





دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک
رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

طراحی، ساخت و تست دسته موتور الاستومری مگنتورئولوژیکال

نگارنده: هاشم دیانتي نیک

اساتید راهنما:

دکتر امیر جلالی

دکتر محمود نوروزی

استاد مشاور:

دکتر مجتبی قطعی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک

شهریور ماه ۱۳۹۷

شماره: ۲۹۷/۱۲۸
تاریخ: ۹۷/۷/۲

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد
با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای هاشم دیانتي نیک با
شماره دانشجویی ۹۴۰۷۵۲۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی تحت عنوان طراحی، ساخت و
تست دسته موتور الاستومری مگنتورنولوژیکال که در تاریخ ۹۷/۶/۲۰ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه
صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: <u>خیلی خوب</u>)	☐ مردود
نوع تحقیق: ☐ نظری ☒ عملی	

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر امیر جلالی	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر محمود نوروزی	دانشیار	
۳- استاد مشاور	دکتر مجتبی قطعی	استادیار	
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر محمدباقر نظری	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر اردشیر کرمی محمدی	دانشیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر حمیدرضا اپیک چی	دانشیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: محمد محسن شاه مردان

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تیسره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).



به پاس تعبیر عظیم و انسانی‌شان از کلمه ایثار
به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان
به پاس قلب‌های بزرگشان که فریاد رس است
و به پاس محبت‌های بی دریغشان که هرگز فروکش
نمی‌کند
این مجموعه را تقدیم می‌کنم به

مادر و پدر عزیزم

شکر خدا که هر چه طلب کردم از خدا بر منتهای همت خود کامران شدم
و به مصداق «من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق» بسی شایسته است
از استادان فرهیخته و پرمایه‌ام دکتر امیر جلالی و دکتر محمود نوروزی
برای زحمات گران‌قدر و راهنمایی‌های کارسازشان

بی‌نهایت سپاس‌گذار باشم

همچنین از جناب آقای دکتر مجتبی قطعی که به عنوان استاد مشاور و جناب
آقای دکتر محمدباقر نظری مسؤول آزمایشگاه که همواره نگارنده را یاری نمودند
کمال تشکر را دارم.

از اساتید دانشکده مهندسی مکانیک

از تمام اساتید و دوستان عزیزی که علمشان را بی‌منت می‌بخشند

... و

بهترین‌های زندگی‌ام

مادر و پدر فداکار و برادران و خواهران دلسوزم

از صمیم قلب سپاس‌گزارم

تعهد نامه

اینجانب هاشم دیانتي نیک دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک (طراحی کاربردی) دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه طراحی، ساخت و تست دسته موتور الاستومر مگنتورئولوژیکال تحت راهنمایی دکتر امیر جلالی و دکتر محمود نوروزی متعهد می شوم

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه 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 صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آن ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز

چکیده

هدف از این تحقیق طراحی، ساخت و تست یک نمونه دسته‌موتور الاستومر مگنتورئولوژیکال است که با اعمال نیروهای عرضی و طولی، الاستومرهای مورد استفاده در دسته‌موتور، در مد نوسان برشی عمل نمایند. در این دسته‌موتور از دو نمونه الاستومر مگنتورئولوژیکال استفاده می‌شود که خواص مکانیکی آن‌ها در حضور میدان مغناطیسی خارجی تغییر می‌کند و با حذف میدان خارجی، بلافاصله به حالت اولیه برمی‌گردند.

بعد از هدف‌گذاری برای یافتن پارامترهای مغناطیسی موردنیاز جهت ساخت دسته‌موتور، از نرم‌افزار شبیه‌ساز استفاده شده است. این نرم‌افزار ابعاد مناسب جهت عبور میدان مغناطیسی از الاستومرها را مشخص کرده و سپس با توجه به ابعاد الاستومرها، با کمک نرم‌افزار سالی‌دورکز، هندسه دسته‌موتور با اهداف مشخص طراحی می‌گردد و در مرحله بعد به ساخت قطعات دسته‌موتور اقدام نموده و قطعات سازه‌ای بر مبنای نقشه‌های سالی‌دورکز ساخته شده است. سپس تمامی قطعات دسته‌موتور مونتاژ شده و تست‌های نوسانی برشی در حضور و غیاب میدان مغناطیسی و همچنین در فرکانس‌های مختلف، انجام می‌پذیرد.

نتایج حاصل از تست در قالب نمودارهای هیستریزیس در فرکانس و میدان‌های مغناطیسی مختلف استنتاج می‌شود. سختی معادل (شیب نمودار هیستریزیس) و میرایی معادل (مساحت محصور هیستریزیس) الاستومر مگنتورئولوژیکال با توجه به نمودارهای هیستریزیس استخراج شده و در فرکانس و میدان‌های مغناطیسی مختلف مقایسه می‌شوند و نشان داده می‌شود که با افزایش فرکانس و چگالی شار مغناطیسی، سختی و میرایی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: الاستومر مگنتورئولوژیکال، دسته‌موتور، طراحی، تست، میدان مغناطیسی

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول:.....	۱
مقدمه.....	۱
۱-۱ پیشگفتار.....	۲
۲-۱ تاریخچه و مروری بر مواد مگنتورئولوژیکال.....	۲
۳-۱ سیالات مگنتورئولوژیکال.....	۳
۴-۱ کاربردهای سیالات مگنتورئولوژیکال.....	۶
۵-۱ الاستومرهای مگنتورئولوژیکال.....	۷
۶-۱ اجزای تشکیل دهنده الاستومرهای مگنتورئولوژیکال.....	۹
۷-۱ کاربردهای الاستومر مگنتورئولوژیکال.....	۱۱
۸-۱ انواع مدل های الاستومر مگنتورئولوژیکال.....	۱۳
۱-۸-۱ معرفی انواع مدل ها.....	۱۳
۲-۸-۱ معادله تعمیم یافته ماکسول.....	۱۶
۳-۸-۱ یافتن خواص مادی الاستومر مگنتورئولوژیکال با استفاده از نمودار هیستریزیس.....	۱۸
۹-۱ چالش های استفاده از الاستومرهای مگنتورئولوژیکال.....	۲۰
۱۰-۱ حلقه های پسماند.....	۲۱
۱۱-۱ دسته موتور.....	۲۲
۱۲-۱ عملکرد دسته موتورها.....	۲۳
۱۳-۱ پیشینه تحقیقات دسته موتورها.....	۲۶
۱۴-۱ معرفی تحقیق حاضر.....	۲۸

۱۵-۱	ضرورت تحقیق و کاربرد آن	۲۹
۱۶-۱	نوآوری	۲۹
۱۷-۱	ساختار پایان نامه	۳۰
فصل دوم:		
۱-۲	مقدمه	۳۱
۲-۲	شکل گیری ایده	۳۲
۳-۲	شبیه سازی میدان مغناطیسی	۳۳
۴-۲	طراحی هندسه دسته موتور	۳۶
۵-۲	مونتاژ قطعات دسته موتور	۳۷
۶-۲	ساخت قطعات دسته موتور	۴۱
فصل سوم:		
۱-۳	تولید الاستومر مگنتورئولوژیکال	۴۳
۱-۱-۳	مقدمه	۴۴
۲-۱-۳	ساخت نمونه های الاستومر مگنتورئولوژیکال	۴۴
فصل چهارم:		
۱-۴	مقدمه	۵۱
۲-۴	اجزای مورد استفاده در فرایند انجام تست نوسان محوری	۵۲
۱-۲-۴	معرفی اجزای تست	۵۲
۲-۲-۴	تست برشی با اعمال نیروی محوری و تفسیر فیزیکی نمودارها	۵۵
۳-۲-۴	تست برشی در فرکانس های مختلف	۵۷
۴-۲-۴	تست برشی در میدان های مغناطیسی مختلف	۵۸
۳-۴	تست نوسان برشی با اعمال نیروی عرضی	۵۹
۱-۳-۴	آماده سازی دسته موتور برای تست با اعمال نیروی عرضی	۵۹
۲-۳-۴	تست برش در فرکانس ثابت	۶۱

۳-۳-۴	تست برش در فرکانس‌های مختلف	۶۲
۴-۴	محدوده رفتار خطی و غیرخطی الاستومر مگنتورئولوژیکال	۶۳
۵-۴	ارتعاشات پایه	۶۴
فصل پنجم: ۷۱		
۱-۵	جمع‌بندی نتایج	۷۱
۲-۵	پژوهش‌های پیش رو	۷۳
منابع: ۷۴		

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ نمای ساده‌ای از سیالات مگنتورئولوژیکال..... ۴
- شکل ۱-۲ رفتار سیالات مگنتورئولوژیکال در حضور میدان مغناطیسی..... ۵
- شکل ۱-۳ دمپرهای سیالات مگنتورئولوژیکال نصب شده روی پل کابلی..... ۶
- شکل ۱-۴ دمپر سیال مگنتورئولوژیکال در خودروهای هامر نظامی..... ۷
- شکل ۱-۵ دمپر سیال مگنتورئولوژیکال در ماشین لباسشویی..... ۷
- شکل ۱-۶ شماتیکی از مراحل ساخت الاستومر مگنتورئولوژیکال ایزوتروپ و غیر ایزوتروپ..... ۷
- شکل ۱-۷ یک نمونه MRE..... ۸
- شکل ۱-۸ شماتیک ساده‌ای از دو نوع ذرات مغناطیس شونده. الف- ایزوتروپ ب- غیر ایزوتروپ..... ۱۱
- شکل ۱-۹ جاذب ارتعاشی قابل تنظیم شامل الاستومر مگنتورئولوژیکال دارای دو کوئل مغناطیسی..... ۱۲
- ۱) نوسانگر ۲) الاستومر مگنتورئولوژیکال ۳) هادی مغناطیسی ۴) کوئل..... ۱۲
- شکل ۱-۱۰ عنصر فلزی قابل تنظیم شامل الاستومر مگنتورئولوژیکال..... ۱۳
- شکل ۱-۱۱ مدل کلوین-ویت..... ۱۴
- شکل ۱-۱۲ مدل سه پارامتره استاندارد..... ۱۵
- شکل ۱-۱۳ مدل سه پارامتری تعمیم یافته ماکسول..... ۱۵
- شکل ۱-۱۴ مدل زنر..... ۱۵
- شکل ۱-۱۵ نمودار هیستریزیس نیرو-جابجایی در بارگذاری نوسانی مواد پلاستیکی..... ۱۹

- شکل ۱-۱۶ چگالی شار مغناطیسی بر حسب شدت میدان مغناطیسی..... ۲۲
- شکل ۱-۱۷ حلقه پسماند برای مواد مغناطیسی سخت و نرم..... ۲۲
- شکل ۱-۱۸ اتصال موتور و شاسی به کمک انواع دسته موتور..... ۲۴
- شکل ۱-۱۹ انواع دسته موتورهای ارتجایی..... ۲۴
- شکل ۲-۱ ایده طرح اولیه دسته موتور..... ۳۳
- شکل ۲-۲ دستگاه تست VSM..... ۳۴
- شکل ۲-۳ تولید میدان مغناطیسی ۲۷۰ میلی تسلا با جریان ورودی ۱/۵ آمپر..... ۳۵
- شکل ۲-۴ طرح کلی دسته موتور..... ۳۶
- شکل ۲-۵ نحوه قرارگیری الاستومرها در مد برشی (الف) اعمال نیروی نوسانی طولی
(ب) اعمال نیروی نوسانی عرضی..... ۳۷
- شکل ۲-۶ شماره گذاری قطعات دسته موتور..... ۳۸
- شکل ۲-۷ نمای انفجاری قطعات دسته موتور..... ۴۰
- شکل ۲-۸ قطعات ساخته شده دسته موتور به همراه الاستومرهای مگنتورئولوژیکال..... ۴۱
- شکل ۳-۱ قالب ها الف- قالب حلقه ای شکل ب- قالب سکه ای شکل..... ۴۵
- شکل ۳-۲ ظرف برای مخلوط اجزای لازم به همراه یک ترازو دیجیتالی با دقت 1 گرم..... ۴۶
- شکل ۳-۳ ذرات آهنی به میزان ۷۰ گرم..... ۴۶
- شکل ۳-۴ اضافه کردن ۱۰ گرم روغن سیلیکون به ذرات آهنی..... ۴۷
- شکل ۳-۵ مخلوط کردن ذرات آهن و روغن سیلیکون به مدت ۵ دقیقه..... ۴۷
- شکل ۳-۶ اضافه کردن لاستیک سیلیکون..... ۴۸

- شکل ۳-۷ مخلوط در قالب ریخته شده و آماده پخت ۴۸
- شکل ۳-۸ نمونه های الاستومر مگنتورئولوژیکال ساخته شده ۴۹
- شکل ۴-۱ دسته موتور بعد از مونتاژ شدن ۵۲
- شکل ۴-۲ دستگاه اینسترون جهت اعمال نیرو ۵۳
- شکل ۴-۳ نصب اجزای آزمایش نوسان برشی در دستگاه INSTRON ۵۴
- شکل ۴-۴ منبع تغذیه برای اعمال جریان ورودی به سیم پیچ ۵۴
- شکل ۴-۵ هسته سیم پیچ شده برای تولید میدان مغناطیسی ۵۵
- شکل ۴-۶ حلقه های هیستریزیس در غیاب میدان مغناطیسی. الف - $f = 1 \text{ Hz}$ ب - $f = 3 \text{ Hz}$
- ج: $f = 5 \text{ Hz}$ د: $f = 8 \text{ Hz}$ ۵۶
- شکل ۴-۷ نمودار هیستریزیس در کرنش ۲۵٪ برای فرکانس های مختلف ۵۸
- شکل ۴-۸ حلقه های هیستریزیس در فرکانس ۳ هرتز در چگالی میدان های مغناطیسی مختلف ۵۹
- شکل ۴-۹ الف: بسته شدن دسته موتور برای تست محوری ب: دو عدد فک نگهدارنده دسته موتور ۶۰
- شکل ۴-۱۰ نمای برش خورده برای حالت اعمال نیرو به MRE سکه ای ۶۱
- شکل ۴-۱۱ الف: نمودار هیستریزیس در غیاب میدان مغناطیسی ب: نمودار هیستریزیس در حضور میدان مغناطیسی ۶۱
- شکل ۴-۱۲ الف: حلقه های هیستریزیس در غیاب میدان ب: حلقه های هیستریزیس در حضور میدان ۶۲
- شکل ۴-۱۳ نمودار مدول ذخیره برشی - کرنش ۶۴

شکل ۴-۱۴ سیستم جرم، فنر، دمپر..... ۶۵

شکل ۴-۱۵ نمودار قابلیت انتقال جابه‌جایی..... ۷۰

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۳ اجزای تشکیل دهنده نمونه‌های الاستومر مگنتورئولوژیکال ۴۵

جدول ۱-۴ پارامترهای محاسبه شده در میدان مغناطیسی صفر ۶۸

جدول ۲-۴ پارامترهای محاسبه شده در میدان مغناطیسی ۱۰۰ میلی تسلا ۶۸

جدول ۳-۴ پارامترهای محاسبه شده در میدان مغناطیسی ۱۶۰ میلی تسلا ۶۹

جدول ۴-۴ پارامترهای محاسبه شده در میدان مغناطیسی ۲۲۰ میلی تسلا ۶۹

فصل اول:

مقدمه

۱-۱ پیشگفتار

در این فصل ابتدا به شرح مختصری از مواد مگنتورئولوژیکال پرداخته می‌شود و سپس در مورد اجزا تشکیل‌دهنده الاستومرهای مگنتورئولوژیکال بحث می‌شود و انواع مدل‌سازی‌های الاستومر معرفی می‌گردد. مورد بعدی، مرور اجمالی بر دسته‌موتورها، عملکردهای دسته‌موتورهای ^۱MRE و انواع آن‌ها است و نهایتاً به پیشینه پژوهش، معرفی تحقیق حاضر و ضرورت و نوآوری‌های تحقیق پرداخته خواهد شد.

۲-۱ تاریخچه و مروری بر مواد مگنتورئولوژیکال

مواد مگنتورئولوژیکال^۲ گروهی از مواد هوشمند^۳ مانند سیالات مگنتورئولوژیکال^۴، الاستومرهای مگنتورئولوژیکال^۵، ژل‌های مگنتورئولوژیکال^۶، فوم‌های مگنتورئولوژیکال^۷ و پلاستومرهای مگنتورئولوژیکال^۸ هستند که با اعمال میدان مغناطیسی خارجی خواص مکانیکی، رئولوژی و ویسکوالاستیک آن‌ها تغییر می‌کند و اگر میدان خارجی حذف شود به سرعت به حالت اولیه برمی‌گردند [۱-۲]. وقتی که ذرات ریز آهنی (در حدود میکرون) در یک محیط پلیمری غیر مغناطیسی مانند ژل، سیال و مواد پلاستیکی قرار می‌گیرد، مواد رئولوژیکال ساخته می‌شود. زمانی که مواد مگنتورئولوژیکال در میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد ذرات آهنی جهت‌گیری کرده و زنجیره‌هایی از ذرات را تشکیل می‌دهند. اگر این ساختارهای زنجیره‌ای در یک محیط سیال باشند مانع از جاری شدن سیال شده و تنش تسلیم سیال را افزایش می‌دهند و باعث می‌شوند که در بارگذاری دینامیکی

^۱ Magnetorheological elastomers

^۲ Magnetorheological materials (MR materials)

^۳ Smart material

^۴ Magnetorheological fluids (MRFs)

^۵ Magnetorheological elastomers (MREs)

^۶ Magnetorheological gels (MRGs)

^۷ Magnetorheological foams (MR foams)

^۸ Magnetorheological plastomer

ظرفیت میرایی افزایش می‌یابد. اگر این ساختارهای زنجیره‌ای در محیط الاستومری باشند، مدول ذخیره برشی را افزایش می‌دهند و بعد از حذف میدان مغناطیسی به حالت اولیه برمی‌گردند [۳]. ژاکوب رابینو^۱ [۴] برای اولین بار با مطالعه بر روی سیالات مگنتورئولوژیکال به تحقیق در زمینه‌ی مواد هوشمند پرداخت. شیگا^۲ و همکاران [۵] در سال ۱۹۹۵ الاستومرهای مگنتورئولوژیکال را مطرح کردند و با ترکیب ذرات آهنی و سیلیکون، الاستومر مگنتورئولوژیکال را ساختند و خاصیت ویسکوالاستیکی آن را مورد ارزیابی قرار دادند. جولی^۳ و همکاران [۶] با بررسی خواص رئولوژی الاستومر مگنتورئولوژیکال، افزایش ۴۰ درصدی اندازه مدول ذخیره برشی با حضور میدان مغناطیسی یک تسلا گزارش دادند و همچنین خواص مغناطیسی و رئولوژیکی چندین نوع سیال مگنتورئولوژیکال را مورد بررسی قرار دادند. در ادامه این سیالات را به کمک نمودارهای مختلف با یکدیگر مقایسه کردند. بعضی از کاربردهای کنونی این سیالات بررسی شده است که این کاربردها نشان می‌دهند چگونه باید خواص مواد گوناگون تنظیم شوند تا عملکرد بهینه برای یک کاربرد خاص حاصل گردد. دی ویس^۴ [۷] برای دستیابی به بیشترین افزایش مدول ذخیره برشی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال، درصد حجمی بهینه ۲۷ درصد را برای ذرات آهنی در این مواد گزارش کرد.

۳-۱ سیالات مگنتورئولوژیکال

سیالات مگنتورئولوژیکال از ذرات آهنی در حدود میکرون که در محلول‌ها معلق هستند، تشکیل می‌شوند و با اعمال میدان مغناطیسی خارجی خواص رئولوژیکی آن‌ها از جمله ویسکوزیته آن‌ها به صورت برگشت‌پذیر تغییر می‌کند. که به میزان این تغییر در حضور میدان مغناطیسی اثر (MR) مگنتورئولوژیکال^۵ گفته می‌شود [۸]. به‌طور کلی از تجمع ذرات مغناطیس شونده در یک محیط غیر

^۱ Jacob Rabinow

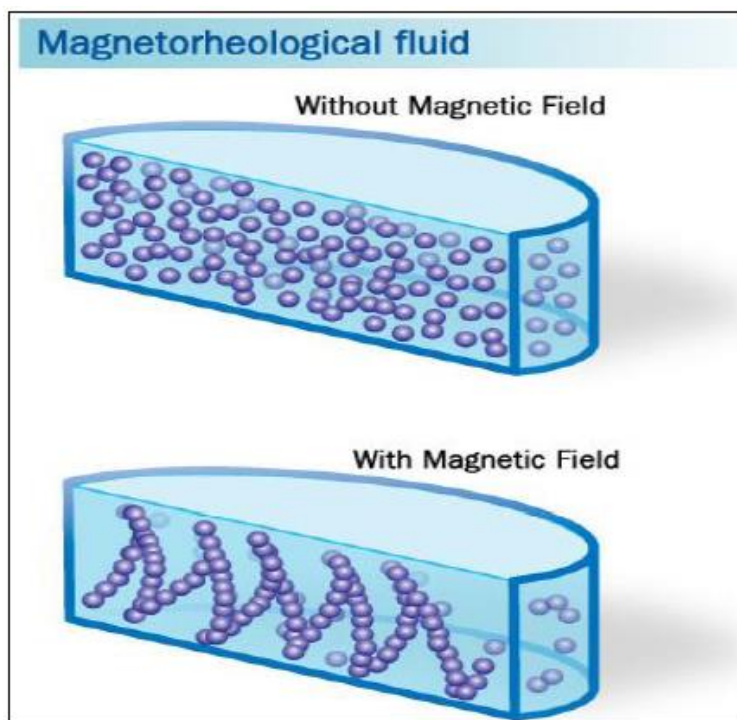
^۲ Shiga

^۳ Jolly

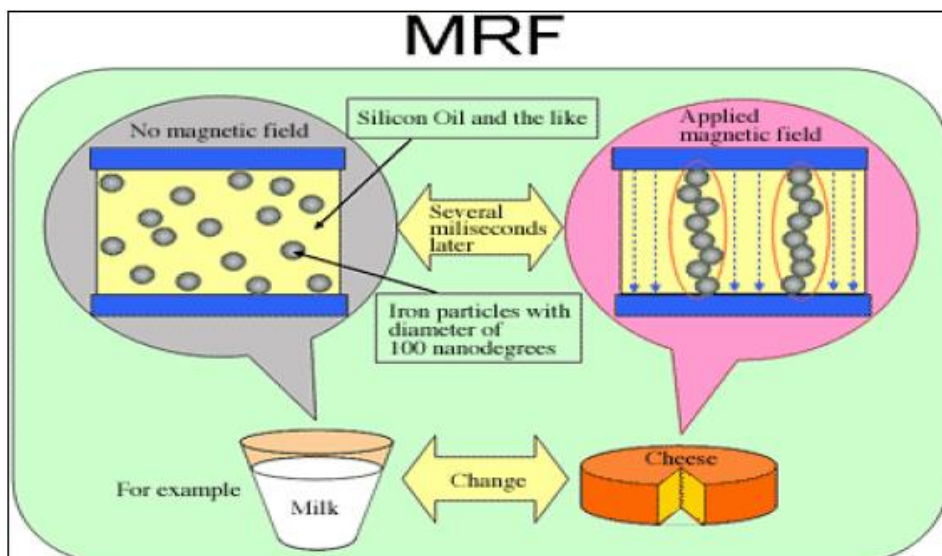
^۴ Davis

^۵ Magnetorheological effect (MR effect)

مغناطیسی، سیالات مگنتورئولوژیکال تشکیل می‌شوند و با تغییر در اندازه و نحوه قرارگیری ذرات مغناطیس شونده، رفتارهای رئولوژیکی متفاوت دیده می‌شود. اندازه این ذرات بین ۱/ تا ۱۰ میکرومتر است. زمانی که سیالات مگنتورئولوژیکال در میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند، برهمکنش بین ذرات مغناطیس شونده باعث می‌شود که ذرات با ساختارهای زنجیره‌ای به صورت ستونی در جهت میدان مغناطیسی شکل‌گیری کنند و این ستون‌های ذرات، ویسکوزیته را به صورت چشمگیری افزایش می‌دهند. شکل و استواری این ستون‌ها به پارامترهایی مانند شدت میدان مغناطیسی، اندازه و توزیع ذرات مغناطیس شونده و درصد حجمی ذرات بستگی دارد.



شکل ۱-۱ نمای ساده‌ای از سیالات مگنتورئولوژیکال [۲].



شکل ۱-۲ رفتار سیالات مگنتورئولوژیکال در حضور میدان مغناطیسی [۴].

شماتیک ساده‌ای از عملکرد سیالات مگنتورئولوژیکال در حضور و غیاب میدان مغناطیسی را در شکل (۱-۱) و (۲-۱) می‌توان دید. سیال حامل^۱ در سیالات مگنتورئولوژیکال، عموماً بر اساس خواص رئولوژی و پایداری دمایی انتخاب می‌شوند. به‌عنوان مثال می‌توان به سیلیکون، روغن، پلی‌استرها^۲ و روغن‌های هیدروکربنی مصنوعی^۳ اشاره کرد. سیالات مگنتورئولوژیکال اغلب دارای افزودنی‌هایی جهت افزایش خواص روان کنندگی، ضد ته‌نشینی و ضد انباشتگی هستند. ته‌نشینی ذرات مغناطیس شونده را تا حدودی می‌توان توسط سیالات تیکسوتروپیک^۴، ژل سیلیکا^۵، صمغ زانتان^۶، و کربوکسیلیک اسید^۷ کنترل کرد. ویژگی‌های منحصربه‌فرد سیالات مگنتورئولوژیکال قابلیت میرایی بسیار زیاد است که ناشی از افزایش تنش تسلیم در حضور میدان مغناطیسی است. اما این مواد دارای معایبی چون

^۱ Carrier fluid

^۲ Polyesters

^۳ Synthetic hydrocarbon oil

^۴ Thixotropic

^۵ Silica gel

^۶ Xanthan gum

^۷ Carboxylic acid

ته‌نشینی ذرات مغناطیس شونده با گذر زمان، مشکل آب‌بندی سیالات در داخل دمپر سیال رئولوژیکال و آلودگی شیمیایی است [۹-۱۰-۱۱].

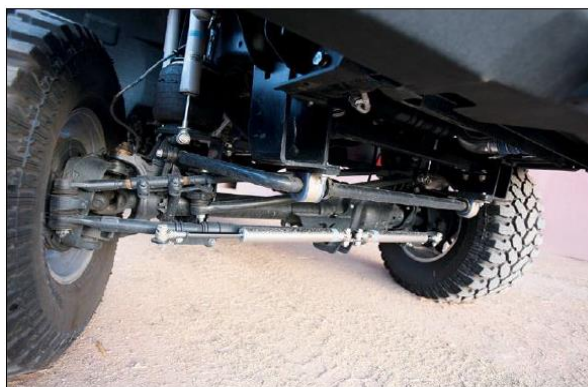
۴-۱ کاربردهای سیالات مگنتورئولوژیکال

به دلیل دارا بودن ویژگی‌های میرایی قابل تنظیم، سیالات مگنتورئولوژیکال دارای کاربردهای زیادی در زمینه‌های کاهش و جذب ارتعاشات و کنترل مکانیکی هستند. این سیالات در کنترل میرایی سازه‌ها، جاذب شوک، سیستم‌های تعلیق، ساختمان‌ها، پل‌ها، کلاچ و ترمز هوشمند، ماشین لباسشویی و ... کاربرد دارند [۵-۱۲].

چند نمونه از کاربرد سیال مگنتورئولوژیکال را در شکل‌های (۱-۳)، (۱-۴) و (۱-۵) می‌توان دید.



شکل ۱-۳ دمپرهای سیالات مگنتورئولوژیکال نصب‌شده روی پل کابلی [۱۳].



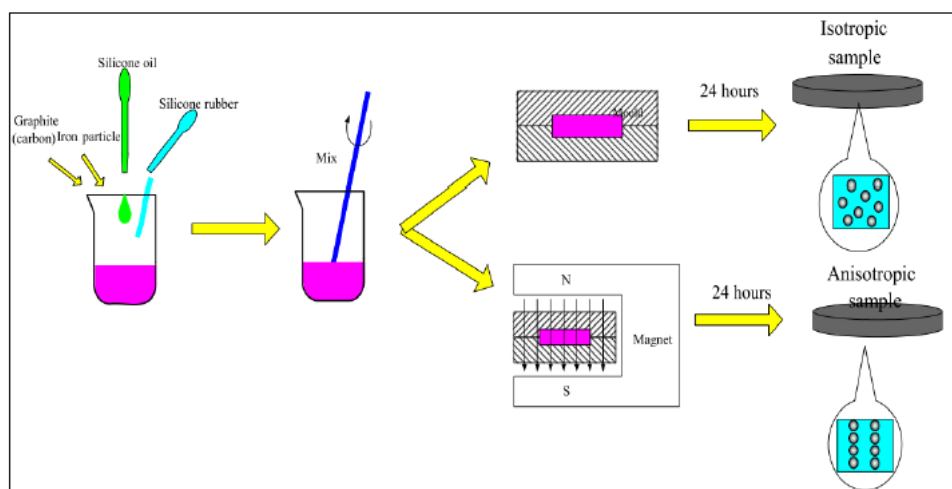
شکل ۱-۴ دمپر سیال مگنتورئولوژیکال در خودروهای هابر نظامی [۱۴].



شکل ۱-۵ دمپر سیال مگنتورئولوژیکال در ماشین لباسشویی [۱۲].

۱-۵ الاستومرهای مگنتورئولوژیکال

الاستومرهای مگنتورئولوژیکال با قرار دادن ذرات ریز مغناطیس شونده در یک محیط الاستومری تشکیل می‌شوند و به دو صورت ایزوتروپ و غیر ایزوتروپ ساخته می‌شوند. بدین صورت که اگر الاستومرها در فرایند پخت در میدان مغناطیسی قرار بگیرند به صورت زنجیره‌هایی از ذرات پخش می‌شوند که در این حالت غیر ایزوتروپ هستند. اگر در فرایند پخت میدان مغناطیسی حضور نداشته باشد ذرات مغناطیس شونده به صورت هموزن و یکنواخت در محیط الاستومری پخش می‌شوند که الاستومرهای مگنتورئولوژیکال ایزوتروپ هستند.



شکل ۱-۶ شماتیکی از مراحل ساخت الاستومر مگنتورئولوژیکال ایزوتروپ و غیر ایزوتروپ [۵].



شکل ۷-۱ یک نمونه MRE [۱۵].

استفاده از الاستومرهای مگنتورئولوژیکال به دلیل سختی و میرایی قابل تنظیم^۱ (تغییر سختی و میرایی با تغییر میدان مغناطیسی) آن در سالیان اخیر افزایش چشمگیری داشته است اما نسبت به سیالات مگنتورئولوژیکال کمتر شناخته شده‌اند. تفاوت سیالات مگنتورئولوژیکال با الاستومر مگنتورئولوژیکال در این است که یک ماده لاستیکی مثل سیلیکون یا لاستیک طبیعی جای سیال را گرفته است. در الاستومرهای مگنتورئولوژیکال نیز با اعمال میدان مغناطیسی، ذرات مغناطیس شونده تمایل به جهت‌گیری در راستای میدان مغناطیسی رادارند. برخلاف سیالات مگنتورئولوژیکال، ذرات مغناطیس شونده بعد از فرایند پخت در جای خود مستقر می‌شوند و شکل ته‌نشینی و آلودگی شیمیایی ذرات مغناطیس شونده از میان می‌رود [۱۶-۱۷].

اثر MR و خواص رئولوژیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال در هر دو حالت ایزوتروپ و غیر ایزوتروپ بعد از حذف میدان مغناطیسی برگشت‌پذیر است. سختی^۲ و میرایی^۳ الاستومرهای مگنتورئولوژیکال بستگی به جهت بارگذاری، جهت میدان مغناطیسی و راستای ذرات مغناطیس شونده دارد.

^۱ Variable stiffness and damping isolators (VSDIs)

^۲ Stiffness

^۳ Damping

۱-۶ اجزای تشکیل دهنده الاستومرهای مگنتورئولوژیکال

الاستومرهای مگنتورئولوژیکال دارای خواص مغناطیس شونده، مانند ذرات آهنی یا سایر مواد فرو آهنی است که به مواد پلیمری و ویسکوالاستیک اضافه می‌شود. اندازه این ذرات مغناطیس شونده بین ۱ تا ۱۰ میکرون است. مطالعات انجام شده نشان داده است که تعداد، اندازه و جهت‌گیری ذرات و همچنین نوع پلیمر به کاررفته، روی خواص رئولوژیکی الاستومرها به شدت تأثیر می‌گذارد. تقسیم‌بندی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال با توجه به پارامترهای مختلفی، مانند نوع ذرات مغناطیس شونده، ساختار و توزیع ذرات مغناطیس شونده و یا نوع محیط و یا ماتریس به صورت زیر است [۱۸]:

۱- بر اساس نوع ماتریس

الف. ماتریس جامد

ب. ماتریس متخلخل^۱

۲- بر اساس نوع ذرات مغناطیس شونده

الف. ذرات مغناطیس شونده نرم

ب. ذرات مغناطیس شونده سخت

۳- بر اساس نوع توزیع ذرات مغناطیس شونده

الف. ایزوتروپ

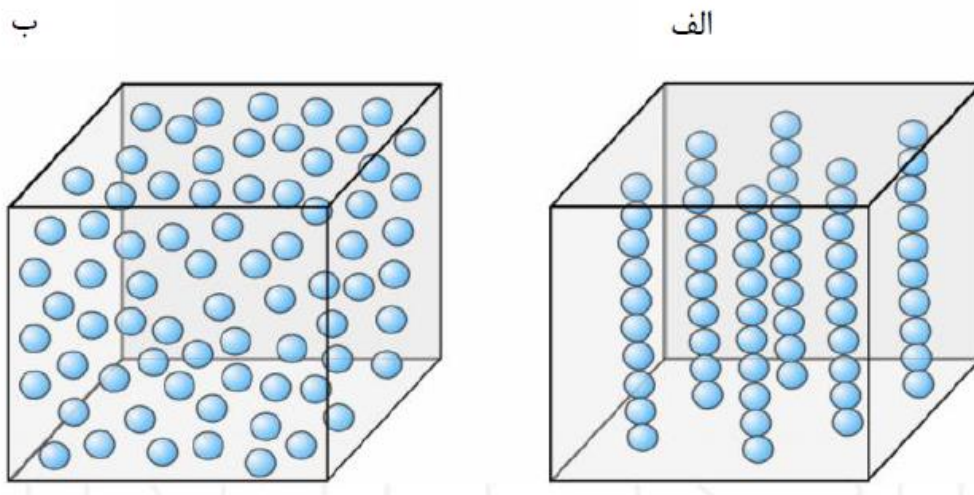
ب. غیر ایزوتروپ

^۱ Porous matrix

برای تولید الاستومر مگنتورئولوژیکال ایزوتروپ معمولاً در آخرین مرحله از فرایند، میدان مغناطیسی اعمال می‌شود که باعث شکل‌گیری ذرات مغناطیس شونده، و به دام افتادن آن‌ها در الاستومر می‌شود. برای اعمال نیروی برشی به الاستومرهای مگنتورئولوژیکال غیرایزوتروپ در حضور میدان مغناطیسی، نیروی بیشتری نسبت به الاستومرهای مگنتورئولوژیکال ایزوتروپ، لازم است که نهایتاً باعث افزایش مدول برشی می‌شود. با افزایش میدان مقدار این نیرو و مدول برشی افزایش می‌یابد [۱۹]. بنابراین تغییر در خواص مکانیکی و رئولوژیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال به شدت وابسته به چگالی میدان مغناطیسی خارجی می‌شود. وقتی که میدان مغناطیسی به الاستومرهای مگنتورئولوژیکال اعمال می‌شود برهم‌کنش بین ذرات مغناطیس شونده باعث می‌شود که ذرات به هم نزدیک شده و سختی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال بیشتر می‌شود و با این تغییر شیب منحنی تنش-کرنش که نمایانگر سختی معادل^۱ است، افزایش می‌یابد [۲۰]. حذف میدان مغناطیسی در فرایند پخت باعث تولید الاستومر مگنتورئولوژیکال غیر ایزوتروپ می‌شود. در ساخت الاستومرهای مگنتورئولوژیکال معمولاً از روغن سیلیکون^۲ به عنوان افزودنی استفاده می‌شود، که افزودن این روغن به ماتریس باعث می‌شود فاصله بین مولکول‌های ماتریس افزایش یافته و چسبندگی بین مولکول‌های ماتریس کاهش یابد. همچنین باعث افزایش توزیع یکنواخت تنش داخلی در ماتریس می‌گردد و باعث می‌شود تا ذرات مغناطیس شونده در حضور میدان مغناطیسی به راحتی جهت‌گیری کنند.

^۱ Equivalent stiffness

^۲ Silicone oil



شکل ۸-۱- شماتیک ساده‌ای از دو نوع ذرات مغناطیس شونده. الف-ایزوتروپ ب-غیر ایزوتروپ [۲].

۷-۱ کاربردهای الاستومر مگنتورئولوژیکال

دو ویژگی منحصر به فرد سختی و میرایی قابل تنظیم الاستومرهای مگنتورئولوژیکال باعث شده است که در سال‌های اخیر، الاستومرها استفاده چشمگیری در کاربردهای مختلف مهندسی داشته باشند. الاستومرهای مگنتورئولوژیکال در ایزوله کننده‌های سختی و میرایی قابل تنظیم، جاذب‌های ارتعاش قابل تنظیم^۱، سیستم‌های تعلیق خودرو^۲، فونداسیون‌های ایزوله کننده هوشمند^۳، سیستم‌های نویز گیر^۴، کنترل ارتعاش و سختی فعال^۵، ایزوله کننده‌های دارای سختی متغیر منفی^۶، سپر خودروها^۷، فضاپیماها^۸، و به‌طور خاصی در تغییر فرکانس‌های طبیعی سیستم‌های مکانیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۱-۲۲].

^۱ Adaptive tuned vibration absorbers(ATVAs)

^۲ Vehicle suspension systems

^۳ Smart-based isolators

^۴ Noise barrier systems

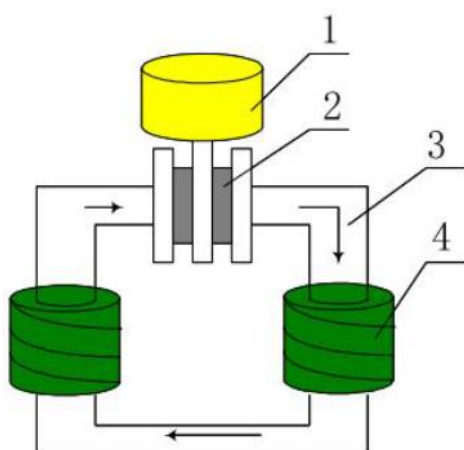
^۵ Negative changing stiffness isolators

^۶ Negative changing stiffness isolators

^۷ Bumper of vehicle

^۸ Spacecraft

گیندر^۱ و همکاران [۲۳] یک جاذب ارتعاش قابل تنظیم (منظور از قابل تنظیم بودن، تغییر سختی و میرایی توسط اعمال میدان مغناطیسی خارجی است)، شامل الاستومر مگنتورئولوژیکال را طراحی کردند که برای تأمین میدان مغناطیسی جهت تغییر سختی و میرایی سیستم، از سیم‌پیچ (کویل^۲) استفاده شده است. دنگ^۳ و همکاران [۲۴] با اضافه کردن یک کویل دیگر، یک جاذب ارتعاشی دیگری را طراحی کردند که شماتیک این جاذب ارتعاشی، و مسیر شار مغناطیسی تولیدشده توسط کویل، در شکل (۹-۱) به نمایش در آمده است. کالیو^۴ و همکاران [۲۵] یک عنصر فنری قابل تنظیم که شامل الاستومر مگنتورئولوژیکال باشد را طراحی کردند. این عنصر فنری قابل تنظیم که میدان مغناطیسی توسط کویل تأمین می‌شود، در حالت فشاری عمل می‌کند. این عنصر فنری قابل تنظیم در شکل (۱-۱۰) نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۹-۱ جاذب ارتعاشی قابل تنظیم شامل الاستومر مگنتورئولوژیکال دارای دو کویل مغناطیسی

(۱) نوسانگر (۲) الاستومر مگنتورئولوژیکال (۳) هادی مغناطیسی (۴) کویل [۲۴].

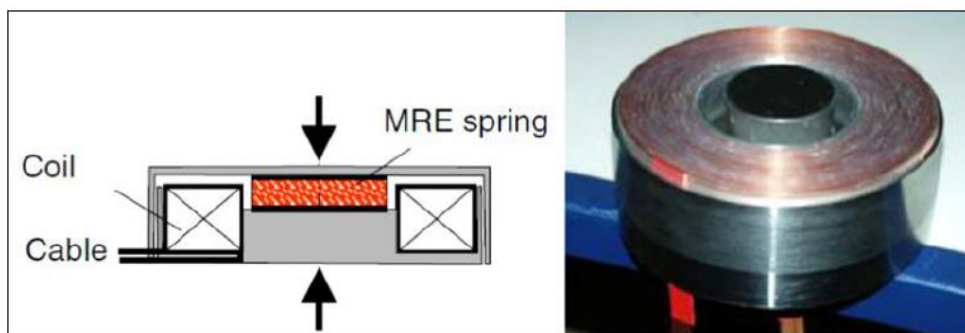
^۱ Ginder

^۲ Coil

^۳ Deng

^۴ Kallio

^۵ Magnetic conductor



شکل ۱-۱۰ عنصر فلزی قابل تنظیم شامل الاستومر مگنتورئولوژیکال [۲۵].

۸-۱ انواع مدل‌های الاستومر مگنتورئولوژیکال

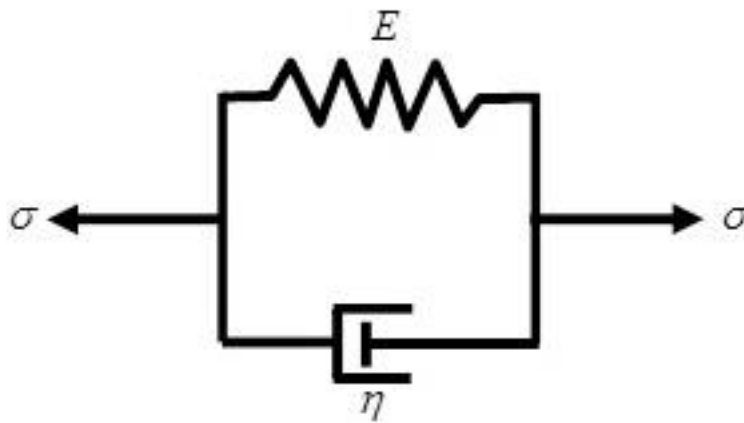
۱-۸-۱ معرفی انواع مدل‌ها

یکی از موارد مورد توجه در سالیان اخیر، پیش‌بینی رفتار مکانیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال است. رفتار ویسکوالاستیک الاستومرهای مگنتورئولوژیکال، عموماً غیرخطی هستند (به‌ویژه در کرنش‌های بسیار بالا)، و این رفتار غیرخطی بیشتر در فشار و کشش قابل مشاهده است تا در رژیم برشی. در این قسمت به انواع مدل‌سازی‌های الاستومر مگنتورئولوژیکال اشاره می‌شود و سپس برای نمونه روابط تئوری مدل ماکسول بیان می‌گردد [۲۶-۲۷-۲۸]. با توجه به نتایج آزمایشگاهی مشخص شده است که در بارگذاری‌های نوسانی-برشی، رفتار الاستومرهای مگنتورئولوژیکال تحت تأثیر میدان مغناطیسی رفتار متفاوتی دارند. این تغییر رفتار علاوه بر چگالی میدان مغناطیسی، به کرنش‌ها و فرکانس‌های بارگذاری نیز وابسته است. به ازای افزایش فرکانس ورودی، ضریب تلفات و مدول ذخیره برشی افزایش می‌یابد و الاستومر مگنتورئولوژیکال رفتار کرنش نرم شوندگی^۱ از خود نشان می‌دهند. همچنین در کرنش‌های بالا رفتار کرنش _سخت‌شوندگی^۲ نمود پیدا می‌کند [۲۹]. مدل تعمیم‌یافته ماکسول، جهت مدل‌سازی رفتار دینامیکی در ناحیه خطی، گزینه مناسبی است. انواع مدل

^۱ Strain-softening

^۲ Strain-stiffening

های رایج دیگر شامل مدل مشتق کسری، مدل کلوین - ویت و مدل سه پارامتری استاندارد^۱ است. معمولاً از مدل مشتق کسری به دلیل پیچیدگی محاسبات ریاضی صرف نظر می شود اما این مدل در فضای وابسته به زمان می تواند رفتار ماده را پیش بینی کند. یکی از مدل های پر کاربرد در زمینه رفتار مواد لاستیکی، مدل کلوین - ویت است که وابستگی رفتار ماده به فرکانس را تا حدودی در نظر می گیرد. که این مدل از یک فنر الاستیک مستقل از فرکانس، و یک جزء میرایی ویسکوز تشکیل شده است (مطابق شکل ۱-۱۱). وجود جزء میرایی ویسکوز در این مدل، باعث پیش بینی بیشتر از حد مورد انتظار مقدار سختی و میرایی در فرکانس های بالا می شود.

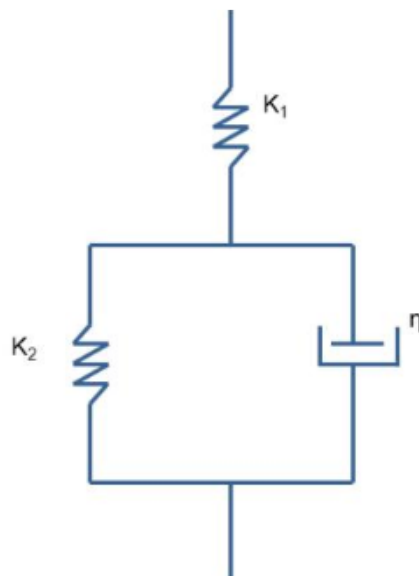


شکل ۱-۱۱ مدل کلوین-ویت

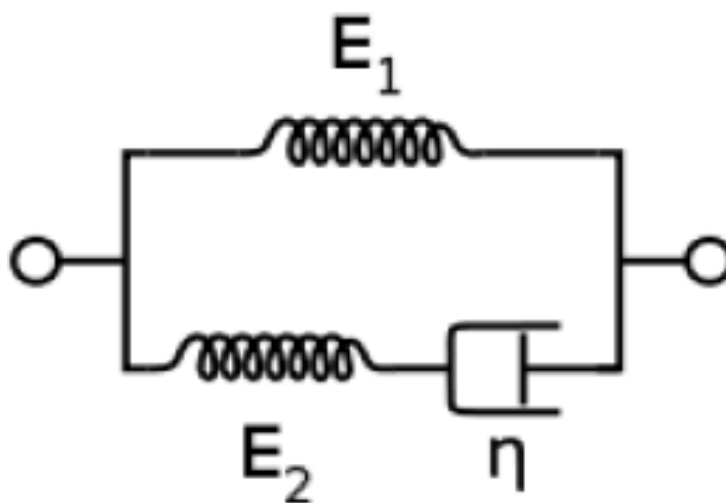
اگر به مدل کلاسیک کلوین - ویت یک جزء فنری به صورت سری اضافه کنیم به مدل سه پارامتری استاندارد^۲ مطابق شکل (۱-۱۲) خواهیم رسید. این مدل مقدار سختی را در اثر افزایش فرکانس به خوبی پیش بینی می کند اما اثر فرکانسی را برای میرایی در نظر نمی گیرد.

^۱ Three parameters standard model

^۲ Three parameters standard model



شکل ۱-۱۲ مدل سه پارامتری استاندارد (زیر نوع یک)
 برای بهبود عملکرد مدل کلاسیک کلین - ویت تحت بارهای ناگهانی از جزء فنری استفاده می
 شود. اگر یک جزء فنری را به صورت سری به جزء میرایی مدل کلین - ویت اضافه کنیم، به مدل سه
 پارامتری تعمیم یافته ماکسول خواهیم رسید (مطابق شکل ۱-۱۳).



شکل ۱-۱۳ مدل سه پارامتری تعمیم یافته ماکسول (زیر نوع دو)

۲-۸-۱ معادله تعمیم یافته ماکسول

جهت آشنایی روابط مورد استفاده در این مدل سازی ها و یافتن پارامترهایی همچون ویسکوالاستیک، مدول ذخیره برشی و مدول تلفات، در بین مدل سازی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال، مدل تعمیم یافته ماکسول را به عنوان مثال در این بخش آورده ایم [۲۹]. مد اول مدل تعمیم یافته ماکسول، مانند مدل زنر^۱ است که در شکل (۱-۱۳) به نمایش در آمده است. افزایش مد در این مدل باعث می شود که وابستگی سختی و میرایی به فرکانس بهتر پیش بینی شود.

برای به دست آوردن معادلات تعمیم یافته ماکسول در مدهای مختلف از معادله مدل ماکسول ساده به صورت زیر شروع می کنیم:

$$\tau + \lambda_i \dot{\tau} = \lambda_i \dot{\gamma} \quad (۱-۱)$$

در این معادله λ زمان رهایی از تنش است که از رابطه زیر به دست می آید:

$$\lambda = \frac{\eta}{G} \quad (۲-۱)$$

که η میرایی ویسکوز و G مدول ذخیره برشی است. اگر کرنش ورودی را کرنش ورودی مختلط γ^* ، تنش خروجی را تنش خروجی مختلط τ^* و مدول برشی مختلط را G^* فرض کنیم، خواهیم داشت:

$$\tau^* = G^* \gamma^* \quad (۳-۱)$$

$$G^* = G' + iG'' \quad (۴-۱)$$

G' مدول ذخیره برشی و G'' مدول تلفات برشی است.

γ^* کرنش ورودی مختلط را به صورت زیر فرض می کنیم:

$$\gamma^* = \gamma_0 e^{i\omega t} \quad (۵-۱)$$

^۱ Zener model

ω فرکانس زاویه‌ای تحریک و γ_0 دامنه کرنش ورودی است. مدول ذخیره برشی G' و مدول تلفات G'' به صورت زیر با قراردادن معادلات (۴-۱) و (۵-۱) در داخل معادله (۳-۱) به دست می‌آیند:

$$G' = \frac{\lambda \eta \omega^2}{1 + \lambda^2 \omega^2} \quad (۶-۱)$$

$$G'' = \frac{\eta \omega}{1 + \lambda^2 \omega^2} \quad (۷-۱)$$

برای معادلات عمومی تعمیم یافته ماکسول برای n شاخه، مدول ذخیره G' و مدول تلفات G'' به طریق مشابه به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$G' = G_0 + \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i \eta_i \omega^2}{1 + \lambda_i^2 \omega^2} \quad (۸-۱)$$

$$G'' = \sum_{i=1}^n \frac{\eta_i \omega}{1 + \lambda_i^2 \omega^2} \quad (۹-۱)$$

برای پیدا کردن پاسخ پایا تنش^۱ الاستومر مگنتورئولوژیکال در مد برشی، کرنش برشی ورودی به صورت یک ورودی سینوسی فرض می‌شود:

$$\gamma(t) = \gamma_0 \sin(\omega t) \quad (۱۰-۱)$$

بنابراین پاسخ پایا تنش ناشی از کرنش برشی ورودی سینوسی، به صورت زیر است:

$$\tau_{model} = \gamma_0 \sqrt{G'^2 + G''^2} \sin(\omega t + \phi) \quad (۱۱-۱)$$

در اینجا ϕ اختلاف فاز بین تنش و کرنش است که نشان دهنده ویسکوالاستیک بودن الاستومر مگنتورئولوژیکال است و از رابطه زیر به دست می‌آید:

^۱ Steady state response

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{G''}{G'}\right) \quad (12-1)$$

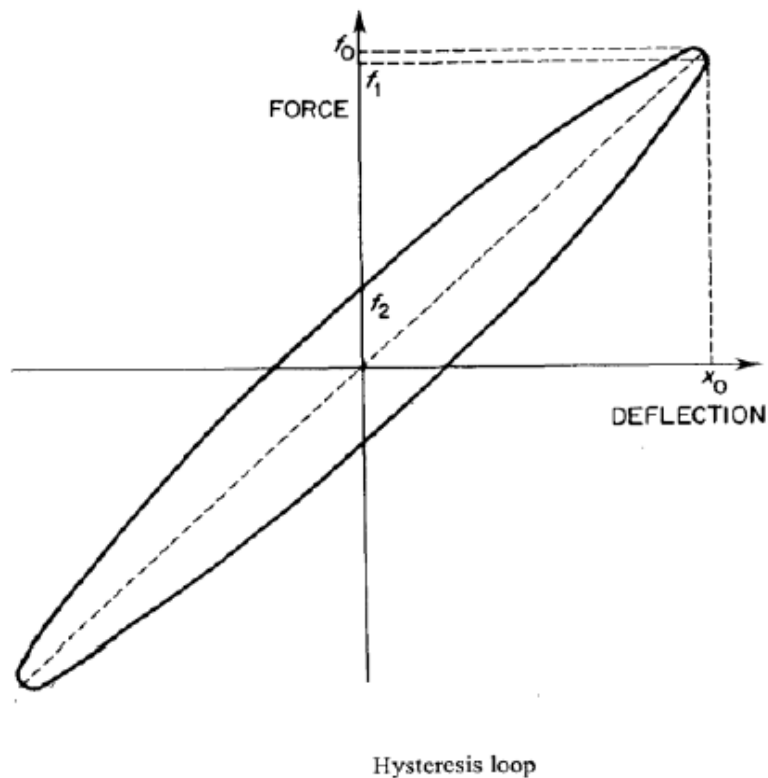
با توجه به معادله (11-1) برای پیش‌بینی پاسخ تنش الاستومر مگنتورئولوژیکال در این مدل پیشنهادی، به‌عنوان مثال در مد دوم، نیاز به محاسبه مدول ذخیره برشی (G') و مدول میرایی (G'') و همچنین نیاز به محاسبه پنج پارامتر λ_1 ، λ_2 ، η_1 ، η_2 و G_0 است. که برای تعیین این پارامترهای مدل تعمیم‌یافته ماکسول در مد دوم، تست‌های نوسانی برشی روی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال در فرکانس‌هایی با مقادیر مختلف، و همچنین در کرنش برشی و میدان مغناطیسی مختلف انجام می‌شود. جهت به حداقل رساندن اختلاف بین مقادیر تنش به‌دست‌آمده از مدل و مقادیر تنش آزمایشگاهی، از روش‌های بهینه‌سازی از جمله روش کمترین مربعات و الگوریتم ژنتیک در جعبه بهینه‌سازی نرم‌افزار متلب استفاده می‌شود. بدین‌صورت، پنج پارامتر ذکرشده در این مدل از طریق بهینه‌سازی تابع خطا که به‌صورت زیر تعریف شده است، به دست می‌آید:

$$f_{\min} = \sum_{f=i}^n \sum_{\gamma_0=i}^n (\tau_{\text{model}} - \tau_{\text{Exp}})^2 \quad (13-1)$$

با توجه به معادله فوق، عملیات بهینه‌سازی در میدان‌های مغناطیسی، فرکانس‌ها و کرنش‌های مختلف انجام می‌شود، بنابراین پارامترهای λ_1 ، λ_2 ، η_1 ، η_2 و G_0 به‌دست‌آمده، برخلاف مدل‌های رایج فقط تابع میدان مغناطیسی هستند.

۳-۸-۱ یافتن خواص مادی الاستومر مگنتورئولوژیکال با استفاده از نمودار هیستریزیس

با استفاده از رفتار ویسکوالاستیک و نمودارهای هیستریزیس می‌توان خواص مادی الاستومر مگنتورئولوژیکال را به دست آورد. مدول ذخیره برشی (G')، مدول تلفات (G'') و ضریب تلفات ($\eta = \frac{G'}{G''}$)، به صورت زیر محاسبه می‌شوند [۳۰].



شکل ۱-۱۵- نمودار هیستریزیس نیرو-جابه‌جایی در بارگذاری نوسانی مواد پلاستیکی [۳۰].
نمودار هیستریزیس یک ماده پلاستیکی زمانی که تحت تأثیر نیروی دینامیکی نوسانی قرار می‌گیرد، نمودار نیرو-جابه‌جایی آن به صورت یک حلقه هیستریزیس، همانند شکل (۱-۱۵) می‌شود. مطابق این شکل پارامترهای x_0 معرف بیشترین جابه‌جایی، f_0 بیشترین نیروی وارد شده به ماده، f_1 نیروی متناظر با بیشترین جابه‌جایی و f_2 نیروی متناظر با جابه‌جایی صفر است. سختی دینامیکی مطابق معادله (۱-۱۴)، از نسبت بیشترین نیروی وارد شده به بیشترین جابه‌جایی محاسبه می‌شود.

$$S = \frac{f_0}{x_0} \quad (1-14)$$

در حالت نوسان برشی روابط نیرو-جابجایی به تنش-کرنش تبدیل شده و مدول مختلط به صورت زیر تعریف می شود:

$$G^* = \frac{f_0 h}{a x_0} = S^* \frac{h}{a} \quad (15-1)$$

که a و h به ترتیب مساحت تحت برش و ضخامت نمونه آزمایش است. مدول ذخیره برشی G' و مدول میرایی G'' به صورت زیر تعریف می شود :

$$G' = \frac{f_1 h}{a x_0} \quad (16-1)$$

$$G'' = \frac{f_2 h}{a x_0} \quad (17-1)$$

و ضریب تلفات درنهایت به شکل زیر تعریف می شود:

$$\xi = \tan \delta = \frac{f_2}{f_1} \quad (18-4)$$

بنابراین با توجه به معادلات (۱۴-۱) تا (۱۸-۱) می توان سختی، مدول ذخیره برشی G' ، مدول میرایی G'' و ضریب تلفات ξ الاستومر مگنتورئولوژیکال را در حالت نوسان برشی محاسبه کرد.

۹-۱ چالش های استفاده از الاستومرهای مگنتورئولوژیکال

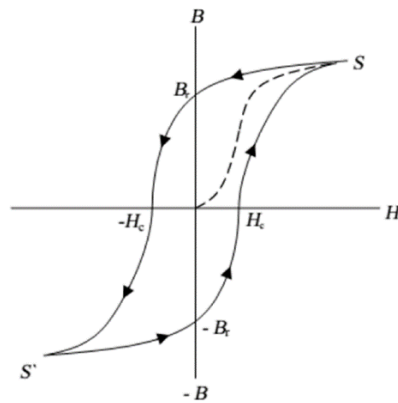
بر اساس نوع عملکرد انواع مواد مگنتورئولوژیکال، کاربردهای آنها در سیستم های مکانیکی متفاوت است. مثلاً سیالات مگنتورئولوژیکال دارای ظرفیت میرا کنندگی بالاتری نسبت به الاستومر

مگنتورئولوژیکال است. پس در کاربردهایی مثل سیستم ترمز از سیالات مگنتورئولوژیکال استفاده می‌شود. دستگاه‌هایی شامل الاستومرهای مگنتورئولوژیکال برای کاهش ارتعاشات سیستم مکانیکی باید چهاراصل زیر را موردتوجه قرار دهند:

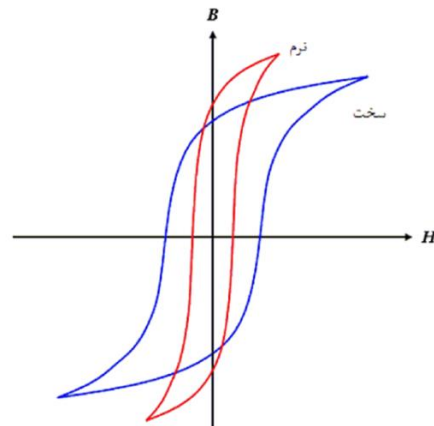
اولاً الاستومرهای مگنتورئولوژیکال باید با درصد وزنی بهینه از ذرات آهنی و ماتریس مشخص درست شوند. دوماً جهت تولید میدان مغناطیسی برای طراحی و بهینه‌سازی سیم‌پیچ مغناطیسی، از نمودار B-H که حلقه پسماند است و اطلاعات فراوانی در مورد خواص مغناطیسی ماده به دست می‌دهد، استفاده گردد. B در این نمودار معرف چگالی شار مغناطیسی و H معرف شدت میدان مغناطیسی است. سوماً برای پیش‌بینی رفتار الاستومر در انواع بارگذاری‌های دینامیکی، مدل رفتار جامع معرفی گردد. چهارماً برای تنظیم رابطه بین تحریک ورودی و میزان جریان الکتریکی (تولید میدان مغناطیسی) یک سیستم کنترلی مناسب در نظر گرفته شود.

۱-۱۰ حلقه‌های پسماند

حلقه‌های پسماند حاوی اطلاعاتی از خواص مغناطیسی ماده است و با رابطه بین شدت میدان مغناطیسی H و چگالی شار مغناطیسی B بیان می‌گردد که به آن منحنی B-H گفته می‌شود. ماده‌ای که حلقه پسماند پهنی داشته باشد خاصیت نفوذپذیری کمی دارد و چگالی شار باقی‌مانده نشان‌دهنده وادارندگی و مقاومت مغناطیسی زیاد است. در شکل (۱-۱۶) یک نمونه از حلقه پسماند برای یک ماده فرو مغناطیس نشان داده شده است. و در شکل (۱-۱۷) حلقه‌های پسماند مغناطیسی سخت، و حلقه‌های مغناطیسی نرم را می‌توان دید. اگر ماده به‌راحتی مغناطیس شود حلقه باریک‌تر خواهد بود و اگر به‌سختی مغناطیس شود حلقه پهن‌تر خواهد شد.



شکل ۱-۱۶ چگالی شار مغناطیسی بر حسب شدت میدان مغناطیسی



شکل ۱-۱۷ حلقه پسماند برای مواد مغناطیسی سخت و نرم

۱۱-۱ دسته‌موتور

اصولاً ویژگی‌هایی چون راحتی سرنشین، پایداری و کیفیت رانندگی از جمله شاخص‌های اساسی و مهم در عملکرد هر وسیله نقلیه محسوب می‌شوند. به همین دلیل موضوعات مربوط به دانش ارتعاشات مکانیکی و دینامیک خودرو از جمله مباحث مورد اهمیت در صنعت طراحی و ساخت خودرو به شمار می‌روند. به‌طور کلی دو منبع عمده تحریک که سبب پیدایش ارتعاشات نامطلوب می‌شوند، عبارت‌اند از: ۱- نامیزانی موتور و تحریک ناشی از ناهمواری‌های جاده. ۲- تحریک‌هایی که مستقیماً به بدنه خودرو وارد و از طریق دسته‌موتورها به خط انتقال قدرت منتقل می‌شوند.

با توجه به اینکه منبع تولید قدرت، خود از جمله تولید نوسانات و ارتعاشات است و می‌تواند سبب ایجاد خلل در عملکرد خودرو شود، تاکنون تحقیقات گسترده‌ای جهت بررسی دلایل بروز ارتعاشات موتور و روش‌های کاهش آن انجام شده است. این در حالی است که همچنان حوزه‌های بررسی نشده فراوانی در موضوع مدل‌سازی و جداسازی ارتعاشات وجود دارد. همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، از جمله مباحث مطرح در صنعت خودروسازی که سهم بسزایی در جلب رضایت مشتریان و افزایش کیفیت خودرو دارد، مسائل دینامیکی و ارتعاشی خودرو است. در یک نگاه کلی می‌توان این مسائل را به دو گروه عمده تقسیم‌بندی کرد:

در گروه نخست، نقش و عملکرد اجزای اثرگذار بر ارتعاشات خودرو بررسی می‌شود. در گروه دوم، اما اهمیت مفصل‌ها و اتصالات مربوط به این قسمت‌ها در بدنه و شاسی مورد بررسی قرار می‌گیرد. بحث نخست به بررسی ارتعاشی-دینامیکی و بحث دوم به تحلیل نیرویی-ارتعاشی و استحکام اجزا اختصاص دارد. بحث دسته‌موتور از جمله مباحثی است که به موضوع یکی از اجزای اثرگذار در حوزه ارتعاشی خودرو می‌پردازد.

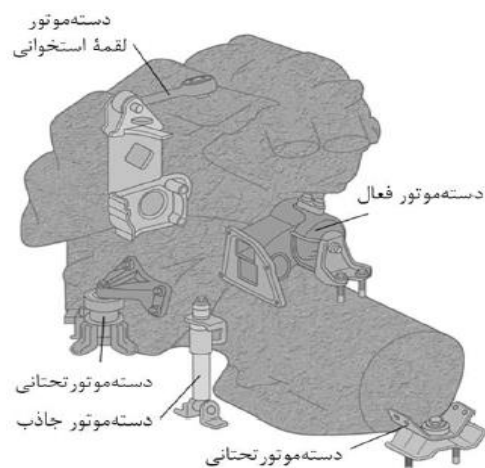
۱-۱۲ عملکرد دسته‌موتورها

عملکرد اصلی دسته‌موتور در هر خودرو عبارت است از:

۱- جداسازی ارتعاشات موتور از بدنه

۲- جلوگیری از اعمال ضربه بر موتور

در شکل (۱-۱۸) نمایی از نحوه اتصال موتور و شاسی به کمک انواع دسته‌موتور را دیده می‌شود.



شکل ۱-۱۸. اتصال موتور و شاسی به کمک انواع دسته موتور [۳۱].

معمولاً در خودروهای دیفرانسیل عقب استفاده از دسته‌موتورهای ارتجاعی، که ساختار بسیار ساده‌ای دارند رواج دارد (در شکل ۱-۱۹ انواع دسته‌موتورهای ارتجاعی قابل مشاهده است). این در حالی است که با گسترش خودروهای دیفرانسیل جلو استفاده از موتورهایی که عمود بر مسیر انتقال قدرت قرار می‌گیرند رواج یافته و این خود سبب توجه به انواع توسعه‌یافته دسته‌موتور شده است.



شکل ۱-۱۹. انواع دسته‌موتورهای ارتجاعی

به‌طور کل می‌توان شرایط اعمالی بار را از دیدگاه نویز و ارتعاشات به دودسته تقسیم کرد:

۱- شرایطی که طی آن ارتعاشاتی با فرکانس کم و دامنه ارتعاشی زیاد به موتور اعمال می‌شود و معمولاً شرایط جاده، شتاب‌گیری سریع، ترمزهای ناگهانی و تعویض دنده از جمله عوامل ایجاد این نوع می‌باشند.

۲- ارتعاشات ثانویه که در حین روشن بودن ماشین همواره بر موتور اعمال می‌شود، ارتعاشاتی با مقادیر فرکانسی زیاد و دامنه بسیار کم می‌باشند. میزان خروج از مرکزی موتور مهم‌ترین عامل ایجاد این نوع می‌باشد.

اتومبیل به منظور رفع آسیب‌های ناشی از دو نوع ارتعاش فوق نیاز به دو نوع دسته‌موتور، با عملکرد متفاوت دارد:

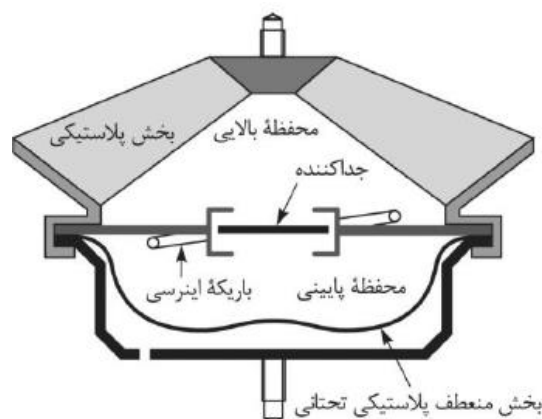
یکی با سختی و میرایی زیاد برای ارتعاش نوع اول که به نام جاذب شوک^۱ شناخته می‌شود و دیگری با سختی و

میرایی کم که بانام جداساز ارتعاشی (ایزولاتور)^۲ شناخته می‌شود. پس مشخصه‌های یک دسته‌موتور ایده آل بستگی به شرایط دامنه و فرکانس تحریک دارد. از قدیمی‌ترین نوع دسته‌موتورها، بانام دسته‌موتورهای ارتجاعی شناخته می‌شوند. این دسته از نگه‌دارنده‌ها، در سال ۱۹۳۰ میلادی با هدف جداسازی ارتعاشات موتور از بدنه استفاده شدند. سختی و میرایی زیاد آن منجر به کاهش لرزش‌ها در فرکانس‌های پایین می‌شود اما در فرکانس‌های بالا کارایی ندارند. از مزایای این گروه از دسته‌موتورها می‌توان به قیمت مناسب، تعمیر و نگهداری آسان، مدل ریاضی ساده، و ابعاد مناسب آن اشاره کرد. یک دسته‌موتور ارتجاعی با مشخصه‌های خطی نمی‌تواند دو هدف فوق را ارضا کند، این نوع از دسته‌موتورها، مورد اول ذکرشده از کارایی دسته‌موتور را برآورده می‌کند اما در سایر موارد عملکرد چندان مطلوبی ندارند. به همین دلیل لازم است که به انواع دیگری از دسته‌موتورها رجوع نمود.

^۱ Shock absorber

^۲ Isolator

دسته‌موتورهای هیدرولیکی به‌صورت رضایت بخشی این مشکل را حل نمی‌کنند، اما باین‌وجود میرایی را در فرکانس‌های کم کاهش می‌دهند و سبب کاهش جداسازی ارتعاشات در فرکانس‌های بالا می‌شوند. از مشکلات این دسته‌موتورها می‌توان به قیمت بالا و پیچیدگی طراحی اشاره کرد. باین‌وجود امروزه همچنان انواع گوناگونی از دسته‌موتورهای هیدرولیکی در حال توسعه‌اند. در شکل زیر ساختار کلی و قسمت‌های گوناگون یک دسته‌موتور هیدرولیکی را می‌توان دید.



شکل ۱-۲۰. نمایی از اجزای اصلی دسته‌موتور هیدرولیکی [۳۱].

از انواع دیگر دسته‌موتورها می‌توان به دسته‌موتورهای نیمه فعال اشاره کرد. دسته‌موتورهایی که برای رفع کاستی‌ها و بهبود عملکرد دسته‌موتورهای غیرفعال معرفی شدند. در این گروه از دسته‌موتورها یک یا چند پارامتر تحت کنترل قرار می‌گیرند که در اغلب موارد ایده اولیه سیستم‌های کنترلی نیمه فعال بر اساس جذب انرژی ارتعاشی سیستم از طریق تغییر در خواص دینامیکی همچون میرایی یا سختی بنا شده است.

۱۳-۱ پیشینه تحقیقات دسته‌موتورها

در این بخش پژوهش‌های مربوط به انواع دسته‌موتورها بررسی شده‌اند.

در سال ۱۹۹۷ کیم^۱ [۳۲] و همکارانش با بهره بردن از یک نمونه خاص از دسته‌موتورهای الاستومری بانام Bush type، طراحی بهینه بر اساس استفاده از فرآیند طراحی پارامتریک با استفاده از بهینه‌سازی پارامترها را پیشنهاد نمودند. به کمک برنامه‌های رایانه‌ای المان محدود، این روش گسترش یافت. به‌طوری‌که برنامه، شکل نهایی دسته‌موتور را با تأمین سختی موردنظر، ارائه می‌دهد. در ادامه لی^۲ و کیم [۳۳] به‌عنوان یک تحقیق جامع به مطالعاتی بر روی ارتقاء عملکرد لاستیک دسته‌موتور با استفاده از طراحی بهینه پرداختند. طراحی بهینه با در نظر گرفتن سختی ماده و مقاومت خستگی لاستیک، محقق گشته است. نویسندگان همچنین عنوان نمودند که الزامات چنین طرحی از طریق بهینه‌سازی چندمنظوره ممکن می‌گردد. لی و همکارانش [۳۳] عمر خستگی یک دسته‌موتور الاستومری را بر اساس تست خواص مواد، و روش المان محدود پیش‌بینی نمود و به معادله‌ی عمر خستگی برای مواد پلاستیکی طبیعی رسید. این معادله بر اساس تست کشش تک‌محوره، تست خستگی پلاستیک طبیعی و بیشینه کرنش اصلی در بارگذاری‌های مختلف، در راستای محورهای مختصات دوبعدی به دست آمد. این روش تخمین عمر، درنهایت به کمک نتایج تست خستگی، صحت‌گذاری شد. در طی تحقیقات روی دسته‌موتورهای هیدرولیکی براچ^۳ و هادو^۴ [۳۱] یک سیستم جامع جهت جداسازی ارتعاشی موتور، در بازه گسترده‌ای از فرکانس و دامنه تحریک طراحی کردند. در ادامه نخعی^۵ و همکاران [۳۴] در یک مطالعه عددی نشان دادند که یک مدل غیرخطی ساده، تا حد خوبی مشخصات سوییچینگ دیکاپلر را نشان می‌دهد. اما این مرجع از پیش‌بینی دقیق رفتار دی‌کاپلر ناتوان بود. در تحقیقی دیگر ونگ^۶ و همکارانش [۳۵] برای تعیین مشخصه‌های دینامیکی دسته‌موتور، نتایج مشخصه‌های دینامیکی که از مدل مکانیکی همراه با دیکاپلر ثابت به‌دست‌آمده بود را با مقادیر آزمایشگاهی نوعی دسته‌موتور هیدرولیکی میرا شده، مقایسه کرد و کارآمدی مدل‌سازی، تأیید شد.

^۱ Kim

^۲ Lee

^۳ Brach

^۴ Haddow

^۵ Nakhaie

^۶ Wang

در زمینه دسته‌موتورهای فعال و شبه فعال برای نخستین بار ویلیام و همکارانش [۳۶] یک مدل دسته‌موتور با سیالات ER را بیان کردند. لزجت سیالات ER با قرار گرفتن در میدان الکتریکی تغییر می‌کند. بعدازآن کارسون^۱ و همکارانش [۳۷] سیالات MR و کاربرد آن‌ها در جذب ارتعاشات را معرفی کرده و به مقایسه آن‌ها با سیالات ER پرداختند. در تحقیق دیگری که توسط چوی^۲ و همکارانش [۳۸] صورت گرفت، طراحی یک ایزولاتور مغناطیسی همراه با سیال MR بود که برای کنترل ارتعاشات یک تیر ارتجاعی با بارگذاری خارجی صورت گرفت. فیضی و همکارانش [۳۹] مدل‌سازی یک دسته‌موتور MR را در دستور کار قرار دادند. مطالعه آن‌ها نشان داد که با افزایش میدان مغناطیسی، سختی دینامیکی نیز قابل تغییر است. پس‌ازآن حسینی و همکارانش [۴۰] اقدام به طراحی و مدل‌سازی یک نمونه عملگر ارزان‌قیمت نمودند. آن‌ها در طی تحقیقات تحلیلی و تجربی خود عنوان کردند که معادلات غیرخطی سیم‌پیچ، در برخی از کاربردهای خاص آن، توانایی خطی سازی را خواهند داشت. در همین سال دسته‌موتور الکترومغناطیسی فعالی پیشنهاد گردید که از انتقال حرارت تولیدشده در سیم‌پیچ به اجزای پلاستیکی دسته‌موتور جلوگیری می‌کرد و مانع از آسیب دیدن آن‌ها می‌شد، و همچنین مقاومت و ماندگاری آن افزایش و ابعاد آن کاهش یافت و ساختار آن ساده‌تر شد.

۱-۱۴ معرفی تحقیق حاضر

هدف از این پژوهش طراحی و ساخت یک دسته‌موتور الاستومر هوشمند است. در این پژوهش ابتدا به مطالعه و جمع‌آوری اطلاعاتی در مورد انواع مواد هوشمند از جمله الاستومر مگنتورئولوژیکال پرداخته شد و در این مورد از انواع کاربردهای آن در صنایع مختلف معرفی گردید. همچنین مطالعه‌ای روی انواع مدل‌هایی برای پیش‌بینی رفتار الاستومر مگنتورئولوژیکال در حالت برشی انجام شد. در ادامه اقدام به ساخت دو نمونه الاستومر مگنتورئولوژیکال با ابعاد مختلف خواهد شد. در

^۱ Carlson

^۲ Choi

مرحله بعد با توجه به اطلاعاتی که در مورد کارایی و معایب دسته‌موتورها در اختیار است به طراحی یک نوع دسته‌موتور الاستومر مگنتورئولوژیکال با نرم‌افزار سالدورکز پرداخته خواهد شد که فقط در حالت برشی عمل می‌کند. برای اعمال میدان مغناطیسی به الاستومرهای به‌کاررفته در این دسته‌موتور از سیم‌پیچ استفاده خواهد گردید. مقدار میدان مغناطیسی با نرم‌افزار FEMM شبیه‌سازی شده و بعد از شبیه‌سازی کامپیوتری، نقشه ابعاد دسته‌موتور به‌وسیله نرم‌افزار سالدورکز^۱ به‌طور دقیق تهیه خواهد گردید و در اختیار تراشکار قرار گرفته و بعد از ساخته‌شدن قطعات مونتاژ خواهد شد و در آزمایشگاه با اعمال نیروهای مکانیکی مورد آزمایش قرار گرفته و نمودارهای آن استخراج خواهد گردید.

۱-۱۵ ضرورت تحقیق و کاربرد آن

ازجمله مباحث مطرح در صنعت اتومبیل‌سازی، که سهم بسیار زیادی در جلب رضایت و افزایش کیفیت خودرو دارد، مسائل مربوط به ارتعاشات و دینامیک خودرو است. با توجه به اهمیت موضوع، استفاده از دسته‌موتوری با کارایی بالا ضروری است. استفاده از مواد MRE به‌عنوان الاستومر یک دسته‌موتور، قابلیت کنترل خواص سازه در بازه فرکانسی مختلف را امکان‌پذیر ساخته و میزان جذب انرژی را افزایش می‌دهد.

۱-۱۶ نوآوری

استفاده از مواد MRE، طراحی و ساخت این نوع دسته‌موتور برای اولین بار در ایران است.

^۱ SolidWorks

۱-۱۷ ساختار پایان نامه

- فصل اول شامل معرفی مواد رئولوژیکال، تاریخچه، کاربرد و معرفی انواع مدل سازی الاستومرها، معرفی انواع دسته موتور و کاربرد و تاریخچه آنها، تعریف مسئله و نوآوری این پژوهش است.
- فصل دوم شامل شبیه سازی میدان مغناطیسی، طراحی، ساخت و مونتاژ دسته موتور است.
- فصل سوم مراحل ساخت الاستومر مگنتورئولوژیکال را بیان می کند.
- فصل چهارم با معرفی اجزای تست نوسانی برشی شروع شده و سپس با انجام تست در بارگذاری های مختلف و تحلیل نتایج آزمایشگاهی به پایان می رسد.
- فصل پنجم شامل خلاصه ای از نتایج و پیشنهادها است.

فصل دوم:

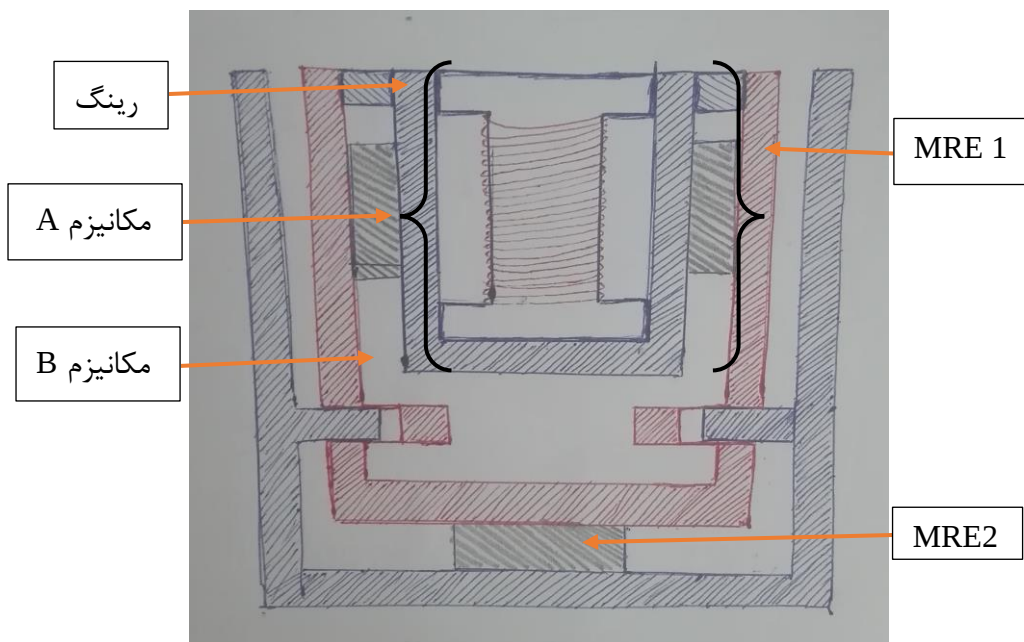
طراحی، ساخت و مونتاژ دسته موتور

۲-۱ مقدمه

هدف گذاری در این پروژه، دمپ نیروهای وارده طولی و عرضی بوده است به طوری که الاستومرهای مورد استفاده در دسته موتور تحت کشش یا فشار قرار نگیرند و فقط در مد برش عمل نمایند. برای محقق شدن این هدف، به دو قطعه MRE (یک قطعه جهت دمپ نیروهای عرضی، و دیگری جهت دمپ نیروهای طولی) احساس نیاز می شود. بر همین مبنا از میان ایده های مختلف، یک ایده برگزیده شد و با استفاده از نرم افزار FEMM ابعاد الاستومرها و قطعات مورد نیاز تعیین گشت. سپس به طراحی شماتیک هندسی دسته موتور به کمک نرم افزار سالیدورکز پرداخته شد و نقشه ابعاد قطعات تهیه گشته و در اختیار تراشکار قرار گرفت. بعد از ساخته شدن، قطعات مورد نظر مونتاژ شده و مراحل ساخت تکمیل گشت.

۲-۲ شکل گیری ایده

اولین هدف در طراحی دسته موتور استفاده از مکانیزمی است که تحت بارگذاری های عرضی و محوری، الاستومرهای مورد استفاده تحت برش قرار گیرند. برای این منظور وجود دو قطعه الاستومر مگنتورئولوژیکال ضروری به نظر می رسيد، به طوری که یک قطعه MRE با اعمال نیروی محوری و دیگری با اعمال نیروی عرضی تحت برش عمل کنند. بدین ترتیب باید دو مکانیزم مجزا طراحی می شد تا به ازای حالتی که بارگذاری طولی اتفاق می افتد، مکانیزم آن مستقل از حالت بارگذاری عرضی عمل کند. بدین شکل با وجود دو قطعه MRE هدف فوق می تواند محقق گردد. بر همین اساس از میان ایده های مختلفی که مطرح شده بودند، شکل (۲-۱) به عنوان ایده نهایی اتخاذ گردید.



شکل ۲-۱- ایده طرح اولیه دسته موتور

طبق طرح فوق، اعمال نیروی عرضی باعث حرکت نوسانی مکانیزم (A) شده و بدون اعمال نیرو به MRE شماره (۲)، MRE شماره (۱) در حالت برشی قرار می‌گیرد. در بارگذاری محوری، مجموعه مکانیزم (B) به نوسان درمی‌آید و MRE شماره (۲) در مد برش عمل می‌کند. وجود رینگ در این مجموعه مانع از اعمال نیرو به MRE شماره (۱) در هنگام بارگذاری محوری می‌شود. بدین ترتیب ایده اولیه با توجه به محقق شدن اهداف ذکر شده، شکل گرفت.

۲-۳ شبیه‌سازی میدان مغناطیسی

بعد از شکل‌گیری ایده اولیه، باید ابعاد الاستومرهای مگنتورئولوژیکال مشخص شود. همچنین ابعاد و جنس قطعات مکانیزم فوق، برای تعیین میدان مغناطیسی عبوری از الاستومرهای مگنتورئولوژیکال مهم می‌باشد. بدین منظور از نرم‌افزار شبیه‌ساز مغناطیسی FEMM استفاده شد. این نرم‌افزار با توجه به ورودی‌های اولیه نظیر ابعاد قطعات، تعداد دور سیم‌پیچ و جریان ورودی به تحلیل میدان مغناطیسی می‌پردازد. برای بهبود بخشیدن در تولید میدان مغناطیسی، ایده ذکر شده توسط نرم‌افزار FEMM اصلاح شد و شکل نهایی توسط نرم‌افزار سالی‌دورکز طراحی گردید.

همان‌طور که ذکر شد ابعاد و جنس قطعات با نرم‌افزار شبیه‌ساز FEMM مشخص گردید. بدین منظور ابتدا ابعاد فرضی در نرم‌افزار ذکر شده وارد شده و با تست کردن ابعاد مختلف به میدان مغناطیسی مطلوب متناظر با ابعاد دست‌یافته شد. مراحل شبیه‌سازی میدان بدین‌صورت است که ابتدا ابعاد هندسه دسته‌موتور و شرایط مرزی در این نرم‌افزار مشخص شده و سپس نمودار B-H یا ضریب نفوذپذیری الاستومر مگنتورئولوژیکال برای نرم‌افزار تعریف می‌شود. برای به دست آوردن ضریب نفوذپذیری از تست^۱ VSM استفاده شد. دستگاه مغناطیس‌سنج نمونه ارتعاش (VSM) از کارخانه سازنده Weistron با توان ورودی دستگاه ۱۵۰۰W، میدان مغناطیسی اعمالی ۰/۸T و ابعاد نمونه الاستومر مورد استفاده برای آنالیز ۴*۲*۲ میلی‌متر (ارتفاع*عرض*طول) است (شکل ۲-۲).



شکل ۲-۲ دستگاه تست VSM

نتایج به دست آمده از این تست در قالب یک گراف که اصطلاحاً منحنی پسماند نامیده می‌شود، به صورت منحنی M-H به دست آورده شد. با استفاده از داده‌های آزمایش VSM و استفاده از رابطه:

$$B = \mu_0 (M + H) \quad (۱-۲)$$

^۱ Vibration Sample Magnetometer

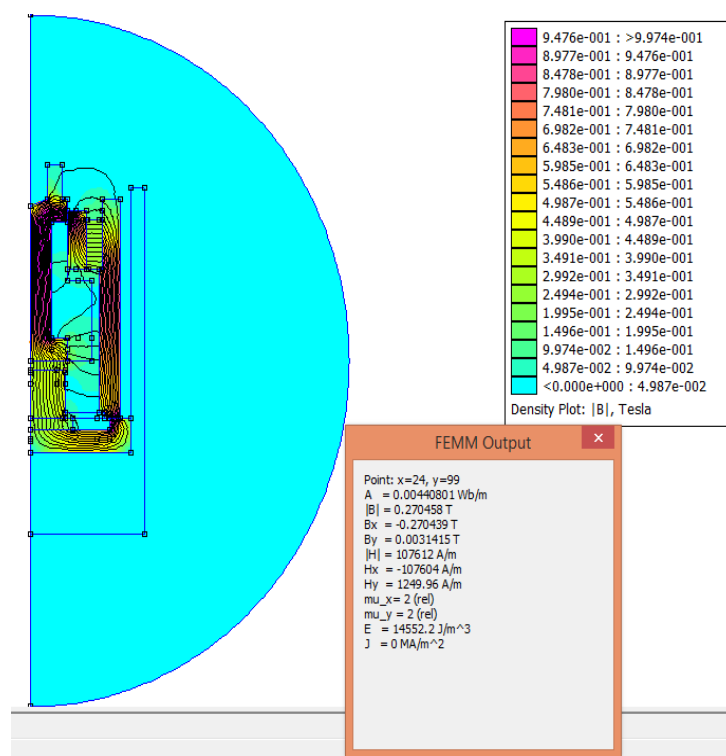
و با در اختیار داشتن مقادیر μ_0 ، M و H که به ترتیب ضریب نفوذپذیری مغناطیسی در خلأ (برحسب هانری بر متر)، مغناطش و شدت میدان مغناطیسی (برحسب تسلا) هستند، مقدار چگالی شار مغناطیسی (B) محاسبه می گردد. همچنین با استفاده از رابطه:

$$B = \mu H \quad (2-2)$$

مقدار ضریب نفوذپذیری الاستومر مگنتورئولوژیکال (μ) به دست می آید. که این مقدار برابر است با:

$$\mu = \frac{H}{B}$$

بعد از تعریف شرایط اولیه برای نرم افزار، میدان های مغناطیسی مورد نیاز به ازای جریان های مختلف شبیه سازی شد. به عنوان مثال اگر جریان ورودی در سیم پیچ ۱/۵ آمپر باشد، میدان مغناطیسی ۲۷۰ میلی تسلا تولید می شود.

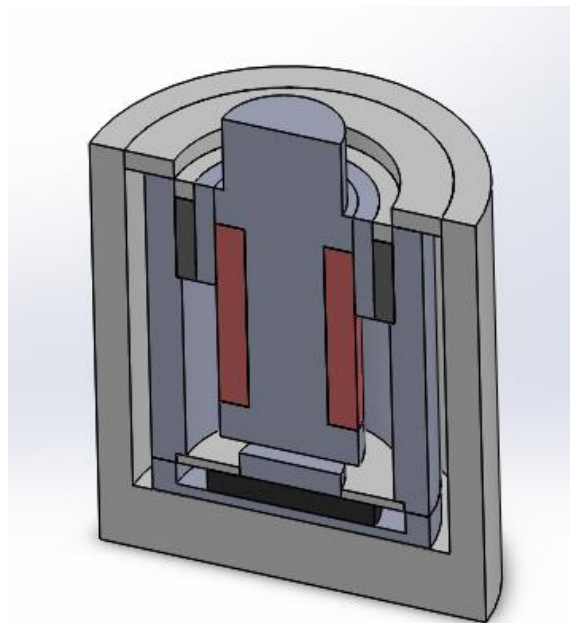


شکل ۲-۳- تولید میدان مغناطیسی ۲۷۰ میلی تسلا با جریان ورودی ۱/۵ آمپر

از آنجایی که در فرایند انجام تست به میدان‌های صفر، ۶۰، ۱۰۰، ۱۶۰، ۲۲۰ و ۲۷۰ میلی تسلا نیاز داریم این نرم‌افزار برای تولید میدان‌های فوق، جریان‌های ورودی صفر، ۳/، ۶/، ۹/ و ۱۲/ را به ترتیب شبیه‌سازی کرد.

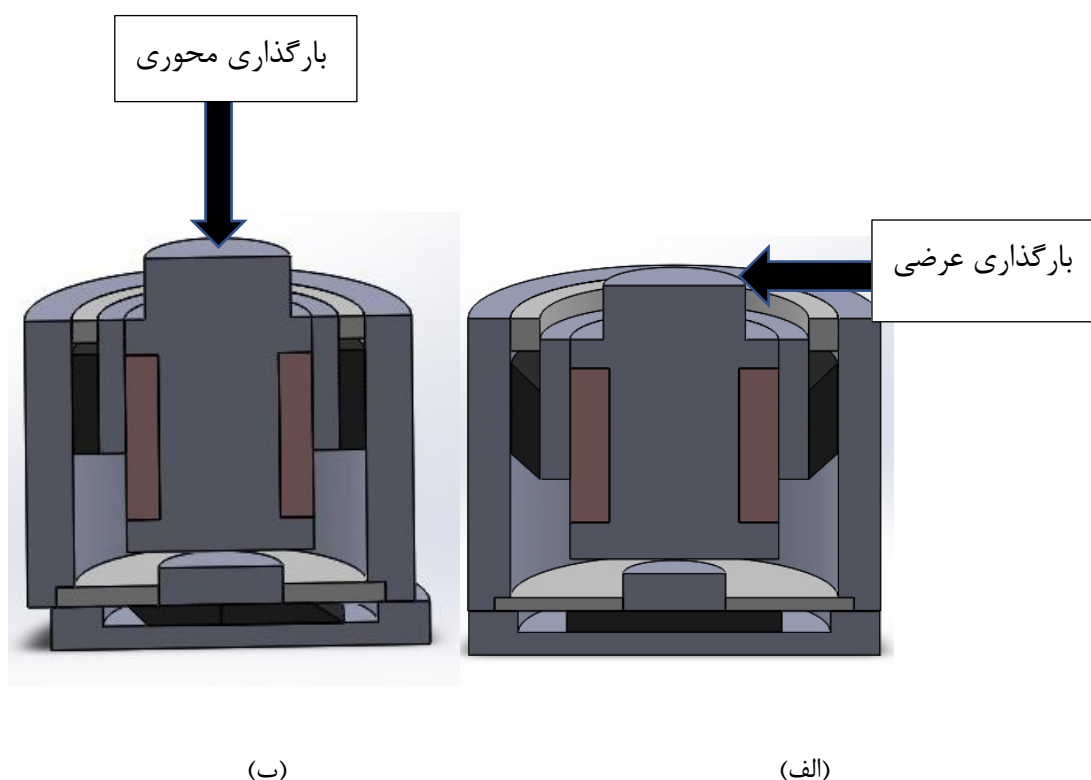
۴-۲ طراحی هندسه دسته‌موتور

در تولید میدان مغناطیسی برای عملکرد بهتر سیستم، ابعاد الاستومرهای مگنتورئولوژیکال و همچنین ابعاد و هندسه دسته‌موتور بسیار مهم می‌باشند. برای دستیابی به عملکرد مطلوب، ایده اولیه در شکل (۱-۲) با نرم‌افزار FEMM اصلاح گردید و بعد از استخراج شدن ابعاد مناسب، در نهایت به طرح کلی شکل (۴-۲) رسیدیم که این شکل با استفاده از نرم‌افزار سالیدورکز طراحی شده است.



شکل ۴-۲- طرح کلی دسته‌موتور

طرح کلی فوق به‌خوبی هدف‌های ذکر شده را محقق می‌سازد. شکل (۵-۲) شماتیکی از عملکرد الاستومرهای مگنتورئولوژیکال در مد برشی را نشان می‌دهد.



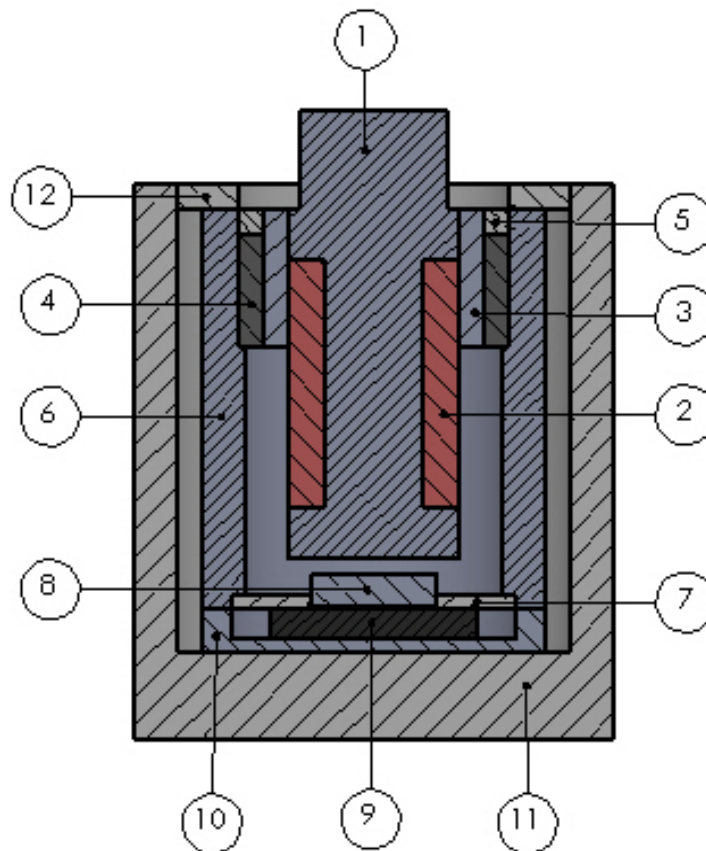
شکل ۲-۵- نحوه قرارگیری الاستومرها در مد برشی (الف) اعمال نیروی نوسانی عرضی (ب) اعمال نیروی نوسانی محوری

در شکل (۲-۵ الف) نیرو به صورت عرضی وارد شده است و با حرکت دو مکانیزم نسبت به یکدیگر باعث قرارگیری الاستومر سکه‌ای در مد برشی می‌شود. در شکل (۲-۵ ب) بارگذاری محوری باعث حرکت نوسانی مکانیزم سیم‌پیچ شده می‌شود و باعث می‌شود که الاستومر حلقه‌ای در مد برشی قرار بگیرد. همان گونه که در شکل فوق مشخص است، الاستومرها در مد کشش یا فشار قرار نمی‌گیرند. در قسمت بعد به توضیح بیشتر در این مورد پرداخته شده است.

۲-۵ مونتاژ قطعات دسته‌موتور

همان گونه که ذکر شد مبنای کار دسته‌موتور دمپ نیروهای نوسانی اعمالی به صورت طولی و عرضی است. بدین خاطر از یک نمونه الاستومر مگنتورئولوژیکال به شکل سکه‌ای و دیگری به شکل رینگ استفاده شده است. این الاستومرها با اعمال نیرو از هر جهت باید در مد برشی عمل کنند، که هندسه دسته‌موتور بر اساس همین موضوع طراحی شد. برای آشنایی بیشتر با نحوه قرارگیری الاستومرهای

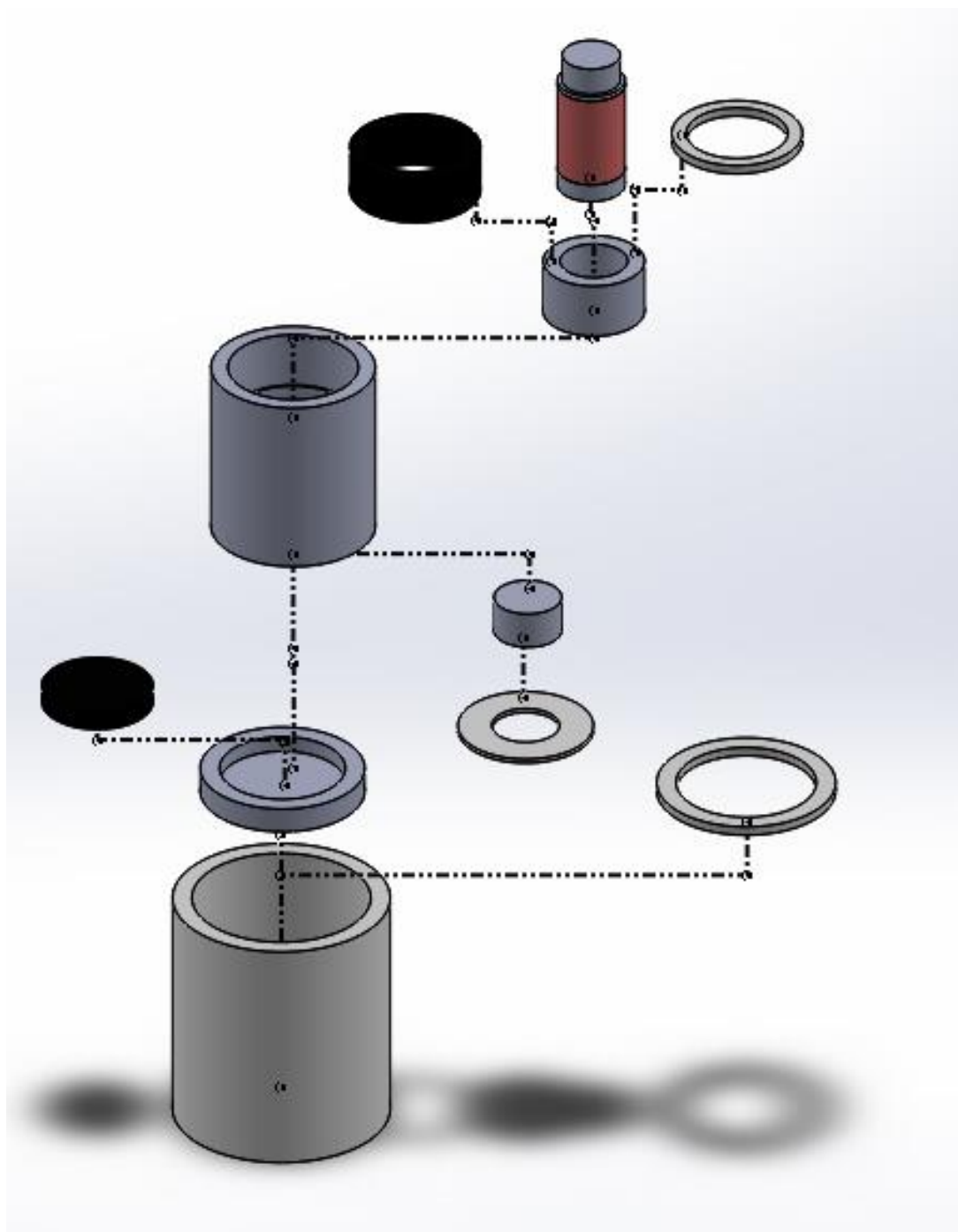
مگنتورئولوژیکال در مد برشی هنگام اعمال نیرو، اجزای طراحی شده دسته‌موتور در شکل شماره‌گذاری شده (۲-۶) آورده شده است.



شکل ۲-۶ شماره گذاری قطعات دسته موتور

قطعه شماره (۱) هسته از جنس آهن است که طبق شماره (۲) سیم‌پیچ شده و وظیفه تولید میدان مغناطیسی متغیر، به ازای جریان‌های ورودی مختلف را بر عهده دارد. زمانی که نیروی محوری به این هسته وارد می‌شود، الاستومری که به شکل رینگ است (شماره ۴ در تصویر)، تحت نوسان برشی قرار می‌گیرد. وجود فضای خالی در زیر هسته سیم‌پیچ شده (قطعه شماره ۱) باعث می‌شود که به الاستومر سکه‌ای (شماره ۹)، هیچ نیرویی وارد نشود و مانع قرارگیری این الاستومر تحت کشش یا فشار می‌شود. زمانی که نیرو به صورت عرضی وارد می‌شود، مجموعه قطعات شماره‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷ و

۸ به صورت یکپارچه نوسان می‌کنند و الاستومر سکه‌ای (شماره ۹ در تصویر) در مد نوسان برشی عمل می‌کند. قابل ذکر است که وجود رینگ شماره ۵، مانع از اعمال نیروی فشاری یا کششی به الاستومر شماره ۴ می‌شود. وجود قطعه شماره ۸ که از جنس آهن است، برای هدایت میدان مغناطیسی از قطعه سیم‌پیچ شده به الاستومر شماره ۹ طراحی شده است. در نهایت مجموعه قطعات ذکر شده فوق، درون قطعه شماره ۱۱ قرار داده شده و رینگ شماره ۱۲ روی این مجموعه جای می‌گیرد و مراحل مونتاژ دسته‌موتور تکمیل می‌گردد. نحوه مونتاژ قطعات در نمای انفجاری شکل (۲-۷) قابل رؤیت است.



شکل ۷-۲- نمای انفجاری قطعات دسته موتور

۲-۶ ساخت قطعات دسته‌موتور

بعد از طراحی اجزای فوق، نقشه تمام قطعات توسط سالی‌دورکز تهیه گردید و در اختیار تراشکار

قرار گرفت، و قطعات با ابعاد موردنظر ساخته شد.



شکل ۲-۸- قطعات ساخته‌شده دسته‌موتور به همراه الاستومرهای مگنتورئولوژیکال

به طور کلی در این فصل ابتدا بر اساس اهداف مورد نظر یک ایده بیان شد و با استفاده از نرم‌افزار

FEMM اصلاح گردیده و طرح نهایی با نرم‌افزار سالی‌دورکز مشخص گردید و بعد از تهیه ابعاد توسط

تراشکار ساخته شد.

فصل سوم:

ساخت الاستومرهای مگنتورئولوژیکال

۳-۱ تولید الاستومر مگنتورئولوژیکال

۳-۱-۱ مقدمه

در واقع قسمت‌های اصلی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال تشکیل شده است از ماتریس، ذرات مغناطیس شونده و افزودنی^۱ که با توجه به نوع کاربرد الاستومر مگنتورئولوژیکال، ماتریس، درصد وزنی و اندازه ذرات آهن و در نهایت افزودنی مورد نیاز تهیه می‌گردد. ابتدا در یک ظرف، سیلیکون را با ذرات آهنی مخلوط می‌کنیم و بعد از آن روغن سیلیکون را اضافه می‌کنیم. روغن سیلیکون به عنوان افزودنی در ساخت الاستومر مگنتورئولوژیکال استفاده می‌شود که باعث افزایش فاصله بین مولکول‌های ماتریس شده و چسبندگی مولکول‌های ماتریس کاهش می‌یابد و همچنین باعث افزایش سیالیت و پلاستیسیته ماتریس شده که منجر به افزایش توزیع یکنواخت تنش داخل در ماتریس می‌گردد و باعث می‌شود تا ذرات مغناطیس شونده به راحتی در حضور میدان مغناطیسی جهت‌گیری کنند. در نهایت به مدت ۵ دقیقه کاملاً هم زده می‌شود تا به صورت کامل مخلوط شوند. سپس با توجه به نوع کاربرد، یک قالب با شکل هندسی مورد نیاز که می‌تواند مکعب مستطیلی، مخروطی، دوزنقه‌ای یا به صورت استوانه باشد، انتخاب و مخلوط تهیه شده را در قالب مورد نظر ریخته و به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط ۲۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری می‌شود. پس از ۲۴ ساعت الاستومر مگنتورئولوژیکال ایزوتروپ آماده است.

با توجه به نوع کاربرد اگر الاستومر مگنتورئولوژیکال غیر ایزوتروپ مورد نیاز بود، در آخرین مرحله ساخت که مخلوط در قالب ریخته شد، به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق در حضور میدان مغناطیسی نگهداری می‌شود که باعث جهت‌گیری ذرات آهنی در راستای خطوط میدان مغناطیسی شده و زنجیره‌هایی از ذرات آهنی به صورت ثابت تشکیل می‌گردند.

^۱ Additive

۳-۱-۲ ساخت نمونه‌های الاستومر مگنتورئولوژیکال

برای ساخت الاستومر مگنتورئولوژیکال از ترکیب سه جز سیلیکون، ذرات آهنی و روغن سیلیکون با توجه به جدول (۳-۱) تهیه می‌کنیم. این جدول بر اساس پژوهش‌های پیشین برای درصدهای بهینه تهیه گردیده است.

جدول ۳-۱- اجزای تشکیل‌دهنده نمونه‌های الاستومر مگنتورئولوژیکال

مواد تشکیل‌دهنده	جرم (گرم)	درصد وزنی
ذرات آهنی	۷۰	۷۰٪
سیلیکون	۲۰	۲۰٪
روغن سیلیکون	۱۰	۱۰٪

جهت آماده‌سازی این دو نمونه MRE که در دسته‌موتور استفاده شده‌اند، از یک قالب استوانه‌ای به ضخامت ۷ میلی‌متر و قطر ۵۴ میلی‌متر (که نمونه MRE به شکل یک سکه ساخته می‌شود) و قالب دیگری به شکل حلقه‌ای که قطر داخلی آن ۲۸ میلی‌متر و قطر خارجی آن ۳۴ میلی‌متر و با ارتفاع ۱۸ میلی‌متر است (نمونه MRE در این قالب به شکل رینگ یا یک حلقه ساخته می‌شود) استفاده می‌شود.



ب



الف

شکل ۳-۱ قالب‌ها الف- قالب حلقه‌ای شکل ب- قالب سکه‌ای شکل

در تهیه نمونه‌های الاستومر مگنتورئولوژیکال برای آزمایش‌های نوسان برشی، از قالب‌های شکل (۳-۱) برای هندسه موردنظر استفاده می‌شود. بدین منظور از یک ظرف جهت مخلوط کردن اجزای لازم، یک ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۱ گرم (مطابق شکل ۳-۲) و یک همزن استفاده شده است (مطابق شکل ۳-۳).



شکل ۳-۲ ظرف برای مخلوط اجزای لازم به همراه یک ترازو دیجیتالی با دقت ۰/۱ گرم

مراحل ساخت این دو نمونه الاستومر مگنتورئولوژیکال در شکل‌های زیر نشان داده شده است. در اولین قدم، ذرات آهنی در ظرف ریخته و اندازه‌گیری می‌شود (مطابق شکل ۳-۳).



شکل ۳-۳ ذرات آهنی به میزان ۷۰ گرم

پس از اندازه‌گیری ۷۰ گرم ذرات آهن، ترازو را صفر کرده و ۱۰ گرم روغن سیلیکون به ذرات آهنی اضافه شده و به مدت ۵ دقیقه باهم زن مخلوط می‌شود (مطابق شکل ۳-۴).



شکل ۳-۴ اضافه کردن ۱۰ گرم روغن سیلیکون به ذرات آهنی



شکل ۳-۵ مخلوط کردن ذرات آهن و روغن سیلیکون به مدت ۵ دقیقه

در گام بعدی ۲۰ گرم لاستیک سیلیکون را به این مخلوط اضافه کرده و کل این اجزا به مدت ۱۰ دقیقه با هم مخلوط می‌شوند .



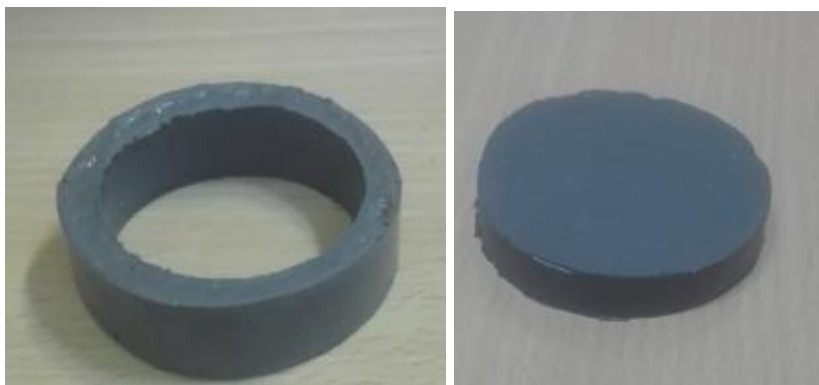
شکل ۳-۶ اضافه کردن لاستیک سیلیکون

و در نهایت مخلوط آماده شده در دو قالب که از قبل تهیه گردیده است، ریخته شده و به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق نگهداری می‌شود.



شکل ۳-۷ مخلوط در قالب ریخته شده و آماده پخت

بعد از ۲۴ ساعت مخلوط از قالب بیرون آورده شده و شکل نهایی آن همانند شکل (۸-۳) خواهد بود.



شکل ۸-۳ نمونه‌های الاستومر مگنتورئولوژیکال ساخته شده

فصل چهارم:

تست نوسان برشی

۱-۴ مقدمه

بعد از ساخت و مونتاژ قطعات به مرحله تست دسته‌موتور می‌رسیم. در این فصل ابتدا اجزای تست معرفی شده و نحوه انجام تست برش در دو حالت بارگذاری عرضی و محوری، در شرایط اعمال میدان‌های مغناطیسی، فرکانس و کرنش‌های مختلف بیان می‌شود. بعد از فرایند تست، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی که در قالب نمودارهای هیستریزیس رسم شده‌اند، به تفسیر فیزیکی رفتار الاستومرهای مگنتورئولوژیکال پرداخته می‌شود و کارایی دسته‌موتور با توجه به این رفتارها مشخص می‌شود.

۲-۴ اجزای مورد استفاده در فرایند انجام تست نوسان محوری

۱-۲-۴ معرفی اجزای تست

بعد از ساخته شدن الاستومرهای مگنتورئولوژیکال و قطعات دسته‌موتور، در نهایت تمام اجزا مونتاژ شده و ایزولاتور موردنظر آماده تست گردید (شکل ۱-۴).



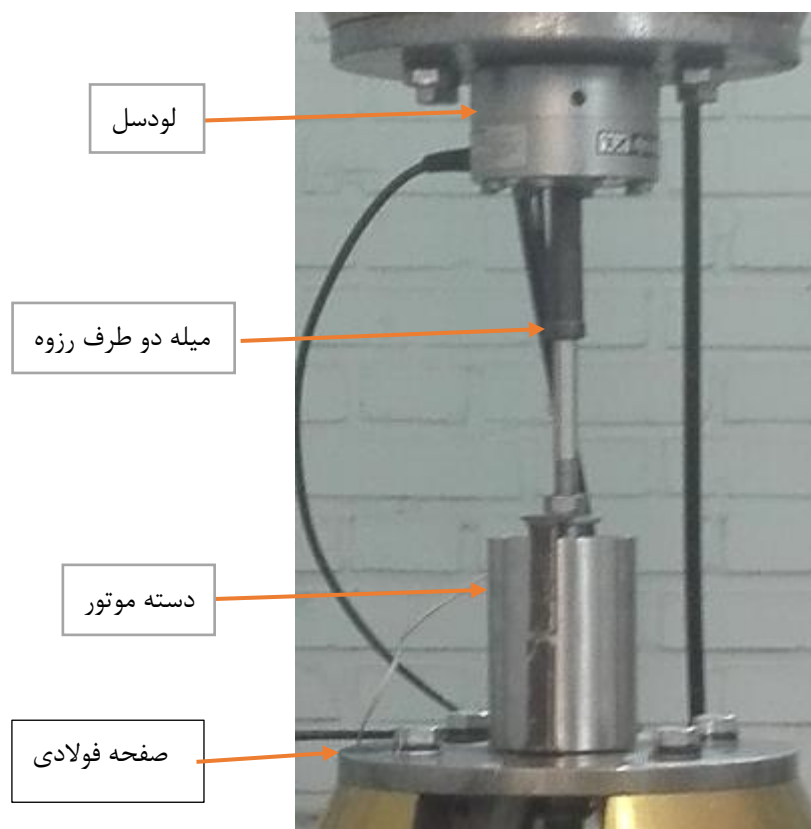
شکل ۱-۴ دسته‌موتور بعد از مونتاژ شدن

برای انجام تست دسته‌موتور از دستگاه سروهیدرولیک INSTRON 8802 ساخت آمریکا (شکل ۴-۲)، که دارای یک لودسل^۱ از سری لودسل‌های فشاری Revere RLC به ظرفیت ۲۸KN از شرکت HBM آلمان است، استفاده می‌کنیم.



شکل ۴-۲ دستگاه اینسترون جهت اعمال نیرو جهت نصب مجموعه برای انجام تست، ابتدا مطابق شکل (۴-۳) لودسل به یک صفحه فولادی متصل به فک دستگاه INSTRON بسته می‌شود و سپس دسته‌موتور توسط یک میله که از دو طرف رزوه شده است از سمت بالا به لودسل دستگاه متصل و از سمت دیگر به یک صفحه فولادی پیچ شده و در جای خود ثابت و آماده تست در حالت بارگذاری نیروهای نوسانی عرضی می‌شود.

^۱ Load-Cell



شکل ۳-۴ نصب اجزای آزمایش نوسان برشی در دستگاه INSTRON

برای اعمال جریان ورودی به سیم پیچ دسته موتور، از منبع تغذیه DC مدل RAYANNIK RN-3005 با گستره ولتاژ ۳۰ V و جریان ۵A استفاده شده است (شکل ۴-۴).



شکل ۴-۴ منبع تغذیه برای اعمال جریان ورودی به سیم پیچ

همان گونه که در مرحله طراحی ذکر شد، دسته‌موتور شامل یک کویل^۱ است که وظیفه تولید میدان مغناطیسی را بر عهده دارد. این کویل (شکل ۴-۵) شامل ۱۲۰۰ دور سیم‌پیچ است که با ورود جریان از منبع تغذیه، میدان‌های مغناطیسی موردنیاز تولید می‌شود.



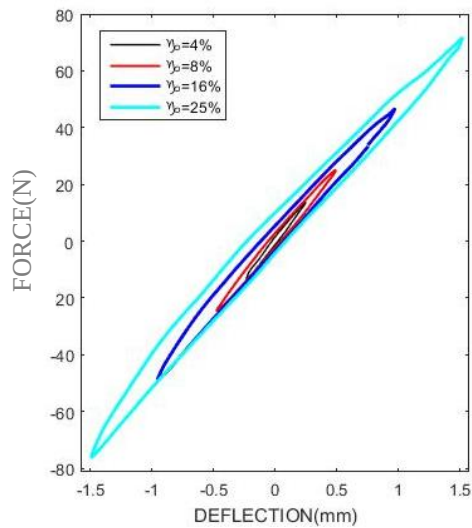
شکل ۴-۵ هسته سیم‌پیچ شده برای تولید میدان مغناطیسی

۴-۲-۲ تست برشی با اعمال نیروی محوری و تفسیر فیزیکی نمودارها

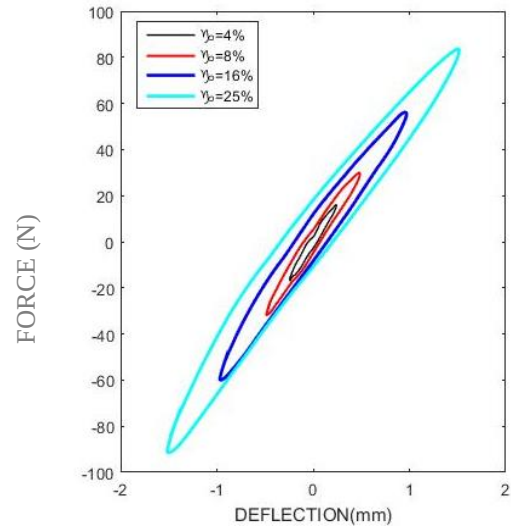
در این مرحله از انجام تست نیرو به‌صورت نوسانی محوری وارد می‌شود که الاستومر مگنتورئولوژیکال حلقه‌ای در مد نوسانی برش قرار می‌گیرد. در فرایند تست میدان‌های مغناطیسی ۰، ۶۰، ۱۰۰، ۱۶۰، ۲۲۰ و ۲۷۰ میلی تسلا و فرکانس‌های ۱، ۳، ۵ و ۸ هرتز اعمال شدند. دامنه‌های جابه‌جایی برشی نیز شامل مقادیر ۰/۲۴، ۰/۴۸، ۰/۹۶ و ۱/۵ میلی‌متر هستند و دامنه کرنش معادل آن‌ها که از نسبت جابه‌جایی به ضخامت به دست می‌آید، به ترتیب برابر با ۴، ۸، ۱۶ و ۲۵ درصد می‌شود. نخستین مرحله از فرایند تست، با بارگذاری در میدان مغناطیسی صفر، فرکانس ثابت ۱ هرتز و کرنش‌های ۴، ۸، ۱۶ و ۲۵ درصد شروع شد. این روند تست در غیاب میدان و کرنش‌های ذکرشده

^۱ Coil

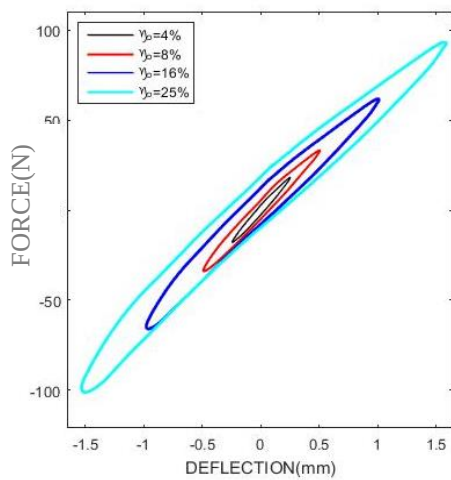
برای فرکانس‌های ۳، ۵ و ۸ هرتز نیز تکرار گردید و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی نمودارهای نیرو-جاب‌جایی آن‌ها به صورت شکل (۴-۶) ترسیم شدند.



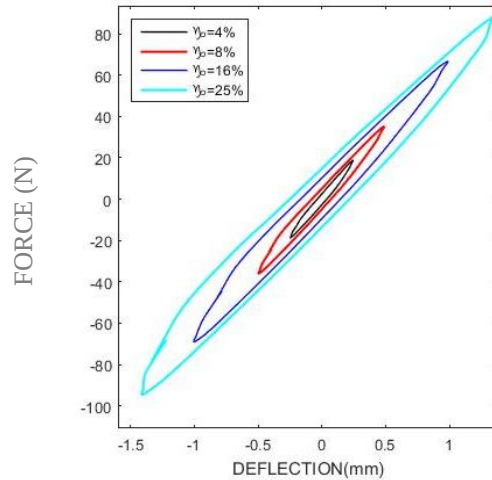
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۴-۶ حلقه‌های هیستریزیس در غیاب میدان مغناطیسی. الف - $f = 1 \text{ Hz}$ ب - $f = 3 \text{ Hz}$

ج: $f = 5 \text{ Hz}$ د: $f = 8 \text{ Hz}$

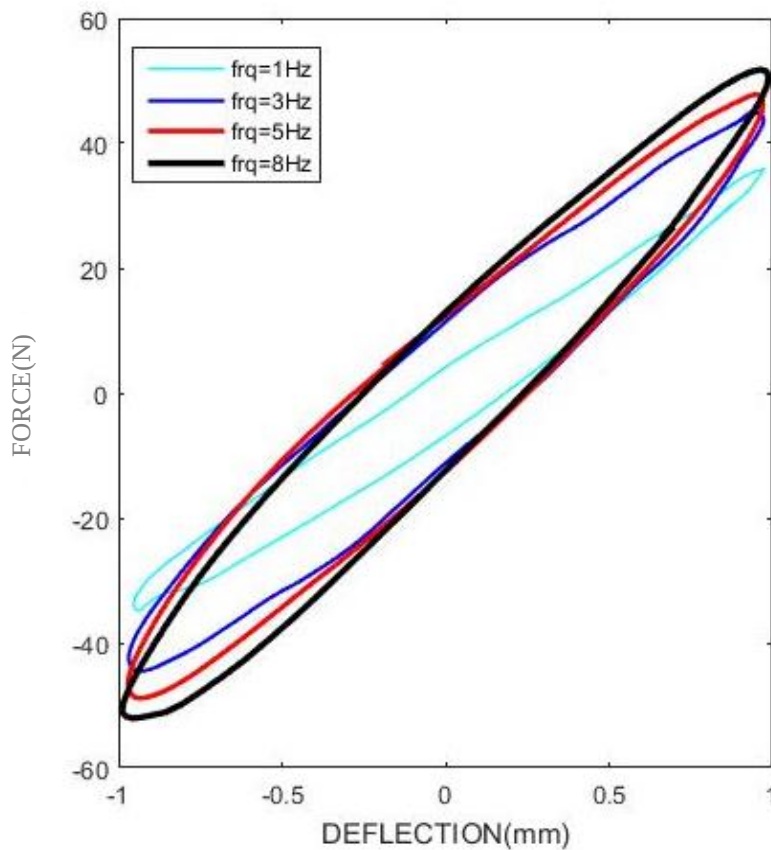
از آنجایی که نمودارهای نیرو-جاب‌جایی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال به صورت حلقه‌های

هیستریزیس بیضی شکل هستند، پس می‌توان نتیجه گرفت که الاستومرهای مگنتورئولوژیکال جزء مواد

ویسکوالاستیک هستند. بعد از اعمال تنش روی این مواد مقداری انرژی، به خاطر خاصیت الاستیکی برگردانده می‌شود و همچنین به خاطر خاصیت ویسکوز بودن، مقداری انرژی به صورت گرما در داخل الاستومر هدر می‌رود. در هر سیکل از کرنش اعمالی مقداری انرژی تلف می‌شود که از آن به عنوان تلفات هیستریزیس یاد می‌شود. همچنین حلقه‌های بیضی‌شکل و تنش غیر صفر در کرنش صفر، اثر هیستریزیس را بیان می‌کند. در کل مساحت زیر منحنی بارگذاری نشان‌دهنده انرژی ورودی و مساحت زیر منحنی باربرداری نشان‌دهنده انرژی برگردانده شده است. پس انرژی تلف‌شده یا تلفات هیستریزیس را می‌توان از اختلاف دو مسیر بارگذاری و باربرداری به دست آورد. به‌طور کلی مساحت حلقه‌های هیستریزیس بیانگر تلفات هیستریزیس یا همان میرایی معادل است. همچنین شیب حلقه‌های هیستریزیس بیانگر سختی معادل است. نمودارهای مربوط به الاستومر مگنتورئولوژیکال مورد استفاده در دسته‌موتور، در بارگذاری محوری در شرایط غیاب میدان مغناطیسی برای کرنش‌ها و فرکانس‌های مختلف نشان می‌دهد که الاستومرهای مگنتورئولوژیکال رفتاری متقارن به صورت حلقه‌های هیستریزیس بیضی‌شکل در مد برش دارند. با توجه به این نمودارها با افزایش کرنش و فرکانس، شیب (سختی معادل دسته‌موتور) و مساحت (میرایی معادل دسته‌موتور) حلقه‌های هیستریزیس افزایش می‌یابد.

۴-۲-۳ تست برشی در فرکانس‌های مختلف

در این مرحله در کرنش ۲۵٪ تست نوسان برشی برای فرکانس‌های ۱، ۳، ۵ و ۸ هرتز انجام گرفت و نمودار هیستریزیس آن ترسیم شد. تأثیر فرکانس‌ها را به صورت یکجا در شکل (۴-۷) می‌توان دید. طبق این نمودار با افزایش فرکانس، شیب و مساحت حلقه‌های هیستریزیس افزایش می‌یابد و نشان می‌دهد که با افزایش فرکانس، می‌توان سختی و میرایی معادل الاستومرهای مگنتورئولوژیکال را افزایش داد.

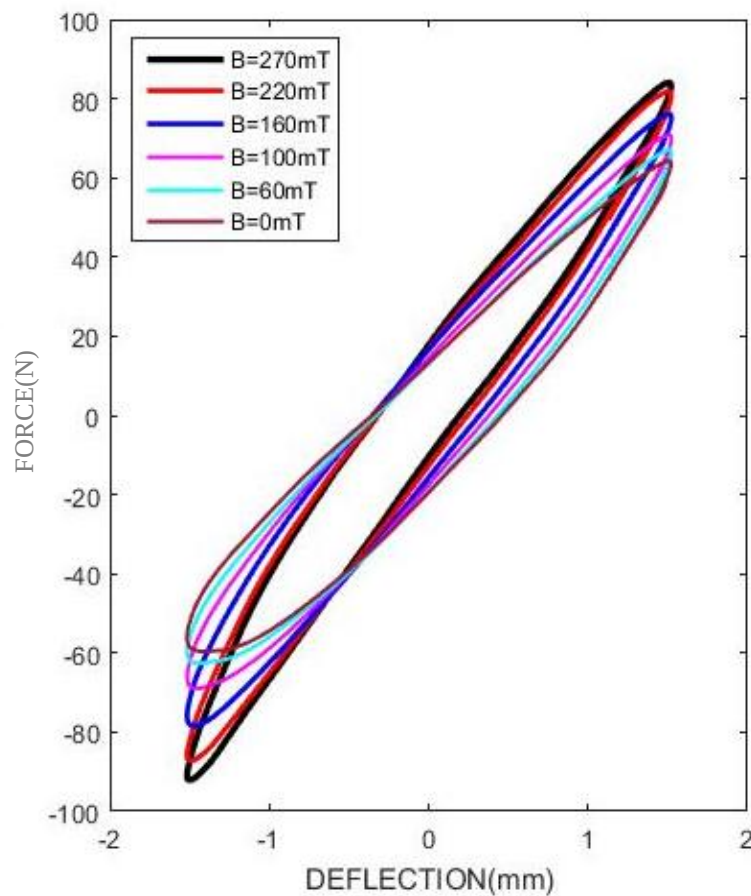


شکل ۴-۷ نمودار هیستریزیس در کرنش ۲۵٪ برای فرکانس‌های مختلف

۴-۲-۴ تست برشی در میدان‌های مغناطیسی مختلف

برای نشان دادن اثر میدان مغناطیسی بر رفتار الاستومرهای مگنتورئولوژیکال، در کرنش ۱۶ درصد و فرکانس ۳ هرتز با چگالی میدان‌های مغناطیسی ۰، ۶۰، ۱۰۰، ۱۶۰، ۲۲۰ و ۲۷۰ میلی تسلا، تست نوسان برشی انجام گرفت و تأثیر میدان‌ها روی الاستومر مگنتورئولوژیکال به صورت حلقه‌های هیستریزیس در یک نمودار رسم گردید.

این نمودارها نشان دادند که برای تمامی حالت‌ها مطابق شکل (۴-۸) با افزایش چگالی میدان مغناطیسی، شیب و مساحت حلقه‌های هیستریزیس افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۸ حلقه‌های هیستریزیس در فرکانس ۳ هرتز در چگالی میدان‌های مغناطیسی مختلف

۴-۳ تست نوسان برشی با اعمال نیروی عرضی

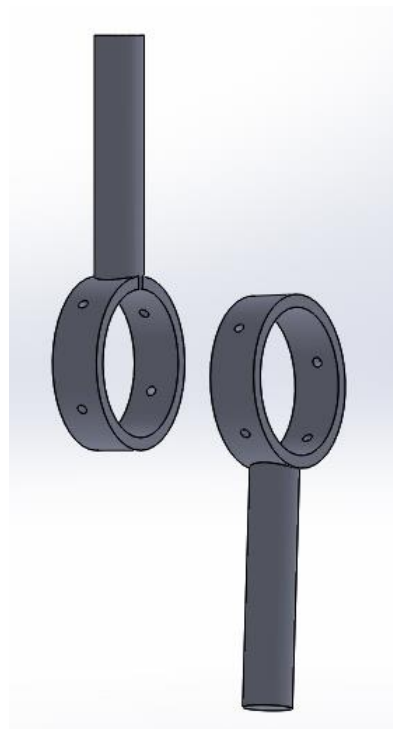
۴-۳-۱ آماده‌سازی دسته‌موتور برای تست با اعمال نیروی عرضی

همان‌گونه که پیش‌تر ذکر شد در بارگذاری نیروی عرضی، الاستومر مگنتورئولوژیکال سکه‌ای باید در مد برش قرار گیرد (الاستومر شماره ۹ در شکل ۲-۲). دستگاه تست اینسترون نیرو را فقط به‌صورت محوری اعمال می‌کند و برای قرارگیری الاستومر مگنتورئولوژیکال سکه‌ای در مد برش به نیروی عرضی نیاز داریم، لذا باید نیروی محوری به نیروی عرضی انتقال یابد. اما به دلیل دامنه نوسانی بسیار کم (دامنه نوسانی بین ۲۴/ تا ۲ میلی‌متر می‌باشد) و وجود لغزش در سیستم‌های انتقال نیرو، طراحی مکانیزمی که نیروی محوری را به نیروی عرضی تبدیل کند را با مشکل روبه‌رو ساخته است. بدین جهت تصمیم بر آن شد تا مکانیزم داخلی دسته‌موتور را به‌صورت مجزا مورد تست قرار دهیم. لذا

دو فک به صورت شکل (۴-۹-ب) طراحی گردید تا علاوه بر کار نگه‌دارندگی مکانیزم، نقش انتقال نیرو از دستگاه تست بر مکانیزم موردنظر را نیز عهده‌دار باشد. وجود چهار عدد پیچ روی این نگه‌دارنده از لغزش مکانیزم در هنگام بارگذاری جلوگیری می‌کند و همچنین به دلیل کوچک بودن طول نمونه از خمش صرفنظر شده است. مکانیزم مورد تست شامل قطعات داخلی دسته‌موتور است که در شکل (۲-۲) با عددهای ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰ شماره‌گذاری شده‌اند. ابتدا مکانیزم ذکرشده را ۹۰ درجه چرخانده و درون حفره‌های نگه‌دارنده قرار می‌دهیم و توسط پیچ‌ها در جای خود محکم می‌کنیم. سپس یکی از پایه‌های نگه‌دارنده که رزوه شده است را از سمت بالا به لودسل دستگاه اینسترون می‌بندیم، پایه دیگر نگه‌دارنده را از سمت پایین توسط چهار عدد پیچ و دو میله (مطابق شکل ۴-۹-الف) به دستگاه اینسترون پیچ می‌کنیم و مجموعه موردنظر آماده بارگذاری نیروی محوری برای تست برشی در حالت‌های مختلف می‌شود.

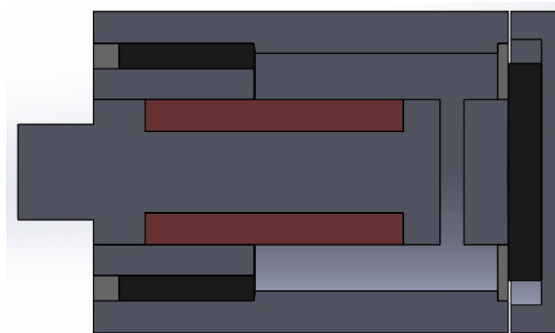


(الف)



(ب)

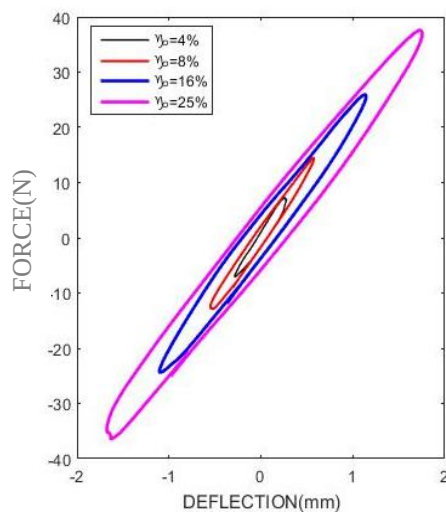
شکل ۴-۹ الف: بسته شدن دسته‌موتور برای تست محوری ب: دو عدد فک نگه‌دارنده دسته‌موتور



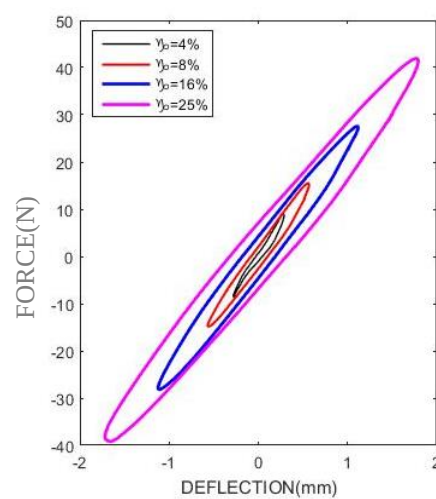
شکل ۴-۱۰ نمای برش خورده برای حالت اعمال نیرو به MRE سکه‌ای
 شکل (۴-۱۰) نمایی از قطعات داخلی اجزای مورد تست را به نمایش می‌گذارد. تست‌هایی که در مرحله قبل برای حالت اعمال نیروهای محوری انجام گرفت این بار برای حالت عرضی تکرار می‌کنیم و نتایج را در قالب نمودارهای هیستریزیس باهم مقایسه می‌کنیم.

۴-۳-۲ تست برش در فرکانس ثابت

ابتدا در فرکانس ثابت ۵ هرتز و دامنه کرنش‌های ۴، ۸، ۱۶ و ۲۵ درصد در حضور و غیاب میدان مغناطیسی تست نوسان برشی انجام گرفت.



(الف)

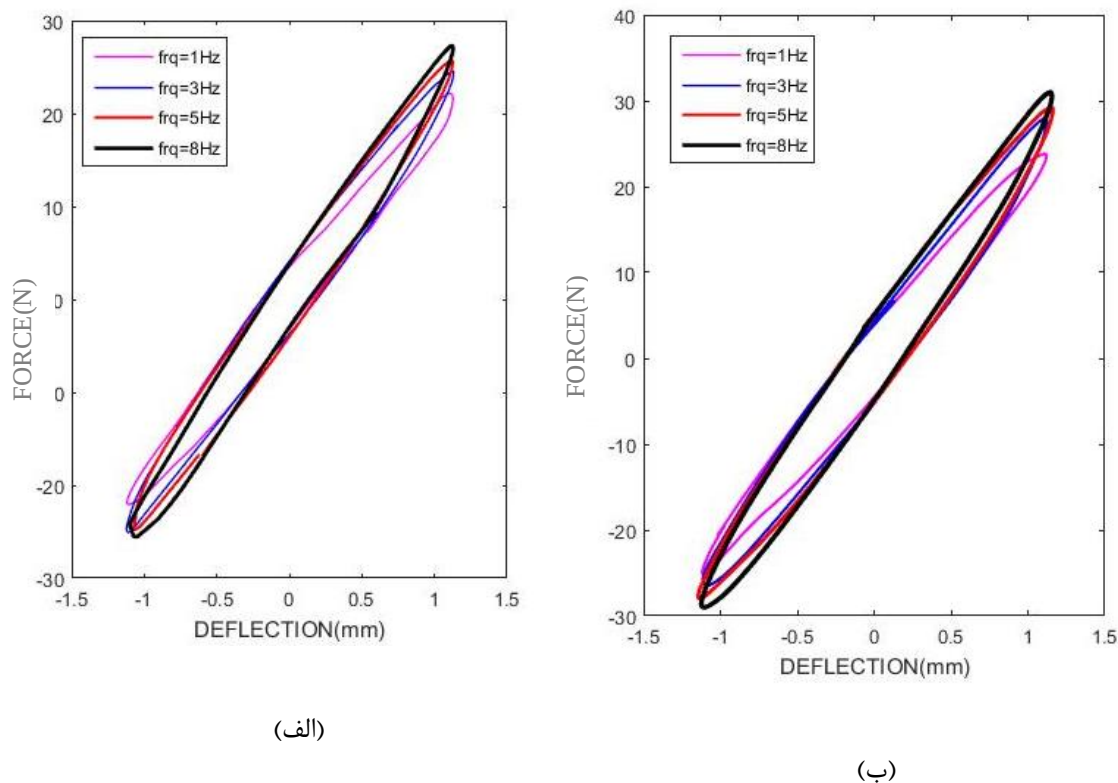


(ب)

شکل ۴-۱۱ الف : نمودار در غیاب میدان مغناطیسی ب : نمودار در حضور میدان مغناطیسی

همان‌طور که در شکل (۴-۱۱) مشاهده می‌شود با افزایش دامنه کرنش، سختی و میرایی افزایش می‌یابد. این افزایش سختی و میرایی در حضور میدان مغناطیسی شدت بیشتری نسبت به عدم حضور میدان دارد.

۳-۳-۴ تست برش در فرکانس‌های مختلف



شکل ۴-۱۲ الف: حلقه‌های هیستریزس در غیاب میدان ب: حلقه‌های هیستریزس در حضور میدان

در شکل (۴-۲۴) نمودار نیرو-جاب‌جایی برای فرکانس‌های مختلف در حضور و غیاب میدان ترسیم شده است و افزایش سختی و میرایی در حضور میدان مغناطیسی با شدت بیشتری نسبت به عدم حضور میدان اتفاق می‌افتد. رفتار الاستومر مگنتورئولوژیکال با هندسه سکه‌ای نیز همانند رفتار الاستومر مگنتورئولوژیکال با هندسه حلقه‌ای شکل است که در قسمت اعمال نیروی عمودی به تفسیر رفتار فیزیکی آن‌ها پرداخته شد.

حال به عنوان نمونه به محاسبه عددی مقدار سختی الاستومر مگنتورئولوژیکال در یکی از حالت‌های ذکر شده می‌پردازیم. برای این محاسبات از رابطه (۱۴-۱) که در قسمت (۳-۸-۱) ذکر شده است استفاده می‌کنیم. با توجه به نمودار شکل (۴-۱۴ الف) از حلقه هیستریزیس با فرکانس ۸ هرتز در غیاب میدان مغناطیسی پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه مقدار سختی استخراج شد. این مقادیر برای پارامترهای f_0 ، f_1 و f_2 به ترتیب برابر با $۲۵/۲۳$ ، $۲۴/۸۵$ ، $۳/۵۴$ نیوتن و x_0 برابر با $۱/۱۲$ میلی‌متر به دست آمد. حال این مقادیر را در رابطه مورد نظر جایگذاری کرده و سختی به دست می‌آید:

$$S = \frac{f_0}{x_0} = \frac{۲۵.۲۳}{۱.۱۲} = ۲۲.۵۳ \text{ N}$$

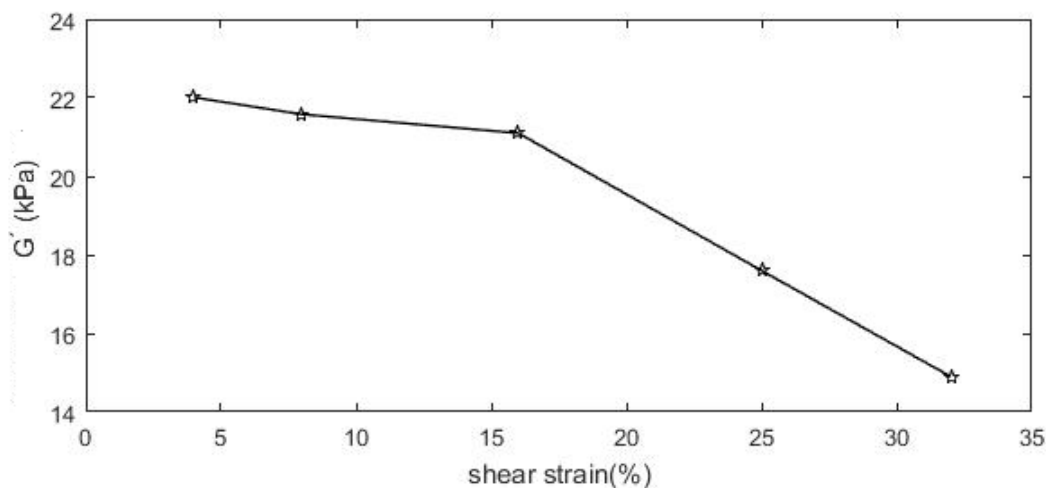
و با توجه به شکل (۴-۲۴ ب) مقادیر f_0 ، f_1 ، f_2 برای فرکانس ۵ هرتز در حضور میدان مغناطیسی ۲۷۰ میلی‌تسلا به ترتیب برابر با $۳۱/۱$ ، $۳۰/۶۲$ ، $۵/۱۱$ نیوتن و مقدار x_0 برابر با $۱/۱۲$ میلی‌متر است. و مقدار سختی در حضور میدان برابر خواهد بود با:

$$S = \frac{f_0}{x_0} = \frac{۳۱.۱}{۱.۱۲} = ۲۷.۷۷ \text{ N}$$

مقدار سختی در فرکانس ۵ هرتز در غیاب میدان برابر با $۲۲/۵۳ \text{ N}$ و در حضور میدان برابر با N $۲۷/۷۷$ به دست آمد، که نتایج حاصل شده در قسمت قبل مبنی بر افزایش مقدار سختی با افزایش چگالی میدان مغناطیسی را تأیید می‌کند.

۴-۴ محدوده رفتار خطی و غیر خطی الاستومر مگنتورئولوژیکال

برای تعیین بازه رفتار خطی و غیر خطی الاستومر مگنتورئولوژیکال، نمودار مدول ذخیره برشی (G') (را با استفاده از رابطه (۶-۱) بر حسب کرنش رسم کرده و بازه رفتار خطی الاستومر مگنتورئولوژیکال را مشخص می‌کنیم.



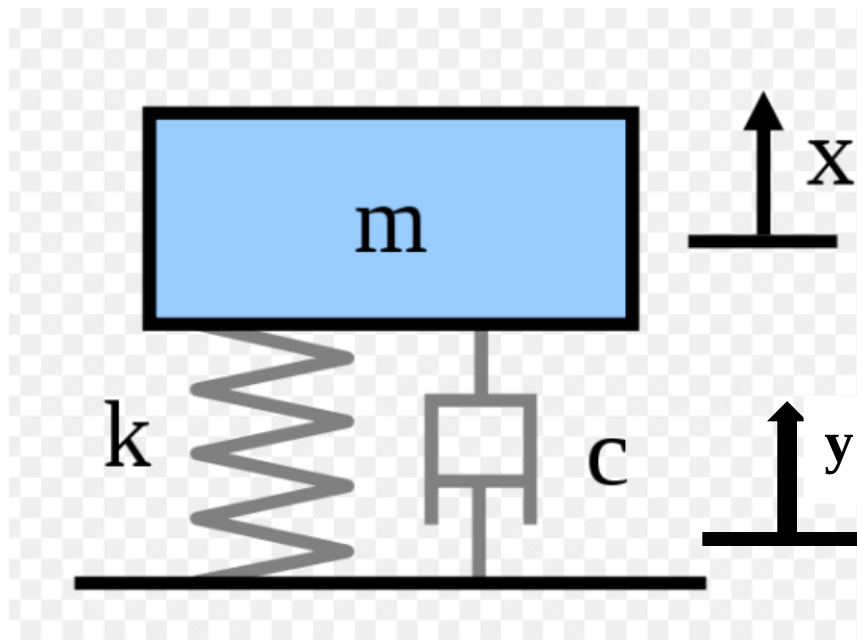
شکل ۴-۱۳ نمودار مدول ذخیره برشی - کرنش برشی

در فرکانس ۵ هرتز مقادیر (G') در کرنش‌های ۴، ۸، ۱۶، ۲۵ و ۳۲ درصد محاسبه شد و طبق نمودار رسم شده مشخص می‌شود که الاستومر مگنتورئولوژیکال تا کرنش ۱۶ درصد رفتار تقریباً خطی دارد و سپس رفتار غیرخطی از خود نشان می‌دهد.

۵-۴ ارتعاشات پایه

گاهی اوقات بدنه خودروها تحت تأثیر جابه‌جایی‌های اجباری از سوی موتور ماشین هستند، که از طریق شاسی به سرشین خودرو منتقل می‌شود، این نوع تحریک‌های خارجی نامطلوب هستند و باید تا حد امکان کاهش یابند. از این رو لازم است که این نوع از تحریک‌های خارجی را با دقت خاصی مورد بررسی قرار دهیم.

برای مطالعه تأثیر جابه‌جایی‌های پایه بر روی این نوع از دسته‌موتور یک مدل ساده یک درجه آزادی مانند شکل (۴-۱۶) را در نظر می‌گیریم که از یک جرم، یک فنر و یک میرا کننده ویسکوز تشکیل شده است.



شکل ۴-۱۴ سیستم جرم، فنر، دمپر

در این شکل $x(t)$ جابه‌جایی جرم و $y(t)$ جابه‌جایی پایه را نشان می‌دهد. جابه‌جایی نسبی جرم و پایه را نیز می‌توان با $z(t) = x(t) - y(t)$ نمایش داد. با توجه به شکل مقدار تغییر شکل فنر $(x - y)$ و سرعت تغییر میراگر $(\dot{x} - \dot{y})$ است. در نتیجه نیروی فنر و نیروی میراگر به ترتیب $k(x - y)$ و $c(\dot{x} - \dot{y})$ خواهد بود. با توجه به قانون دوم نیوتن معادله حرکت به صورت زیر استخراج می‌شود:

$$m\ddot{x} = -c(\dot{x} - \dot{y}) - k(x - y) \quad (۴-۱)$$

و در نتیجه

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = c\dot{y} + ky \quad (۴-۲)$$

با در نظر گرفتن $z(t) = x(t) - y(t)$ داریم:

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = -m\ddot{y} \quad (۴-۳)$$

حال با فرض اینکه حرکت پایه هارمونیک باشد، می‌توان از حل همگن معادله که باگذشت زمان میرا می‌شود صرف‌نظر کرد و برای حل پایدار آن، جابه‌جایی را به‌صورت زیر در نظر گرفت. پس اگر ورودی ما بدین صورت باشد:

$$y = Y e^{i \omega t} \quad (4-4)$$

خواهیم داشت:

$$\dot{y} = i \omega Y e^{i \omega t} \quad (5-4)$$

با توجه به دو رابطه (4-4 و 5-4) ملاحظه می‌شود که تحریک اعمال‌شده و مشتق زمانی آن هر دو دارای فرکانس یکسانی هستند و می‌توان تصور نمود که جابه‌جایی جرم نیز با همان فرکانس صورت می‌گیرد و جابه‌جایی را به‌صورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$x = X e^{i \omega t} \quad (6-4)$$

با استفاده از رابطه (2-4)، (4-4) و (6-4) به دست می‌آید:

$$(-m\omega^2 + i c \omega + k) X e^{i \omega t} = (i c \omega + k) Y e^{i \omega t} \quad (7-4)$$

و در نتیجه

$$\frac{X}{Y} = \frac{(k + i c \omega)}{(k - m \omega^2) + i c \omega} \quad (8-4)$$

با استفاده از روابط فوق می‌توان نسبت دامنه نوسان جرم به دامنه نوسان پایه را مطابق رابطه زیر به دست آورد.

$$\left| \frac{X}{Y} \right| = \sqrt{\frac{k^2 + (c\omega)^2}{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}} \quad (9-4)$$

در رابطه فوق k سختی فنر، که معادل با سختی MRE است. C میرا کننده ویسکوز، معادل با میرایی MRE، m جرم و ω فرکانس ورودی است. رابطه (9-4) را می توان به شکل زیر نوشت:

$$\left| \frac{Y}{X} \right| = \sqrt{\frac{1 + (2\zeta r)^2}{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (10-4)$$

که در رابطه فوق r و ζ به صورت زیر تعریف می شوند:

$$r = \frac{\omega}{\omega_n} \quad (11-4)$$

و

$$\zeta = \frac{c}{c_c} \quad (12-4)$$

ω_n را از رابطه زیر به دست می آوریم:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (13-4)$$

از روابط فوق برای تحلیل ارتعاشاتی عملکرد دسته موتور می توان بهره جست. برای دستیابی به عملکرد بهتر سیستم، با استفاده از نمودار قابلیت انتقال جابه جایی^۱، می توان به تحلیل ارتعاشی سیستم پرداخت و فرکانس مطلوب برای کارایی بهتر دسته موتور را استخراج نمود. بدین ترتیب پارامترهای

$\frac{X}{Y}$ ، r ، ζ ، ω_n به ترتیب از رابطه های (10-4)، (11-4)، (12-4) و (13-4) محاسبه شده و مقدار

k نیز از شیب حلقه های هیستریزیس برای فرکانس های ۱، ۳، ۵ و ۸ هرتز در میدان های مغناطیسی

^۱ Transmissibility Amplitude Acceleration

صفر، ۱۰۰، ۱۶۰ و ۲۲۰ میلی تسلا استخراج شده و در جدول‌های (۱-۴)، (۲-۴)، (۳-۴) و (۴-۴) بیان شده است.

جدول ۱-۴ پارامترهای محاسبه‌شده در میدان مغناطیسی صفر

ω	ω_n	K(N)	r	ζ	$\frac{X}{Y}$
۱	۲/۷	۱۹/۷۷	/۳۷۰	/۵۳۵	۱/۰۰۰۷
۳	۲/۸۵	۲۲/۰۲	۱/۰۵۰	/۶۰۱	۱/۰۰۰۵
۵	۲/۹۳	۲۳/۲۱	۱/۷۰۱	/۷۷	/۹۹۹۵
۸	۳/۰۵	۲۵/۲۶	۲/۶۲۰	/۹۲	/۹۹۸۸

/

جدول ۲-۴ پارامترهای محاسبه‌شده در میدان مغناطیسی ۱۰۰ میلی تسلا

ω	ω_n	K(N)	r	ζ	$\frac{X}{Y}$
۱	۲/۸۲۲	۲۱/۵	/۳۵۴۴	/۵۴	۱/۰۰۱۰
۳	۲/۹۲۰	۲۳/۰۳	۱/۰۲۷	/۶۰۸	۱/۰۰۰۵
۵	۳/۰۰۹	۲۴/۴۶	۱/۶۶۰	/۷۷۶	/۹۹۹۶
۸	۳/۱۲۱	۲۶/۳	۲/۵۶۰	/۹۲۸	/۹۹۹۸

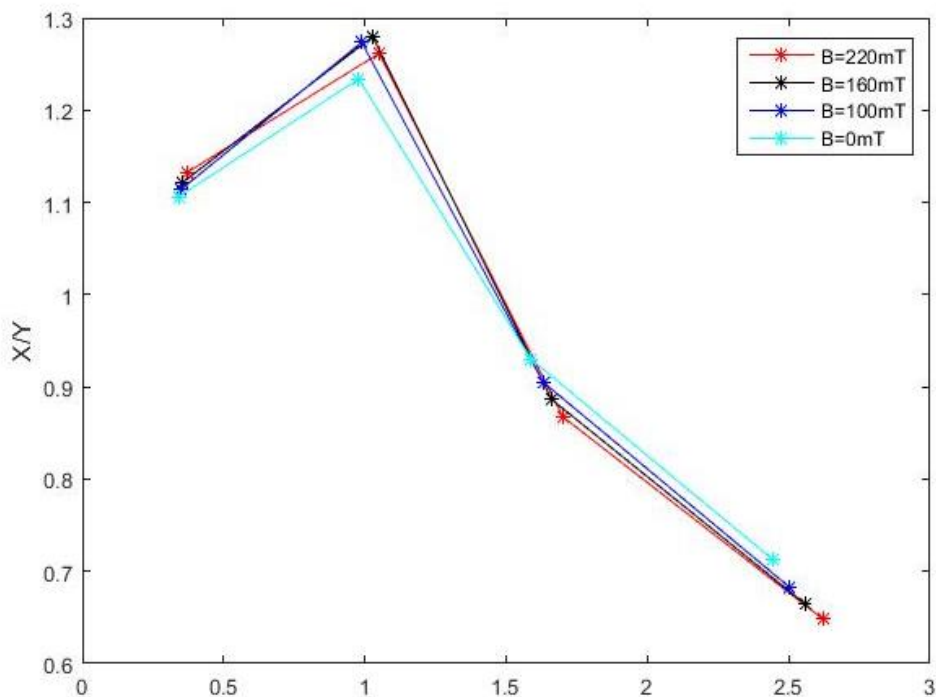
جدول ۳-۴ پارامترهای محاسبه شده در میدان مغناطیسی ۱۶۰ میلی تسلا

ω	ω_n	K(N)	r	ζ	$\frac{X}{Y}$
۱	۲/۸۹	۲۲/۵	/۳۴۶	/۵۸۳۲	۱/۰۰۲۳
۳	۳/۰۳۵	۲۴/۸۸	/۹۸۸۴	/۶۴۱	۱/۰۰۰۵
۵	۳/۰۷	۲۵/۴۴	۱/۶۳	/۸۰۸	/۹۹۳۵
۸	۳/۱۹۷	۲۷/۶	۲/۵۰۲	/۹۴۴	/۹۸۱۲

جدول ۴-۴ پارامترهای محاسبه شده در میدان مغناطیسی ۲۲۰ میلی تسلا

ω	ω_n	K(N)	r	ζ	$\frac{X}{Y}$
۱	۲/۹۳۱	۲۳/۲	/۳۴۱	/۶۵۱	۱/۰۰۲۲
۳	۳/۰۶۷	۲۵/۳	/۹۷۸	/۷۰۶	/۹۹۹۲
۵	۳/۱۵۰	۲۶/۸	۱/۵۸۷	/۸۵۸	/۹۹۴۴
۸	۳/۲۷۱	۲۸/۹	۲/۴۴۶	/۹۹۱	/۹۸۵۰

با استفاده از مقادیر محاسبه شده، نمودار قابلیت انتقال جابه‌جایی-نسبت دامنه در شکل (۴-۲۰) ترسیم شده است.



شکل ۴-۱۵ نمودار قابلیت انتقال جابه‌جایی

با توجه به نمودار فوق مشاهده می‌شود که با افزایش میدان مغناطیسی نسبت دامنه‌ها (دامنه خروجی به دامنه ورودی) کاهش می‌یابد و این بدین معنی است که دامنه خروجی کاهش یافته است. پس این نتیجه استنباط می‌شود که میدان مغناطیسی تأثیر بسزایی در ارتعاشات سیستم دارد و با افزایش میدان مغناطیسی اثرپذیری دسته‌موتور افزایش می‌یابد. در تحلیل فرکانسی مشاهده می‌شود که تغییرات کاهش دامنه، از $\Gamma=1$ شروع می‌شود. پس برای عملکرد مطلوب سیستم مقدار نسبت دامنه $(r = \frac{\omega}{\omega_n})$ باید از یک بزرگ‌تر باشد، در نتیجه به ازای $\omega > \omega_n$ اثرپذیری سیستم مطلوب‌تر خواهد بود. با توجه به اینکه با افزایش نسبت فرکانس، نسبت دامنه کاهش پیدا می‌کند پس با افزایش فرکانس تحریک و کاهش فرکانس طبیعی می‌توان اثرپذیری سیستم دسته‌موتور را بالا برد.

فصل پنجم:

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱ جمع‌بندی نتایج

در آغاز این پژوهش الاستومرهای مگنتورئولوژیکال به‌عنوان مواد هوشمند معرفی شدند که خواص رئولوژیکی آن‌ها با اعمال میدان مغناطیسی خارجی تغییر می‌کند و با حذف میدان خارجی بلافاصله به حالت اولیه برمی‌گردند. سپس تاریخچه‌ای از کارهای انجام‌شده و کاربردهای آن ارائه شد. همچنین انواع دسته‌موتورها معرفی شدند و نقاط قوت و ضعف آن‌ها به همراه تاریخچه مختصر بیان شد. در ادامه با توجه به هدف‌گذاری‌های انجام‌شده، هندسه دسته‌موتور با استفاده از نرم‌افزار سالدورکز طراحی، و نقشه قطعات تهیه و ساخته شد. طراحی این دسته‌موتور به‌گونه‌ای بود که با اعمال نیروهای نوسانی به‌صورت عرضی و طولی، الاستومرهای مگنتورئولوژیکال مورد استفاده در آن فقط در مد برشی عمل می‌کنند. در مرحله بعد به ساخت الاستومرهای مگنتورئولوژیکال پرداخته، و با توجه به هندسه دسته‌موتور، دو قطعه الاستومر مگنتورئولوژیکال ساخته شد. در ساخت دسته‌موتور از یک هسته آهنی سیم‌پیچ شده استفاده شد، که با تغییر جریان ورودی، چگالی شار میدان مغناطیسی تغییر می‌کند و می‌توان سختی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال مورد استفاده در دسته‌موتور را کنترل کرد. بعد از مونتاژ قطعات دسته‌موتور، تست نوسان برشی در شرایط مختلف بارگذاری، از قبیل دامنه‌های کرنش، فرکانس‌های ورودی و چگالی میدان‌های مغناطیسی مختلف، انجام گرفت و تفسیر کاملی از داده‌های آزمایشگاهی الاستومر مگنتورئولوژیکال تحت بارگذاری نیروهای نوسانی برشی بیان شد.

بر اساس نمودارهای هیستریزس استخراج‌شده از داده‌های آزمایشگاهی، سختی و میرایی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال قابل کنترل است و تحت تأثیر شرایط بارگذاری، شامل فرکانس و کرنش، رفتار دینامیکی الاستومر مگنتورئولوژیکال تغییر می‌کند. نتایج تست نشان داد که سختی و میرایی الاستومر مگنتورئولوژیکال در حضور و غیاب میدان مغناطیسی، با افزایش فرکانس افزایش می‌یابد. این افزایش در حضور میدان مغناطیسی با شدت بیشتری صورت می‌پذیرد و همچنین با افزایش کرنش و چگالی شار مغناطیسی، سختی و میرایی افزایش می‌یابد. همچنین از داده‌های

آزمایشگاهی نمودار قابلیت انتقال جابه‌جایی ترسیم شد و با توجه به رفتار الاستومرها در این نمودار به این نتیجه رسیدیم که اثرپذیری دسته‌موتور به میدان مغناطیسی وابسته است و با افزایش میدان مغناطیسی اثرپذیری بیشتر می‌شود. همچنین به ازای فرکانس تحریک بزرگ‌تر از فرکانس طبیعی، سیستم عملکرد مطلوبی خواهد داشت. به‌علاوه، با افزایش فرکانس تحریک و یا کاهش فرکانس طبیعی اثرپذیری دسته‌موتور افزایش می‌یابد.

۵-۲ پژوهش‌های پیش رو

در این مرحله به برخی از تحقیق‌هایی که می‌تواند در آینده در زمینه دسته‌موتور و الاستومر مگنتورئولوژیکال مورد تحلیل و بررسی بیشتر قرار گیرد اشاره می‌شود.

- بررسی خواص و رفتار الاستومر مگنتورئولوژیکال در مد ترکیبی برشی و فشاری
- مدل‌سازی رفتار دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال در مد ترکیبی برشی-فشاری
- طراحی دسته‌موتور الاستومری در مد کشش و فشار

- [1] Carlson, J. D., & Jolly, M. R. (2000). MR fluid, foam and elastomer devices. *mechatronics*, 10(4-5), 555-569.
- [2] Wang, X., & Cai, J. Y. (2012). Magnetorheological Elastomer: State and Application. In *Advanced Materials Research* (Vol. 393, pp. 161-165). Trans Tech Publications.
- [3] Ginder, J. M., Nichols, M. E., Elie, L. D., & Tardiff, J. L. (1999, July). Magnetorheological elastomers: properties and applications. In *Smart Structures and Materials 1999: Smart Materials Technologies* (Vol. 3675, pp. 131-139). International Society for Optics and Photonics.
- [4] Deng, H. X., Gong, X. L., & Wang, L. H. (2006). Development of an adaptive tuned vibration absorber with magnetorheological elastomer. *Smart materials and structures*, 15(5), N111.
- [5] Shiga, T., Okada, A., & Kurauchi, T. (1995). Magnetorheological behavior of composite gels. *Journal of Applied Polymer Science*, 58(4), 787-792.
- [6] Jolly, M. R., Carlson, J. D., Munoz, B. C., & Bullions, T. A. (1996). The magnetorheological response of elastomer composites consisting of ferrous particles embedded in a polymer matrix. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 7(6), 613-622.
- [7] Davis LC (1999) Model of magnetorheological elastomers *J. Appl. Phys.* 85, (6), 3348
- [8] Liu, Y. D., & Choi, H. J. (2013). Recent progress in smart polymer composite particles in electric and magnetic fields. *Polymer International*, 62(2), 147-151.
- [9] Zhu, X., Jing, X., & Cheng, L. (2012). Magnetorheological fluid dampers: A review on structure design and analysis. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 23(8), 839-873.
- [10] Claracq, J., Sarrazin, J., & Montfort, J. P. (2004). Viscoelastic properties of magnetorheological fluids. *Rheologica Acta*, 43(1), 38-49.
- [11] Ashtiani, M., Hashemabadi, S. H., & Ghaffari, A. (2015). A review on the magnetorheological fluid preparation and stabilization. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 374, 716-730.
- [12] Spelta, C., Previdi, F., Savaresi, S. M., Fraternali, G., & Gaudiano, N. (2009). Control of magnetorheological dampers for vibration reduction in a washing machine. *Mechatronics*, 19(3), 410-421.
- [13] Chen, Z. Q., Wang, X. Y., Ko, J. M., Ni, Y. Q., Spencer, B. F., Yang, G., & Hu, J. H. (2004). MR damping system for mitigating wind-rain induced vibration on Dongting Lake Cable-Stayed Bridge. *Wind & structures*, 7(5), 293-304.

- [14] Jolly, M. R., Bender, J. W., & Carlson, J. D. (1999). Properties and applications of commercial magnetorheological fluids. *Journal of intelligent material systems and structures*, 10(1), 5-13.
- [15] Goncalves, F. D., Koo, J. H., & Ahmadian, M. (2006). A review of the state of the art in magnetorheological fluid technologies-Part I: MR fluid and MR fluid models. *The Shock and Vibration Digest*, 38(3), 203-219.
- [16] Yu, M., Qi, S., Fu, J., Yang, P. A., & Zhu, M. (2015). Preparation and characterization of a novel magnetorheological elastomer based on polyurethane/epoxy resin IPNs matrix. *Smart Materials and Structures*, 24(4), 045009.
- [17] Li Y, Li J, Li W, Du H (2014) A state-of-the-art review on magnetorheological elastomer devices *Smart Mater. Struct.* 23, (12), 123001
- [18] Vatandoost, H., Norouzi, M., Alehashem, S. M. S., & Smoukov, S. K. (2017). A novel phenomenological model for dynamic behavior of magnetorheological elastomers in tension–compression mode. *Smart Materials and Structures*, 26(6), 065011.
- [19] Zhou, G. Y. (2003). Shear properties of a magnetorheological elastomer. *Smart materials and structures*, 12(1), 139.
- [20] Farshad M, Le Roux M (2005) Compression properties of magnetostrictive polymer composite gels *Polym. Test.* 24, (2), 163-8
- [21] Bogdanov, V., Borin, D., Stepanov, G., & Andruszkiewicz, A. (2009). Usage of magneto-active elastomers in a bumper of a vehicle for front impact protection. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 149, No. 1, p. 012089). IOP Publishing.
- [22] Bazinenkov, A. M., & Mikhailov, V. P. (2015). Active and semi active vibration isolation systems based on magnetorheological materials. *Procedia Engineering*, 106, 170-174.
- [23] Ginder, J. M., Schlotter, W. F., & Nichols, M. E. (2001, July). Magnetorheological elastomers in tunable vibration absorbers. In *Smart structures and materials 2001: damping and isolation* (Vol. 4331, pp. 103-111). International Society for Optics and Photonics.
- [24] Deng, H. X., Gong, X. L., & Wang, L. H. (2006). Development of an adaptive tuned vibration absorber with magnetorheological elastomer. *Smart materials and structures*, 15(5), N111.
- [25] Kallio, M., Lindroos, T., Aalto, S., Järvinen, E., Kärnä, T., & Meinander, T. (2007). Dynamic compression testing of a tunable spring element consisting of a magnetorheological elastomer. *Smart Materials and Structures*, 16(2), 506.

- [26] Eem, S. H., Jung, H. J., & Koo, J. H. (2012). Modeling of magneto-rheological elastomers for harmonic shear deformation. *IEEE transactions on magnetics*, 48(11), 3080-3083.
- [27] Li, W. H., Zhou, Y., & Tian, T. F. (2010). Viscoelastic properties of MR elastomers under harmonic loading. *Rheologica acta*, 49(7), 733-740.
- [28] Koo, J. H., Khan, F., Jang, D. D., & Jung, H. J. (2010). Dynamic characterization and modeling of magneto-rheological elastomers under compressive loadings. *Smart Materials and Structures*, 19(11), 117002.
- [29] Yu, Y., Li, Y., & Li, J. (2014, July). A novel strain stiffening model for magnetorheological elastomer base isolator and parameter estimation using improved particle swarm optimization. In *Sixth World Conference on Structural Control and Monitoring (6WCSCM)*. International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE).
- [30] Brown, R. (2006). *Physical testing of rubber*. Springer Science & Business Media.
- [31] Brach, R. M., & Haddow, A. G. (1993). *On the dynamic response of hydraulic engine mounts* (No. 931321). SAE Technical Paper.
- [32] Kim, J. J., & Kim, H. Y. (1997). Shape design of an engine mount by a method of parameter optimization. *Computers & structures*, 65(5), 725-731.
- [33] Park, C. H., Shim, H. J., Choi, D. H., Kim, J. K., & Lee, S. M. (2012). Shape optimization of rubber isolators in automotive cooling modules for the maximization of vibration isolation and fatigue life. *International Journal of Automotive Technology*, 13(1), 61.
- [34] Geisberger, A., Khajepour, A., & Golnaraghi, F. (2002). Non-linear modelling of hydraulic mounts: theory and experiment. *Journal of Sound and vibration*, 249(2), 371-397.
- [35] Poojary, U. R., & Gangadharan, K. V. (2016). Experimental investigation on the effect of magnetic field on strain dependent dynamic stiffness of magnetorheological elastomer. *Rheologica Acta*, 55(11-12), 993-1001.
- [36] Williams, E. W., Rigby, S. G., Sproston, J. L., & Stanway, R. (1993). Electrorheological fluids applied to an automotive engine mount. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 47, 221-238.
- [37] Barber, L. K., & Munz, D. C. (2011). Consistent-sufficient sleep predicts improvements in self-regulatory performance and psychological strain. *Stress and Health*, 27(4), 314-324.
- [38] Choi, S. B., Hong, S. R., Sung, K. G., & Sohn, J. W. (2008). Optimal control of structural vibrations using a mixed-mode magnetorheological fluid mount. *International Journal of Mechanical Sciences*, 50(3), 559-568.

- [39] Barber, L. K., & Munz, D. C. (2011). Consistent-sufficient sleep predicts improvements in self-regulatory performance and psychological strain. *Stress and Health*, 27(4), 314-324.
- [40] Hosseini, A. M., Arzanpour, S., Golnaraghi, F., & Parameswaran, A. M. (2013). Solenoid actuator design and modeling with application in engine vibration isolators. *Journal of Vibration and Control*, 19(7), 1015-1023.

Abstract

The purpose of this research is to design, build and test a magnetorheological elastomer engine mount which is applied by horizontal and vertical forces, the elastomers used in the engine mount are in the shear regime. In this engine mount, two magnetorheological elastomers are used that their mechanical properties change in the presence of external magnetic field and also are immediately returned to the original state by removing the external field. After targeting to find the magnetic parameters needed to build the engine mount, simulator software was used. This software specifies the dimensions suitable for passing the magnetic field from the elastomers and then, considering the dimensions of the elastomers with the help of the SolidWorks software, so engine mount geometry is design for specific purposes. In the next step, we have to work on the assembly of parts and made instrument pieces based on SolidWorks map. all of the assembled parts of the engine mount and oscillatory shear were tested in the presence and absence of a magnetic field and also at various frequencies.

The results of the test are derived in the form of hysteresis charts in different frequencies and magnetic field extracted equivalent hardness (hysteresis gradient graph) and equivalent damping (enclosed hysteresis area) elastomers magnetorheological according to hysteresis diagrams and are compared to different frequencies and fields. it is shown that with increasing frequency and density of magnetic flux, the hardness and damping of magnetorheological elastomers increases.

Keywords: magnetorheological elastomers, engine mount, design, test, the magnetic field



Shahrood University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering

Design, fabrication and test of a Magnetorheological Elastomer (MRE) engine mount

Hashem Dianati Nick

Supervisors:

Dr. Amir jalali

Dr. Mahmood Norouzi

Advisor

Dr. Mojtba Qhatii

Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirements for the Degree of Master of Science (M.Sc.)

Sept. 2018