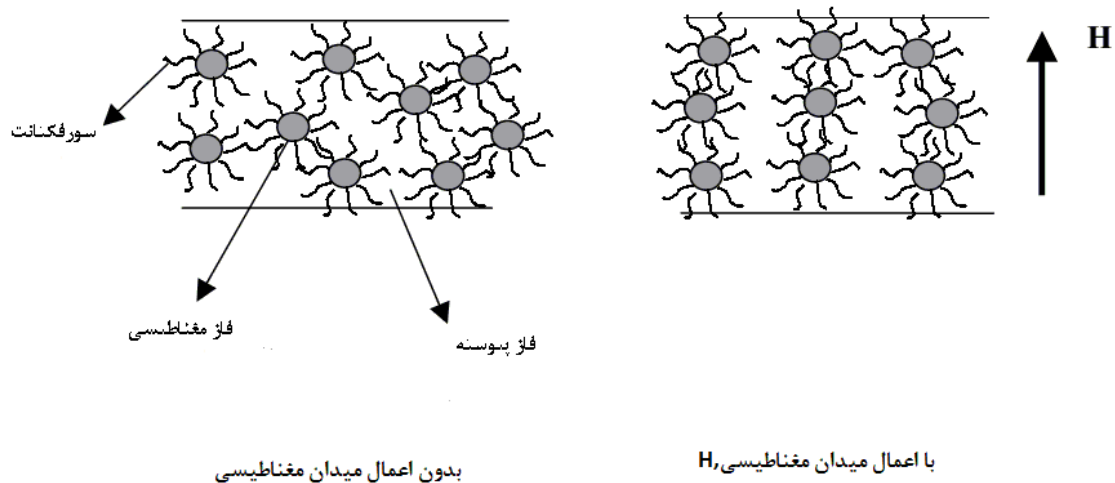
سیالات الکترورنولوژیکی و مگنتورنولوژیکی سوسپانسیون‌های غیرکلوئیدی با ذراتی در مقیاس میکرونی کوچک ($10-5 \mu m$) هستند که حرکت برونی^۱ در آنها دیده نمی‌شود (برخلاف سیالات فرو) کشف این سیالات به دهه‌ی ۱۹۴۰ برمی‌گردد.

سیالات ER و MR به ترتیب به میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی با تغییر شدید در رفتار رئولوژیکی^۲ پاسخ می‌دهند. مهمترین مشخصه‌ی این سیالات توانایی آنها در تغییری به طور برگشت پذیر از جریان آزاد، سیالات ویسکوز خطی^۳، به نیمه جامد است که تنش تسلیم^۴ آنها به سرعت و بطور پیوسته با اعمال میدان الکتریکی یا مغناطیسی قابل کنترل است (چند میلی ثانیه). در غیاب میدان، سیالات ER و MR عمدتاً مانند یک سیال نیوتنی رفتار می‌کنند. هنگامیکه میدان الکتریکی یا مغناطیسی خارجی اعمال می‌شود، موجب می‌گردد تا ذرات معلق قطبی شوند که بدین ترتیب به سمت کاهش انرژی ذخیره شده در مجموعه پیش می‌رود. این مجموعه کم انرژی از زنجیره‌ی ذرات هم راستا با میدان خارجی تشکیل شده است. این ساختار زنجیر مانند حرکت سیال را تغییر می‌دهد، در نتیجه خواص رئولوژیکی آن از طریق افزایش تنش تسلیم در جهت عمود بر میدان مغناطیسی تغییر پیدا می‌کند. انرژی مکانیکی مورد نیاز برای غلبه کردن بر این ساختارهای زنجیر مانند با افزایش میدان اعمالی افزایش می‌یابد. در شکل ۱-۱ نحوه تشکیل این ساختارهای زنجیره‌ای نشان داده شده است. چون تنش تسلیم می‌تواند به طور برگشت پذیر با کنترل شدت میدان تغییر کند، سیالات ER و MR بطور بالقوه ابزاری مناسب برای ارتباط بین سیستم‌های مکانیکی و الکتریکی می‌باشند.

رفتار رئولوژیکی چنین سیالاتی را می‌توان به دو رژیم مجزا پیش از تسلیم و پس از تسلیم طبقه

-
1. Brownian
 2. Rheological Behavior
 3. Linear Viscous Liquids
 4. Yield Strength

بندی کرد. در رژیم پیش از تسلیم، هر دوی این سیالات در نتیجه کشش زنجیره به خاطر شکسته شدن اتفاقی بعضی از زنجیره ها مانند جامدات الاستیک رفتار می کنند، در حالیکه پس از تسلیم بین شکسته شدن زنجیره ها و شکل گیری دوباره زنجیره ها تعادل وجود دارد.



شکل ۱-۱ نحوه تشکیل زنجیره ذرات مغناطیسی در حضور میدان مغناطیسی

رفتار سیالات MR و ER را می توان جهت ساده سازی، مانند پلاستیک بینگهام^۱ مدل کرد که دارای استحکام تسلیم متغیر می باشند [۳].

$$\tau = \tau_y (field) \operatorname{sgn}(\dot{\gamma}) + \eta \dot{\gamma} \quad \tau \geq \tau_y \quad (1-1)$$

در رابطه (۱-۱) field مقدار عددی میدان الکتریکی یا مغناطیسی، $\dot{\gamma}$ نرخ برش سیال، η ویسکوزیته پلاستیک (در میدان صفر) و τ_y تنش تسلیم است.

در تنش های پایین تر از تنش تسلیم (کرنش های در مقیاس 10^{-2}) ماده رفتار ویسکوالاستیک^۲ از خود نشان می دهد:

1. Bingham Plastic
2. Viscoelastic

$$\tau = G^* \gamma \quad \tau < \tau_y \quad (2-1)$$

در رابطه (۲-۱) G^* مدول مختلط^۱ ماده است. باید توجه داشت که مدول مختلط وابسته به میدان می باشد [۴].

سیالات MR در ابتدا کمتر از سیالات ER مورد بررسی قرار گرفتند اما در سال های اخیر سیالات MR بطور گسترده ای مورد مطالعه قرار گرفته اند که این به علت بعضی از خواص جالب توجه آنها است؛ در جدول ۱-۱ [۵] برخی از خواص عمومی سیالات ER و MR بیان شده است.

جدول ۱-۱ خواص سیالات ER و MR

سیال MR	سیال ER	خاصیت
میلی ثانیه	میلی ثانیه	زمان پاسخ
۰,۲-۰,۳ Pa.s	۰,۲-۰,۳ Pa.s	ویسکوزیته ی پلاستیک، η (در ۲۵°C)
-۴۰ تا ۱۵۰°C	+۹۰°C تا +۱۰ (یونی، DC) +۱۲۵°C تا -۲۵ (غیر یونی، AC)	محدوده دمای کاری
در حدود ۲۵۰ kA/m	در حدود ۴ kV/mm	بیشینه میدان
۲-۲۵ V ۱-۲ A (۲-۵۰ W)	۲-۵ kV ۱-۱۰ mA (۲-۵۰ W)	توان مورد نیاز
10^{-10} - 10^{-11} s/Pa	10^{-7} - 10^{-8} s/Pa	η / τ_y^2
3×10^3 - 4×10^3 kg/m ³	1×10^3 - 2×10^3 kg/m ³	چگالی
10^5 J/m ³	10^3 J/m ³	بیشینه چگالی انرژی
بدون تاثیرپذیری از بیشتر ناخالصی ها	حساس به ناخالصی ها	پایداری

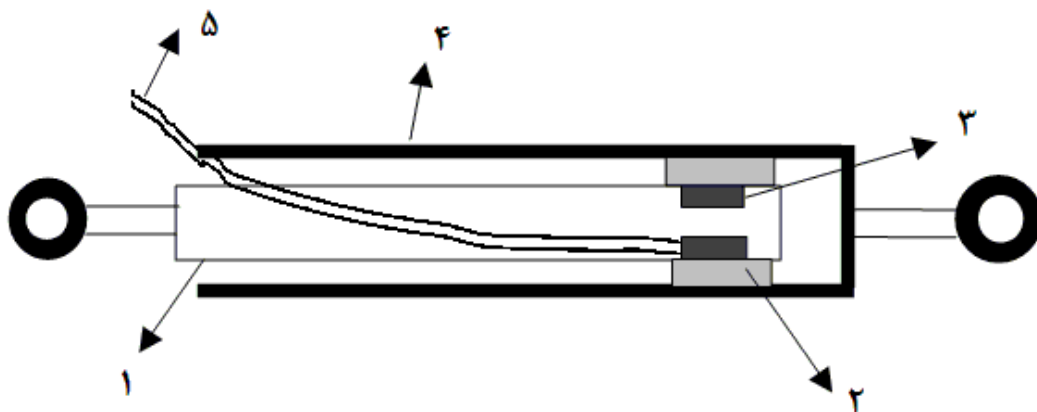
۱-۳ کاربردهای سیالات MR

در بازار امروز استفاده از پیشرفته‌ترین سیالات MR در کاربردهای مربوط به کنترل فعال ارتعاشات یا انتقال گشتاور اهمیت فراوانی پیدا کرده است. ضربه‌گیرها، دمپرها، ارتعاشی، دمپرها، میراکننده ارتعاش زلزله، کلاچ‌ها و آب‌بندها مهمترین کاربردهای سیال MR هستند [۷-۵]. در این کاربردها، خواص رئولوژیکی سیال، مد کاری دستگاه، طراحی مدار مغناطیسی و شکل سیم‌پیچ پارامترهای مهم عملکرد دستگاه‌ها هستند [۸، ۹]. یکی از مهمترین پیشرفت‌های اخیر در حوزه سیالات MR بوسیله Delphi Automotive Systems ارائه شده است. Delphi و Cadillac سیستم تعلیق نیمه فعال MagneRide™ که میزان نیروی میرایی را تنظیم می‌کند را گسترش داده‌اند.

صیقل دادن نوری^۱ که اولین بار توسط کوردونسکی^۲ و همکاران [۱۰] ابداع شد یکی دیگر از کاربردهای مهم سیالات MR می باشد [۱۱]. سیال MR حاوی ماده ساینده صیقل دهنده غیرمغناطیسی است. تحت برش زیاد جریان ذرات ساینده غیرمغناطیسی موجب برداشته شدن سطح ماده می‌شود. متداولترین ترکیب ماده ساینده / مایع حامل برای صیقل دادن نوری تمام شیشه‌ها و کریستال‌ها ترکیب اکسیدسریوم / آب است. مواد ساینده‌ای همچون آلومینا و الماس برای موادی به غیر از شیشه‌ها استفاده می‌شود.

شرکت Lord اخیراً دستگاه‌هایی با کمک سیال MR برای کاربردهای تجاری همچون سیستم تعلیق صندلی ماشین‌های سنگین، ترمزهای دیسکی، که امکان تغییر نیروی ترمزی برای دستگاه‌های ورزشی فراهم می‌کند و نیز دمپرها، ارتعاشی برای کاربردهای گوناگون صنعتی مانند دمپرها ماشین‌های ظرفشویی را تولید کرده است [۱۲]. دمپرهایی که حاوی سیال MR هستند و برای کاربردهای تجاری مانند سیستم تعلیق صندلی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند در شکل ۱-۲ نشان داده شده‌اند [۱۳].

1. Optical Polishing
2. Kordonski



شکل ۲-۱ دمپر MR (۱ میل پیستون ۲ پیستون ۳ کوئل مغناطیسی ۴ سیلندر ۵ سیم تغذیه جریان)

از دیگر کاربردهای سیالات MR می‌توان به دمپرهای صندلی خودروها، دمپرهای بازگشتی، دمپرهای با طول کورس زیاد که در پل‌ها و ساختمان‌ها کاربرد دارند و دمپرهای ضد زلزله اشاره نمود.

۴-۱ چالش‌های فناوری MR

بزرگترین چالش در ارتباط با سیال MR داشتن نسبت تنش برشی در چگالی شار معین به تنش برشی در چگالی شار صفر بالا، پایداری دمایی و ماندگاری است. دومین چالش بزرگ در ارتباط با سیالات MR دانش مورد نیاز برای ساخت سیال MR پایدار و قابل دوباره پراکنده شدن است. مقالات چاپ شده در زمینه فناوری سیال MR زیاد نیست. ساخت سیال MR ماندگار چالش دیگری است. مطالعاتی در مورد نقش دما وجود دارد که تنش تسلیم سیالات MR را در دماهای مختلف مشخص کرده‌اند که این مطالعات نشان دادند سیالات MR از لحاظ دمایی پایدار می‌باشند. اگر چه ویسکوزیته‌ی سیالات MR در حالت غیرفعال پارامتر مهمی برای داشتن اثر MR بالا است اما در مورد جزئیات آن بررسی صورت نگرفته است.

۵-۱ منشأ مغناطیس

سه نوع آهن‌ربا وجود دارد که می‌توانند دیگر قطعات آهنی یا فولادی را جذب کنند، این آهن‌رباها عبارتند از آهن‌ربای دائمی، آهن‌ربای موقتی و آهن‌ربای الکتریکی. خاصیت مغناطیسی یک آهن‌ربای

دائمی از حرکت و برهم کنش الکترون‌های آن ناشی می‌شود و دارای وادارندگی^۱ مغناطیسی بالا است که باعث ماندگاری خاصیت مغناطیسی آن برای مدت طولانی می‌گردد. وادارندگی مغناطیسی را می‌توان بصورت شدت میدان مغناطیسی لازم برای کاهش خاصیت مغناطیسی آن ماده به صفر بعد از رسیدن آن ماده به حالت اشباع مغناطیسی، توصیف کرد [۱۴]. یک آهن‌ربای موقتی دارای وادارندگی مغناطیسی کم است که به راحتی قابل مغناطیس شدن می‌باشد اما میدان ایجاد شده توسط آن‌ها بسیار کوچک است. این مواد به راحتی تحت تاثیر یک میدان خارجی مغناطیس می‌شوند. آهن‌رباهای الکتریکی را می‌توان با پیچیدن حلقه‌ای از سیم به دور یک هسته‌ی آهن نرم تولید کرد. میدان مغناطیسی تنها در زمانی که جریان الکتریکی در داخل سیم پیچی وجود دارد ایجاد می‌گردد. قدرت این نوع آهن‌رباها بوسیله‌ی گشتاور مغناطیسی^۲ بیان می‌شود، این گشتاور حاصل حرکت چرخشی الکترون‌ها به دور هسته است. منبع گشتاور الکترومغناطیسی بوسیله خاصیت مکانیکی کوانتومی بیان می‌گردد. (گشتاور مغناطیسی دو قطبی چرخشی).

گشتاور مغناطیسی کل اتم، مجموع خالص گشتاورهای مغناطیسی هر کدام از الکترون‌ها بطور مجزا می‌باشد. گشتاور مغناطیسی خالص ناشی از تمایل دو قطبی‌های مغناطیسی در ضدیت با یکدیگر جهت کاهش انرژی خالص می‌باشد.

رفتار مواد مغناطیسی را می‌توان بصورت زیر طبقه‌بندی کرد:

۱- دیامغناطیس^۳

۲- پارامغناطیس^۴

۳- فرومغناطیس^۵

-
1. Coercivity
 2. Magnetic Moment
 3. Diamagnetic
 4. Paramagnetic
 5. Ferromagnetic

۴- غیر فرومغناطیس^۱

۵- فری مغناطیس^۲

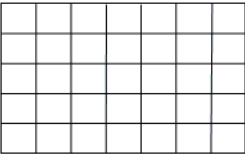
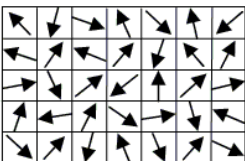
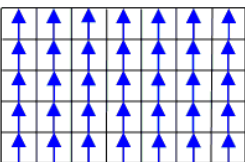
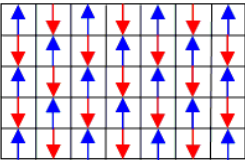
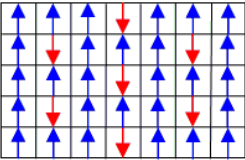
در جدول ۱-۲ خواص این مواد ارائه شده است. مغناطیس پذیری^۳ (در جدول ۱-۲) میزان مغناطیس شدن یک ماده در اثر اعمال میدان مغناطیسی می باشد. دردمای اتاق، مواد دیامغناطیس و پارامغناطیس، هیچ کدام دارای پسماند مغناطیسی نیستند. پسماند یک خاصیت سیستم است که به هنگام اعمال نیرو به آن بلافاصله نسبت به آن واکنش نشان نمی دهد، در عوض بطور آهسته واکنش نشان می دهد یا بطور کامل به حالت اصلی خود باز نمی گردد. مواد دیامغناطیس، مغناطیس شوندگی منفی بسیار کوچکی از خود نشان می دهند. این مواد از اتم هایی تشکیل می شوند که تقریباً گشتاور مغناطیسی خالص ندارند، نفوذپذیری مغناطیسی^۴ توانایی ماده در مغناطیس شدن در میدان های مغناطیسی تقریباً ضعیف است. نفوذپذیری نسبی را می توان نسبت نفوذپذیری ماده ی مغناطیسی به نفوذپذیری خلا تعریف کرد. از اینرو، نفوذپذیری نسبی در مواد دیامغناطیس در پاسخ به میدان مغناطیسی خارجی اندکی کمتر از صفر است. در مقابل، مواد پارامغناطیس با بی نظمی در گشتاور اتمی، دارای مغناطیس شوندگی خالص صفر هستند. این مواد دارای نفوذپذیری مغناطیسی اندکی بزرگتر از یک هستند.

مواد فرومغناطیس موادی با نفوذپذیری مغناطیسی بالا هستند که می توانند به مقدار زیاد مغناطیس شوند و می توانند گشتاور مغناطیسی دائمی را حفظ کنند. دوقطبی های مغناطیسی اولیه داخل محدوده ها همگی موازی یکدیگر قرار می گیرند، اما هنگامیکه محدوده ها همگی بر خلاف جهت یکدیگر قرار می گیرند، به این ماده غیر فرومغناطیس گفته می شود. اگر محدوده ی خالص یک سیستم مساوی صفر نباشد، به این ماده فری مغناطیس گفته می شود. فری مغناطیس ها همه ویژگی های

1. Anti-ferromagnetic
2. Ferrimagnetic
3. Magnetic Susceptibility
4. Magnetic Permeability

رفتاری مواد فرومغناطیس را دارند اما در نظم مغناطیسی تفاوت‌های زیادی با هم دارند.

جدول ۱-۲ انواع مختلف مواد مغناطیسی

مثال‌ها	مغناطیس‌پذیری	رفتار مغناطیسی	نوع ماده مغناطیسی
مس، نقره، طلا و آلومینا	کم و منفی		دیامغناطیس
آلومینیوم، تیتانیوم و آلیاژهای مس	کم و مثبت		پارامغناطیس
آهن، نیکل و کبالت	خیلی زیاد و مثبت، تابع میدان اعمالی، وابسته به میکروساختار		فرومغناطیس
منگنز، کروم، اکسید منگنز و اکسید نیکل	کم و مثبت		غیرفرومغناطیس
فریت‌ها	زیاد و مثبت، تابع میدان اعمالی، وابسته به میکروساختار		فری مغناطیس

۱-۶ مواد مغناطیسی

فرومغناطیس‌ها و فری مغناطیس‌ها دو نوع از مواد مغناطیسی هستند که بطور گسترده در اجزاء مغناطیسی بکار می‌روند. بنابراین مواد با حوزه‌های کم یا بدون حوزه، وادارندگی بالایی دارند در حالیکه مواد با حوزه‌های زیاد وادارندگی کم دارند.

بطور کلی به موادی که به راحتی مغناطیس می‌شوند و به راحتی نیز خاصیت مغناطیسی خود را از دست می‌دهند، مواد مغناطیسی نرم^۱ گفته می‌شود اما به موادی که به سختی خاصیت مغناطیسی خود را از دست می‌دهند مواد مغناطیسی سخت^۲ گفته می‌شود. به غیر از وادارندگی عوامل دیگری هم وجود دارند که مواد مغناطیسی نرم و سخت را از هم متمایز می‌کنند مانند حلقه‌ی پسماند، اشباع مغناطیسی^۳، نفوذپذیری و چگالی شار باقیمانده^۴.

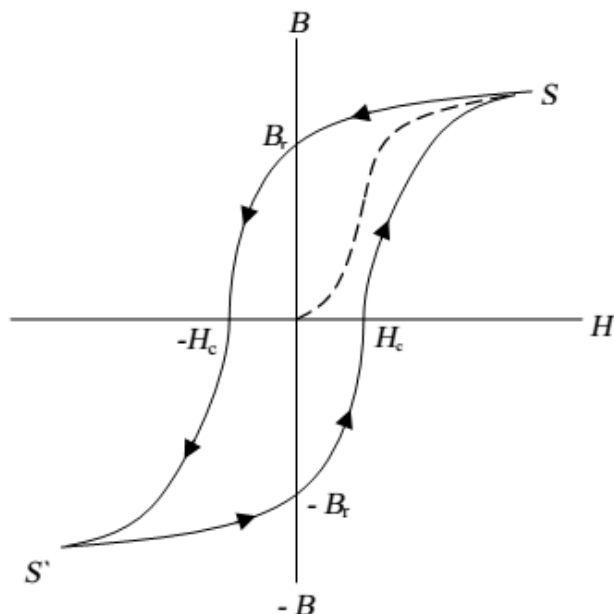
۱-۶-۱ حلقه پسماند

یک حلقه‌ی پسماند دارای اطلاعات فراوانی در مورد خواص مغناطیسی ماده است و می‌توان این حلقه را با رابطه‌ی بین چگالی شار مغناطیسی B و شدت میدان مغناطیسی H بیان کرد و معمولاً به آن منحنی $B-H$ گفته می‌شود [۱۵]. ماده‌ای با حلقه‌ی پسماند پهن دارای نفوذپذیری کم و چگالی شار باقیمانده، وادارندگی و مقاومت مغناطیسی زیاد است. در مقابل، ماده‌ای با حلقه‌ی پسماند باریک ویژگیهای متضاد دارد. نمونه‌ای از حلقه‌ی پسماند برای یک ماده فرومغناطیس در شکل ۱-۳ نشان داده شده است.

خط‌چین رسم شده در شکل ۱-۳ نحوه مغناطیس شدن یک ماده فرومغناطیس که هیچ گونه خاصیت مغناطیسی ندارد را تا رسیدن به اشباع مغناطیسی نشان می‌دهد. نقاط S و S' بیان کننده‌ی

-
1. Soft Magnetic Materials
 2. Hard Magnetic Materials
 3. Saturation
 4. Remanence

مقادیر اشباع مغناطیسی در سمت مثبت و منفی محور H می‌باشد.



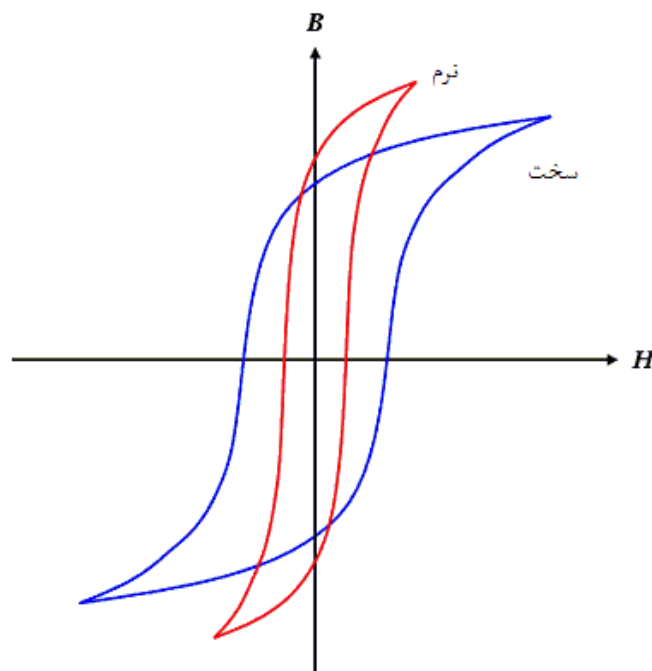
شکل ۳-۱ چگالی شار مغناطیسی بر حسب شدت میدان مغناطیسی

هنگامیکه مقدار H به صفر نزدیک می‌شود منحنی برای برگشتن به مکان اولیه خود از نقطه‌ی S به نقطه‌ی B_r حرکت می‌کند. در این نقطه هنوز مقداری از چگالی شار مغناطیسی باقی مانده است و این میدان باقی مانده B_r را باقیمانده‌ی مغناطیسی می‌نامند. وقتی مقدار H در سمت منفی قرار می‌گیرد یا به عبارتی H ذخیره می‌شود، منحنی به سمت نقطه‌ی $-H_c$ در B صفر حرکت می‌کند. با افزایش بیشتر H در جهت منفی، ماده از لحاظ مغناطیسی اشباع می‌گردد و به نقطه‌ی S' می‌رسد، این درحالی است که نیروی مغناطیس‌کنندگی در جهت منفی افزایش می‌یابد.

در سمت مقابل، هنگامیکه H دوباره به سمت صفر نزدیک می‌شود، منحنی از نقطه‌ی S' به نقطه‌ی $-B_r$ حرکت می‌کند، مقدار B_r در هر دو سمت با هم برابر است. منحنی هنگامیکه H مثبت می‌شود در مقدار B صفر به سمت H_c حرکت می‌کند. افزایش بیشتر H منجر به بازگشت منحنی به نقطه‌ی S می‌گردد و حلقه کامل می‌شود [۱۶].

شکل ۴-۱ حلقه‌های پسماند مواد مغناطیسی سخت و نرم را نشان می‌دهد. شکل و اندازه‌ی

حلقه‌ی پسماند به شدت به نوع ماده بستگی دارد. اگر ماده به راحتی مغناطیس شود حلقه باریک خواهد بود. اما اگر ماده به راحتی مغناطیس نشود حلقه پهن خواهد بود. علاوه بر این، مواد مغناطیسی گوناگون در مقادیر چگالی شار مغناطیسی متفاوتی اشباع می‌شوند که این موضوع ارتفاع حلقه را تحت تاثیر قرار می‌دهد. مساحت حلقه همچنین به بیشینه چگالی مغناطیسی که در ماده ایجاد می‌شود بستگی دارد [۱۷].



شکل ۱-۴ حلقه پسماند برای مواد مغناطیسی نرم و سخت

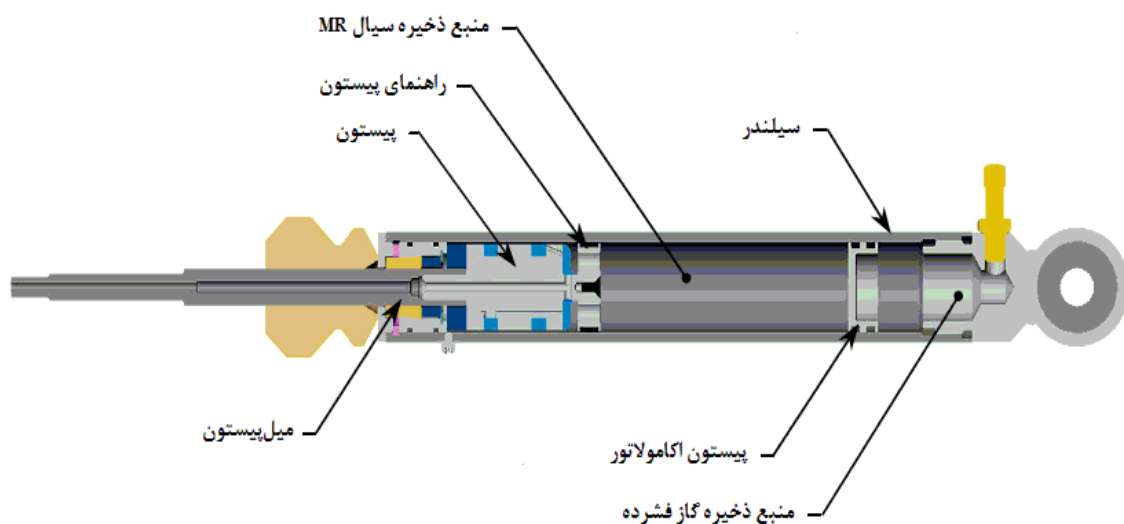
۷-۱ دمپر MR

در بین دستگاه‌های MR، دمپرهای MR بطور گسترده‌تر از دیگر دستگاه‌ها مورد مطالعه قرار گرفته و برای کاربردهای تجاری توسعه یافته است. استفاده از دمپرهای MR شامل کاربرد آن‌ها در صنعت خودرو نیز می‌شود. از دیگر کاربردهای دمپرهای MR می‌توان به سیستم‌های کنترل، کاهش اثرات

زلزله^۱، دمپره‌های کاهش ضربه اسلحه^۲ که برای کنترل اثرات دینامیکی اسلحه استفاده می‌گردد.

۱-۷-۱ انواع دمپره‌های MR

دمپره‌های MR دارای سه مدل اصلی می‌باشند. تک مخزنه^۳، دو مخزنه^۴ و دو سر متحرک^۵. از این سه مدل، مدل تک مخزنه متداول است چون می‌توان آن را در هر جهت دلخواه نصب کرد و اندازه آن نیز کوچک است. یک دمپر MR تک مخزنه، شکل ۵-۱، دارای یک مخزن ذخیره‌سازی برای سیال MR است و یک مکانیزم انباره^۶ جهت جبران تغییر در حجم ناشی از حرکت میل پیستون می‌باشد [۱۸]. پیستون انباره مانعی بین سیال MR و گاز فشرده شده (معمولاً نیتروژن) که جهت جبران تغییرات حجم ایجاد شده به هنگام ورود میل پیستون به داخل سیلندر استفاده می‌شود، ایجاد می‌نماید.

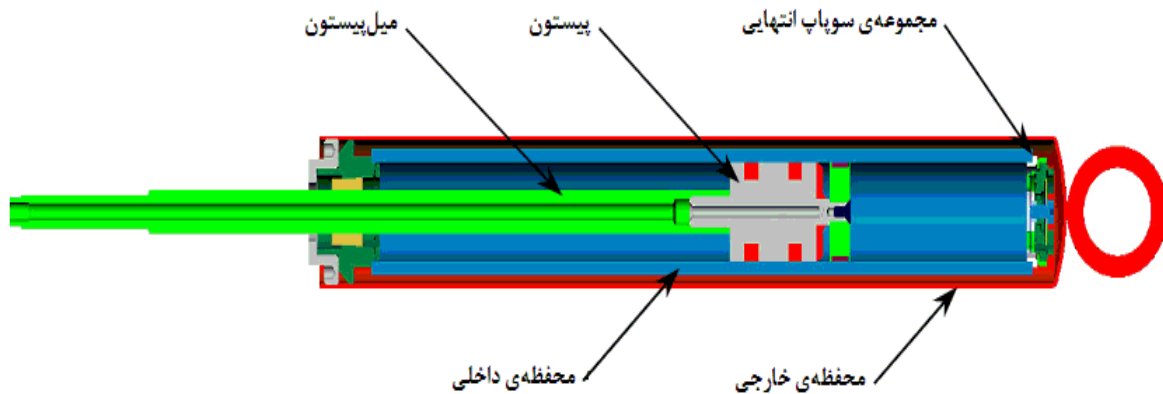


شکل ۵-۱ دمپر MR تک مخزنه

همان‌طور که در شکل ۶-۱ نشان داده شده است. دمپر MR دو مخزنه دارای دو مخزن ذخیره

1. Earthquake Mitigation
2. Gun Recoil Dampers
3. Mono Tube
4. Twin Tube
5. Double-ended
6. Accumulator Mechanism

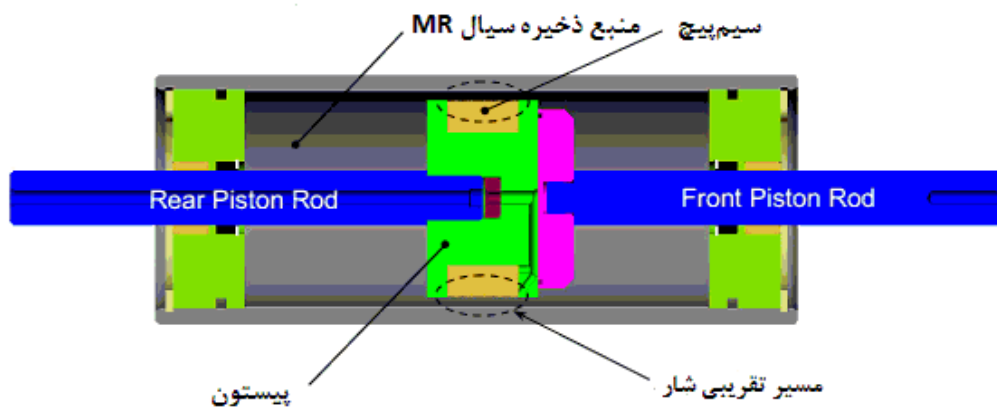
سیال است.



شکل ۶-۱ دمپر MR دو مخزنه

در این مدل، دمپر دارای یک محفظه‌ی داخلی و یک محفظه‌ی خارجی می‌باشد که بوسیله‌ی یک سوپاپ انتهایی از یکدیگر جدا شده‌اند. حجم قرار گرفته بین محفظه‌ی داخلی و محفظه‌ی خارجی، مخزن خارجی نامیده می‌شود. محفظه‌ی داخلی بوسیله‌ی سیال MR پر می‌گردد لذا هیچ حجم هوایی وجود نخواهد داشت. برای جبران تغییرات حجم ایجاد شده به خاطر حرکت میل پیستون، از مخزن خارجی که بخشی از آن توسط سیال MR پر شده، استفاده می‌شود. بنابراین، مخزن خارجی در یک دمپر دو مخزنه کاری را می‌کند که مکانیزم انباره پنوماتیکی در یک دمپر تک مخزنه انجام می‌دهد.

آخرین نوع از دمپرهای MR دمپر دو سر متحرک نامیده می‌شود، چون یک میل پیستون با قطر یکسان از دو سر سیلندر بیرون آمده است. شکل ۷-۱ یک دمپر MR دو سر متحرک را نشان می‌دهد. چون به هنگام حرکت میل پیستون نسبت به بدنه‌ی دمپر هیچ تغییری در حجم رخ نمی‌دهد، دمپر دو سر متحرک نیاز به مکانیزم جبران سازی ندارد.



شکل ۷-۱ دمپر MR دو سر متحرک

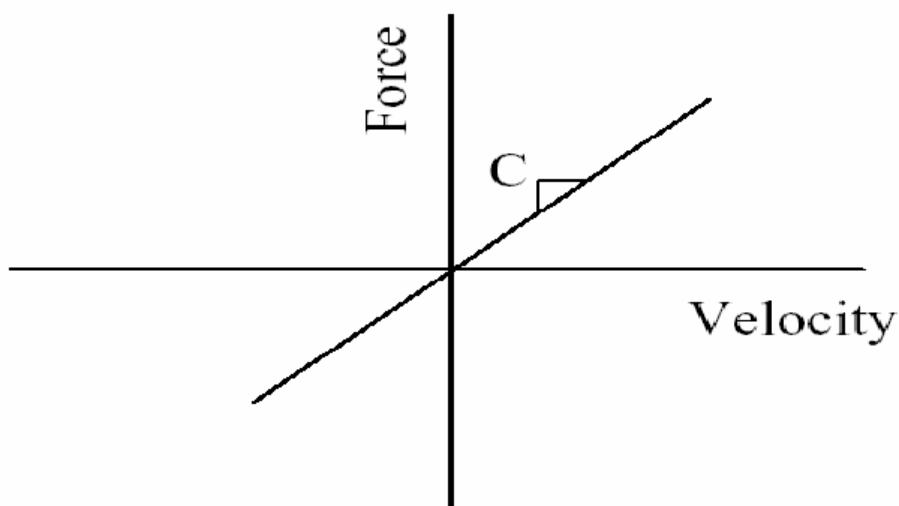
۸-۱ عملکرد دمپر MR

در دمپره‌های غیرفعال^۱ متداول، عملکرد دمپر اغلب بر اساس نمودارهای نیرو بر حسب سرعت ازریایی می‌شود. برای یک دمپر ویسکوز خطی، نمودار نیرو بر حسب سرعت در شکل ۸-۱ نشان داده شده است. شیب خط نیرو بر حسب سرعت را ضریب دمپر، C ، می‌نامند. در عمل خط نیرو بر حسب سرعت بطور متناوب دو خطی و نامتقارن است و دارای مقادیر C مختلف برای هر یک از مراحل پایین آمدن^۲ (تراکم) و بازگشت^۳ (باز شدن) هستند، در شکل ۹-۱ علت نامتقارن بودن این نمودار از کاربرد نهایی دمپر در سیستم تعلیق خودرو نشأت می‌گیرد. وقتی دمپر بطور سری با فنر اصلی سیستم تعلیق خودرو کار می‌کند، دمپر در مرحله فشرده شدن بر خلاف نیروی فنر عمل می‌کند و در مرحله باز شدن به شدت توسط نیروی فنر یاری می‌شود.

هنگامیکه خودرو با یک گودال برخورد می‌کند یا به هنگام عدم تماس آن با جاده، تنها مکانیزم برای جلوگیری از این مشکل نیروی حاصل از مرحله برگشت می‌باشد [۱۹].

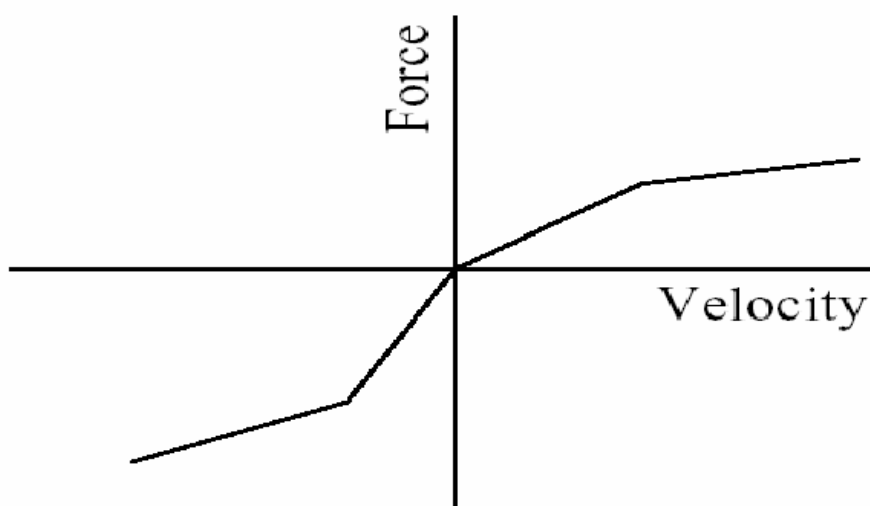
چون دمپر غیرفعال به گونه‌ای است که به ازای یک سرعت معین تنها یک نیرو متناظر با آن

1. Passive Dampers
2. Jounce
3. Rebound



شکل ۸-۱ نمودار نیرو بر حسب سرعت دمپر خطی

وجود دارد منحنی میرایی بوسیله یک مهندس خودرو برای هر کاربرد خاص تصحیح شود. بنابراین، پوش^۱ کاری یک دمپر غیرفعال به یک منحنی از پیش طراحی شده نیرو- سرعت محدود می‌گردد. در مورد دمپرهاي MR، منحنی‌های نیرو - سرعت ایده‌آل در شکل ۱۰-۱ نشان داده شده است. نتیجه یک پوش نیرو بر حسب سرعت است که در یک ناحیه امتداد یافته است. بیشتر از آن که یک خط در صفحه نمودار نیرو- سرعت باشد. در این حالت ایده‌آل، نیروی میرایی مستقل از سرعت میل- پیستون است و تنها تابع جریان وارد شده به سیم‌پیچ است.



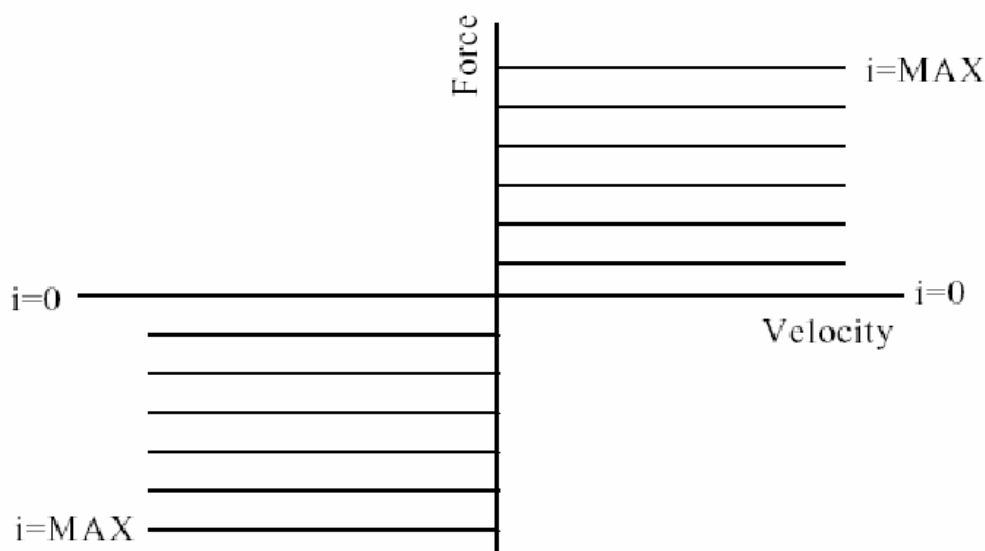
شکل ۹-۱ نمودار نیرو بر حسب سرعت دمپر دوخطی و نامتقارن

1. Envelope

می‌توان کنترلر این نوع دمپرها را طوری برنامه‌ریزی کرد تا از هر مدل مشخصه نیرو و سرعت پیروی کند.
می‌توان نیروی دمپر MR ایده‌آل را بصورت زیر مدل کرد:

$$F_{MRDAMPER} = \alpha i \quad (3-1)$$

در رابطه (3-1) α ثابت و i جریان دمپر است. مدل ارائه شده در شکل 1-10 جزئیات دمپر MR واقعی را بیان نمی‌کند، بعضی از اثراتی که در این مدل جا افتاده‌اند عبارتند از اشباع میدان مغناطیسی، پسماند مغناطیسی و نیروی حاصل از انبارش فشرده شده.



شکل 1-10 نمودار نیرو برحسب سرعت دمپر ایده‌آل

9-1 پیشینه پژوهش

در این بخش ابتدا پژوهش‌های مربوط به سیال MR مورد مطالعه قرار گرفته و پس از آن پژوهش‌های مرتبط با ساخت دمپر MR بررسی شده‌اند.

در سال ۱۹۹۸ جولی^۱ و همکاران [۳] خواص مغناطیسی و رئولوژیکی چندین نوع سیال

1.Jolly

مگنتورئولوژیکال تجاری را مورد بحث و بررسی قرار دادند. این سیالات به کمک نمودارهای مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند. بعضی از کاربردهای کنونی این سیالات بررسی شده است. این کاربردها نشان می‌دهند چگونه باید خواص مواد گوناگون تنظیم شوند تا عملکرد بهینه برای یک کاربرد خاص حاصل گردد.

در سال ۲۰۰۲ بوسیسی^۱ و همکاران [۲۰] خواص سیالات مگنتورئولوژیکال و ساختار آن‌ها را مورد بررسی قرار دادند.

در سال ۲۰۰۵ گنکالوز^۲ [۲۱] رفتار سیالات مگنتورئولوژیکال را در سرعت‌های بالا و نرخ‌های برش بالا مورد بررسی قرار داد. در این پژوهش رفتار سیال در سرعت‌های بالا و نرخ‌های برش بالا برای حالت غیرفعال و فعال بوسیله‌ی رئومتر بررسی شده است.

در سال ۲۰۰۵ دلگادو^۳ و همکاران [۲۲] در مورد ساخت سوسپانسیون‌های مگنتورئولوژیکال و پایداری آن‌ها تحقیق و بررسی کردند.

در سال ۲۰۰۶ ورلی^۴ و همکاران [۲۳] چند نمونه سیال مگنتورئولوژیکال دو بخشی با استفاده از ذرات آهن در مقیاس نانومتر و میکرون تهیه کردند. سیالات مگنتورئولوژیکال متداول از ذرات آهن در مقیاس میکرون تشکیل می‌شوند. در این پژوهش در ساخت سیال MR مخلوطی از ذرات در مقیاس میکرون آهن و ذرات آهن در مقیاس نانو استفاده شده است.

در سال ۲۰۰۸ روزکوفسکی^۵ و همکاران [۲۴] ویسکوزیته‌ی سیال MR را تحت میدان مغناطیسی اندازه‌گیری کردند. هدف این پژوهش تعیین ویسکوزیته‌ی سیال MR در مقادیر میدان مختلف و تعیین پارامترهای موثر در توقف جریان سیال در یک لوله موئین بوده است.

-
1. Bossis
 2. Goncalves
 3. Delgado
 4. Wereley
 5. Roszkowski

در سال ۲۰۰۸ جیان^۱ و همکاران [۲۵] چند نمونه سیال مگنتورئولوژیکال با سیالات حامل گوناگون تهیه کرده و خواص آن‌ها را مورد بررسی قرار دادند.

در سال ۲۰۰۸ مازلان^۲ [۲۶] رفتار سیالات مگنتورئولوژیکال در مد فشاری را مورد بررسی قرار داد. وی در این پژوهش رفتار سه نوع سیال مگنتورئولوژیکال را آزمایش کرد که یکی از آنها پایه-آبی و دو سیال دیگر پایه-هیدروکربنی بودند. نتایج آزمایشگاهی نشان دادند که رفتار سیالات MR به حرکت نسبی بین ذرات جامد مغناطیسی و سیال حامل بستگی دارد.

در سال ۲۰۰۸ ترکزین^۳ و کیوک^۴ [۲۷] چند نمونه سیال مگنتورئولوژیکال تهیه کردند. در این پژوهش خواص اصلی سیالات MR، مانند پاسخ آنها به میدان خارجی و پایداری آنها مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این نتایج مربوط به اثر پایدارکنندگی افزودنی‌های مختلف در این پژوهش ارائه شده است.

در سال ۲۰۱۲ چوی^۵ و همکاران [۲۸] سیال مگنتورئولوژیکالی را به کمک ذرات آهن کربونیل پخش شده در محلول پلیمری تهیه کردند و مشخصات رئولوژیکی آن را تحت میدان مغناطیسی مورد بررسی قرار دادند. در تهیه این سیال از محلول پلیمری پایه آبی ساخته شده از اکسید پلی اتیلن بعنوان سیال حامل و آهن کربونیل (CI) استفاده شده است.

در سال ۲۰۱۲ ماهندران^۶ و همکاران [۲۹] خواص مغناطیسی مکانیکی سیالات MR پایه آهنی را مورد پژوهش قرار دادند. ایشان برای ساخت سیال MR از روغن سیلیکون (OKs) و پودر آهن استفاده کردند. برای جلوگیری از ته‌نشینی ذرات آهن از گریس استفاده شده است.

در سال ۲۰۰۰ گردانی‌نژاد و همکاران [۳۰] یک جاذب ضربه‌ی قابل کنترل نیمه‌فعال حاوی سیال مگنتورئولوژیکال برای اتومبیل‌های خارج از بزرگراه، حداکثر بار بالا مورد مطالعه قرار دادند.

-
1. Jian
 2. Mazlan
 3. Turczyn
 4. Kciuk
 5. Choi
 6. Mahendran

مطالعات تئوری و آزمایشگاهی برای آزمایش این دمپر MRF انجام گرفته است.

در سال ۲۰۰۱ پوینور^۱ و همکاران [۱۸] در مورد طراحی خلاقانه دمپر مگنتورئولوژیکال بحث کردند. این پژوهشگران در این پژوهش به دنبال طرح‌های جایگزین برای دمپر MR بوده‌اند. سپس یک دمپر مغناطیسی برای مرسدس ML-430 و اتومبیل مسابقه‌ای Ford ساختند که هر دوی این دمپرها عملکرد خوبی را از خود نشان دادند. در همین سال گاوین و دیگران در مورد طراحی بهینه‌ی دمپر MR تحقیق کردند. در این پژوهش دو هدف در طراحی دمپر MR مد نظر پژوهشگران بوده است: دمپر باید مصرف توان الکتریکی پایینی داشته باشد. پاسخ دستگاه به سیگنالهای فرمان سریع باشد. سپس آنها دمپر MR را ساخته و مورد آزمایش قرار دادند که نتایج نهایی به اهداف طرح بسیار نزدیک بود.

در سال ۲۰۰۱ یانگ^۲ [۳۱] دمپر مگنتورئولوژیکال در مقیاس بزرگ را برای کاهش ارتعاشات، مدل‌سازی و تست کرد. هدف این پژوهش بسط مفاهیم مربوط به دمپره‌ای MR برای کاهش خطرات طبیعی در سازه‌های بزرگ بوده است.

در سال ۲۰۰۲ ورلی^۳ و همکاران [۳۲] یک سوپاپ مگنتورئولوژیکال با بازده بالا را طراحی کردند. هدف این پژوهش کوچک کردن سوپاپ MR با حفظ بیشینه عملکرد اثر MR در سوپاپ بود. ایشان با وجود محدودیت اندازه‌ی سوپاپ، به بیشینه چگالی شار مغناطیسی در شیار عبور سیال دست پیدا کردند.

در سال ۲۰۰۲ جنک^۴ [۳۳] نحوه ساخت سیالات مگنتورئولوژیکال و رفتار آنها را مورد بررسی قرار داد. هدف این پژوهش بررسی اثر نیروهای بین ذرات بر پایداری و قابلیت پخش دوباره سیالات MR و عوامل تاثیرگذار بر خواص رئولوژیکی سیالات MR در حالت فعال و غیرفعال بوده است.

1. Poynor
2. Yang
3. Wereley
4. Genç

در سال ۲۰۰۳ گراوات^۱ [۳۴] کاربرد دمپر MR بر روی موتورسیکلت‌ها را مورد بررسی قرار داد. هدف این پژوهش انطباق دمپر MR برای استفاده در سیستم تعلیق چرخ جلوی موتورسیکلت بود. طرح دمپر MR تک مخزنه برای جایگزینی دمپر OEM استفاده گردید. سپس دمپر MR ساخته شد و در مورد آزمایش قرار گرفت و داده‌های آزمایش با سیستم تعلیق OEM مورد مقایسه قرار گرفت.

در همین سال گردانی‌نژاد و همکاران [۳۵] یک ضربه‌گیر قابل کنترل نیمه‌فعال حاوی سیال مگنتورئولوژیکال برای سیستم تعلیق چرخ عقب یک موتورسیکلت off-road بصورت تئوری و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. یک مدل تئوری براساس مفاهیم مکانیک سیالات برای پیش بینی نیروی میرایی قابل کنترل برحسب پارامترهای فیزیکی دستگاه، خواص سیال مگنتورئولوژیکال، پارامترهای مدار الکترومغناطیسی و جابجایی ورودی ارائه شده است.

در سال ۲۰۰۴ جانگ^۲ و همکاران [۳۶] یک دمپر MR با سیم‌پیچ الکترومغناطیسی که از دو قسمت تشکیل شده بود را طراحی، تست و شبیه‌سازی کردند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد استفاده از این نوع سیم‌پیچ موجب افزایش محدوده‌ی دینامیکی می‌گردد.

در سال ۲۰۰۵ سینگلا^۳ [۳۷] یک دمپر MR مد ترکیبی برای کاهش نیروی میرایی در حالت غیرفعال طراحی کرد. هدف این پژوهش کاهش نیروهای میرایی در حالت غیرفعال بوده است. وی این کار را با قرار دادن برش‌های نیم دایره‌ای در پیرامون پیستون انجام داده است.

در سال ۲۰۰۶ مزیک^۴ و همکاران [۳۸] یک نمونه آزمایشگاهی دمپر مگنتورئولوژیکال را برای سیستم کنترل ارتعاشات فعال مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق مفهوم یک سیستم جداسازی از منابع ارتعاشی خارجی به کمک دمپرهای مگنتورئولوژیکال ارائه شده است.

در سال ۲۰۰۸ احمدخانلو [۳۹] یک دمپر مگنتورئولوژیکال برای سیستم‌های تله‌راتیک طراحی

1. Gravatt
2. Zhang
3. Singla
4. Mężyk

و مدل سازی نمود. هدف این پژوهش توسعه‌ی نسل بعدی سیستم‌های بازخورد نیرو، بوسیله‌ی ترکیب سیستم‌های مگنتورئولوژیکال جدید با تحلیل میکروساختاری و طراحی سیستم‌های کنترل پیشرفته است.

در سال ۲۰۰۹ لینگ^۱ و همکاران [۴۰] یک دمپر مگنتورئولوژیکال برای وسایل نقلیه ریلی طراحی کردند. وسایل نقلیه ریلی نیاز به پاسخ سریع و محدوده‌ی دینامیکی گسترده دارند. برای این منظور در طراحی الکترومغناطیسی دمپرهای MR متداول برای بهبود مشخصات دینامیکی و استاتیکی تغییراتی ایجاد گردیده است.

در سال ۲۰۱۱ حدادیان [۴۱] با استفاده از روش سطح پاسخ یک طرح بهینه برای دمپرهای مگنتورئولوژیکال ارائه داده است.

در سال ۲۰۱۱ پنگ^۲ [۴۲] سیستم فرمان موتورسیکلت و عوامل حرکت‌های نامنظم فرمان را مورد بررسی قرار داده و مقایسه‌ای بین دمپر قابل تنظیم دستی و دمپر MR پیشنهادی انجام داده است.

در سال ۲۰۱۱ ساهین^۳ و پارلاک^۴ [۴۳] اثر تغییرات دما بر رفتار دمپر مگنتورئولوژیکال را مورد بررسی قرار دادند. ایشان دریافتند که دما به اندازه‌ی سرعت بر رفتار دمپر MR تاثیرگذار است.

در سال ۲۰۱۲ سورش^۵ و همکاران [۴۴] اثر پروفیل‌های پیستون گوناگون را بر عملکرد دمپر مگنتورئولوژیکال مورد بررسی قرار دادند. ایشان با استفاده از روش المان محدود اثر پروفیل پیستون بر بیشینه افت فشار ارائه شده توسط دمپر را مورد ارزیابی قرار دادند.

در سال ۲۰۱۳ مانگال^۶ و همکاران [۴۵] یک دمپر مگنتورئولوژیکال را طراحی و تست نموده و نتایج آن را مورد ارزیابی قرار دادند.

1.Ling
2.Peng
3. Şahin
4. Parlak
5.Suresh
6. Mangal

در سال ۲۰۱۳ گلداز^۱ [۴۶] تحلیل الکترومکانیکی دمپر مگنتورئولوژیکال که پیستون آن از ورق-های فولادی الکتریکی ساخته شده بود را ارائه کرد. وی برای اولین بار مشخصات الکترومکانیکی این نوع دمپر را در این پژوهش ارائه کرده است.

۱-۱۰ معرفی تحقیق حاضر

هدف از این پژوهش طراحی و ساخت دمپر هوشمند با روغن هیدرولیکی مگنتورئولوژیکال می باشد. در این پژوهش پس از جمع آوری اطلاعات مورد نیاز و مطالعه‌ی پژوهش‌های گذشته ابتدا سیال MR در آزمایشگاه دانشگاه ساخته شد و پس از انجام تست ته‌نشینی، تست‌های رئومتری برای سیال MR ساخته شده، انجام گرفت که نتایج این تست‌ها در فصول بعدی آمده است.

در گام بعدی با توجه به اطلاعات بدست آمده از تست سیال و بدست آوردن معادلات نیرویی و در نهایت شبیه‌سازی میدان مورد نیاز در هسته‌ی پیستون به کمک نرم‌افزار Ansys Maxwell، هندسه‌ی و ابعاد قسمت‌های مختلف دمپر MR طراحی گردید.

در گام سوم برپایه‌ی طراحی مدار هیدرولیکی و مدار مغناطیسی مرحله‌ی قبل اجزای مختلف دمپر MR ساخته شد. در گام نهایی تست‌های نیرویی دمپر MR در کارخانه کمک فنر سازی ایندامین سایپا انجام گرفت.

۱-۱۱ ضرورت تحقیق

سیال MR و دمپر MR جزء تکنولوژی‌های سطح بالا طبقه‌بندی می‌شوند. در کشور ما به علت کمبود مواد و امکانات لازم جهت ساخت این نوع دمپر پژوهش‌های بسیار محدودی در این زمینه صورت گرفته است. تمرکز این پژوهش‌ها نیز عمدتاً بر ساخت دمپر MR بوده است تا ساخت سیال MR که این موضوع ناشی از دشواری ساخت یک سیال همگن با درصد ته‌نشینی پایین می‌باشد.

1. Goldasz

در این پژوهش با بررسی‌های لازم در مکانیزم ته‌نشینی ذرات پودر آهن در روغن حامل و روش-های جلوگیری از این پدیده، در نهایت سیالی با درصد ته‌نشینی بسیار پایین مطابق با مشخصات سیال ساخته شده توسط شرکت LORD تهیه شده است.

ساخت این نوع دمپر در کشور ما به دلایل ذکر شده، هیچ‌گاه به سمت تجاری‌سازی سوق پیدا نکرده است. در این پژوهش جهت نیل به بومی‌سازی ساخت این نوع دمپر تمام طراحی‌های صورت گرفته برپایه‌ی مشخصات کمک فنر جلو خودروی سواری تیا ساخت شرکت ایندامین سایپا انجام شده است.

۱-۱۲ نوآوری‌های تحقیق

در این پژوهش در قسمت طراحی مدار مغناطیسی، جهت افزایش چگالی شار مغناطیسی در مسیر عبور سیال بدون افزایش طول قطب‌ها و یا افزایش دورهای سیم‌پیچ مغناطیسی که به دلیل محدودیت‌های هندسی امکان این تغییرات وجود نداشت، با ایجاد سه عدد شیار بر روی هسته‌ی سیم-پیچ مغناطیسی چگالی شار مغناطیسی در مسیر عبور سیال ۵۰ درصد افزایش پیدا کرد. این میزان افزایش در چگالی شار مغناطیسی بدون تغییر در ابعاد هسته بسیار حائز اهمیت می‌باشد. همچنین از یک قطعه‌ی واسط جهت بستن مسیر شار مغناطیسی استفاده شده است که در بهبود عملکرد دمپر MR تاثیر بسزایی دارد.

برای نخستین بار در این پژوهش مدل ۸ ثابت ماکسول بر روی داده‌های تست سیال پیاده‌سازی شده و زمان رهایی از تنش برای سیال MR ساخته شده، بدست آمده است.

فصل ۲ (طراحی و ساخت)

۱-۲ پیش‌گفتار

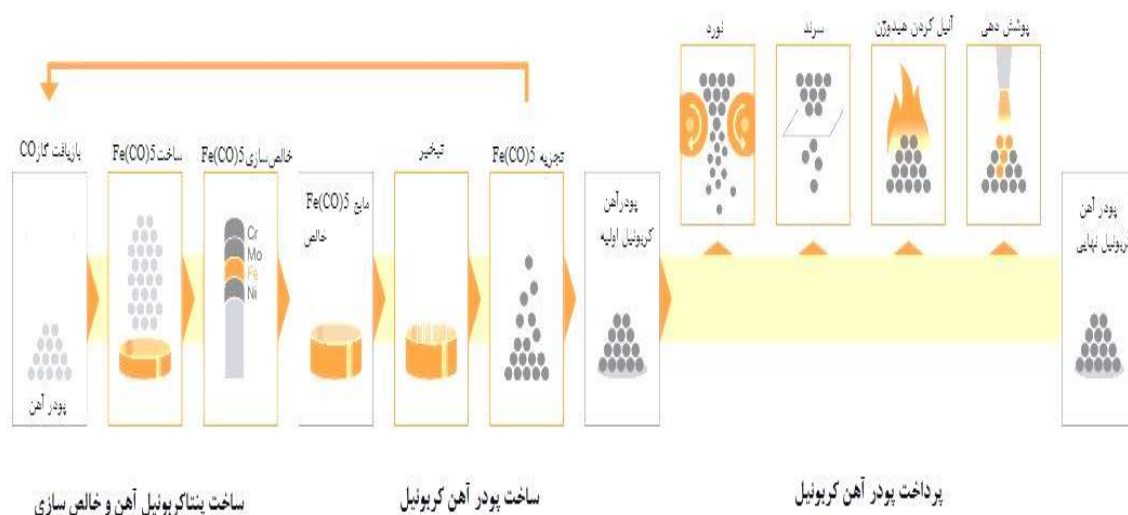
در این فصل ابتدا نحوه ساخت سیال MR بیان شده و سپس دمپر MR طراحی می‌گردد. در ادامه با استفاده از نقشه‌های دوبعدی دمپر MR ساخته می‌شود.

۲-۲ ترکیبات سیال MR

همانطور که در فصل گذشته بیان شد سیالات MR سوسپانسیون‌های مغناطیسی قابل کنترلی هستند که از فاز پراکنده فعال مغناطیسی، سیال حامل غیرمغناطیسی و عامل پایدارکننده تشکیل شده‌اند.

۱-۲-۲ فاز پراکنده فعال مغناطیسی

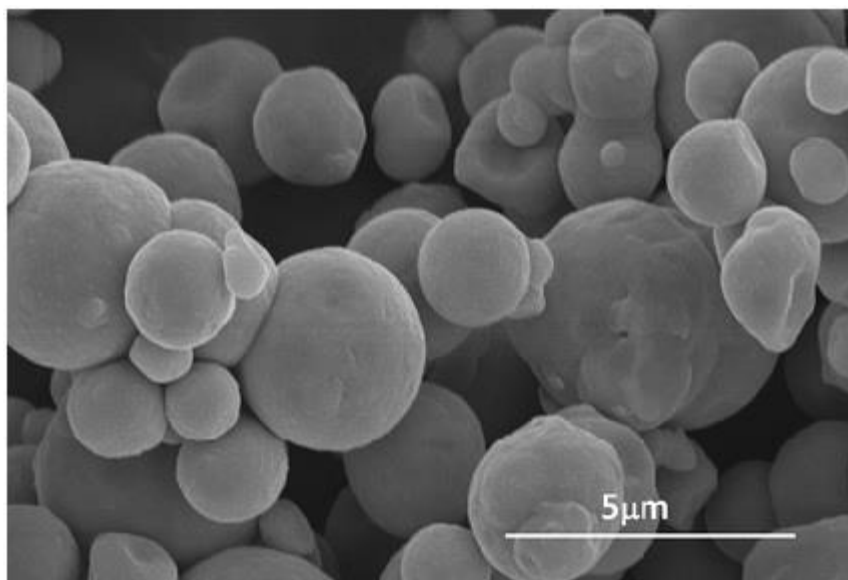
فاز پراکنده فعال مغناطیسی مهمترین عامل در قدرت سیالات MR می‌باشد. انتخاب پودر آهن از این جهت در بهینه‌سازی اثر MR مهم است چون این ذرات دارای بالاترین قابلیت اشباع مغناطیسی هستند. پودر آهن کربونیل از تجزیه‌ی گرمایی پنتا کربونیل آهن ($\text{Fe}(\text{CO})_5$) با خلوص بالا تهیه



شکل ۱-۲ فرآیند تولید پودر آهن کربونیل

می‌شود.

در طول فرآیند تجزیه، لایه‌های آهن کروی بر روی هسته تشکیل می‌شود؛ از اینرو پودر آهن کربونیل ساختاری پوسته‌ای دارد. شرایط تجزیه، ویژگیهای اصلی پودر آهن کربونیل مانند توزیع اندازه ذرات را تعیین می‌کنند. در شکل ۲-۱ فرآیند تولید پودر آهن کربونیل نشان داده شده است.



شکل ۲-۲ تصویر SEM از پودر آهن کربونیل

شکل ۲-۲ ساختار ذرات آهن کربونیل را که توسط SEM تهیه شده، نشان می‌دهد. ذرات تقریباً کروی و با میانگین اندازه $2\ \mu\text{m}$ می‌باشند.

۲-۲-۲ عامل پایدارکننده

فعال کننده‌های سطح جزء عوامل پراکنش با وزن مولکولی پایین هستند. مولکول‌های فعال-کننده سطح کشش سطحی بین رنگدانه و محلول رزین را کاهش می‌دهند. کاهش کشش سطحی نشئت گرفته از این موضوع است که ساختار فعال کننده‌های سطح از دو گروه با حلالیت متفاوت یا قابلیت قطبی شدن متفاوت تشکیل شده است. در محلول‌های آبی، گروه قطبی را گروه آب دوست و گروه غیرقطبی را گروه آب گریز یا چربی دوست می‌نامند. در محلول‌های غیر آبی گروه قطبی را گروه چربی گریز و گروه غیرقطبی را چربی دوست می‌نامند. فعال کننده‌های

سطح را با توجه به ساختار شیمیایی آن‌ها و گروه قطبی آن‌ها دسته‌بندی می‌کنند: آنیونی، کاتیونی، خنثی الکتریکی و غیر یونی. این دسته‌بندی در شکل ۳-۲ ارائه شده است.



شکل ۳-۲ دسته بندی فعال کننده های سطح

تاثیر فعال کننده‌های سطح بصورت زیر تعیین می‌شود:

- میزان جذب گروه قطبی به سطح ذرات جامد.
 - رفتار زنجیره‌ی غیرقطبی در سیال پیرامون ذرات جامد
- مکانیزم پایدارکنندگی در فعال کننده‌های سطح الکتروستاتیک می‌باشد: گروه‌های قطبی، دولایه‌ی الکتریکی در اطراف ذرات تشکیل می‌دهند. حرکت برونی موجب می‌شود ذرات جامد بطور پیوسته در محیط سیال حامل به یکدیگر برخورد کنند، از اینرو این ذرات در مرحله‌ی ته‌نشینی تمایل زیادی به دوباره کلوخه شدن دارند.

پربکاربردترین فعال کننده‌های سطح مورد استفاده برای پراکنش ذرات عبارتند از:

- مشتقات اسیدهای چرب
- استرهای اسید فسفریک
- اسید پلی اکریلیک
- الکل استیلن

در این پژوهش از اسید استئاریک که یک نوع اسید چرب اشباع شده با زنجیره‌ی ۱۸ تایی کربن می‌باشد، استفاده گردیده است. اتحادیه‌ی بین المللی شیمی محض و کاربردی این ماده را اسید اکتادکانوئیک نام‌گذاری کرده است. فرمول شیمیایی این اسید عبارتست از $C_{18}H_{36}O_2$.

۳-۲-۲ سیال حامل

کروسین، روغن پارافین سبک، روغن معدنی، روغن سیلیکون با ویسکوزیته‌ی بین ۱/۵ cP تا ۷۰۰ cP در ۱۰۰ F و آب برخی از سیالات حاملی هستند که در ساخت سیالات MR مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این پژوهش از روغن هیدرولیک کاسپین VG46 بعنوان سیال حامل استفاده شده است. مشخصات این روغن در جدول ۱-۲ آمده است.

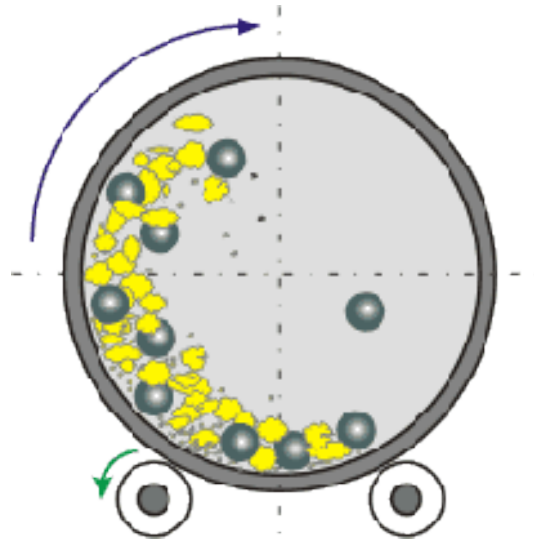
جدول ۱-۲ مشخصات روغن هیدرولیکی VG46

ویسکوزیته در (mm ² /s) +100°C	ویسکوزیته در (mm ² /s) +40°C	چگالی در (g/cm ³) +15°C	شاخص ویسکوزیته طبق استاندارد ISO
۶/۷	۴۶	۰/۸۸	VG46

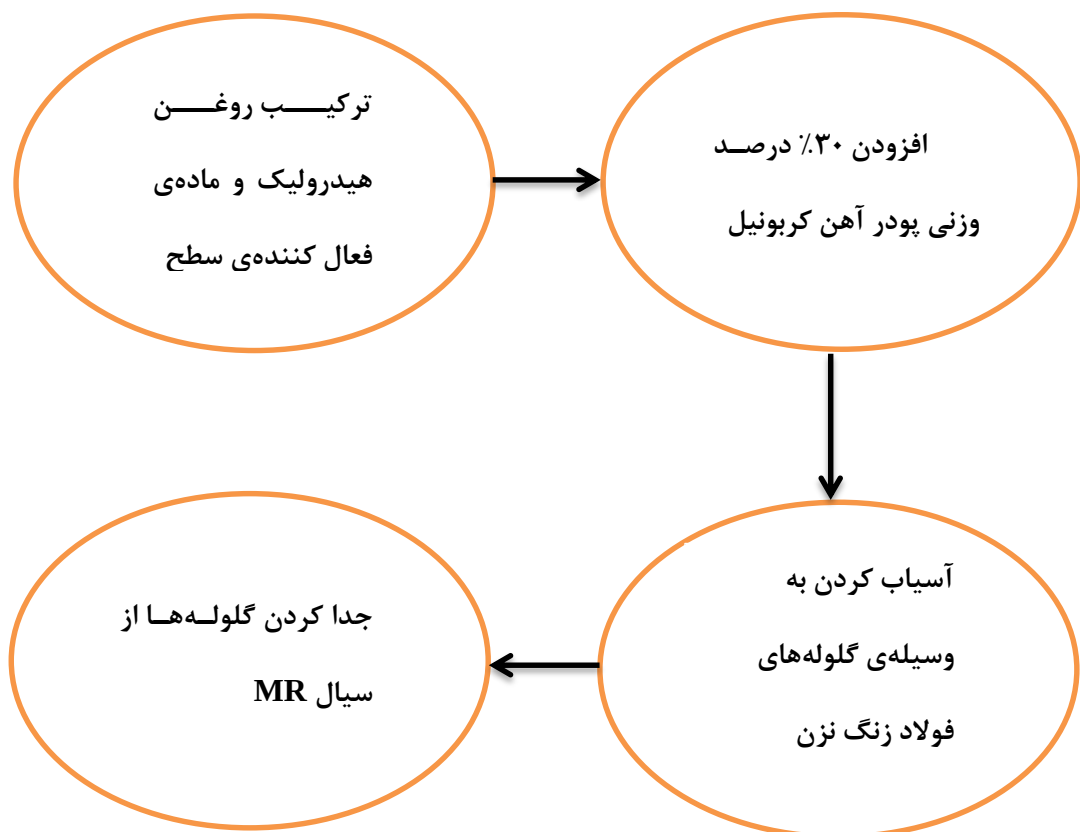
۳-۲ ساخت سیال MR

در ساخت این سیال از ۷۰٪ وزنی روغن هیدرولیک، ۳۰٪ وزنی پودر آهن کربونیل و ۳٪ وزنی پودر آهن، اسید استئاریک استفاده شده است. در ابتدا ماده‌ی فعال کننده‌ی سطح را در روغن هیدرولیک به کمک همزن مغناطیسی magnetic stirrer حل می‌کنیم. شایان ذکر است که جهت حل شدن اسید استئاریک در روغن هیدرولیک کاسپین باید در حین هم زدن کمی گرما نیز به ظرف حاوی این دو ماده داده شود در غیر اینصورت فرآیند حل شدن اسید استئاریک در روغن هیدرولیک به شدت زمان‌بر خواهد بود. پس از آن پودر آهن کربونیل را به داخل ظرف اضافه کرده و به کمک مخلوط کن stirrer به مدت ۱۰ دقیقه این مواد را با هم مخلوط می‌کنیم. پس از این مرحله سیال MR را به

مدت ۱۲ ساعت بوسیله‌ی گلوله آسیاب می‌کنیم. برای آسیاب کردن از گلوله‌های فولاد زنگ نزن به قطر ۱۲ میلیمتر استفاده گردید. در شکل ۲-۴ نمای شماتیک یک آسیاب گلوله‌ای نشان داده شده است. پس از اتمام این زمان گلوله‌ها را از سیال جدا کرده و سیال را در ظرف دیگری می‌ریزیم.



شکل ۲-۴ آسیاب گلوله‌ای



شکل ۲-۵ فلوجارت ساخت سیال MR

۴-۲ ساخت دمپر

ساخت دمپر MR نیازمند دو مرحله‌ی اولیه می‌باشد که شامل طراحی هندسه‌ی دمپر MR و طراحی مدار مغناطیسی می‌شود.

۴-۲-۱ طراحی هندسه دمپر MR

برای طراحی هندسه‌ی دمپر MR، فرض می‌کنیم پارامترهای زیر مشخص می‌باشند [۱]:

۱- تنش تسلیم سیال MR یعنی τ_y

۲- شعاع سیلندر دمپر MR

۳- بیشینه سرعت V_p پیستون دمپر MR

افت فشار در امتداد شیار عبور سیال عبارتست از:

$$\Delta p = \Delta p_\eta + \Delta p_\tau = \frac{6\nu_p (A_p + \pi R_m h)}{\pi R_m h^3} \eta L + \frac{c}{h} \tau_y (H) L \quad (1-2)$$

در معادله (۱-۲) Δp_η افت فشار ویسکوز و Δp_τ افت فشار ناشی از تنش تسلیم وابسته به

میدان، A_p مساحت سطح مقطع پیستون، R_m شعاع میانگین شیار عبور سیال، h ضخامت شیار

عبور سیال، L طول سیم‌پیچ، η ویسکوزیته‌ی پلاستیک می‌باشند. پارامتر C در این معادله تابع

پروفیل سرعت جریان است.

$$c = \left(2.07 + \frac{12\eta A_p \nu_p}{12\eta A_p \nu_p + 0.4A_g h \tau_y} \right) \quad (2-2)$$

متغیر c از حداقل مقدار ۲ (برای $\Delta P_\tau / \Delta P_\eta < 1$) تا حداکثر مقدار ۳ (برای

$\Delta P_\tau / \Delta P_\eta > 100$) تغییر می‌کند.

مشخص است که $2\pi R_m h = A_g$ مساحت شیار عبور سیال می‌باشد لذا

$$\Delta p_\eta = \frac{12\eta A_{Rm} \nu_p}{A_g h^2} L \quad (3-2)$$

که در این معادله $A_{Rm} = \pi R_m^2 = A_p + \frac{A_g}{2}$

در نتیجه نیروی مقاوم دمپر عبارتست از:

$$F = \Delta p A_p = \Delta p_{\eta} A_p + \Delta p_{\tau} A_p = F_{\eta} + F_{\tau} \quad (4-2)$$

بنابراین

$$F_{\eta} = \frac{12\eta A_{Rm} v_p}{A_g h^2} A_p L \quad (5-2)$$

و

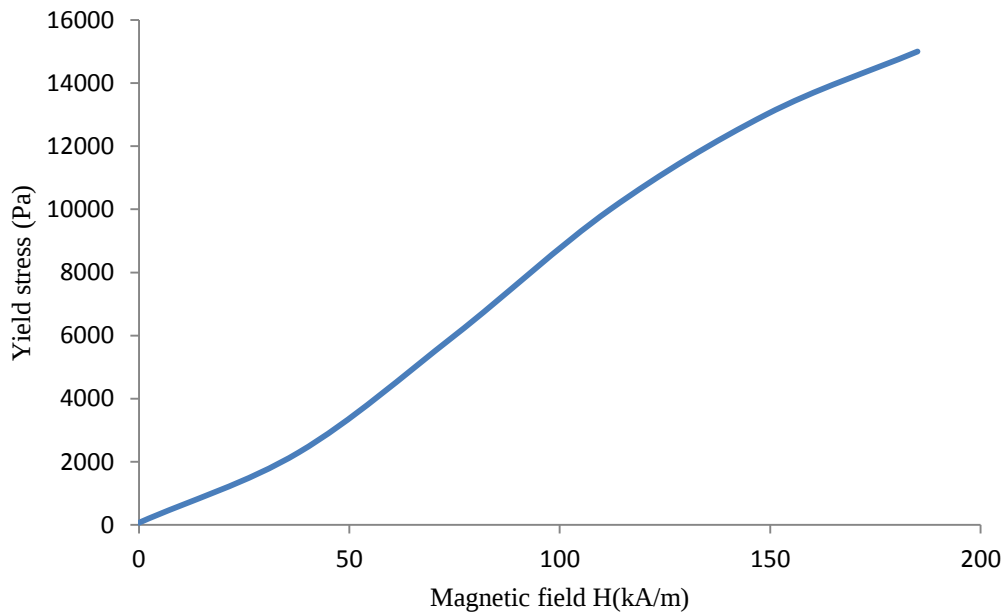
$$F_{\tau} = \frac{c \tau_y (H) A_p}{h} L \quad (6-2)$$

در معادلات بالا F_{η} و F_{τ} به ترتیب مولفه‌ی ویسکوز نیروی میرایی دمپر و مولفه‌ی ناشی از

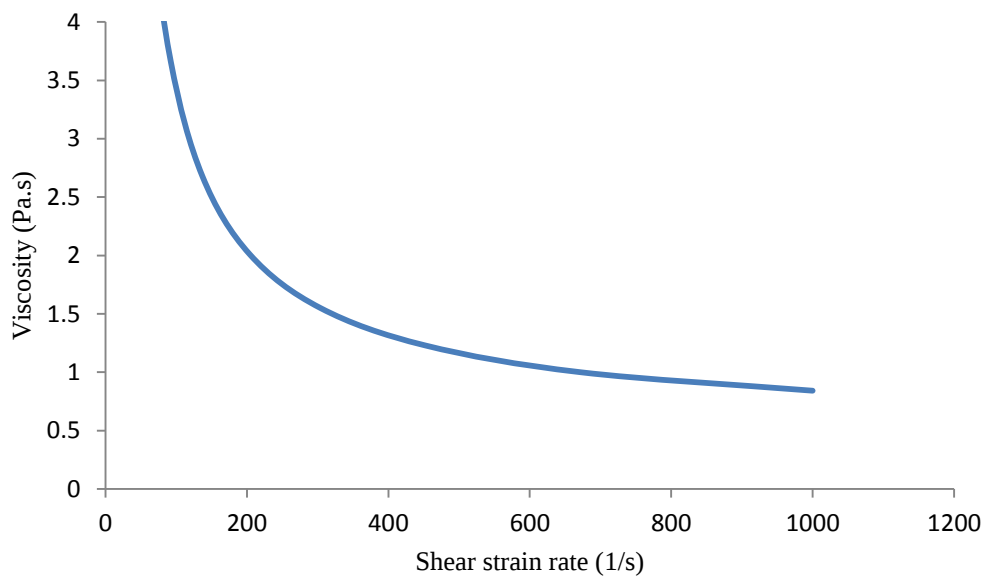
تنش تسلیم وابسته به میدان می‌باشند.

در طراحی دمپرهای MR فرض بر این است که سیال MR از لحاظ مغناطیسی اشباع شده است؛

تنها در این حالت است که سیال، بیشینه تنش تسلیم τ_y را از خود نشان می‌دهد.



شکل ۶-۲ تنش تسلیم برحسب میدان مغناطیسی برای سیال MR



شکل ۷-۲ ویسکوزیته برحسب نرخ کرنش برشی برای سیال MR

با توجه به شکل ۶-۲ سیال MR در $H = 185 \text{ kA} / \text{m}$ به حالت اشباع می‌رسد که تنش تسلیم متناظر با این میدان مغناطیسی برابر $\tau_y = 15 \text{ kPa}$ می‌باشد.

ویسکوزیته‌ی پلاستیک در حالت غیرفعال برای سیال MR با توجه به شکل ۷-۲ برابر $\eta = 0.5 \text{ Pa.s}$ است.

۱-۱-۴-۲ تعیین پهنای شیار و طراحی هیدرولیکی

در هنگام طراحی دمپر MR محدوده‌ی دینامیکی و بیشینه مقدار نیروی قابل کنترل دو پارامتر کلیدی می‌باشند.

۱-۱-۴-۲-۱ نیروی قابل کنترل و محدوده دینامیکی

نیروی قابل کنترل F_r بیان‌کننده‌ی نیروی حاصل از تنش تسلیم القا شده توسط میدان τ_y می‌باشد.

محدوده‌ی دینامیکی بصورت نسبت نیروی خروجی کل F به نیروی غیرقابل کنترل F_{uc} تعریف

می‌شود. نیروی غیرقابل کنترل F_{uc} شامل نیروی ویسکوز F_η و نیروی اصطکاک می‌باشد. بنابراین

$$D = \frac{F}{F_{uc}} = \frac{F_{uc} + F_\tau}{F_{uc}} = 1 + \frac{F_\tau}{F_\eta + F_f} \quad (۷-۲)$$

با جانشین کردن معادلات (۵-۲) و (۶-۲) در معادله‌ی بالا خواهیم داشت

$$D = 1 + \frac{c \tau_y L A_p A_g h}{12 \eta A_{Rm} \nu_p A_p L + A_g h^2 F_f} \quad (۸-۲)$$

در این معادله c از معادله‌ی بدست می‌آید، $A_p = \frac{\pi}{4} \left[(d_{cyl}^{in})^2 - 4 d_{ret} h - d_{rod}^2 \right]$ مساحت سطح

مقطع پیستون، F_f نیروی اصطکاک، $A_{Rm} = \frac{\pi}{4} \left[(d_{cyl}^{in})^2 - 2 d_{ret} h - d_{rod}^2 \right]$ مساحت میانگین شیار

عبور سیال و $A_g = \pi d_{ret} h$ مساحت سطح مقطع شیار عبور سیال می‌باشند. نکته قابل توجه این

است که مقادیر F_f و طول سیم‌پیچ مغناطیسی L تاثیری بر مقدار بهینه‌ی شیار ندارد.

جهت افزایش کارایی دمپر MR، محدوده‌ی دینامیکی نیرو باید تا حد امکان بزرگ باشد. اندازه‌ی

شیار کوچک نیروی قابل کنترل را افزایش می‌دهد اما هنگامیکه اندازه‌ی شیار h بسیار کوچک باشد

نیروی ویسکوز F_η سریعتر از نیروی قابل کنترل F_τ افزایش می‌یابد و محدوده‌ی دینامیکی D کاهش

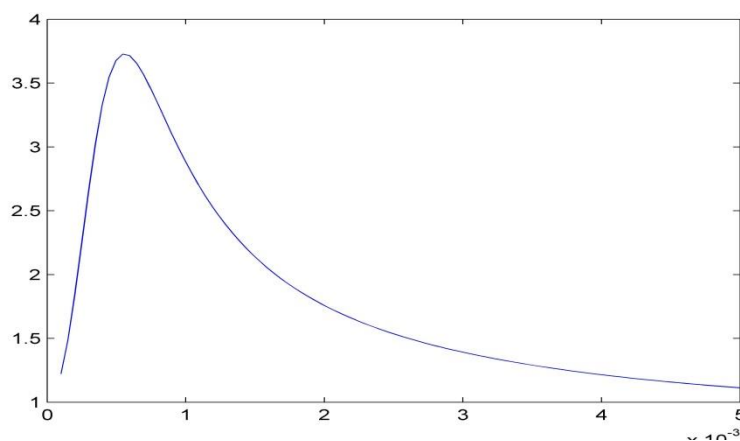
می‌یابد. اگر اندازه‌ی شیار h بزرگ باشد، هم F_η و هم F_τ کاهش می‌یابند. از اینرو باید یک اندازه‌ی

شیار بهینه وجود داشته باشد که محدوده‌ی دینامیکی D را بیشینه نماید.

در شکل ۸-۲ نمودار محدوده‌ی دینامیکی براساس اطلاعات طراحی برحسب اندازه‌ی شیار رسم

شده است. از این نمودار پهنای شیار $h = 0.54 \times 10^{-3} m$ برای $D_{max} \cong 3.73$ بدست می‌آید. با

مشخص شدن این پارامتر، پارامترهای ابعادی و کاری مدار هیدرولیکی تعیین شده‌اند.



شکل ۲-۸ محدوده دینامیکی برحسب پهنای شیار عبور سیال

۲-۴-۲ طراحی مدار مغناطیسی

فرآیند طراحی مدار مغناطیسی شامل مراحل زیر است:

۱- انتخاب نقطه‌ی عملکرد سیال MR : با توجه به مشخصات سیال MR ساخته شده،

$H = 185 \text{ kA/m}$ بدست می‌آید.

۲- انتخاب جنس پیستون و قطعه‌ای که مدار مغناطیسی توسط آن بسته می‌شود. فولاد کم

کربن (میزان کربن فولاد باید کمتر از ۰/۱۵٪ باشد) با ضریب نفوذپذیری مغناطیسی بالا

مطلوب می‌باشد.

۳- تعیین طول سیم‌پیچ مغناطیسی. در این پژوهش از دو سیم‌پیچ مساوی استفاده شده است.

۲-۴-۲-۱ شبیه سازی میدان مغناطیسی به کمک نرم افزار ANSYS Maxwell

۲-۴-۲-۱-۱ آشنایی با ANSYS Maxwell

ANSYS Maxwell یک بسته‌ی نرم‌افزاری تعاملی با عملکرد بالا است که از تحلیل اجزای

محدود (FEA) برای حل مسائل الکتریکی یا مغناطیسی استفاده می‌کند.

این نرم‌افزار مسائل میدان الکترومغناطیسی را با حل معادلات ماکسول، که در زیر آمده است، در

یک ناحیه‌ی محدود از فضا با استفاده از شرایط مرزی و شرایط اولیه‌ای که توسط کاربر تعیین می-

شود، حل می‌کند.

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (9-2)$$

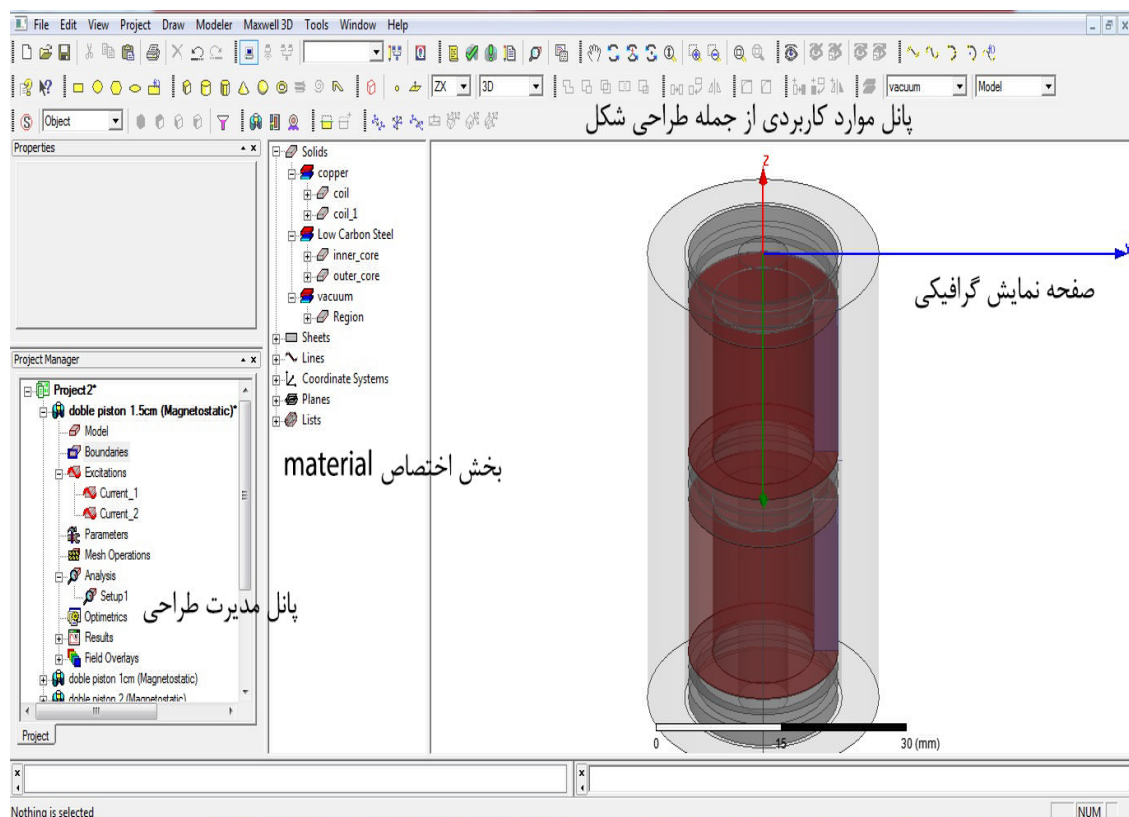
$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot D = \rho$$

$$\nabla \cdot B = 0$$

معادله‌های ماکسول، معادله‌هایی هستند که چگونگی ایجاد شدن میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی را توسط بارها و جریان‌های الکتریکی و نیز پیدایش یکی از این میدان‌ها توسط تغییر میدان دیگر را توصیف می‌کنند. این معادله‌ها مبانی الکترومغناطیس کلاسیک و مهندسی برق به شمار می‌روند که اولین بار توسط فیزیکدان اسکاتلندی جیمز کلرک ماکسول فرمول‌بندی شده‌اند.

در این معادلات ρ چگالی بار الکتریکی، J چگالی جریان الکتریکی، E شدت میدان الکتریکی، H

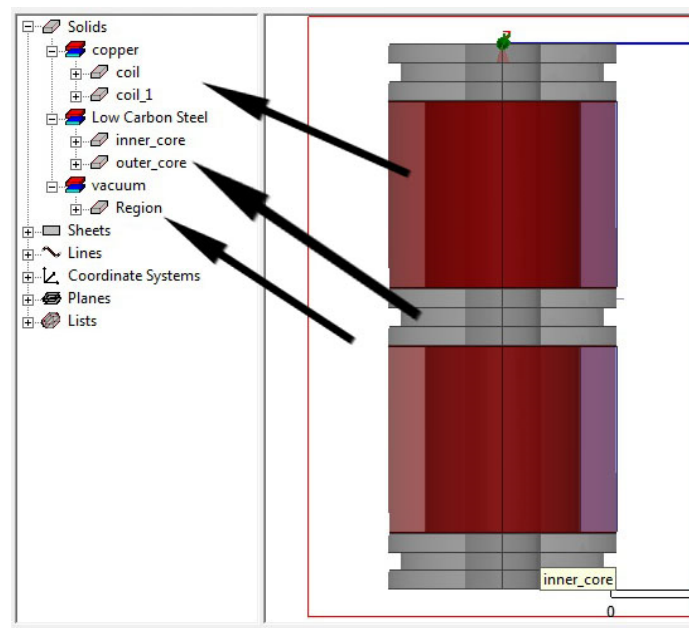


شکل ۹-۲ نمای کلی از محیط نرم افزار ANSYS Maxwell

شدت میدان مغناطیسی و H و D میدانهایی هستند که توسط چگالی قطبیت الکتریکی و مغناطیسی به ترتیب P و M در ماده تعریف می‌شوند. نرم‌افزار ANSYS Maxwell دارای حلگرهای متفاوتی است که در این پژوهش جهت شبیه‌سازی از حلگر مگنتواستاتیک استفاده شده است. روند طراحی و پیاده‌سازی عملکرد مغناطیسی کویل در ادامه معرفی و مختصراً تشریح می‌گردد. شکل ۲-۹ نمایی کلی از محیط نرم‌افزار را نمایش می‌دهد.

گام اول در شبیه‌سازی، طراحی قطعه مورد نظر در یک نرم‌افزار طراحی می‌باشد بدین منظور می‌توان از پانل طراحی Maxwell و یا هر نرم‌افزار شبیه‌سازی سه بعدی (مثلاً SolidWorks) بهره برد. در این پژوهش برای تسریع در فرآیند طراحی، ابتدا طرح کویل در SolidWorks طراحی و سپس برای بررسی عملکرد مغناطیسی به Maxwell import می‌گردد.

در مرحله بعد، بایستی جنس مواد برای قطعه مورد نظر تعریف گردد. ماده انتخابی برای هسته و قطعه‌ی پیرامون آن ST-37 است. سیم‌پیچ‌های کویل از نوع مس هستند و فضای پیرامون قطعه را سیال MR ساخته شده، پوشانده است. شکل ۲-۱۰ نمایی از پانل اختصاصی material و نوع ماده هر بخش از قطعه را نمایش می‌دهد.

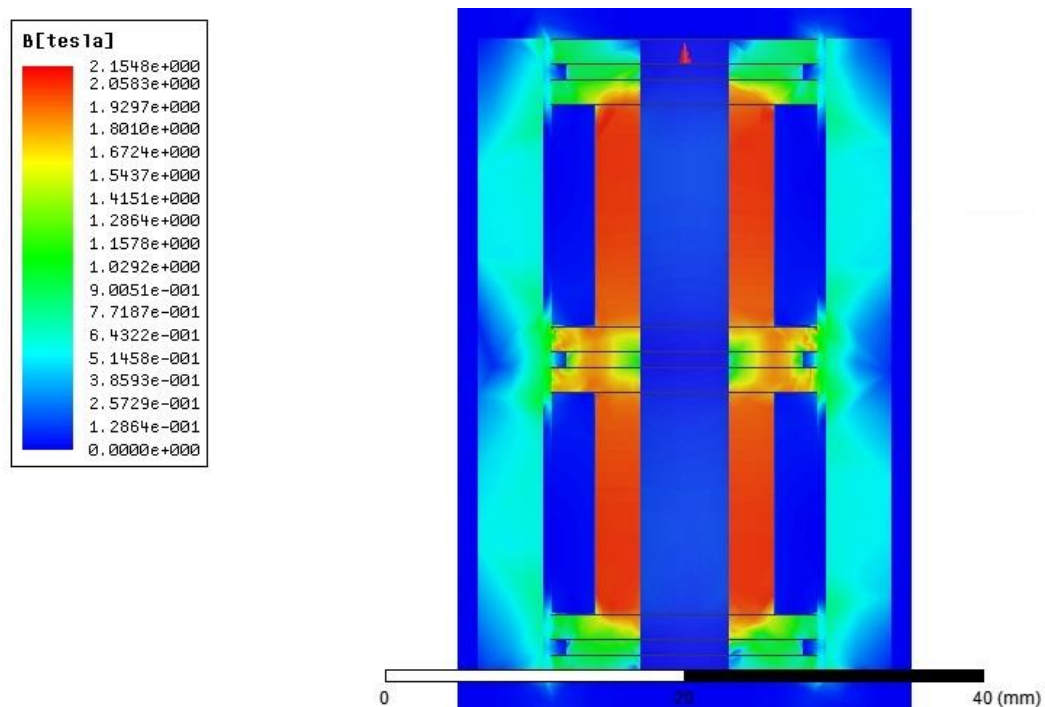


شکل ۲-۱۰ پانل اختصاصی material

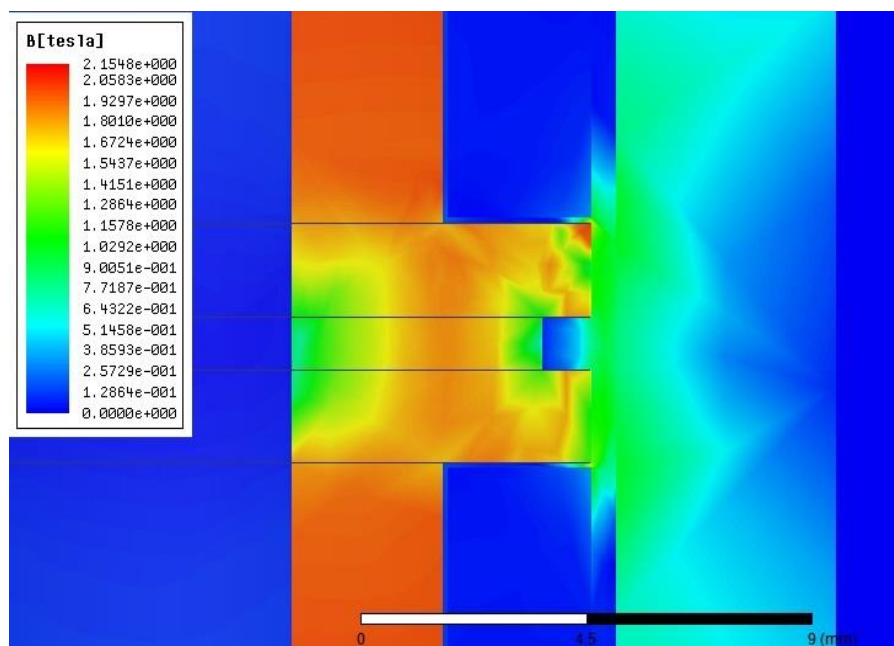
گام بعدی طراحی تعریف سیم‌پیچ‌های کوئل و اختصاص جریان ثابت به آنها می‌باشد. شدت جریان انتخابی به فضای در دسترس برای سیم‌بندی مرتبط است. سیم مسی انتخابی، سیم به قطر ۰/۵ میلیمتر می‌باشد. در ساختار قطعه مورد آزمایش دو بخش برای سیم‌پیچی وجود دارد، بنابراین کل آمپر دور تولید شده دو برابر آمپر دور هر یک از کوئل‌ها می‌باشد.

در نهایت با انتخاب درصد خطای پیشنهادی برای نتایج محاسبات فرآیند تجزیه و تحلیل را آغاز می‌نماییم.

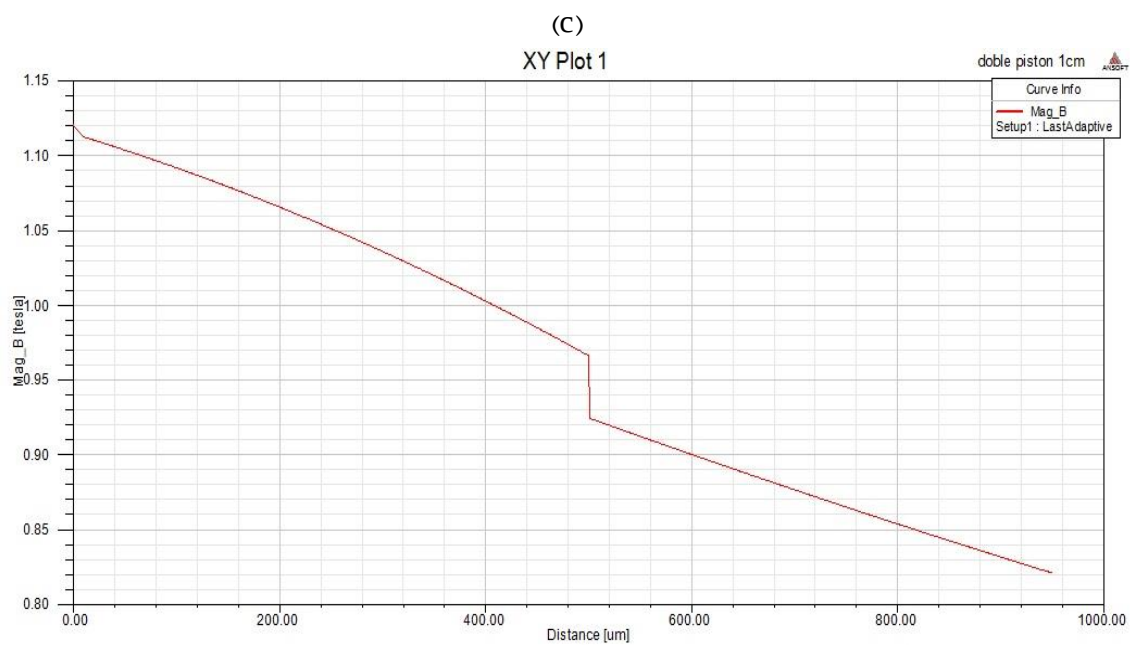
شکل ۱۱-۲ (a) هسته سیم‌پیچ با سه شیار به عرض ۱ میلیمتر را نشان می‌دهد و شکل ۱۱-۲ (b) قسمتی که بیشترین چگالی شار را دارد نمایش می‌دهد. تغییر چگالی شار در امتداد شیار عبور سیال در شکل ۱۱-۲ (c) ارائه شده است.



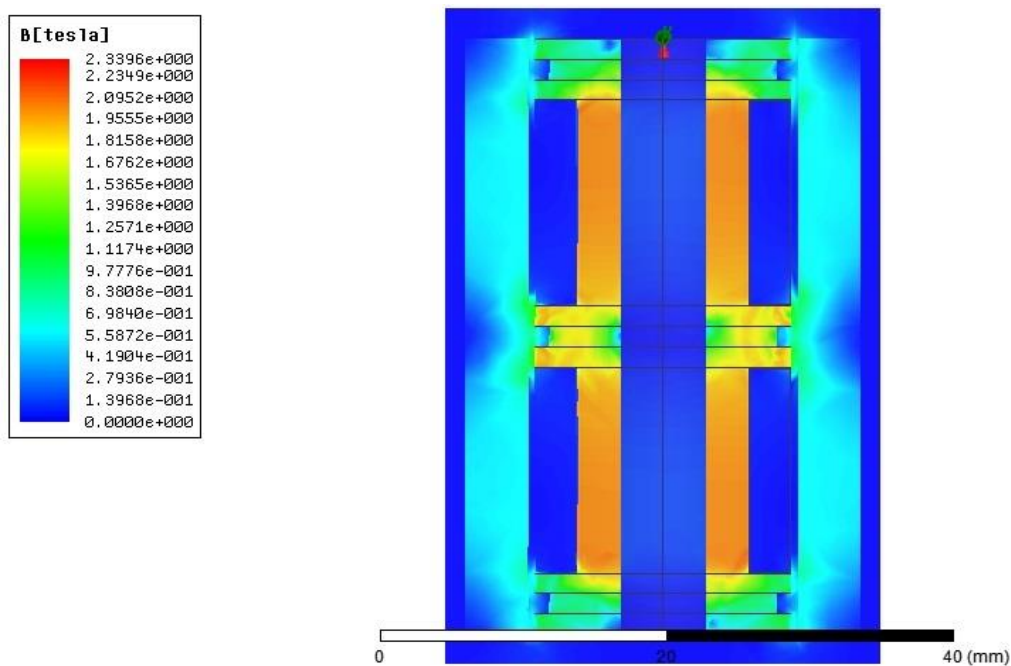
(a)



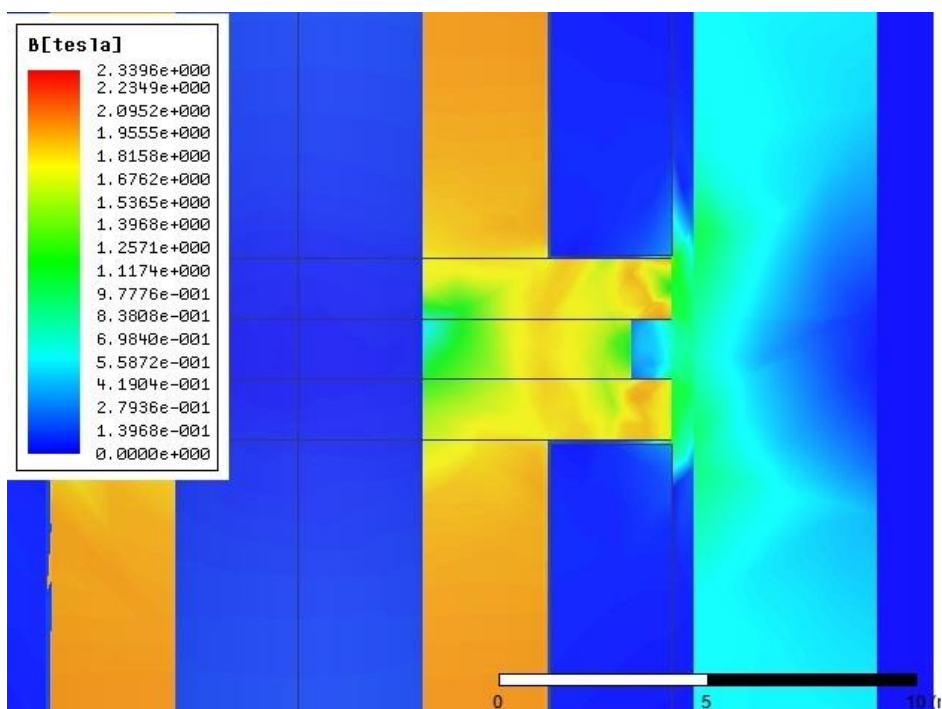
(b)



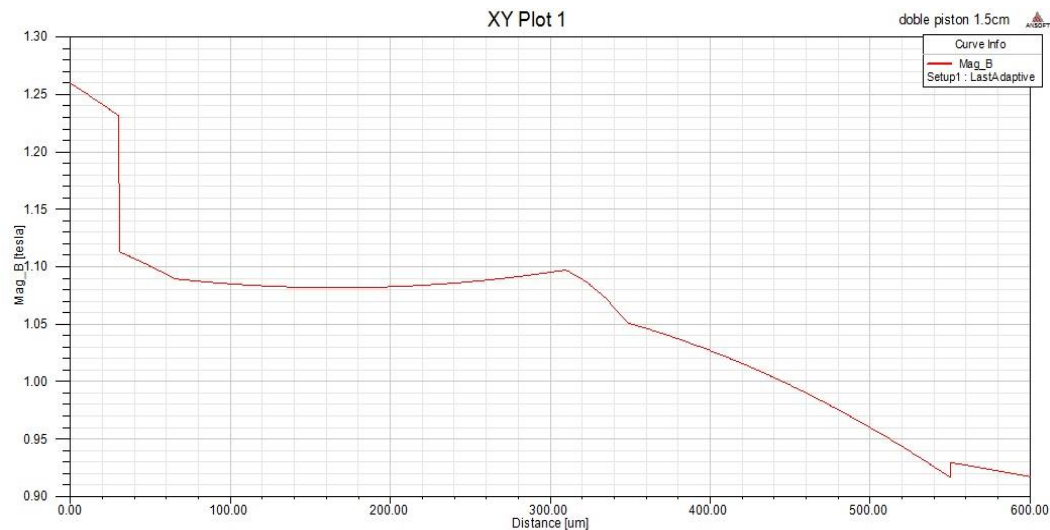
شکل ۲-۱۱ چگالی شار مغناطیسی برای ضخامت شیار ۱ میلیمتر (a) کانتور چگالی شار مغناطیسی پیستون (b) کانتور چگالی شار مغناطیسی بین دو سیم پیچ (c) چگالی شار مغناطیسی برحسب فاصله از هسته بین دو سیم پیچ



(a)



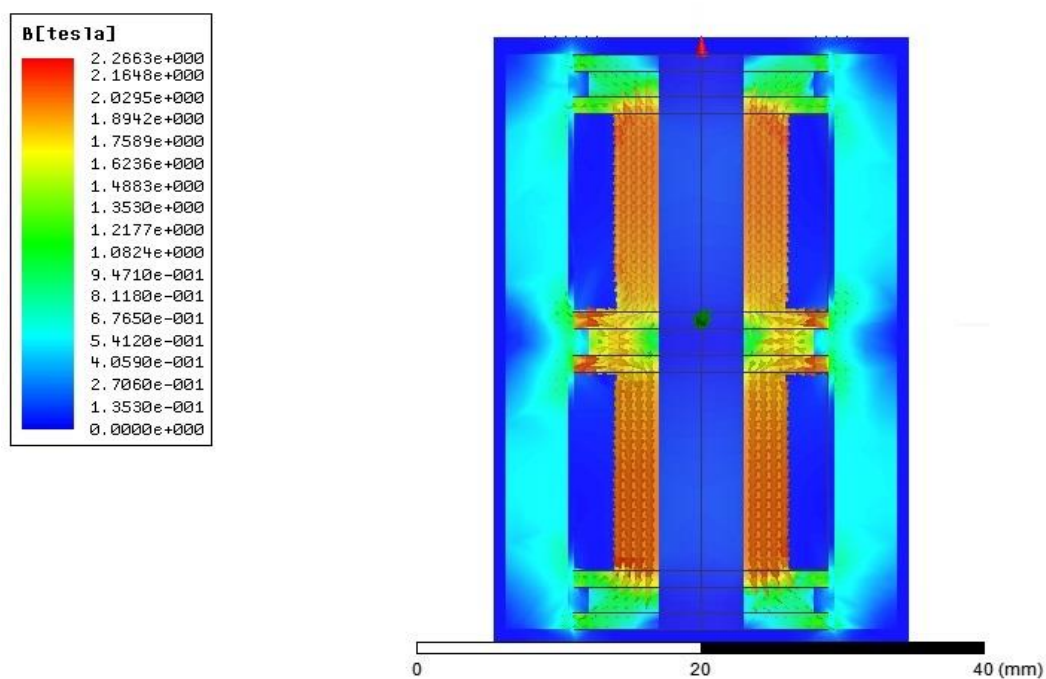
(b)



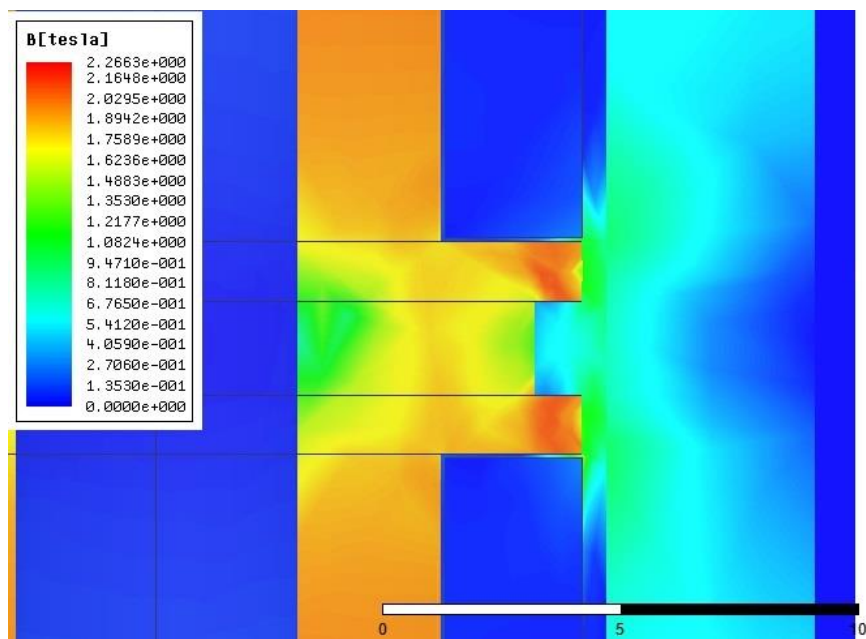
(C)

شکل ۱۲-۲ چگالی شار مغناطیسی برای ضخامت شیار ۱/۵ میلیمتر (a) کانتور چگالی شار مغناطیسی پیستون (b) کانتور چگالی شار مغناطیسی بین دو سیم پیچ (c) چگالی شار مغناطیسی برحسب فاصله از هسته بین دو سیم پیچ

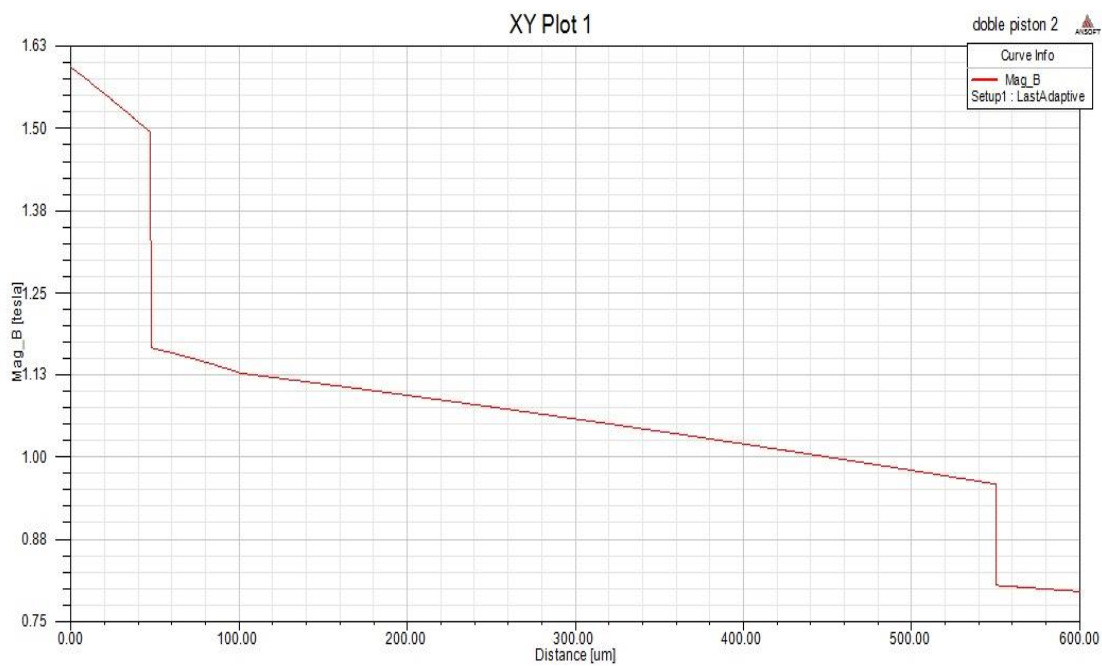
شکل ۱۲-۲ (a) هسته سیم پیچ با سه شیار به عرض ۱/۵ میلیمتر را نشان می دهد و شکل ۱۲-۲ (b) قسمتی که بیشترین چگالی شار را دارد نمایش می دهد. تغییر چگالی شار در امتداد شیار عبور سیال در شکل ۱۲-۲ (c) ارائه شده است.



(a)



(b)



(c)

شکل ۲-۱۳ چگالی شار مغناطیسی برای ضخامت شیار ۲ میلیمتر (a) کانتور چگالی شار مغناطیسی پیستون (b) کانتور چگالی شار مغناطیسی بین دو سیم پیچ (c) چگالی شار مغناطیسی برحسب فاصله از هسته بین دو سیم پیچ

شکل ۲-۱۳ (a) هسته سیم‌پیچ با سه شیار به عرض ۲ میلی‌متر را نشان می‌دهد و شکل ۲-۱۳ (b) قسمتی که بیشترین چگالی شار را دارد نمایش می‌دهد. تغییر چگالی شار در امتداد شیار عبور سیال در شکل ۲-۱۳ (c) ارائه شده است.

با توجه به شبیه‌سازی با نرم‌افزار ANSYS Maxwell طول هر قطب و ضخامت شیار اطراف قطب‌ها جهت دست یافتن به چگالی شار $B=1.1 \text{ T}$ که برای سیال مورد مطالعه معادل $H=185 \text{ kA/m}$ است، در ناحیه‌ی فعال عبارت است از:

- طول هر سیم‌پیچ (L): ۱۵ میلی‌متر
- ضخامت شیار: ۲ میلی‌متر

نکته حائز اهمیت در شبیه‌سازی این است که تعداد دورهای زیاد در یک سیم‌پیچ الکترومغناطیسی لزوماً داشتن یک مدار مغناطیسی قوی (شار مغناطیسی بالا) را تضمین نمی‌کند. طراح باید سعی کند تا بین تعداد دورها و میزان جریان قابل دسترس بوسیله‌ی منبع جریان تعادل برقرار نماید. کاهش قطر سیم موجب افزایش تعداد دورها می‌گردد اما به بهای افزایش مقاومت الکتریکی و کاهش بیشتر جریان درون سیم‌پیچ، این موضوع می‌تواند به شدت چگالی شار الکترومغناطیسی را کاهش دهد. برعکس، افزایش قطر سیم تعداد دورها را کاهش می‌دهد اما موجب افزایش جریان درون سیم‌پیچ می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که افزایش قطر سیم نتایج مطلوب‌تری را نسبت به کاهش آن به همراه دارد (چگالی شار مغناطیسی بالاتر). در عمل سیمی باید انتخاب شود که توان عبور جریان الکتریکی حداقل ۴ آمپر را داشته باشد و در ضمن به کمک آن بتوان سیم‌پیچی با تعداد دورهای زیاد تهیه کرد.

مدار الکترومغناطیسی این دمپر تشکیل شده از پیستون آهنی که دارای دو سیم‌پیچ است. این سیم‌پیچ‌ها به دور دو شیار ماشینکاری شده پیرامون پیستون پیچیده شده‌اند. سیم‌پیچ‌ها با سیم به قطر ۰,۵ میلی‌متر پیچیده شده‌اند، هر کدام ۱۱۳ دور، و در جهت مخالف یکدیگر. این پیکربندی پیستونی را با دو سیم‌پیچ الکترومغناطیسی ۱۱۳ دور ایجاد می‌کند که دارای مقاومت کل $0,7 \Omega$ است.

هنگامیکه سیم‌پیچ‌ها پیچیده شدند، سیم‌پیچ با چسب پوشانده شد. دو دلیل برای استفاده از چسب وجود دارد. اولین دلیل، محافظت کردن از سیم‌پیچ‌ها است تا از پارگی و اتصال کوتاه شدن آنها جلوگیری شود. دومین دلیل، فراهم کردن یک مسیر صاف و بدون ناپیوستگی برای سیال در طول سیم‌پیچ است.

در جدول ۲-۲ کلیه پارامترهای مربوط به مدار هیدرولیکی و مغناطیسی دمپر MR ارائه شده است.

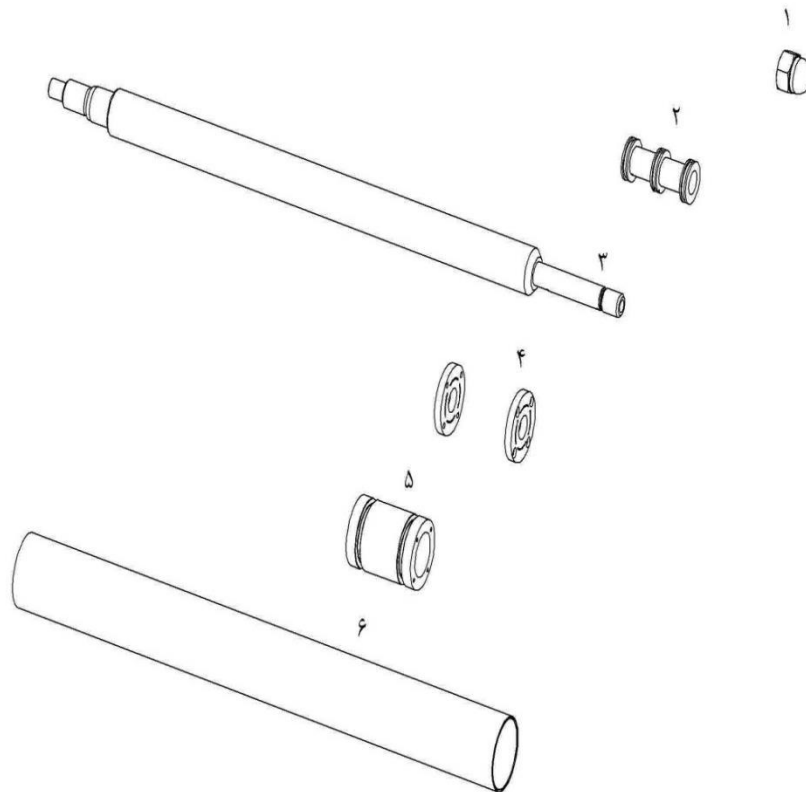
جدول ۲-۲ پارامترهای مدار هیدرولیکی و مغناطیسی دمپر MR

$A_p = 3.617 \times 10^{-4} m^2$	$c = 2.586$
$A_{Rm} = 3.772 \times 10^{-4} m^2$	$\tau_y = 15 kPa$
$A_g = 3.102 \times 10^{-5} m^2$	$\eta = 0.5 Pa.s$
$h = 5.454 \times 10^{-4} m$	$L = 1.5 \times 10^{-2} m$
$v_p = 0.05 m / s$	

۲-۵ نقشه‌ها

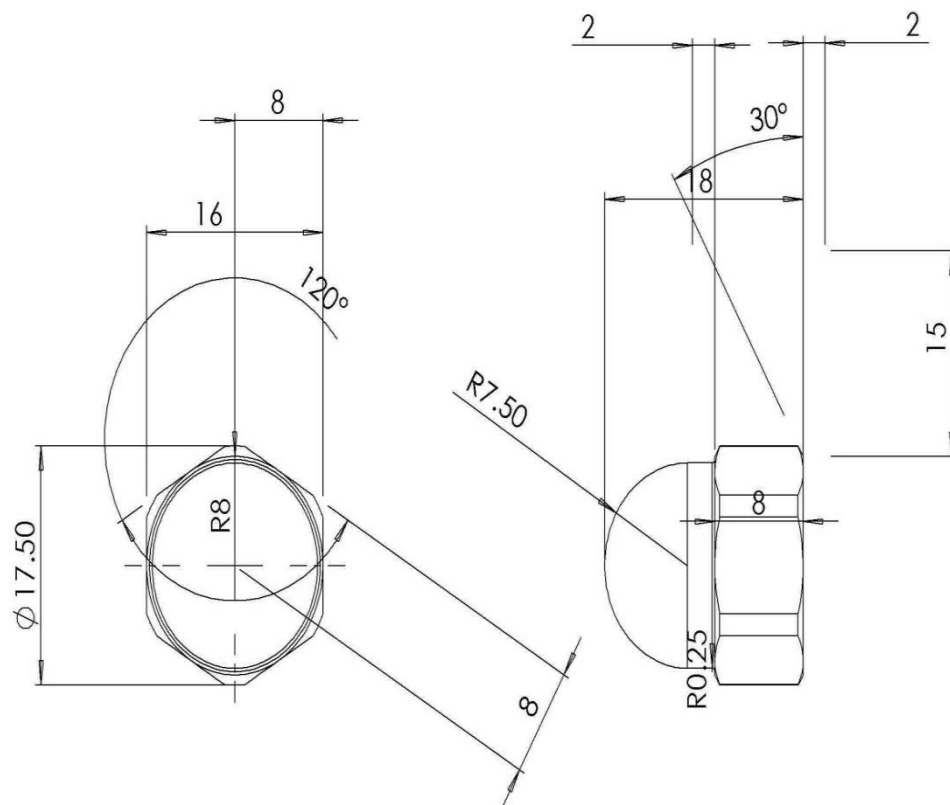
پس از مشخص شدن تمامی پارامترهای طراحی دمپر MR، نقشه‌های مورد نیاز برای ساخت دمپر بوسیله نرم‌افزار SolidWorks 2013 تهیه گردید. در شکل ۲-۱۴ نمای انفجاری دمپر MR طراحی شده، ارائه شده است. در ادامه نقشه‌های دوبعدی تمامی قطعات به ترتیب شماره‌گذاری شده در نمای انفجاری، آورده شده است. شکل ۲-۱۵ مهره‌ی انتهایی را نشان می‌دهد که وظیفه‌ی ثابت نگه‌داشتن پیستون را به عهده دارد. در شکل ۲-۱۶ هسته پیستون دمپر MR ارائه شده است. ابعاد میل‌پیستون این دمپر در شکل ۲-۱۷ آورده شده است. دو قطعه از جنس فولاد زنگ نزن ۳۰۴ که در دو سر هسته قرار می‌گیرند در شکل ۲-۱۸ نشان داده شده‌اند. شکل ۲-۱۹ برگرداننده‌ی شار را

نمایش می‌دهد و در آخرین قطعه که سیلندر دمپر MR می‌باشد در شکل ۲۰-۲ نشان داده شده است. شکل ۲۱-۲ تصویر پیستون مونتاژ شده‌ی دمپر MR را نشان می‌دهد. در شکل ۲۲-۲ دمپر MR بطور کامل مونتاژ شده و آماده‌ی تست گردیده است.



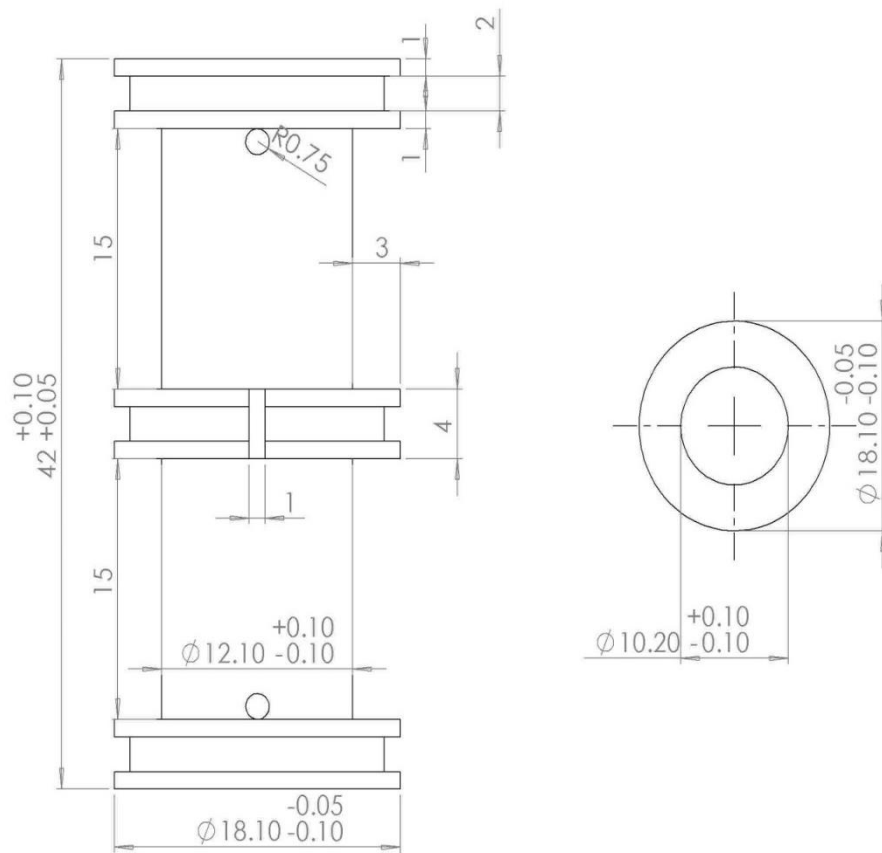
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
								MR Damper			
NAME		SIGNATURE		DATE				DWG NO.		A4	
DRAWN											
CHKD											
APPVD											
MFG											
Q.A						MATERIAL:					
						WEIGHT:		SCALE:		SHEET 1 OF 1	

شکل ۱۴-۲ نمای انفجاری از دمپر MR



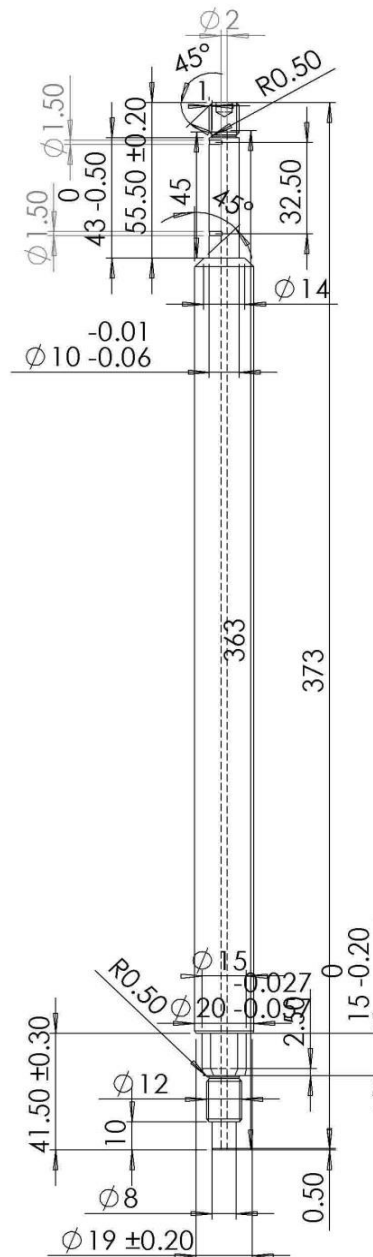
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
DRAWN						End cap nut			
CHK'D									
APPVD									
MFG									
Q.A						MATERIAL:		DWG NO.	
						Stainless steel		A4	
						WEIGHT:		SCALE:	
								SHEET 1 OF 1	

شکل ۱۵-۲ مهره انتهایی (قطعه شماره ۱)



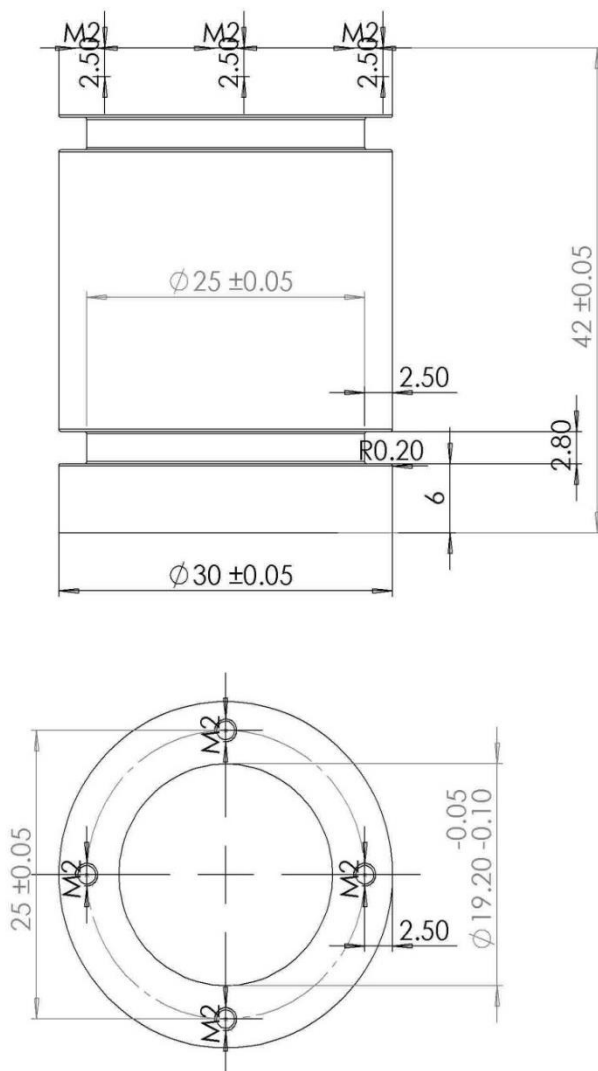
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
NAME				SIGNATURE		DATE		TITLE:			
DRAWN								Piston core			
CHKD											
APPVD											
MFG											
Q.A						MATERIAL:		DWG NO.			
						ST-37		A4			
						WEIGHT:		SCALE:1:1			
								SHEET 1 OF 1			

شکل ۱۶-۲ هسته پیستون (قطعه شماره ۲)



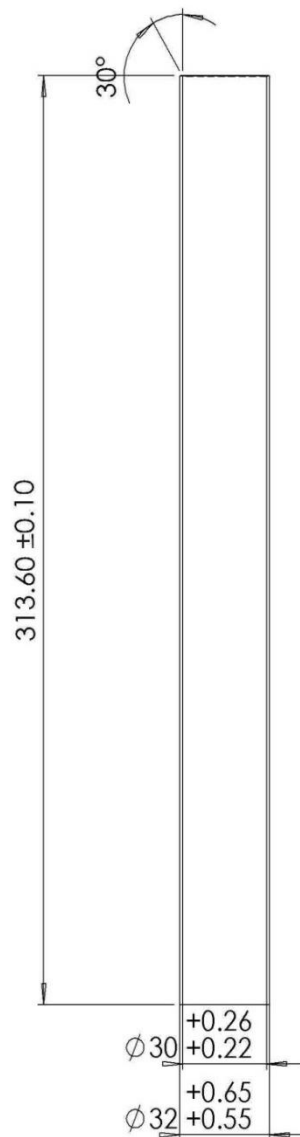
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN		NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:	
CHK'D								Piston rod	
APPVD									
MFG									
Q.A									
						MATERIAL:		DWG NO.	
						CK-45		A4	
						WEIGHT:		SCALE:	
								SHEET 1 OF 1	

شکل ۱۷-۲ میل پیستون (قطعه شماره ۳)



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
NAME				SIGNATURE		DATE		TITLE:			
DRAWN								Flux return			
CHK'D											
APPVD											
MFG											
Q.A								DWG NO.			
								A4			
								MATERIAL:			
								ST-37			
								WEIGHT:			
								SCALE:			
								SHEET 1 OF 1			

شکل ۱۹-۲ برگرداننده شار (قطعه شماره ۵)



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:		Cylinder	
DRAWN									
CHKD									
APPVD									
MFG									
Q.A						MATERIAL:		DWG NO.	
						ST-52		A4	
						WEIGHT:		SCALE:	
								SHEET 1 OF 1	

شکل ۲-۲۰ سیلندر (قطعه شماره ۶)



شکل ۲-۲۱ پیستون دمپر MR



شکل ۲-۲۲ دمپر MR مونتاژ شده

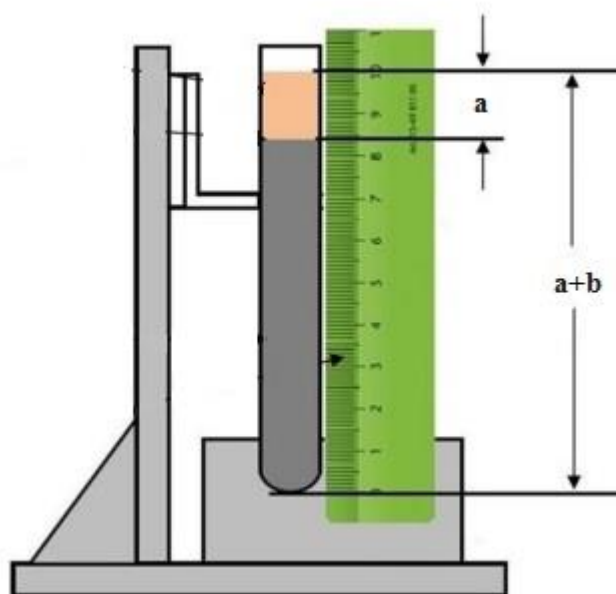
فصل ۳ (نتایج آزمایشگاهی)

۱-۳ تست ته نشینی

در این پژوهش میزان ته نشینی بوسیله‌ی مشاهده‌ی تغییر مکان مرز بین بخش شفاف و کدر سیال حامل در دمای اتاق اندازه‌گیری شده است. سیال MR ساخته شده را درون لوله آزمایش شیشه‌ای به قطر ۲۰mm و طول ۲۰cm برای چند روز نگهداری می‌کنیم. نسبت ته نشینی به کمک رابطه‌ی (۱-۳) قابل محاسبه می‌باشد:

$$R = \frac{b}{(a+b)} \cdot 100\% \quad (۱-۳)$$

در این رابطه a ارتفاع سیال شفاف و b ارتفاع سیال کدر است. نمای شماتیک نحوه اندازه‌گیری نسبت ته نشینی در شکل ۱-۳ نشان داده شده است.



شکل ۱-۳ نمای شماتیک نحوه اندازه‌گیری نسبت ته نشینی

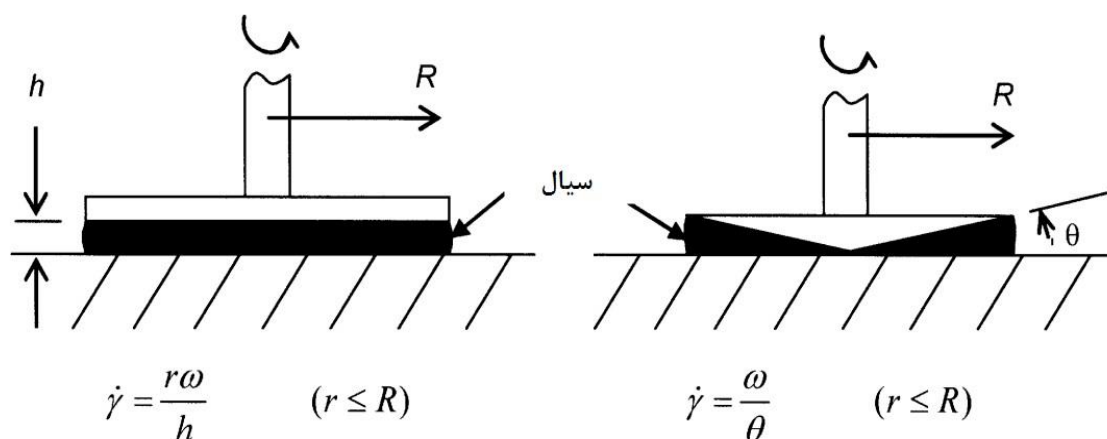
نتایج بدست آمده برای سیال MR ساخته شده در جدول ۱-۳ آمده است.

جدول ۱-۳ نتایج تست ته نشینی سیال MR ساخته شده

زمان (ساعت)	۱۲ ساعت	۲۴ ساعت	۳۶ ساعت	۴۸ ساعت
نسبت ته نشینی	۲٪	۳٪	۴٪	۵٪

۲-۳ دستگاه تعیین خواص سیال MR

سیالات وابسته به میدان بوسیله‌ی خواص ویسکوالاستیک خطی و برش-یکنواخت خود طبقه‌بندی می‌شوند که این کار به کمک روش‌های رئولوژیکی انجام می‌شود.



شکل ۲-۳ پیکربندی های مختلف رئومتر

دو نوع پیکربندی که در تعیین خواص اینگونه سیالات مورد استفاده قرار می‌گیرند در شکل ۲-۳ نشان داده شده‌اند. در این نوع پیکربندی‌ها حجم کوچکی از سیال نمونه بین دو صفحه‌ی موازی هم محور یا بین یک مخروط با زاویه‌ی کوچک و یک صفحه تحت جریان‌های برشی، نوسانی یا خزشی مورد آزمایش قرار می‌گیرد.

جهت انجام تست‌های رئومتری سیال MR ساخته شده، نیاز به رئومتری داریم که میدان مغناطیسی لازم جهت اعمال به سیال را فراهم نماید از اینرو کلیه‌ی تست‌های رئومتری سیال MR ساخته شده در آزمایشگاه رئومتری پژوهشگاه علوم و صنایع رنگ انجام شده است. رئومتر مورد استفاده در این تست مدل MCR 300 ساخت شرکت Anton Paar اتریش می‌باشد که توسط شرکت وارث شیمی بهار نمایندگی این شرکت در ایران تهیه شده است (شکل ۳-۳).

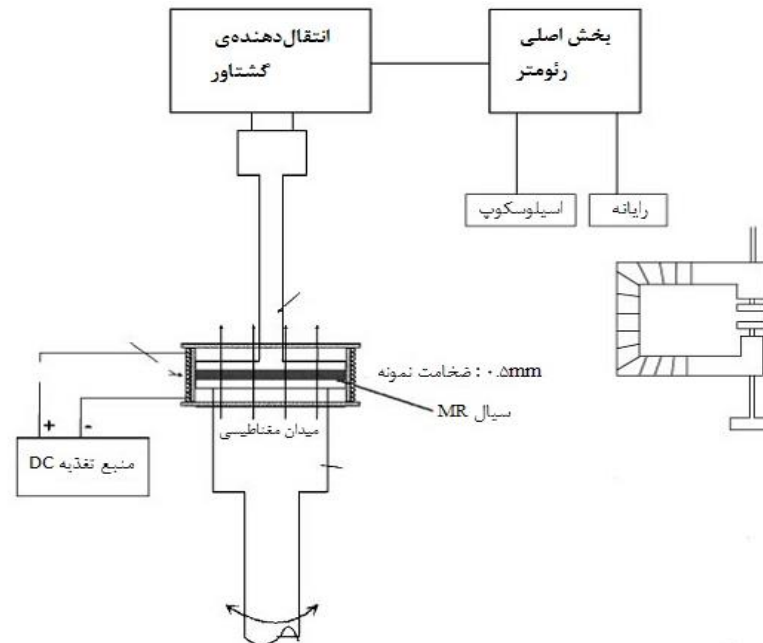
برای انجام تست‌ها ۰,۴ cc از سیال MR با دقت در وسط صفحه مشخص شده رئومتر قرار داده

می‌شود. ضخامت نمونه h ، ۰,۵ mm تنظیم می‌شود، شکل ۳-۳(b).

(a)



(b)



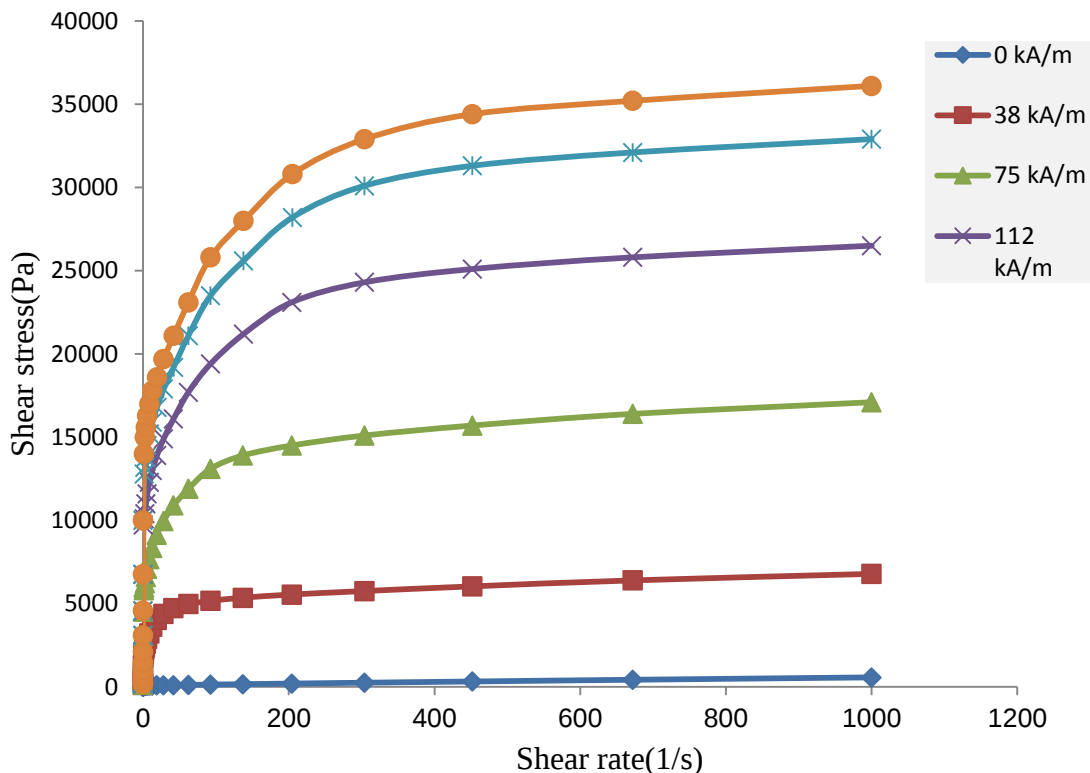
شکل ۳-۳ (a) رنومتر مدل MCR 300 (b) مکانیزم عملکرد رنومتر

۳-۳ نتایج تست های رئومتر

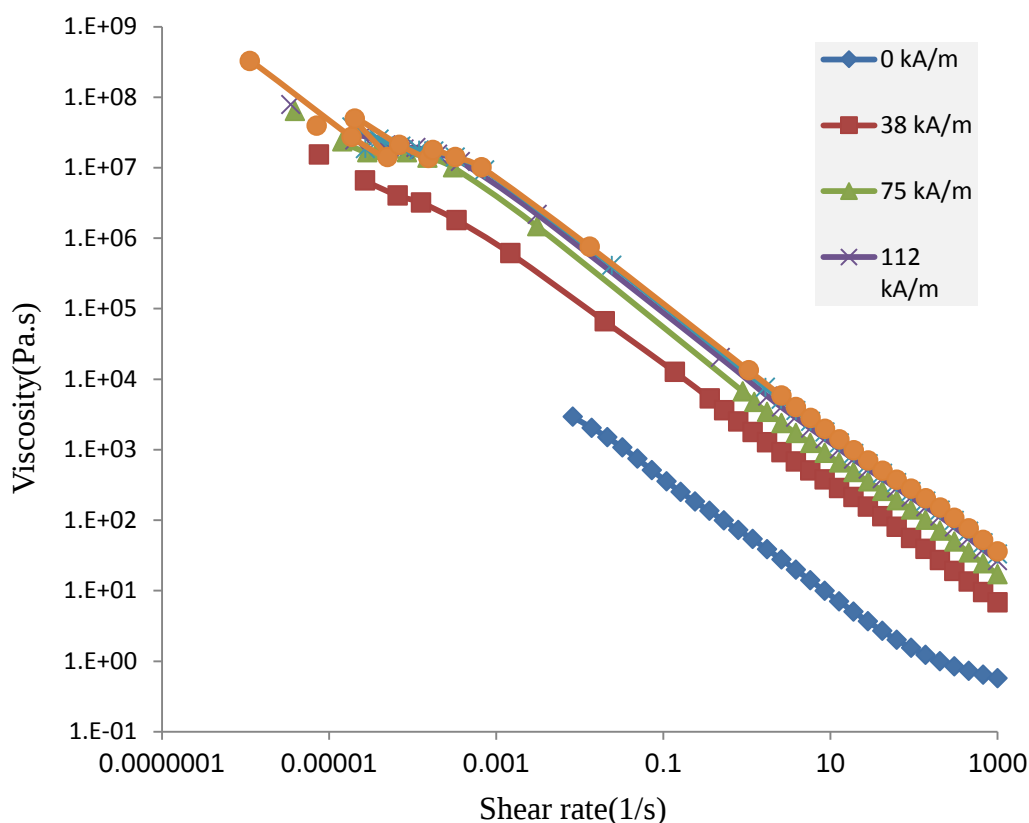
در این پژوهش تست های رئومتري در دو مد برشی و نوسانی انجام گرفته است. در مد برشی با تغییر نرخ برش $\dot{\gamma}$ ، ویسکوزیته η و تنش برشی τ سیال MR تحت میدان های مختلف اندازه گیری شده اند. در مد نوسانی با تغییر فرکانس زاویه ای ω ، مدول دینامیکی سیال G' و G'' و ویسکوزیته ی مرکب η^* سیال MR تحت میدان های مختلف اندازه گیری شده اند.

۳-۳-۱ مد برشی

شکل ۳-۴ نشان می دهد که سیال MR در حالتی که میدان مغناطیسی به آن اعمال نمی شود رفتار تقریباً نیوتنی دارد اما با اعمال میدان مغناطیسی سیال MR تنش تسلیم τ_y از خود نشان می دهد. همان طور که در شکل ۳-۴ مشخص است تنش تسلیم τ_y با افزایش میدان مغناطیسی H افزایش می یابد.



شکل ۳-۴ منحنی تنش برشی برحسب نرخ برش در میدان های H مختلف



شکل ۳-۵ منحنی ویسکوزیته برحسب نرخ برش در میدان های H مختلف

در محدوده ای از نرخ های برش ($\dot{\gamma} = 0, 1-200 \text{ 1/s}$) سیال MR رفتاری غیرخطی پیدا می کند.

بعد از این ناحیه رابطه ی تنش برشی با نرخ برش تقریباً خطی می شود.

از نتایج تست در مد برشی همچنین می توان جهت بررسی تغییر ویسکوزیته ی سیال تحت میدان های مختلف استفاده نمود. در شکل ۳-۵ منحنی ویسکوزیته ی سیال MR برحسب نرخ برش در میدان های مختلف ترسیم شده است. ویسکوزیته ی سیال MR در غیاب میدان در نرخ های برش

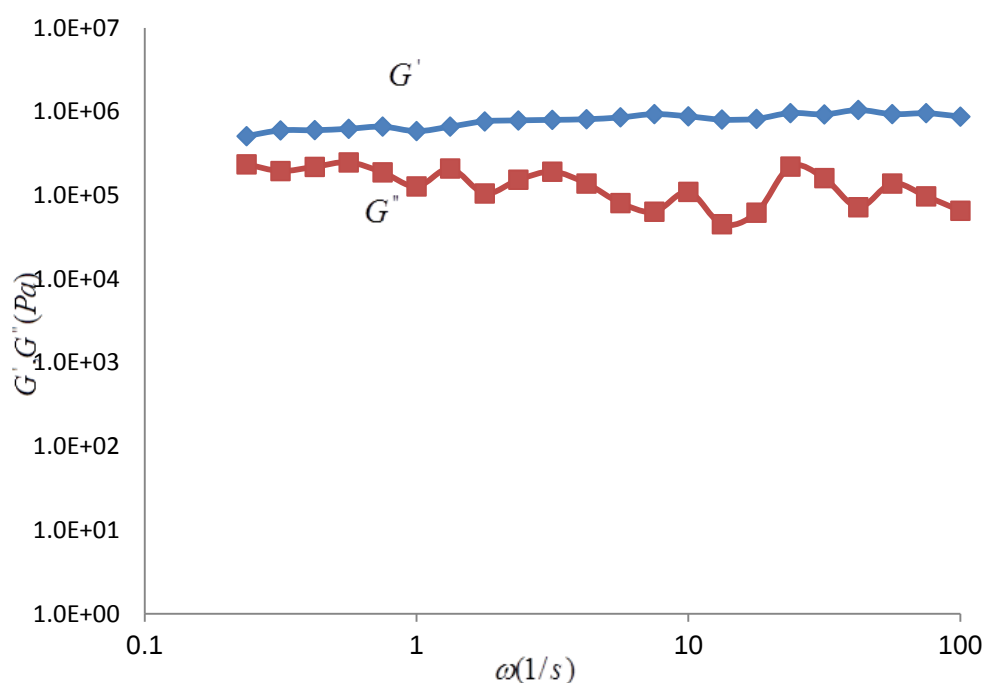
$\dot{\gamma} = 0, 1-1000 \text{ 1/s}$ بین $\eta = 0,5741-2920 \text{ Pa.s}$ تغییر می کند که با اعمال میدان مغناطیسی

$H = 38 \text{ kA/m}$ تغییرات ویسکوزیته ی سیال $\eta = 6,791-1,53 \times 10^7 \text{ Pa.s}$ خواهد شد که افزایش

چشمگیری را نشان می دهد. افزایش ویسکوزیته سیال تا زمانی ادامه پیدا می کند که سیال از لحاظ مغناطیسی اشباع نشده باشد.

۲-۳-۳ مد نوسانی

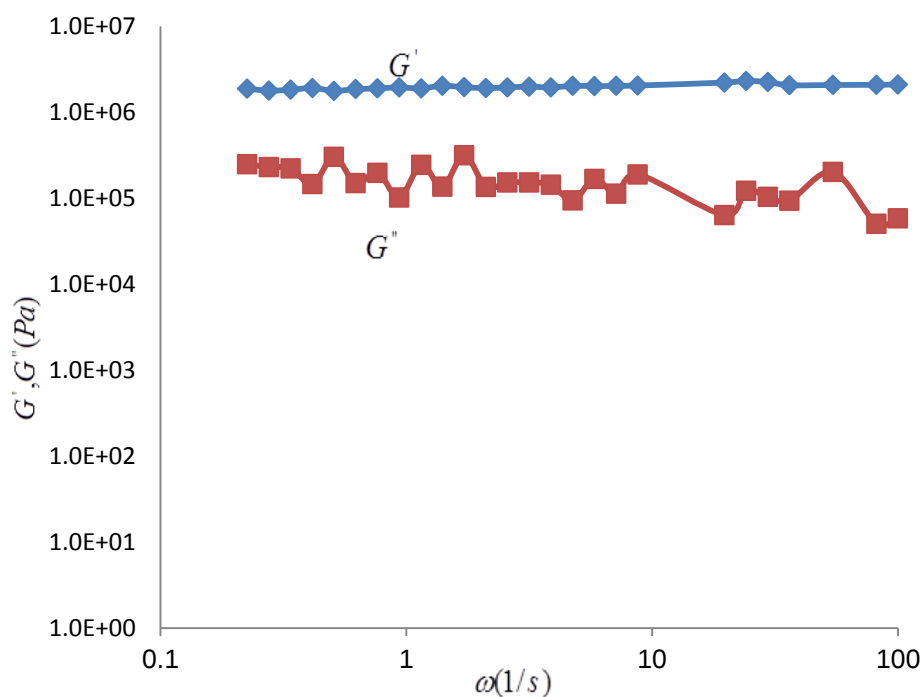
رفتار سیال MR در مد نوسانی به وسیله سه پارامتر: مدول ذخیره‌ای G' ، مدول اتلافی G'' و ویسکوزیته‌ی مختلط^۳ بررسی می‌شود. کلیه‌ی تست‌ها در کرنش برشی $\gamma = 0.1\%$ انجام گرفته است. در شکل ۶-۳ منحنی تغییرات G' و G'' برحسب فرکانس زاویه‌ای برای میدان $H = 38 \text{ kA/m}$ نشان داده شده است. مدول ذخیره‌ای (مدول الاستیک) در کلیه‌ی فرکانس‌ها بیشتر از مدول اتلافی (مدول ویسکوز) می‌باشد.



شکل ۶-۳ منحنی G' و G'' برحسب فرکانس زاویه‌ای در میدان $H = 38 \text{ kA/m}$

با افزایش میدان مغناطیسی به $H = 75 \text{ kA/m}$ مدول ذخیره‌ای G' و مدول اتلافی G'' همان‌طور که در شکل ۷-۳ نشان داده شده است، افزایش پیدا می‌کنند. در این میدان مغناطیسی هم مدول ذخیره‌ای (مدول الاستیک) در کلیه‌ی فرکانس‌ها بیشتر از مدول اتلافی (مدول ویسکوز) است.

-
1. Storage modulus
 2. Loss modulus
 3. Complex viscosity



شکل ۷-۳ منحنی G' و G'' برحسب فرکانس زاویه ای در میدان $H=75\text{ kA/m}$

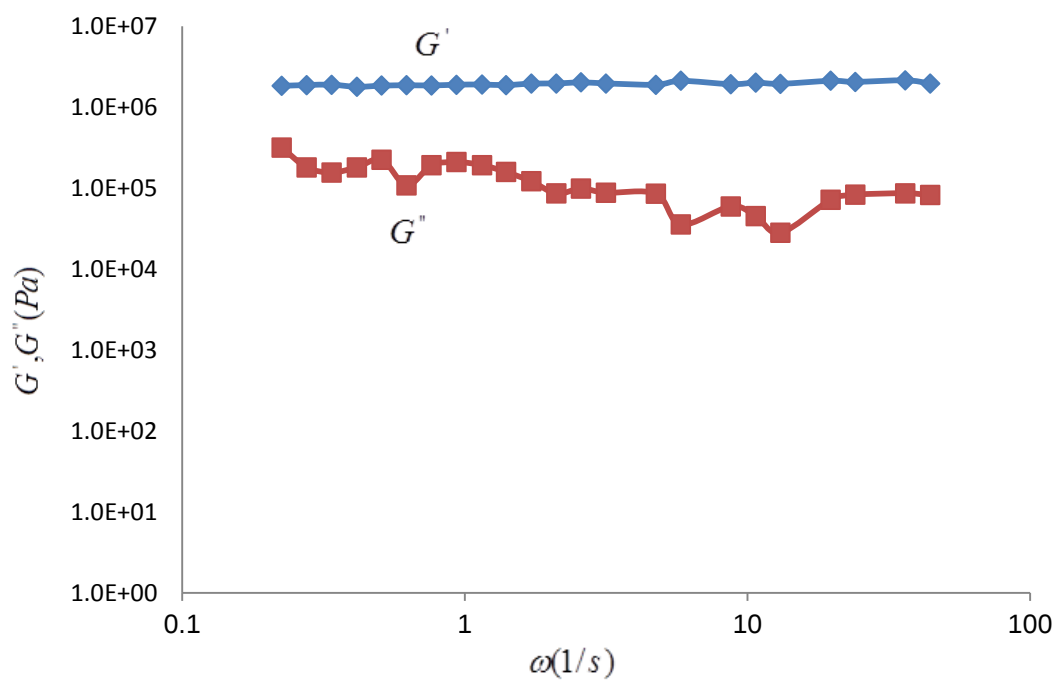
همان طور که در شکل ۸-۳ مشخص است، افزایش میدان مغناطیسی به $H=112\text{ kA/m}$

تغییر چندانی بر روی مقادیر مدول ذخیره ای G' و مدول اتلافی G'' ندارد. مدول ذخیره ای G' در

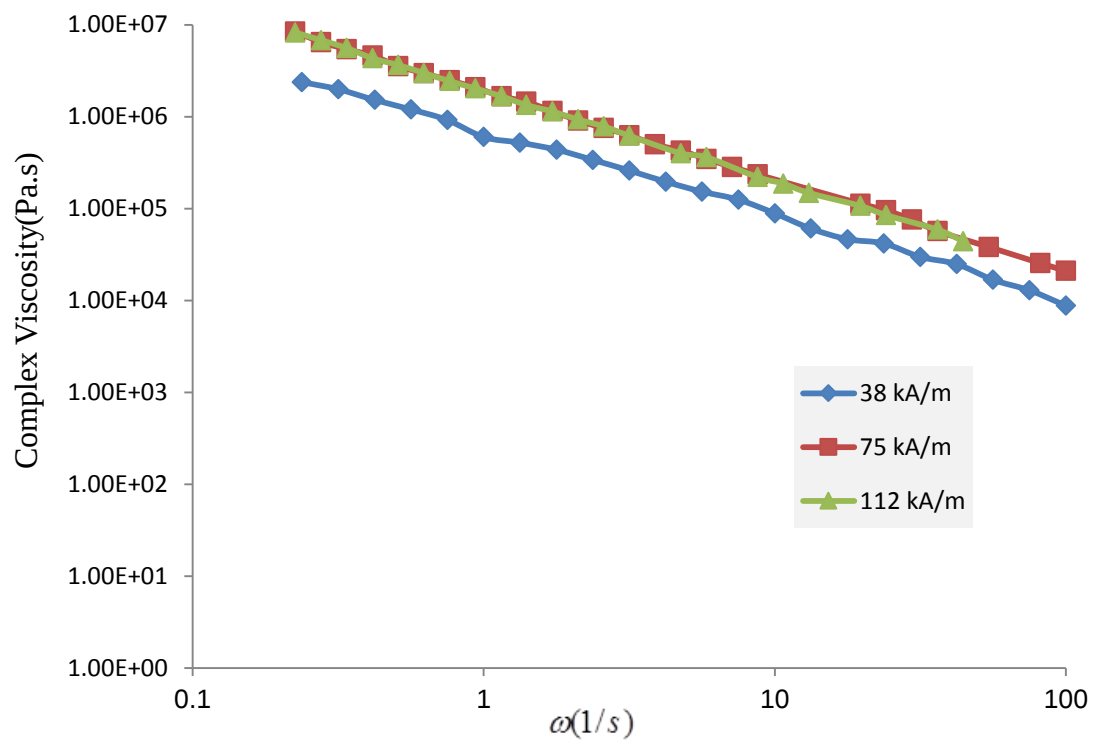
کلیه ی میدان ها رابطه خطی با فرکانس زاویه ای دارد.

در شکل ۹-۳ منحنی ویسکوزیته ی مختلط برحسب فرکانس زاویه ای در میدان های مختلف

ارائه شده است. ویسکوزیته مرکب سیال MR ساخته شده با افزایش فرکانس زاویه ای کاهش می یابد.



شکل ۳-۸ منحنی G' و G'' بر حسب فرکانس زاویه ای در میدان $H=112 \text{ kA/m}$



شکل ۳-۹ منحنی ویسکوزیته ی مرکب بر حسب فرکانس زاویه ای در میدان های مختلف

۳-۴ مدل سازی رفتار سیال MR

۳-۴-۱ مدل سازی ویسکوزیته

ویسکوزیته‌ی سیال MR ساخته شده را می‌توان به وسیله مدل کاریو-یاسودا^۱ مدل‌سازی نمود. مدل کاریو-یاسودا عبارتست از:

$$\eta = \eta_{\infty} + \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{(1 + (\lambda \dot{\gamma})^a)^{(1-n)/a}} \quad (۲-۳)$$

در رابطه‌ی (۲-۳) η_{∞} ویسکوزیته‌ی سیال به ازای نرخ‌های برش بزرگ، η_0 ویسکوزیته‌ی سیال در نرخ برش صفر، λ زمان مشخصه، a پارامتر تعیین کننده پهنای بخشی از منحنی است که تابع ویسکوزیته در آن بخش کاهش می‌یابد و n ضریب توانی می‌باشد. در جدول ۲-۳ پارامترهای مدل کاریو-یاسودا برای میدان‌های مختلف ارائه شده است.

جدول ۲-۳ پارامترهای مدل کاریو-یاسودا برای میدان‌های مختلف

n	a	$\lambda(s)$	$\eta_{\infty}(Pas)$	$\eta_0(Pas)$	$H(kA/m)$
۰,۳	۱,۹۷۴	۳,۴	۰	۲۹۲۰	۰
۰,۲۶	۱,۹۷۷	۳,۷	۰	۵۳۳۰	۳۸
۰,۲	۱,۹۷۹	۴,۱	۰	۶۷۲۰	۷۵
۰,۱۸	۱,۹۸۹	۴,۵۵	۰	۷۱۳۵	۱۱۲
۰,۱۷	۱,۹۹۹	۴,۹۵	۰	۷۷۰۰	۱۴۹
۰,۱۷۵	۲	۵,۳	۰	۸۲۵۰	۱۸۵

با توجه به ضرایب بدست آمده برای مدل کاریو-یاسودا می‌توان به وضوح مشاهده نمود که

ویسکوزیته‌ی سیال MR ساخته شده با افزایش نرخ برش کاهش می‌یابد^۲.

1. Carreau-Yasuda

2. Shear-thinning

۳-۴-۲ مدل سازی رفتار سیال در مد نوسانی

از داده‌های تست سیال MR در مد نوسانی برای محاسبه‌ی گستره‌ی رهایی از تنش^۱ استفاده می‌شود. گستره رهایی از تنش، (λ_i, η_i) ها، بوسیله‌ی داده‌های تست سیال MR در مد نوسانی بدست می‌آید. برای مدل‌سازی سیال MR در مد نوسانی از مدل ماکسول^۲ استفاده شده است. در این مدل G' و G'' با روابط (۳-۳) و (۴-۳) تعریف می‌شوند:

$$G' = \sum_{i=1}^n \frac{\eta_i \lambda_i \omega^2}{1 + \lambda_i^2 \omega^2} \quad (۳-۳)$$

$$G'' = \eta_s \omega + \sum_{i=1}^n \frac{\eta_i \omega}{1 + \lambda_i^2 \omega^2} \quad (۴-۳)$$

روابط (۳-۳) و (۴-۳) G' و G'' را به n مولفه تجزیه می‌کنند که هر مولفه با یک زمان رهایی از تنش λ_i و یک ضریب ویسکوزیته η_i مشخص می‌شود. مقدار n برای هر مد تا زمانی که به یک برازش خوب برای داده‌های آزمایشگاهی برسیم افزایش می‌یابد. برای این منظور تابع $f_{\min}$ را بصورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$f_{\min} = \sum_{i=1}^m \left[(G'_{\text{model}}(\omega) - G'_{\text{exp}}(\omega))^2 + (G''_{\text{model}}(\omega) - G''_{\text{exp}}(\omega))^2 \right] \quad (۵-۳)$$

برای بهینه کردن جواب‌های تابع رابطه (۵-۳) از تابع الگوریتم ژنتیک نرم‌افزار متلب استفاده شده است. اندازه‌ی جمعیت در تابع الگوریتم ۲۰ و اندازه نسل ۱۰ انتخاب شده است.

گستره‌ی رهایی از تنش، (λ_i, η_i) ها برای $n=8$ تحت میدان مغناطیسی $H=38 \text{ kA/m}$ در جدول ۳-۳ آمده است.

1. Relaxation spectrum
2. Maxwell

جدول ۳-۳ گستره رهایی از تنش براساس مدل تغییر یافته ماکسول برای میدان $H=38kA/m$

i	$\lambda_i (s)$	$\eta_i (Pa.s)$
۰	۰	۲۴,۳۴۳۹
۱	۰,۰۵۳۸	۱۶,۳۲۴۰
۲	۰,۳۳۲۶	۳۰,۱۹۸۱
۳	۰,۲۸۰۳	۳۳,۸۵۵۸
۴	۰,۳۰۴۳	۲۷,۹۶۸۵
۵	۰,۲۷۶۱	۳۱,۱۸۹۴
۶	۰,۵۳۳۵	۲۹,۵۹۷۰
۷	۰,۲۶۷۱	۲۸,۶۱۳۹
۸	۰,۴۹۸۲	۳۰,۰۳۷۵

براساس نتایج این مدل سازی، سیال MR ساخته شده زمان رهایی از تنش میانگین $\bar{\lambda} = 0.2s$

از خود نشان می‌دهد از اینرو می‌توان نتیجه گرفت سیال MR ساخته شده تا حدودی رفتار ویسکوالاستیک دارد.

۳-۵ نتایج تست های نیرویی دمپر

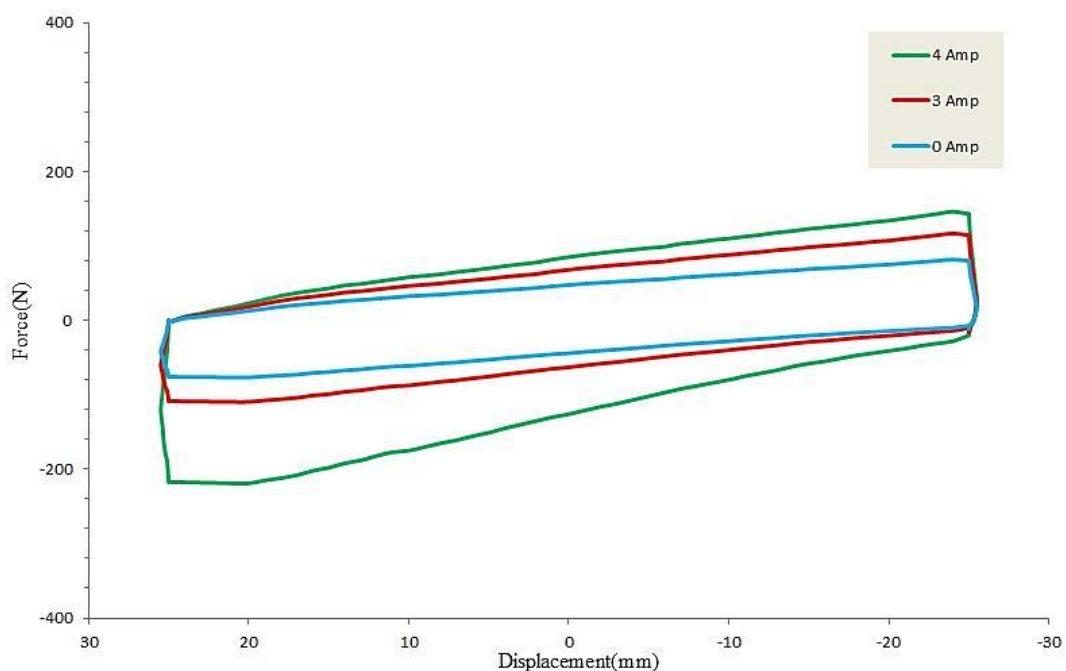
تست‌های نیرویی دمپر MR ساخته شده با همکاری شرکت کمک فنر سازی ایندامین سایپا و به

کمک دستگاه تست مواد^۱، شکل ۳-۱۰، انجام شده است. تست‌ها در دو سرعت ۰/۵ m/s و ۱ m/s و تحت میدان‌های مختلف انجام گرفته است. قبل از انجام تست اپراتور دستگاه فایل تنظیمات مربوط به این تست را آماده می‌کند. دمپر MR را در قاب دستگاه و بین گیره‌ی آن قرار می‌دهیم.



شکل ۳-۱۰ دستگاه تست مواد

برای سرعت 0.5 m/s در اولین مرحله هیچ جریانی را به پیستون دمپر اعمال نمی‌کنیم تا میزان نیروی دمپر را در حالتی که هیچ میدان مغناطیسی اعمال نمی‌شود بدست آوریم. منحنی تغییرات نیرو برحسب جابجایی برای این حالت در شکل ۳-۱۱ نشان داده شده است. در مرحله‌ی بعدی در همین سرعت به پیستون دمپر جریان 3 A اعمال می‌کنیم؛ منحنی تغییرات نیرو برحسب جابجایی در این حالت در شکل ۳-۱۱ ارائه شده است. مشاهده می‌کنیم که نیروی میرایی دمپر برای جریان 3 A تقریباً 40% نسبت به حالتی که هیچ جریانی به سیم‌پیچ اعمال نمی‌شود افزایش پیدا کرده است. اعمال جریان 4 A به پیستون دمپر MR باعث افزایش نیروی میرایی دمپر به میزان 74% نسبت به حالتی که هیچ جریانی به سیم‌پیچ اعمال نمی‌شود، می‌گردد.



شکل ۳-۱۱ منحنی نیرو برحسب جابجایی برای جریان‌های مختلف در سرعت 0.5 m/s

محدوده‌ی نیروی میرایی کمک فنر جلو تیا که توسط شرکت ایندامین تهیه شده در جدول ۳-۴ ارائه شده است. مقایسه نتایج تست نیروی میرایی دمپر MR ساخته شده با مقادیر جدول ۳-۴ نشان می‌دهد که استفاده از دمپر MR نیروی میرایی را در سرعت 0.5 m/s برای جریان 3 A به میزان

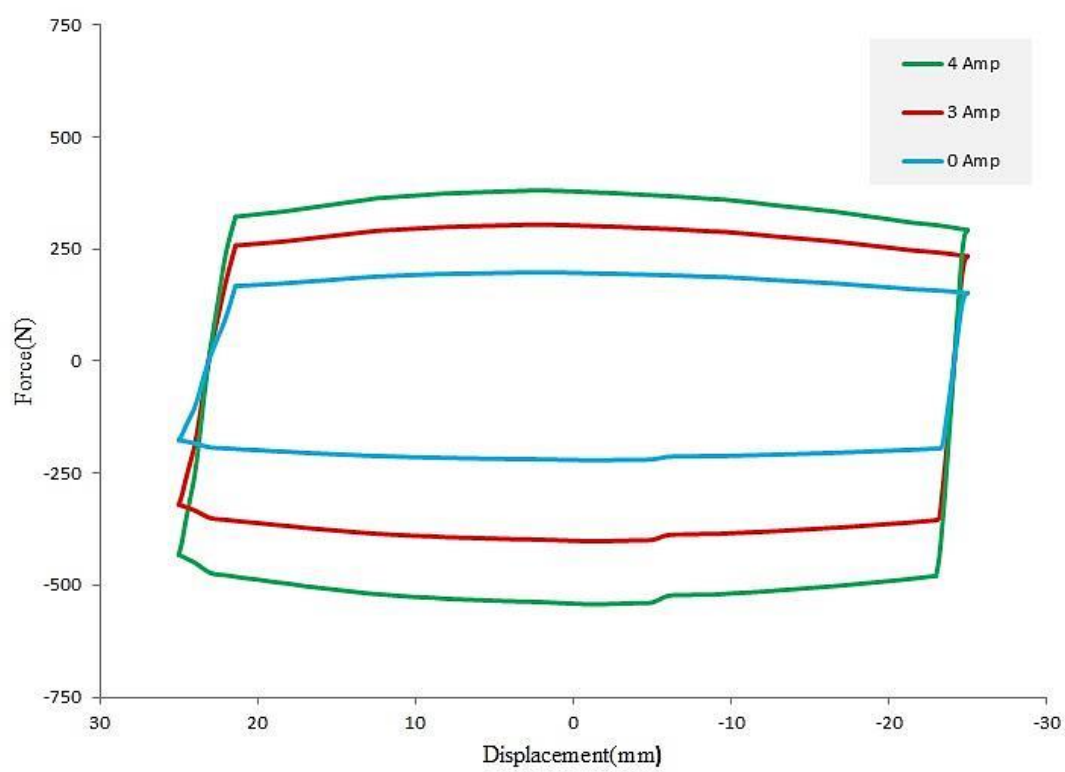
۲۶٪ و در جریان ۴ A به میزان ۷۰٪ افزایش می‌دهد.

جدول ۳-۴ محدوده نیروی میرایی کمک فنر جلو خودرو تیب

$V=0.1\text{m/s}$	$V=0.05\text{m/s}$	
۲۶۰	۹۰	Reb(N)
۲۲۰	۱۳۰	Comp(N)

برای تست نیروی دمپر در سرعت 0.1 m/s اپراتور دستگاه فایل تنظیمات مورد نظر را انتخاب کرده و دستگاه را برای تست آماده می‌نماید. مانند حالت قبل ابتدا هیچ جریانی را به پیستون دمپر اعمال نمی‌کنیم تا میزان نیروی دمپر را در حالتی که هیچ میدان مغناطیسی اعمال نمی‌شود بدست آوریم. منحنی تغییرات نیرو برحسب جابجایی برای این حالت در شکل ۳-۱۲ نشان داده شده است. در مرحله‌ی بعدی در همین سرعت به پیستون دمپر جریان ۳ A اعمال می‌کنیم؛ منحنی تغییرات نیرو برحسب جابجایی در این حالت در شکل ۳-۱۲ ارائه شده است. مشاهده می‌کنیم که نیروی میرایی دمپر برای جریان ۳ A به میزان ۵۴٪ نسبت به حالتی که هیچ جریانی به سیم‌پیچ اعمال نمی‌شود افزایش پیدا کرده است. اعمال جریان ۴ A به پیستون دمپر MR باعث افزایش نیروی میرایی دمپر به میزان ۹۰٪ نسبت به حالتی که هیچ جریانی به سیم‌پیچ اعمال نمی‌شود، می‌گردد. مقایسه نتایج تست نیروی میرایی دمپر MR ساخته شده با مقادیر جدول ۳-۴ نشان می‌دهد که استفاده از دمپر MR نیروی میرایی در سرعت 0.1 m/s برای جریان ۳ A به میزان ۹۳٪ و در جریان ۴ A به میزان ۱۵۰٪ افزایش می‌دهد.

با توجه به داده‌های بدست آمده از تست نیروی میرایی دمپر MR می‌توان ضریب دمپر C را برای دمپر MR ساخته شده بدست آورد. در جدول ۳-۵ مقادیر ضریب دمپر برای دمپر MR ساخته شده ارائه شده است.



شکل ۳-۱۲ منحنی نیرو بر حسب جابجایی برای جریان‌های مختلف در سرعت ۰/۱ m/s

جدول ۳-۵ ضریب میرایی دمپر MR ساخته شده

جریان ۴ آمپر	جریان ۳ آمپر
$C_{Reb} = 4/7 \text{ kNs/m}$	$C_{Reb} = 3/7 \text{ kNs/m}$
$C_{Comp} = 6/4 \text{ kNs/m}$	$C_{Comp} = 5/8 \text{ kNs/m}$

فصل ۴ (نتیجه گیری و پیشنهادات)

۴-۱ پیشگفتار

در این فصل نتایج بدست آمده از تست‌های سیال MR ساخته شده، تست ته‌نشینی و تست رئومتری، و تست‌های نیرویی دمپر MR ساخته شده ارائه شده است.

۴-۲ جمع بندی نتایج

نتایج تست ته‌نشینی سیال MR ساخته شده نشان می‌دهد که نسبت ته‌نشینی این سیال در مدت ۱۲ ساعت ۲٪، در ۲۴ ساعت ۳٪، در ۳۶ ساعت ۴٪ و در ۴۸ ساعت ۵٪ می‌باشد. بنابراین مهمترین مشکل در ساخت سیالات MR که همان پایداری این نوع سیالات است، تا حد زیادی مرتفع شده است.

تست رئومتری انجام گرفته روی سیال MR ساخته شده در مد برشی نشان می‌دهد که ویسکوزیته‌ی سیال MR ساخته شده با افزایش نرخ برش کاهش می‌یابد اما با افزایش میدان مغناطیسی در یک نرخ برش ثابت، افزایش پیدا می‌کند. تنش تسلیم سیال MR ساخته شده نیز با افزایش میدان مغناطیسی افزایش می‌یابد. نتایج تست سیال در مد نوسانی گویای این مطلب است که سیال MR ساخته شده زمان رهایی از تنش میانگین $\bar{\lambda} = 0.2s$ از خود نشان می‌دهد از اینرو می‌توان نتیجه گرفت سیال MR ساخته شده تا حدودی رفتار ویسکوالاستیک دارد.

تست نیرویی دمپر MR ساخته شده نشان می‌دهد که استفاده از دمپر MR نیروی میرایی را در سرعت 0.05 m/s برای جریان 3 A به میزان ۲۶٪ و در جریان 4 A به میزان ۷۰٪ افزایش می‌دهد. همچنین استفاده از دمپر MR نیروی میرایی در سرعت 0.1 m/s برای جریان 3 A به میزان ۹۳٪ و در جریان 4 A به میزان ۱۵۰٪ افزایش می‌دهد.

با توجه به نتایج بدست آمده، در صورت استفاده از دمپر MR به جای کمک‌فنرهای معمولی در خودروی سواری تیب، می‌توان با صرف انرژی کم به میزان نیروی میرایی مورد نظر شرکت سازنده‌ی خودرو رسید که این نیرو به راحتی قابل کنترل بوده و با توجه به پستی و بلندی‌های جاده تغییر می‌-

کند لذا راحتی و آسودگی بیشتری را برای سرنشینان خودرو به همراه خواهد داشت.

۳-۴ پیشنهادات

- بررسی مدل سازی سیال با استفاده از مدل های دیگر همچون هرشل-بالکلی بر نیروی میرایی
- بررسی تاثیر اندازه ی ذرات پودر آهن در اشباع مغناطیسی سیال MR و نیز تاثیر آن بر پایداری سیال
- طراحی و ساخت دمپر MR برای خودروهای سنگین و خودروهای نظامی
- طراحی مدار کنترلی مورد نیاز برای دمپر MR
- بررسی تاثیر ویسکوالاستیک بودن سیال بر نیروی میرایی دمپر
- بررسی چگونگی کاهش مصرف انرژی در دمپر MR

پیوست ها

جدول ۱- نتایج تست رئومتری سیال MR ساخته شده در مد برشی برای میدان $H=0 \text{ kA/m}$

Meas. Pts.	Shear Rate	Shear Stress	Viscosity	Speed	Torque
	[1/s]	[Pa]	[Pa·s]	[1/min]	[μNm]
1	0.00824	24.1	2,920	0.00393	37.8
2	0.0139	28.4	2,040	0.00665	44.6
3	0.0213	31.9	1,500	0.0102	50.1
4	0.0324	34.9	1,070	0.0155	54.8
5	0.049	36.4	743	0.0234	57.2
6	0.0729	37.2	511	0.0348	58.5
7	0.109	38.5	355	0.0518	60.5
8	0.161	40.7	252	0.077	63.9
9	0.239	43.8	183	0.114	68.9
10	0.356	48	135	0.17	75.4
11	0.529	52.3	98.8	0.253	82.2
12	0.788	57	72.3	0.376	89.5
13	1.17	63	53.8	0.56	99
14	1.74	67.6	38.8	0.832	106
15	2.59	71.7	27.7	1.24	113
16	3.86	75.9	19.7	1.84	119
17	5.74	80	14	2.74	126
18	8.53	84.5	9.91	4.07	133
19	12.7	89.5	7.05	6.06	141
20	18.9	95.2	5.05	9.01	150
21	28.1	103	3.66	13.4	161
22	41.8	112	2.68	19.9	176
23	62.1	125	2.01	29.7	196
24	92.4	143	1.55	44.1	225
25	137	168	1.23	65.6	264
26	204	204	1	97.6	321
27	304	256	0.842	145	402
28	452	328	0.727	216	516
29	672	432	0.642	321	678
30	1,000	574	0.574	477	902

جدول ۲- نتایج تست رئومتری سیال MR ساخته شده در مد برشی برای میدان $H=38\text{ kA/m}$

Meas. Pts.	Shear Rate	Shear Stress	Viscosity	Speed	Torque
	[1/s]	[Pa]	[Pa·s]	[1/min]	[μNm]
1	-0.00018	74.1	-414,000	-8.6E-05	116
2	7.53E-06	115	15,300,000	3.6E-06	181
3	2.69E-05	176	6,570,000	1.28E-05	277
4	6.65E-05	267	4,020,000	3.18E-05	420
5	0.000126	402	3,190,000	6.02E-05	632
6	0.000335	602	1,800,000	0.00016	946
7	0.00147	899	611,000	0.000704	1,410
8	0.02	1,320	65,900	0.00958	2,080
9	0.137	1,740	12,700	0.0657	2,740
10	0.358	1,910	5,330	0.171	3,000
11	0.535	1,940	3,630	0.256	3,050
12	0.789	1,980	2,510	0.377	3,110
13	1.17	2,090	1,780	0.561	3,290
14	1.74	2,210	1,270	0.832	3,480
15	2.59	2,380	917	1.24	3,740
16	3.84	2,610	678	1.84	4,090
17	5.72	2,890	504	2.73	4,530
18	8.52	3,220	378	4.07	5,060
19	12.7	3,620	285	6.06	5,680
20	18.9	4,020	213	9.02	6,310
21	28.1	4,390	156	13.4	6,890
22	41.7	4,740	114	19.9	7,450
23	62.1	4,980	80.2	29.7	7,830
24	92.4	5,170	55.9	44.1	8,110
25	137	5,360	39	65.6	8,420
26	204	5,550	27.1	97.6	8,710
27	304	5,760	19	145	9,050
28	452	6,040	13.4	216	9,490
29	672	6,400	9.52	321	10,100
30	1,000	6,790	6.79	478	10,700

جدول ۳-۱ نتایج تست رئومتر سیال MR ساخته شده در مد برشی برای میدان $H=75\text{kA/m}$

Meas. Pts.	Shear Rate	Shear Stress	Viscosity	Speed	Torque
	[1/s]	[Pa]	[Pa·s]	[1/min]	[μNm]
1	-5.3E-05	147	-2,750,000	-2.6E-05	230
2	-1.2E-05	188	-15,200,000	-5.9E-06	295
3	3.91E-06	249	63,700,000	1.87E-06	392
4	1.44E-05	340	23,600,000	6.92E-06	535
5	2.86E-05	476	16,600,000	1.37E-05	747
6	3.83E-05	677	17,700,000	1.83E-05	1,060
7	5.22E-05	977	18,700,000	0.000025	1,530
8	8.58E-05	1,420	16,600,000	4.11E-05	2,230
9	0.00015	2,080	13,900,000	7.19E-05	3,280
10	0.000305	3,070	10,100,000	0.000146	4,820
11	0.00309	4,530	1,470,000	0.00148	7,120
12	0.891	5,990	6,720	0.427	9,410
13	1.22	5,810	4,740	0.587	9,120
14	1.74	5,970	3,430	0.833	9,380
15	2.6	6,230	2,390	1.25	9,780
16	3.84	6,610	1,720	1.84	10,400
17	5.71	7,100	1,240	2.73	11,200
18	8.54	7,670	898	4.09	12,000
19	12.7	8,360	658	6.08	13,100
20	18.9	9,140	483	9.06	14,400
21	28.2	9,970	354	13.5	15,700
22	41.8	10,900	260	20	17,100
23	62.2	11,900	192	29.8	18,800
24	92.5	13,100	142	44.2	20,600
25	137	13,900	101	65.7	21,900
26	204	14,500	71.2	97.7	22,900
27	304	15,100	49.6	145	23,700
28	452	15,700	34.7	216	24,600
29	672	16,400	24.3	322	25,700
30	1,000	17,100	17.1	478	26,900

جدول ۴-۱ نتایج تست رئومتری سیال MR ساخته شده در مد برشی برای میدان $H=112\text{ kA/m}$

Meas. Pts.	Shear Rate	Shear Stress	Viscosity	Speed	Torque
	[1/s]	[Pa]	[Pa·s]	[1/min]	[μNm]
1	-6.2E-05	172	-2,790,000	-3E-05	270
2	-2.2E-05	213	-9,540,000	-1.1E-05	335
3	3.49E-06	275	78,600,000	1.68E-06	431
4	-1.3E-06	366	-274,000,000	-6.4E-07	575
5	2.03E-05	502	24,700,000	9.74E-06	788
6	2.48E-05	703	28,400,000	1.19E-05	1,110
7	4.77E-05	1,000	21,000,000	2.29E-05	1,580
8	7.93E-05	1,450	18,300,000	3.81E-05	2,280
9	0.000109	2,110	19,300,000	5.25E-05	3,320
10	0.000199	3,100	15,600,000	9.53E-05	4,870
11	0.000373	4,570	12,200,000	0.000179	7,180
12	0.00311	6,750	2,170,000	0.00149	10,600
13	0.481	9,730	20,200	0.231	15,300
14	1.77	10,100	5,720	0.85	15,900
15	2.59	10,400	4,020	1.24	16,400
16	3.83	11,000	2,860	1.84	17,200
17	5.77	11,600	2,010	2.77	18,200
18	8.59	12,300	1,430	4.12	19,300
19	12.8	13,000	1,020	6.14	20,400
20	18.9	13,900	731	9.09	21,800
21	28.2	14,900	529	13.5	23,400
22	41.8	16,100	386	20.1	25,400
23	62.2	17,700	285	29.8	27,800
24	92.5	19,400	210	44.4	30,500
25	138	21,200	154	66	33,300
26	204	23,100	113	97.8	36,300
27	304	24,300	79.9	146	38,100
28	452	25,100	55.6	216	39,500
29	672	25,800	38.4	322	40,500
30	1,000	26,500	26.6	479	41,700

جدول ۵-۱ نتایج تست رئومتری سیال MR ساخته شده در مد برشی برای میدان $H=149\text{ kA/m}$

Meas. Pts.	Shear Rate	Shear Stress	Viscosity	Speed	Torque
	[1/s]	[Pa]	[Pa·s]	[1/min]	[μNm]
1	-6E-05	176	-2,950,000	-2.9E-05	276
2	-1.2E-05	217	-18,800,000	-5.6E-06	341
3	-3.7E-06	279	-74,900,000	-1.8E-06	438
4	-1.1E-06	370	-340,000,000	-5.2E-07	581
5	2.71E-05	506	18,600,000	0.000013	795
6	1.88E-05	708	37,700,000	9.03E-06	1,110
7	3.96E-05	1,010	25,500,000	1.91E-05	1,580
8	7.24E-05	1,460	20,100,000	3.48E-05	2,290
9	0.00012	2,120	17,700,000	5.77E-05	3,330
10	0.00018	3,110	17,200,000	8.67E-05	4,880
11	0.000323	4,580	14,200,000	0.000155	7,200
12	0.000731	6,770	9,250,000	0.000352	10,600
13	0.0242	10,000	413,000	0.0116	15,700
14	1.66	12,800	7,700	0.798	20,100
15	2.57	13,200	5,140	1.24	20,700
16	3.85	13,800	3,580	1.85	21,600
17	5.77	14,500	2,510	2.77	22,800
18	8.62	15,200	1,770	4.14	23,900
19	12.8	15,900	1,240	6.14	24,900
20	19	16,800	885	9.11	26,400
21	28.2	17,900	633	13.6	28,100
22	41.9	19,200	459	20.1	30,200
23	62.2	21,100	339	29.9	33,200
24	92.5	23,500	255	44.4	37,000
25	138	25,600	186	66.1	40,300
26	205	28,200	138	98.1	44,200
27	304	30,100	98.9	146	47,200
28	452	31,300	69.3	217	49,100
29	672	32,100	47.8	323	50,400
30	1,000	32,900	32.9	480	51,700

جدول ۶- نتایج تست رئومتر سیال MR ساخته شده در مد برشی برای میدان $H=185\text{kA/m}$

Meas. Pts.	Shear Rate	Shear Stress	Viscosity	Speed	Torque
	[1/s]	[Pa]	[Pa·s]	[1/min]	[μNm]
1	-4.1E-05	177	-4,360,000	-2E-05	278
2	-1.3E-05	218	-16,500,000	-6.4E-06	343
3	7.13E-06	280	39,200,000	3.43E-06	439
4	1.13E-06	371	327,000,000	5.45E-07	583
5	1.86E-05	507	27,300,000	8.95E-06	797
6	4.98E-05	710	14,200,000	0.000024	1,110
7	2.03E-05	1,010	49,700,000	9.78E-06	1,590
8	6.92E-05	1,460	21,100,000	3.33E-05	2,290
9	0.000155	2,120	13,700,000	7.46E-05	3,340
10	0.000175	3,110	17,800,000	8.43E-05	4,890
11	0.000324	4,590	14,100,000	0.000156	7,200
12	0.000669	6,780	10,100,000	0.000322	10,600
13	0.0132	10,000	757,000	0.00637	15,700
14	1.05	14,000	13,300	0.507	22,000
15	2.58	15,000	5,820	1.24	23,600
16	3.87	15,600	4,020	1.86	24,500
17	5.79	16,300	2,820	2.79	25,700
18	8.6	17,000	1,980	4.14	26,800
19	12.8	17,800	1,390	6.16	27,900
20	19	18,600	980	9.13	29,200
21	28.2	19,700	697	13.6	30,900
22	42	21,100	503	20.2	33,200
23	62.2	23,100	372	29.9	36,300
24	92.4	25,800	279	44.4	40,500
25	138	28,000	203	66.1	43,900
26	205	30,800	150	98.3	48,300
27	304	32,900	108	146	51,600
28	452	34,400	76.1	217	54,000
29	672	35,200	52.4	323	55,300
30	1,000	36,100	36.1	481	56,700

جدول ۷- نتایج تست رئومتری سیال MR ساخته شده در مد نوسانی برای میدان $H=3\text{ kA/m}$

Angular Frequency	Storage Modulus	Loss Modulus	Damping Factor	Complex Viscosity	Deflection Angle	Torque
[1/s]	[Pa]	[Pa]	[1]	[Pa·s]	[mrad]	[μNm]
100	8.78E+05	6.58E+04	0.075	8.80E+03	5.99E-03	1.66E+02
75	9.60E+05	9.75E+04	0.101	1.29E+04	5.19E-03	1.57E+02
56.2	9.36E+05	1.39E+05	0.148	1.68E+04	5.26E-03	1.56E+02
42.2	1.05E+06	7.26E+04	0.0694	2.49E+04	4.52E-03	1.49E+02
31.6	9.30E+05	1.61E+05	0.173	2.98E+04	4.88E-03	1.45E+02
23.7	9.67E+05	2.21E+05	0.229	4.18E+04	4.85E-03	1.51E+02
17.8	8.22E+05	6.22E+04	0.0756	4.64E+04	5.75E-03	1.49E+02
13.3	8.06E+05	4.54E+04	0.0563	6.06E+04	5.55E-03	1.41E+02
10	8.81E+05	1.10E+05	0.125	8.88E+04	5.09E-03	1.42E+02
7.5	9.38E+05	6.40E+04	0.0682	1.25E+05	4.40E-03	1.30E+02
5.62	8.56E+05	8.14E+04	0.0951	1.53E+05	4.95E-03	1.34E+02
4.22	8.14E+05	1.39E+05	0.171	1.96E+05	5.14E-03	1.33E+02
3.16	8.00E+05	1.92E+05	0.24	2.60E+05	5.00E-03	1.29E+02
2.37	7.89E+05	1.54E+05	0.196	3.39E+05	5.04E-03	1.27E+02
1.78	7.69E+05	1.06E+05	0.138	4.37E+05	4.97E-03	1.21E+02
1.33	6.64E+05	2.09E+05	0.315	5.22E+05	5.25E-03	1.15E+02
1	5.86E+05	1.28E+05	0.218	6.00E+05	6.17E-03	1.16E+02
0.75	6.64E+05	1.89E+05	0.284	9.20E+05	4.85E-03	1.05E+02
0.562	6.26E+05	2.49E+05	0.397	1.20E+06	5.06E-03	1.07E+02
0.422	6.02E+05	2.20E+05	0.365	1.52E+06	5.13E-03	1.03E+02
0.316	5.99E+05	1.96E+05	0.327	1.99E+06	4.97E-03	9.83E+01
0.237	5.13E+05	2.36E+05	0.461	2.38E+06	5.49E-03	9.74E+01

جدول ۸- نتایج تست رئومتری سیال MR ساخته شده در مد نوسانی برای میدان $H=75\text{kA/m}$

Angular Frequency	Storage Modulus	Loss Modulus	Damping Factor	Complex Viscosity	Deflection Angle	Torque
[1/s]	[Pa]	[Pa]	[1]	[Pa·s]	[mrad]	[μNm]
100	2.10E+06	5.84E+04	0.0279	2.10E+04	4.91E-03	3.22E+02
81.6	2.08E+06	5.03E+04	0.0242	2.55E+04	5.17E-03	3.37E+02
54.4	2.07E+06	2.02E+05	0.0978	3.82E+04	5.23E-03	3.41E+02
36.2	2.06E+06	9.36E+04	0.0454	5.70E+04	5.07E-03	3.28E+02
29.6	2.24E+06	1.03E+05	0.0461	7.59E+04	4.47E-03	3.14E+02
24.1	2.31E+06	1.22E+05	0.0528	9.58E+04	4.64E-03	3.36E+02
19.7	2.21E+06	6.36E+04	0.0287	1.13E+05	4.81E-03	3.34E+02
8.73	2.04E+06	1.89E+05	0.0925	2.35E+05	5.00E-03	3.22E+02
7.13	2.02E+06	1.13E+05	0.0558	2.84E+05	4.96E-03	3.15E+02
5.82	2.01E+06	1.67E+05	0.0832	3.47E+05	5.04E-03	3.18E+02
4.75	2.02E+06	9.40E+04	0.0465	4.27E+05	4.99E-03	3.16E+02
3.87	1.94E+06	1.43E+05	0.0736	5.01E+05	5.04E-03	3.07E+02
3.16	1.98E+06	1.52E+05	0.0765	6.28E+05	5.02E-03	3.12E+02
2.58	1.94E+06	1.52E+05	0.0784	7.55E+05	5.09E-03	3.11E+02
2.11	1.91E+06	1.35E+05	0.0708	9.07E+05	5.11E-03	3.06E+02
1.72	1.95E+06	3.14E+05	0.161	1.15E+06	4.85E-03	3.01E+02
1.4	2.03E+06	1.36E+05	0.0666	1.45E+06	4.94E-03	3.15E+02
1.15	1.89E+06	2.43E+05	0.128	1.67E+06	5.15E-03	3.08E+02
0.935	1.94E+06	1.02E+05	0.0525	2.08E+06	4.98E-03	3.04E+02
0.763	1.89E+06	1.97E+05	0.104	2.49E+06	5.01E-03	2.97E+02
0.622	1.85E+06	1.49E+05	0.0808	2.98E+06	5.12E-03	2.97E+02
0.508	1.77E+06	3.02E+05	0.17	3.54E+06	5.18E-03	2.92E+02
0.415	1.91E+06	1.46E+05	0.0763	4.63E+06	4.68E-03	2.81E+02
0.338	1.82E+06	2.22E+05	0.122	5.42E+06	5.24E-03	3.02E+02
0.276	1.78E+06	2.30E+05	0.13	6.49E+06	5.13E-03	2.88E+02
0.225	1.88E+06	2.48E+05	0.131	8.43E+06	4.72E-03	2.81E+02

جدول ۹- نتایج تست رئومتری سیال MR ساخته شده در مد نوسانی برای میدان $H=112\text{ kA/m}$

Angular Frequency	Storage Modulus	Loss Modulus	Damping Factor	Complex Viscosity	Deflection Angle	Torque
[1/s]	[Pa]	[Pa]	[1]	[Pa·s]	[mrad]	[μNm]
44.4	1.96E+06	8.19E+04	0.0418	4.42E+04	5.48E-03	3.36E+02
36.2	2.14E+06	8.63E+04	0.0403	5.91E+04	5.06E-03	3.39E+02
24.1	2.05E+06	8.26E+04	0.0403	8.51E+04	5.13E-03	3.29E+02
19.7	2.11E+06	7.14E+04	0.0339	1.07E+05	4.97E-03	3.28E+02
13.1	1.94E+06	2.80E+04	0.0144	1.48E+05	5.37E-03	3.26E+02
10.7	2.00E+06	4.51E+04	0.0225	1.87E+05	5.18E-03	3.25E+02
8.73	1.92E+06	5.94E+04	0.031	2.20E+05	5.40E-03	3.24E+02
5.82	2.11E+06	3.54E+04	0.0168	3.63E+05	4.53E-03	2.99E+02
4.75	1.89E+06	8.50E+04	0.045	3.99E+05	5.58E-03	3.30E+02
3.16	1.96E+06	8.75E+04	0.0446	6.21E+05	5.10E-03	3.14E+02
2.58	2.02E+06	9.85E+04	0.0487	7.85E+05	5.00E-03	3.17E+02
2.11	1.96E+06	8.58E+04	0.0438	9.32E+05	5.03E-03	3.09E+02
1.72	1.95E+06	1.21E+05	0.0618	1.14E+06	5.03E-03	3.08E+02
1.4	1.87E+06	1.58E+05	0.0843	1.34E+06	5.22E-03	3.07E+02
1.15	1.90E+06	1.92E+05	0.101	1.67E+06	5.01E-03	3.00E+02
0.935	1.89E+06	2.09E+05	0.111	2.03E+06	5.05E-03	3.01E+02
0.763	1.85E+06	1.91E+05	0.103	2.44E+06	5.12E-03	2.98E+02
0.622	1.86E+06	1.08E+05	0.0583	2.99E+06	5.01E-03	2.92E+02
0.508	1.84E+06	2.24E+05	0.122	3.65E+06	5.04E-03	2.93E+02
0.415	1.78E+06	1.80E+05	0.101	4.32E+06	5.19E-03	2.91E+02
0.338	1.89E+06	1.56E+05	0.0826	5.59E+06	4.75E-03	2.81E+02
0.276	1.87E+06	1.80E+05	0.0965	6.80E+06	5.06E-03	2.97E+02
0.225	1.83E+06	3.16E+05	0.172	8.25E+06	5.07E-03	2.95E+02

جدول ۱۰-۱ نتایج تست نیرویی دمپر MR ساخته شده برای جریان ۴ آمپر در سرعت ۰/۰۵ m/s

Disp(mm)	Comp(N)	Reb(N)
25	0	
25.1	-40	
25.2	-60	
25.3	-80	
25.4	-100	
25.5	-120	
25.4	-140	
25.3	-165	
25.2	-180	
25.1	-190	
25	-217	-3
24	-217	5
23	-218	9
22	-218	14
21	-219	18
20	-219	23
19	-215	28
18	-212	33
17	-208	37
16	-202	40
15	-198	43
14	-192	47
13	-188	49
12	-182	52
11	-177	55
10	-175	58
9	-170	60
8	-165	62
7	-161	65
6	-155	67
5	-151	70
4	-145	73
3	-140	75
2	-135	78
1	-130	82
0	-126	85
-1	-121	88
-2	-116	90
-3	-112	93
-4	-107	95
-5	-102	97

Disp(mm)	Comp(N)	Reb(N)
-6	-97	99
-7	-92	103
-8	-88	105
-9	-84	108
-10	-80	110
-11	-75	112
-12	-71	115
-13	-67	118
-14	-62	120
-15	-58	123
-16	-55	125
-17	-51	127
-18	-47	129
-19	-44	132
-20	-41	134
-21	-38	137
-22	-34	140
-23	-31	143
-24	-28	146
-25	-20	143
-25		143
-25.1		110
-25.2		90
-25.3		70
-25.4		50
-25.5		30
-25.4		10
-25.3		0
-25.2		-5
-25.1		-10
-25		-20

جدول ۱۱- نتایج تست نیرویی دمپر MR ساخته شده برای جریان ۳ آمپر در سرعت ۰/۰۵ m/s

Disp(mm)	Comp(N)	Reb(N)
25	0	
25.1	-20	
25.2	-30	
25.3	-40	
25.4	-50	
25.5	-60	
25.4	-70	
25.3	-83	
25.2	-90	
25.1	-95	
25	-109	
25	-109	-2
24	-109	4
23	-109	7
22	-109	11
21	-110	14
20	-110	18
19	-108	22
18	-106	26
17	-104	30
16	-101	32
15	-99	34
14	-96	38
13	-94	39
12	-91	42
11	-89	44
10	-88	46
9	-85	48
8	-83	50
7	-81	52
6	-78	54
5	-76	56
4	-73	58
3	-70	60
2	-68	62
1	-65	66
0	-63	68
-1	-61	70
-2	-58	72
-3	-56	74
-4	-54	76
-5	-51	78

Disp(mm)	Comp(N)	Reb(N)
-6	-49	79
-7	-46	82
-8	-44	84
-9	-42	86
-10	-40	88
-11	-38	90
-12	-36	92
-13	-34	94
-14	-31	96
-15	-29	98
-16	-28	100
-17	-26	102
-18	-24	104
-19	-22	106
-20	-21	107
-21	-19	110
-22	-17	112
-23	-16	114
-24	-14	117
-25	-10	114
-25		114
-25.1		88
-25.2		72
-25.3		56
-25.4		40
-25.5		24
-25.4		8
-25.3		0
-25.2		-4
-25.1		-8
-25		-16

جدول ۱۲- نتایج تست نیرویی دمپر MR ساخته شده در حالت بدون جریان در سرعت ۰/۰۵ m/s

Disp(mm)	Comp(N)	Reb(N)
25	0	
25.1	-14	
25.2	-21	
25.3	-28	
25.4	-35	
25.5	-42	
25.4	-49	
25.3	-58	
25.2	-63	
25.1	-67	
25	-76	
25	-76	-2
24	-76	3
23	-76	5
22	-76	8
21	-77	10
20	-77	13
19	-75	16
18	-74	18
17	-73	21
16	-71	22
15	-69	24
14	-67	26
13	-66	27
12	-64	29
11	-62	31
10	-61	32
9	-60	34
8	-58	35
7	-56	36
6	-54	38
5	-53	39
4	-51	41
3	-49	42
2	-47	44
1	-46	46
0	-44	48
-1	-42	49
-2	-41	51
-3	-39	52
-4	-37	53
-5	-36	54

Disp(mm)	Comp(N)	Reb(N)
-6	-34	55
-7	-32	58
-8	-31	59
-9	-29	60
-10	-28	62
-11	-26	63
-12	-25	64
-13	-23	66
-14	-22	67
-15	-20	69
-16	-19	70
-17	-18	71
-18	-16	72
-19	-15	74
-20	-14	75
-21	-13	77
-22	-12	78
-23	-11	80
-24	-10	82
-25	-7	80
-25		80
-25.1		62
-25.2		50
-25.3		39
-25.4		28
-25.5		17
-25.4		6
-25.3		0
-25.2		-3
-25.1		-6
-25		-11

جدول ۱۳-أ نتایج تست نیرویی دمپر MR ساخته شده در حالت بدون جریان در سرعت ۰/۱ m/s

Disp(mm)	Comp(N)	Reb(N)
21.4		168
22		99
22.5		55
23		11
23.4		-33
23.7		-72
24		-105
24.3		-127
24.6		-149
24.8		-165
25		-176
25	-176	168
24	-183	170
23	-193	172
22	-195	174
21	-197	176
20	-199	179
19	-201	181
18	-202	184
17	-205	187
16	-206	189
15	-208	190
14	-210	192
13	-211	193
12	-212	194
11	-213	195
10	-215	196
9	-215	196
8	-216	197
7	-217	198
6	-217	198
5	-218	198
4	-218	197
3	-219	197
2	-219	196
1	-220	195
0	-221	194
-1	-221	193
-2	-221	192
-3	-221	191
-4	-220	190
-5	-219	189

Disp(mm)	Comp(N)	Reb(N)
-6	-213	188
-7	-213	186
-8	-212	184
-9	-212	181
-10	-211	179
-11	-210	177
-12	-210	176
-13	-208	174
-14	-207	171
-15	-206	168
-16	-205	166
-17	-204	163
-18	-203	161
-19	-201	158
-20	-200	155
-21	-199	152
-22	-197	
-23	-195	
-23	-195	
-23.2	-195	
-23.4	-189	
-23.6	-143	
-23.8	-91	
-24	-39	
-24.2	13	
-24.4	65	
-24.6	117	
-24.8	146	
-25	152	

جدول ۱۴- نتایج تست نیرویی دمپر MR ساخته شده برای جریان ۳ آمپر در سرعت ۰/۱ m/s

Disp(mm)	Comp(N)	Reb(N)
21.4		258
22		180
22.5		100
23		20
23.4		-60
23.7		-130
24		-190
24.3		-230
24.6		-270
24.8		-300
25		-320
25	-320	258
24	-333	261
23	-350	264
22	-354	267
21	-358	271
20	-361	275
19	-365	279
18	-368	283
17	-372	287
16	-375	291
15	-378	293
14	-381	295
13	-384	297
12	-386	299
11	-388	300
10	-390	301
9	-391	302
8	-393	303
7	-394	304
6	-395	305
5	-396	305
4	-397	304
3	-398	302
2	-399	301
1	-400	300
0	-401	299
-1	-402	297
-2	-402	296
-3	-401	294
-4	-400	292
-5	-399	290

Disp(mm)	Comp(N)	Reb(N)
-6	-388	289
-7	-387	286
-8	-386	283
-9	-386	279
-10	-384	276
-11	-383	273
-12	-381	270
-13	-379	267
-14	-377	263
-15	-375	259
-16	-373	255
-17	-371	251
-18	-369	247
-19	-366	243
-20	-364	239
-21	-361	234
-22	-358	
-23	-355	
-23	-355	
-23.2	-350	
-23.4	-290	
-23.6	-220	
-23.8	-140	
-24	-60	
-24.2	20	
-24.4	100	
-24.6	180	
-24.8	224	
-25	234	

جدول ۱۵- نتایج تست نیرویی دمپر MR ساخته شده برای جریان ۴ آمپر در سرعت ۰/۱ m/s

Disp(mm)	Comp(N)	Reb(N)
21.4		323
22		243
22.5		135
23		27
23.4		-81
23.7		-176
24		-257
24.3		-311
24.6		-365
24.8		-405
25		-432
25	-432	323
24	-450	326
23	-473	330
22	-478	334
21	-483	339
20	-487	344
19	-493	349
18	-497	354
17	-502	359
16	-506	364
15	-510	366
14	-514	369
13	-518	371
12	-521	374
11	-524	375
10	-527	376
9	-528	378
8	-531	379
7	-532	380
6	-533	381
5	-535	381
4	-536	379
3	-537	378
2	-538	376
1	-540	375
0	-541	373
-1	-543	371
-2	-542	369
-3	-541	368
-4	-540	365
-5	-539	363

Disp(mm)	Comp(N)	Reb(N)
-6	-524	361
-7	-522	357
-8	-521	353
-9	-521	349
-10	-518	345
-11	-516	341
-12	-514	338
-13	-512	334
-14	-509	329
-15	-506	324
-16	-504	319
-17	-501	314
-18	-497	309
-19	-494	304
-20	-491	299
-21	-487	293
-22	-483	
-23	-479	
-23	-479	
-23.2	-438	
-23.4	-363	
-23.6	-275	
-23.8	-175	
-24	-75	
-24.2	25	
-24.4	125	
-24.6	225	
-24.8	280	
-25	293	

منابع

- [1] Guglielmino Emanuele, Sireteanu Tudor, Stammers Charles W., Ghita Gheorghe, Giuclea Marius, 2008, **Semi-active Suspension Control**, Springer, London.
- [2] Melzner K, Fleischer J, Odenbach S, 2001, New developments in the investigation of magnetoviscous and viscoelastic effects in magnetic fluids, **Magnetohydrodynamics vol. 37, 285.**
- [3] Jolly, M.R., J.W. Bender, and C.J. D, 1998, Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids. in SPIE 5th Annual Int. Symposium on Smart Structures and Materials, San Diego.
- [4] Weiss K.D., Carlson J.D. and Nixon D.A., 1994, Viscoelastic properties of magneto- and electro-rheological fluids, **Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 5, 772–775.**
- [5] Carlson, J.D. and M.J. Charzan., 1994, Magnetorheological fluid dampers, Lord Corporation: United States.
- [6]. Johnston, G.L., et al., 1998, Passive Magnetorheological Clutch, General Motors Corporation: USA.
- [7]. Jolly, et.al, . 1997, Indirect measurements of microstructure development in magnetorheological fluids, in ER Fluids-MR Suspensions and Their Applications, Japan.
- [8] Bolter R., Janocha H. and Hellbruck S, 1996, Design of Magnetorheological Fluid Actuators. in Actuator 96, Bremen, Germany: AXON Technologie Consult GmbH.
- [9] R. Bolter and Janocha H., 1997, Design Rules for MR Fluid Actuators in Different Working Modes, in Smart Structures and Materials 1997: Passive Damping and Isolation, San Diego.
- [10] Kordonski W. and Jacobs S., 1996, Model of Magnetorheological Finishing, **Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 7: p. 131-137.**
- [11] Jacobs, S.D., et al., 1999, MRF: Computer Controlled Optics Manufacturing, **The American Ceramic Society Bulletin: p. 42-48.**
- [12] Online Technical Library, Lord Corporation, <http://www.lord.com>.

- [13] Gans, B.J.d., 2000, Magnetorheology of an Inverse Ferrofluid, University of Twente: Twente. p. 135.
- [14] BIN MAZLAN S.A., 2008, Ph.D Thesis, The behaviour of magnetorheological fluids in squeeze mode, Dublin City University.
- [15] Callister Jr. W. D., 1994, **Materials Science and Engineering: An Introduction, 3rd Ed.**, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- [16] Kraus J. D., 1991, **Electromagnetics, International Edition, 4th Edition**, McGraw-Hill Inc., Singapore.
- [17] Nicolaides A., 1996, **Electrical and Electronic Principles II, 2nd Ed.**, PASS Publications, London.
- [18] Poynor J. C , 2001, MS Thesis, Innovative Designs for Magneto-Rheological Dampers, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [19] Milliken, W.F., and Milliken, D.L., 1995, Race Car Vehicle Dynamics, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA.
- [20] Bossis G., Volkova O., Lacis S. and Meunier A., 2002, Magnetorheology: fluids, structures and rheology, **Stefan Odenbach (Ed.): LNP 594, pp. 202–230.**
- [21] Goncalves F. D., 2005, Ph.D Thesis, Characterizing the Behavior of Magnetorheological Fluids at High Velocities and High Shear Rates, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [22] Viota J.L., Vicente J. de, Durán J.D.G., Delgado A.V., 2005, Stabilization of magnetorheological suspensions by polyacrylic acid polymers, **Journal of Colloid and Interface Science 284, pp. 527–541.**
- [23] N. M. WERELEY et al, 2006, Bidisperse magnetorheological fluids using Fe particles at nanometer and micron scale, **Journal of intelligent materials systems and structures, vol. 17.**
- [24] Roszkowski A., Bogdan M., Skoczynski W., Marek B., 2008, Testing viscosity of mr fluid in magnetic field, **Measurement science review, volume 8, section 3, no.3.**
- [25] Jian Z , Jin-qiu Z, Jin-feng J, 2008, Characteristic analysis of magnetorheological fluid based on different carriers, **Journal of central south university of technology September 2008, Volume 15, Issue 1 Supplement, pp 252-255.**
- [26] Mazlan S.A.B, 2008, Ph.D Thesis, The behaviour of magnetorheological fluids in squeeze mode, Dublin city university.

- [27] Turczyn R., Kciuk M., 2008, Preparation and study of model magnetorheological fluids, **Journal of achievements in materials and manufacturing engineering, Volume 27, Issue 2.**
- [28] Kim M.S., Liu Y.D., Park B.J., You C., Choi H.J., 2012, Carbonyl iron particles dispersed in a polymer solution and their rheological characteristics under applied magnetic field, **Journal of industrial and engineering Chemistry 18, pp.664-667.**
- [29] Premalatha S.E., Chokkalingam R., Mahendran M., 2012, Magneto mechanical properties of iron based mr fluids, **American journal of polymer science, pp. 50-55.**
- [30] Gordaninejad F. and Kels S.P., 2000, Magneto-rheological fluid shock absorbers for HMMWV, Proceedings of SPIE Vol. 3989.
- [31] Yang G., 2001, Ph.D Thesis, Large-scale magnetorheological fluid damper for vibration mitigation: modeling, testing and control, University of Notre Dame.
- [32] Yoo J.H, Wereley N. M., 2002, Design of a high-efficiency magnetorheological valve, **Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 13, No. 10, pp. 679–685.**
- [33] Genç S.; 2002, Ph.D Thesis, Synthesis and Properties of Magnetorheological (MR) Fluids, University of Pittsburgh.
- [34] Gravatt J. W., 2003, Magneto-Rheological Dampers for Super-sport Motorcycle Applications, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [35] Ericksen E. O. and Gordaninejad F., 2003, A magneto-Rheological fluid shock absorber for an off-road motorcycle, **International J. Vehicle Design.**
- [36] Zhang H.H., Liao C.R., Chen W.M., Huang S.L., 2004, Study on the design, test and simulation of a mr damper with two-stage electromagnetic coil, electrorheological fluids and magnetorheological suspensions, Proceedings of the Ninth International Conference, pp. 728-734, Beijing.
- [37] Singla R., 2005, MS Thesis, Design of a mixed-mode mr damper with reduced off-state damping, The Ohio State University.
- [38] Świtoński E., Mężyk A., Duda S., Kciuk S., 2007, Prototype magnetorheological fluid damper for active vibration control system, **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 21.**
- [39] Ahmadkhanlou F., 2008, Ph.D Thesis, Design, modeling and control of magnetorheological fluid-based force feedback dampers for telerobotic systems, The

Ohio State University.

[40] Ling Z., Chuan L., Jiefeng P. and Yinong L., 2009, Electromagnetic design of an innovative magneto-rheological damper for all terrain vehicle, The 16th international congress on sound and vibration, Krakow.

[41] Hadadian A, 2011, MS Thesis, Optimal Design of Magnetorheological Dampers Constrained in a Specific Volume Using Response Surface Method, Concordia University.

[42] Peng G., 2011, MS Thesis, Development of MR fluid damper for motorcycle steering, University of Wollongong.

[43] Şahin İ., Parlak Z., 2005, MS Thesis, Investigation of the effects of temperature variations on the magnetorheological damper behaviour, The Ohio State University.

[44] Sadak Ali Khan Md., Suresh A., Ramaiah N.S., 2012, Analysis of magneto rheological fluid damper with various piston profiles, **International journal of engineering and advanced technology, Volume-2, Issue-2.**

[45] Mangal S K, Kumar Ashwani, 2013, Testing and evaluation of magneto-rheological shock absorber, **Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 2, No. 1.**

[46] Goldasz J., 2013, Electro-mechanical analysis of a magnetorheological damper with electrical steel laminations, **Przegląd elektrotechniczny.**

Abstract

The objective of this research is design and fabrication of smart damper with magnetorheological (MR) hydraulic oil. In this thesis the MR fluid used in MR damper is synthesized first. The sedimentation test and rheometry test in shear and oscillatory modes are implemented. Careau-yasuda model is used for modeling of the rheometry test results in this research. Also rheometry test results is used for obtaining generalized MAXWELL model coefficients. In the next step MR damper is designed and geometrical and hydraulic parameters is derived with the aid of fluid rheometry test results and shock absorber specifications of TIBA car. In order to obtain magnetic parameters required for damper construction, ANSYS-MAXWELL software has been utilized. In the construction of damper, two-dimensional drawings of all parts have been supplied with SOLIDWORKS 2013 software and all parts have been constructed with great precision. Force tests of MR damper have been utilized with the cooperation of INDAMIN SAIPA Corporation in two velocity of 0.05 m/s and 0.1 m/s and three modes as follows: without application of electric current, with 3 A and with 4 A application of electric current to the damper winding. The results of these tests show that the constructed MR damper increases damping force in comparison with conventional shock absorber of TIBA car as follows: in the velocity of 0.05 m/s and 3 A current damping force augmentation is 26%, in the velocity of 0.05 m/s and 4 A current damping force augmentation is 70%, in the velocity of 0.1 m/s and 3 A current damping force augmentation is 93% and in the velocity of 0.1 m/s and 4 A current damping force augmentation is 150%.

Keywords: Magnetorheological, MR fluid, MR damper, Careau-yasuda model, generalized MAXWELL model



Shahrood University

Faculty of Mechanical Engineering

Design and Fabrication of Smart Damper with Magnetorheological
Hydraulic Oil

Sadegh Mohammadi

Supervisor: Mahmood Norouzi

September 2014