





دانشکده مهندسی مکانیک

گروه جامدات

بررسی تجربی تاثیر عامل شکل در مدول ذخیره و اتلاف مواد MRE تحت بارگذاری دینامیکی
فشاری - کششی و ارائه روابط اصلاحی تئوری برای آنها

دانشجو: امیرحسین یعقوبی

اساتید راهنما:

دکتر امیر جلالی

دکتر محمود نوروزی

استاد مشاور: دکتر مجتبی قطعی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه‌ی کارشناسی ارشد

شهریور ۱۳۹۹

فرم شماره ۷: صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای به شماره دانشجویی..... رشته گرایش تحت عنوان که در تاریخ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

☐ قبول (با درجه : امتیاز)	☐ دفاع مجدد	☐ مردود
نوع تحقیق: ☐ نظری ☐ عملی		

- ۱- عالی (۲۰ - ۱۹) ۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۸/۹۹)
 ۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹) ۴- قابل قبول (۱۴ - ۱۵/۹۹)
 ۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول			
۲- استاد راهنمای دوم			
۳- استاد مشاور			
۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی			
۵- استاد ممتحن اول			
۶- استاد ممتحن دوم			

رئیس دانشکده:

اگر این مختصر را ارزشی است؛

آن ارزش تقدیم به

قطب عالم امکان، حضرت باران ، آیت رب ودود و ناجی ملک وجود؛ آنکه جهانی در
انتظار عدالت و لطف اوست.

و تقدیم می کنم به آنان که مهر آسمانی شان آرام بخش آلام زمینی ام است

به استوارترین تکیه گاهم،دستان پرمهر پدرم

به سبزترین نگاه زندگیم،چشمان سبز مادرم

به امن ترین مکانم، قلب مهربان همسرم.

تشکر و قدردانی

با سپاس فراوان از حضرت حق که بی نور او گام برداشتن ممکن نیست.

نهال را “باران” باید، تا سیرابش کند از آب حیات و “آفتاب” باید تا بتاباند نیرو را و محکم کند شاخه های تازه روییده را؛ بسی شایسته است تشکر و سپاس از استاد دانشمند و پر مایه ام جناب آقای دکتر امیر جلالی که از محضر پر فیض تدریس شان از دوران کارشناسی تا ارشد، بهره ها برده ام و با امتنان بیکران از مساعدت های بی شائبه جناب آقای دکتر محمود نوروزی که بنده را در مسیر تحصیل و پژوهش راهنما بوده اند.

از آقای دکتر مجتبی قطعی به عنوان استاد مشاور که بنده را در به کارگیری تجهیزات تخصصی یاری نمودند تشکر می نمایم.

در آخر از آقای دکتر محمد باقر نظری که با صبر و بردباری خود، بنده را در انجام آزمایش های پژوهش یاری نمودند، تشکر می نمایم.

تعهد نامه

اینجانب امیرحسین یعقوبی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک طراحی کاربردی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود، نویسنده پایان نامه " بررسی تجربی تاثیر عامل شکل در مدول ذخیره و اتلاف مواد MRE تحت بارگذاری دینامیکی فشاری - کششی و ارائه روابط اصلاحی تئوری برای آن ها " تحت راهنمایی دکتر امیر

جلالی به عنوان استاد راهنمای اول و دکتر محمود نوروزی به عنوان استاد راهنمای دوم متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده 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 مدرکی 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 افراد که در به دست آوردن نتایج اصلی پایان نامه تأثیر گذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت شده است.
- 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 اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

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 نمی باشد.

چکیده

الاستومرهای مگنتورئولوژیکال گروهی از مواد هوشمند می‌باشند که از ترکیب پلیمر و ذرات مغناطیس شونده، مانند پودر آهن ساخته می‌شوند. این مواد در حضور میدان مغناطیسی از خود واکنش نشان می‌دهند که به صورت تغییر در خواص رئولوژیکال، مانند سختی و میرایی پدیدار می‌گردد. علت تغییرات، تشکیل شدن زنجیره‌هایی از ذرات مغناطیس شونده در حضور میدان مغناطیسی می‌باشد. وجود این قابلیت باعث استفاده از این مواد در زمینه‌ی کنترل ارتعاشات مکانیکی گردیده است که نیاز به شناخت رفتار دینامیکی این مواد را مورد توجه قرار داده است. عوامل متعددی در پاسخ دینامیکی تاثیرگذار می‌باشند، مانند نوع و میزان مواد سازنده، شرایط محیطی، نوع و میزان کرنش ورودی و موارد دیگر.

یکی از عوامل موثر در پاسخ دینامیکی، عامل شکل (shape factor) می‌باشد. این عامل نسبت مساحت ناحیه‌ی تحت بار مکانیکی به مساحت قسمت بدون بار را بیان می‌کند. در تحقیق حاضر، هدف شناسایی تأثیر عامل شکل در میزان خواص ارتعاشی ماده در حالت دینامیکی کشش- فشار می‌باشد. به این منظور نمونه‌هایی با عامل شکل‌های مختلف (قطرهای مختلف) از ۰/۴۲ تا ۰/۹۳ و ترکیب پلیمر سیلیکون، پودر آهن و روغن سیلیکون قالب‌ریزی شده و تحت آزمایش‌های مختلف دینامیکی قرار گرفته‌اند. میدان مغناطیسی اعمال شده از ۰ تا ۲۵۰ میلی تسلا، کرنش ورودی از ۸ تا ۱۴ درصد و نرخ کرنش ورودی از ۱ تا ۸ هرتز می‌باشد. پس از انجام آزمایش‌های موردنظر داده‌ها با استفاده از فیلتر پایین‌گذر نویزگیری شده و نمودارهای هیستریزیس آن‌ها رسم شده است. در ادامه مدول‌های ذخیره و اتلاف برای هر آزمایش محاسبه گشته است. طبق نتایج بدست آمده با افزایش عامل شکل، میزان مدول ذخیره فشاری و کششی افزایش پیدا خواهد نمود و مدول اتلاف تغییر به خصوصی پیدا نمی‌کند. بیشترین تاثیر عامل شکل، برای افزایش مدول ذخیره در فشار برابر ۳۹/۸۷ درصد و در کشش برابر ۵۲/۷۰ بدست آمده است. نتیجه دیگری که می‌توان به آن اشاره نمود، افزایش مدول ذخیره و مدول اتلاف با افزایش چگالی میدان مغناطیسی می‌باشد. بیشترین اثر مگنتورئولوژیکال در فشار برابر با ۲۹/۹۵ درصد و در کشش برابر با ۲۱/۶۶ درصد برای افزایش مدول ذخیره بدست آمده است.

در انتها با استفاده از داده‌های بدست آمده از آزمایش‌ها، مدلی جامع در حالت کشش و فشار ارائه گشته است که می‌توان از آن در کاربردهای کنترلی استفاده نمود. این مدل شامل قسمت هیستریزیس و قسمت سختی و اتلاف غیر خطی می‌باشد. این اجزا شامل ثابت‌هایی است که هر کدام مربوط به تاثیر یک عامل می‌باشند. با استفاده از الگوریتم ژنتیک نرم افزار متلب، مقادیر ثابت مدل دینامیکی پیشنهاد شده، به صورت بهینه بدست آمده‌اند. ضرایب این مدل تنها بر حسب چگالی میدان مغناطیسی می‌باشند و از کرنش و نرخ کرنش و عامل شکل مستقل می‌باشند. در ادامه مقدار خطای مدل ارائه شده با نتایج عملی بدست آمده، محاسبه گشت که میزان قابل قبولی را نشان داده است.

واژگان کلیدی: الاستومر مگنتورئولوژیکال؛ مدل دینامیکی؛ خواص ارتعاشی؛ عامل شکل؛ الگوریتم ژنتیک؛ هیستریزیس.

فهرست مطالب

۱ - مقدمه، مروری بر مواد مگنتورئولوژیکال	۱
۱-۱ مقدمه‌ای بر مواد هوشمند	۲
۲-۱ مواد مگنتورئولوژیکال	۲
۳-۱ سیال‌های مگنتورئولوژیکال	۳
۴-۱ الاستومرهای مگنتورئولوژیکال	۴
۴-۱-۱ مواد ویسکوالاستیک	۴
۴-۱-۲ ساختار الاستومرهای مگنتورئولوژیکال	۶
۴-۱-۳ انواع الاستومرهای مگنتورئولوژیکال	۸
۵-۱ فوم‌های مگنتورئولوژیکال	۹
۶-۱ کاربرد مواد مگنتورئولوژیکال	۱۰
۶-۱-۱ کاربرد سیال‌های مگنتورئولوژیکال	۱۰
۶-۱-۲ کاربرد الاستومرهای مگنتورئولوژیکال	۱۲
۶-۱-۳ کاربرد فوم‌های مگنتورئولوژیکال	۱۵
۷-۱ پیشینه‌ی پژوهش	۱۶
۸-۱ چالش‌های فناوری الاستومر مگنتورئولوژیکال	۲۵
۹-۱ معرفی تحقیق حاضر	۲۶
۹-۱-۱ عامل شکل (shape factor)	۲۶

۳۰	 ۲-۹-۱ مشخصات تحقیق
۳۲	 ۱۰-۱ ضرورت تحقیق
۳۲	 ۱۱-۱ نوآوری‌های تحقیق
۳۵	 ۲ - ساخت نمونه‌ی الاستومر مگنتورئولوژیکال و پیکربندی آزمایش
۳۶	 ۱-۲ ساخت نمونه‌ی الاستومر مگنتورئولوژیکال
۴۳	 ۲-۲ ساخت و پیکربندی آزمایش
۴۳	 ۱-۲-۲ تولید میدان مغناطیسی
۴۵	 ۲-۲-۲ ساخت فیکسچر
۵۳	 ۳ - رفتار دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال
۵۴	 ۱-۳ مقدمه
۵۴	 ۲-۳ آزمایش دینامیکی کشش-فشار
۵۶	 ۳-۳ هیستریزیس
۵۷	 ۴-۳ مدول ذخیره و مدول اتلاف
۵۹	 ۵-۳ ترسیم نمودار تنش- کرنش
۶۲	 ۶-۳ تحلیل تغییرات مدول ذخیره و اتلاف در برابر چگالی شار مغناطیسی
۶۳	 ۱-۶-۳ تغییرات E'
۶۵	 ۲-۶-۳ تغییرات E''
۶۷	 ۳-۶-۳ اثر مگنتورئولوژیکال
۷۰	 ۷-۳ تحلیل تغییرات مدول ذخیره و اتلاف در برابر کرنش ورودی

۷۱	 تغییرات E' ۱-۷-۳
۷۲	 تغییرات E" ۲-۷-۳
۷۳	 ۸-۳ تحلیل تغییرات مدول ذخیره و اتلاف در برابر فرکانس ورودی
۷۴	 تغییرات E' ۱-۸-۳
۷۵	 تغییرات E" ۲-۸-۳
۷۷	 ۹-۳ تحلیل تغییرات مدول ذخیره و اتلاف در برابر عامل شکل
۷۸	 تغییرات E' ۱-۹-۳
۸۱	 تغییرات E" ۲-۹-۳
۸۳	 ۴ - مدل سازی ..
۸۴	 ۱-۴ پیش گفتار
۸۵	 ۲-۴ مدل های ویسکوالاستیک
۸۵	 ۱-۲-۴ مدل های پایه
۸۶	 ۲-۲-۴ مدل جامد خطی استاندارد
۸۷	 ۳-۲-۴ مدل های تعمیم یافته
۸۹	 ۴-۲-۴ مدل بوک - ون
۹۰	 ۵-۲-۴ مدل وطن دوست و همکاران
۹۲	 ۳-۴ معرفی مدل
۹۵	 ۴-۴ محاسبه ی ضرایب مدل
۹۸	 ۵-۴ اعتبارسنجی مدل

۵ - نتیجه گیری	۱۰۵
۵-۱ جمع بندی نتایج	۱۰۶
۵-۲ پیشنهادهای پژوهشی	۱۱۰
مراجع	۱۱۱

فهرست اشکال

شکل ۱-۱- عکس SEM الف) سیال مگنتورئولوژیکال تحت عدم حضور میدان مغناطیسی ب) سیال مگنتورئولوژیکال تحت حضور میدان مغناطیسی [۱۲]	۴
شکل ۲-۱- نمودار رفتار مواد ویسکوالاستیک بر حسب زمان در حالت خزش [۱۵]	۵
شکل ۳-۱- نمودار رفتار مواد ویسکوالاستیک بر حسب زمان در حالت رهایش	۶
شکل ۴-۱- عکس SEM از الاستومر مگنتورئولوژیکال در سایزها و درصد وزنی مختلف. (a-d) نمونه ها با اندازه ی ۱/۱ میکرومتر و درصدهای وزنی ۱۰٪ و ۳۰٪ و ۶۰٪ و ۸۰٪ (a'-d') نمونه ها با اندازه ی ۹ میکرومتر و درصدهای وزنی ۱۰٪ و ۳۰٪ و ۶۰٪ و ۸۰٪ [۲۲]	۷
شکل ۵-۱- عکس SEM از نمونه های الاستومر مگنتورئولوژیکال غیرایزوتروپیک تحت میدان های مغناطیسی مختلف [23] (a) 0 mT (b) 200 mT (c) 400 mT (d) 600 mT (e) 800 mT (f) 1000 mT	۹
شکل ۶-۱- عکس SEM از فوم اسفنجی [۲۵]	۱۰
شکل ۷-۱- ساختار داخلی میراگر مگنتورئولوژیکال ساخته شده توسط شرکت لرد [۳۱]	۱۱
شکل ۸-۱- ساختار داخلی و نمونه ی تولید شده ترمز هوشمند مگنتورئولوژیکال [۳۴]	۱۱
شکل ۹-۱- کاربرد میراگر مگنتورئولوژیکال در کنترل ارتعاشات پل سیتانگ در چین [۳۰]	۱۲
شکل ۱۰-۱- ایزولاتور هوشمند ساخته شده از MRE [۴۵]	۱۳

- شکل ۱-۱۱- بوش هوشمند MRE استفاده شده در خودرو [۴۶] ۱۴
- شکل ۱-۱۲- ساختار شیر هوشمند MRE به منظور تنظیم خروجی هوا [۳۴] ۱۴
- شکل ۱-۱۳- دمپر هوشمند ساخته شده به وسیله فوم مگنتورئولوژیکال [۴۷] ۱۵
- شکل ۱-۱۴- نمونه‌ی MRE تحت فشار محوری ۲۷
- شکل ۱-۱۵- شماتیک لایه پلاستیک ۲۷
- شکل ۱-۱۶- نمودار مدول الاستیک فشاری موثر بر حسب عامل شکل به صورت لگاریتمی. ---- طبق معادله (۷-۱) و طبق معادله (۴-۱) ۲۹
- شکل ۲-۱- قالب‌های ساخته شده به منظور قالب گیری MRE ۳۷
- شکل ۲-۲- تصویر پشت قالب ۳۷
- شکل ۲-۳- مخلوط پودر آهن کربونیل و روغن سیلیکون ۳۸
- شکل ۲-۴- پودر آهن و روغن سیلیکون پس از ۵ دقیقه مخلوط شدن ۳۹
- شکل ۲-۵- افزودن پلیمر سیلیکون به مخلوط ذرات آهن و روغن سیلیکون ۳۹
- شکل ۲-۶- اضافه کردن هاردنر به مخلوط ۴۰
- شکل ۲-۷- مخلوط کردن کل مواد تشکیل دهنده با یکدیگر ۴۰
- شکل ۲-۸- قالب پر شده از الاستومر مگنتورئولوژیکال ۴۱
- شکل ۲-۹- نمونه‌ی MRE در حال جدا شدن از قالب ۴۱
- شکل ۲-۱۰- چهار عدد نمونه‌ی الاستومر مگنتورئولوژیکال ایزوتروپیک با shape factor های متفاوت ۴۲
- شکل ۲-۱۱- نمونه برش خورده MRE ۴۲
- شکل ۲-۱۲- آهنربا نئودیمیوم N42 ۴۳
- شکل ۲-۱۳- سه عدد آهنربا نئودیمیوم به هم چسبیده شده به همراه جعبه محافظ ۴۴
- شکل ۲-۱۴- اندازه‌گیری میدان مغناطیسی بین آهنرباها ۴۵
- شکل ۲-۱۵- دستگاه سروهیدرولیک INSTRON 8802 ۴۶

شکل ۲-۱۶- لودسل INSTRON.....	۴۷
شکل ۲-۱۷- قسمت پایین فیکسچر.....	۴۸
شکل ۲-۱۸- قسمت بالای فیکسچر.....	۴۸
شکل ۲-۱۹- اندازه گیری میدان مغناطیسی در بالای فیکسچر.....	۴۹
شکل ۲-۲۰- چسباندن نمونه‌ی MRE به صفحه فلزی.....	۵۰
شکل ۲-۲۱- نمونه‌ی MRE آماده شده جهت متصل کردن به فیکسچر.....	۵۰
شکل ۲-۲۲- شبیه سازی اعمال نیرو به فیکسچر بالا.....	۵۱
شکل ۲-۲۳- شبیه سازی اعمال نیرو به فیکسچر پایین.....	۵۲
شکل ۲-۲۴- ستاپ بسته شده روی دستگاه INSTRON.....	۵۲
شکل ۳-۱- صفحه رابط کاربری دستگاه INSTRON ..	۵۵
شکل ۳-۲- اجزاء ستاپ آزمایش.....	۵۶
شکل ۳-۳- نمودار حلقه هیستریزیس وابسته به زمان [۱۰۱].....	۵۷
شکل ۳-۴- منحنی نیرو بر حسب جابجایی استفاده شده در روش براون.....	۵۸
شکل ۳-۵- منحنی نیرو بر حسب جابجایی به منظور محاسبه مدول‌ها در حالت فشاری.....	۵۹
شکل ۳-۶- نمودار هیستریزیس فیلتر نشده.....	۶۱
شکل ۳-۷- نمودار هیستریزیس فیلتر شده.....	۶۱
شکل ۳-۸- نمودارهای هیستریزیس MRE در شارهای مغناطیسی متفاوت.....	۶۲
شکل ۳-۹- تغییرات مدول ذخیره فشاری نسبت به چگالی شار مغناطیسی در کرنش‌های متفاوت.....	۶۳
شکل ۳-۱۰- تغییرات مدول ذخیره فشاری نسبت به چگالی شار مغناطیسی در فرکانس‌های متفاوت.....	۶۳
شکل ۳-۱۱- تغییرات مدول ذخیره کششی نسبت به چگالی شار مغناطیسی در کرنش‌های متفاوت.....	۶۴
شکل ۳-۱۲- تغییرات مدول ذخیره فشاری نسبت به چگالی شار مغناطیسی در فرکانس‌های متفاوت.....	۶۴
شکل ۳-۱۳- تغییرات مدول اتلاف فشاری نسبت به چگالی شار مغناطیسی در کرنش‌های متفاوت.....	۶۵

- شکل ۳-۱۴- تغییرات مدول اتلاف فشاری نسبت به چگالی شار مغناطیسی در فرکانس‌های متفاوت.۶۵
- شکل ۳-۱۵- تغییرات مدول اتلاف کششی نسبت به چگالی شار مغناطیسی در کرنش‌های متفاوت.۶۶
- شکل ۳-۱۶- تغییرات مدول اتلاف کششی نسبت به چگالی شار مغناطیسی در فرکانس‌های متفاوت.۶۶
- شکل ۳-۱۷- تغییرات اثر مگنتورئولوژیکال بر حسب کرنش، در فرکانس‌ها و عامل شکل‌های مختلف. ستون سمت راست) اثر مگنتورئولوژیکال کششی - ستون سمت چپ) اثر مگنتورئولوژیکال فشاری.۶۷
- شکل ۳-۱۸- تغییرات اثر مگنتورئولوژیکال بر حسب فرکانس، در کرنش‌های مختلف و عامل شکل ۰/۷۸. ستون سمت راست) اثر مگنتورئولوژیکال کششی - ستون سمت چپ) اثر مگنتورئولوژیکال فشاری.۶۸
- شکل ۳-۱۹- تغییرات اثر مگنتورئولوژیکال بر حسب عامل شکل، در کرنش‌های مختلف و فرکانس ۵ هرتز. ستون سمت راست) اثر مگنتورئولوژیکال کششی - ستون سمت چپ) اثر مگنتورئولوژیکال فشاری.۶۹
- شکل ۳-۲۰- نمودارهای کشش-فشار هیستریزیس MRE در کرنش‌های ورودی متفاوت.۷۰
- شکل ۳-۲۱- تغییرات مدول ذخیره فشاری نسبت به کرنش ورودی در چگالی شارهای مغناطیسی متفاوت.۷۱
- شکل ۳-۲۲- تغییرات مدول ذخیره کششی نسبت به کرنش ورودی در چگالی شارهای مغناطیسی متفاوت.۷۱
- شکل ۳-۲۳- تغییرات مدول اتلاف فشاری نسبت به کرنش ورودی در چگالی شارهای مغناطیسی متفاوت.۷۲
- شکل ۳-۲۴- تغییرات مدول اتلاف کششی نسبت به کرنش ورودی در چگالی شارهای مغناطیسی متفاوت.۷۲
- شکل ۳-۲۵- نمودارهای کشش-فشار هیستریزیس نمونه MRE در فرکانس‌های ورودی متفاوت.۷۳
- شکل ۳-۲۶- تغییرات مدول ذخیره فشاری نسبت به تمام فرکانس‌های ورودی در چگالی شارهای مغناطیسی متفاوت.۷۴

شکل ۳-۲۷- تغییرات مدول ذخیره فشاری نسبت به فرکانس ورودی در چگالی شارهای مغناطیسی متفاوت.

۷۵

شکل ۳-۲۸- تغییرات مدول ذخیره کششی نسبت به فرکانس ورودی در چگالی شارهای مغناطیسی متفاوت.

۷۵

شکل ۳-۲۹- تغییرات مدول اتلاف فشاری نسبت به فرکانس ورودی در چگالی شارهای مغناطیسی متفاوت.

۷۶

شکل ۳-۳۰- تغییرات مدول اتلاف کششی نسبت به فرکانس ورودی در چگالی شارهای مغناطیسی متفاوت.

۷۶

شکل ۳-۳۱- نمودارهای کشش- فشار هیستریزیس نمونه MRE در عامل شکل‌های (قطرهای) متفاوت. ۷۷

شکل ۳-۳۲- تغییرات مدول ذخیره بر حسب عامل شکل و در میدانهای مغناطیسی و کرنشهای مختلف.

ستون سمت راست) مدول ذخیره کششی - ستون سمت چپ) مدول ذخیره فشاری. ۷۸

شکل ۳-۳۳- اثر عامل شکل بر حسب کرنش، در میدانهای مغناطیسی و فرکانسهای مختلف.

ستون سمت راست) اثر عامل شکل کششی - ستون سمت چپ) اثر عامل شکل فشاری. ۸۰

شکل ۳-۳۴- اثر عامل شکل بر حسب میدان مغناطیسی، در کرنشها و فرکانسهای مختلف.

ستون سمت راست) اثر عامل شکل کششی - ستون سمت چپ) اثر عامل شکل فشاری. ۸۰

شکل ۳-۳۵- تغییرات مدول اتلاف بر حسب عامل شکل و در میدانهای مغناطیسی و کرنشهای مختلف.

ستون سمت راست) مدول اتلاف کششی - ستون سمت چپ) مدول اتلاف فشاری. ۸۱

شکل ۴-۱- نمادهای فنر و میراگر. ۸۴

شکل ۴-۲- نماد مدلهای پایه ویسکوالاستیک به همراه ثوابت فیزیکی : الف) مدل کلین ب) مدل ماکسول.

۸۵

شکل ۴-۳- مدل سه پارامتری استاندارد جامد خطی در حالت ماکسول. ۸۷

شکل ۴-۴- مدل تعمیم یافته ماکسول. ۸۸

- شکل ۴-۵ - مدل تعمیم یافته کلوین..... ۸۸
- شکل ۴-۶ - مدل تعمیم یافته بوک - ون..... ۸۹
- شکل ۴-۷ - مدل ویسکوالاستیک وطن دوست و همکاران..... ۹۰
- شکل ۴-۸ - تغییر شکل هیستریزیس MRE بر اساس تغییر ثوابت در مدل وطن دوست و همکاران..... ۹۲
- شکل ۴-۹ - حلقه هیستریزیس تنش- کرنش برای داده‌های آزمایشگاهی و مدل پیشنهادی در عامل شکل ۹۳/۰..... ۹۲
- ، میدان مغناطیسی ۲۰۰ میلی تسلا، فرکانس ۳ هرتز و کرنش ۸ درصد..... ۹۸
- شکل ۴-۱۰ - حلقه هیستریزیس تنش- کرنش برای داده‌های آزمایشگاهی و مدل پیشنهادی در عامل شکل ۷۸/۰، میدان مغناطیسی ۲۵۰ میلی تسلا، فرکانس ۵ هرتز و کرنش ۱۲ درصد..... ۹۸
- شکل ۴-۱۱ - حلقه هیستریزیس تنش- کرنش برای داده‌های آزمایشگاهی و مدل پیشنهادی در عامل شکل ۶۲/۰، میدان مغناطیسی ۱۰۰ میلی تسلا، فرکانس ۵ هرتز و کرنش ۸ درصد..... ۹۹
- شکل ۴-۱۲ - حلقه هیستریزیس تنش- کرنش برای داده‌های آزمایشگاهی و مدل پیشنهادی در عامل شکل ۴۶/۰، میدان مغناطیسی ۲۵۰ میلی تسلا، فرکانس ۵ هرتز و کرنش ۱۲ درصد..... ۹۹

فهرست جداول

- جدول ۱-۱ - مقادیر ورودی آزمایش..... ۳۱
- جدول ۱-۲ - مشخصات مواد به کار رفته در ساخت MRE..... ۳۶
- جدول ۱-۴ - تفسیر فیزیکی ثابت‌های مدل پیشنهادی..... ۹۴
- جدول ۲-۴ - مقادیر پارامترهای مدل پیشنهادی..... ۹۵
- جدول ۳-۴ - ضرایب ثابت مدل پیشنهادی..... ۹۶
- جدول ۴-۴ - میزان درصد تطابق برای مدل پیشنهادی..... ۱۰۰

علائم اختصاری

نماد	کمیت	نماد	کمیت
A	سطح مقطع نمونه	MRE	الاستومر مگنتورئولوژیکیال
B	چگالی میدام مغناطیسی	<i>norm</i>	تابع اندازه در متلب
D	قطر نمونه	<i>S</i>	عامل شکل
<i>E</i>	مدول الاستیک دینامیکی	<i>t</i>	زمان
<i>E'</i>	مدول ذخیره دینامیکی	<i>x</i>	جابجایی
<i>E''</i>	مدول تلفات دینامیکی	$\dot{x}$	نرخ جابجایی
<i>E_c</i>	مدول ذخیره دینامیکی موثر	ε	کرنش
<i>f</i>	فرکانس	$\dot{\varepsilon}$	نرخ کرنش
G	مدول ذخیره برشی	ε_0	دامنه کرنش
h	ضخامت نمونه	η	ضریب میراگر
<i>K</i>	مدول بالک	$\bar{\eta}$	ضریب تلفات تابع هیستریزیس
<i>K₁</i>	ضریب اول تابع هیستریزیس	ν	ضریب پواسون
<i>K₂</i>	ضریب دوم تابع هیستریزیس	σ	تنش کششی- فشاری
MR	مگنتورئولوژیکیال	$\dot{\sigma}$	نرخ تنش
MRF	سیال مگنتورئولوژیکیال		

۱ - مقدمه، مروری بر مواد مگنتورئولوژیکال

۱-۱ مقدمه‌ای بر مواد هوشمند

استفاده از مواد مختلف در دوران‌های بسیار دور تا به امروز به صورت مستمر مورد توجه بشر قرار داشته است و متناسب با نیازهای آن تکامل پیدا کرده است. در دوران حاضر مواد هوشمند^۱ یکی از نیازهای اساسی علوم مهندسی می‌باشند. مواد هوشمند به نوعی از مواد اطلاق می‌گردند که محرکی را دریافت، انتقال یا پردازش کرده و با ایجاد یک تأثیر مفید به آن واکنش نشان می‌دهند [۱]. به عنوان نمونه، ماده‌ی هوشمندی به نام پیزوالکتریک^۲ پس از دریافت کرنش از طرف محیط، جریان الکتریسیته تولید می‌کند؛ واکنش این ماده در این فرایند الکتریسیته تولیدی می‌باشد. این واکنش می‌تواند در مواد دیگر نوع متفاوتی از انرژی مانند تولید گرما و یا نور باشد. محرک نیز می‌تواند از نوع دیگر انرژی مانند میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی، نور و ... باشد.

از کاربرد این مواد در علوم مختلف می‌توان به ساخت حسگر [۲]، کاربرد در پزشکی [۳]، کاهش ارتعاشات در مکانیک [۴] و ... اشاره نمود.

۲-۱ مواد مگنتورئولوژیکال

در انواع مختلف مواد هوشمند، گروهی از آن‌ها وجود دارند که در حضور میدان مغناطیسی از خود واکنش نشان می‌دهند. مواد مگنتورئولوژیکال^۳ جزء این دسته قرار می‌گیرند. واکنش در این مواد متناسب با میزان میدان مغناطیسی، به صورت تغییر در خواص مکانیکی و خواص رئولوژیکال^۴ ظاهر می‌گردد [۵]. این واکنش با سرعت بسیار بالا (هزارم ثانیه) به واسطه‌ی حضور میدان مغناطیسی ایجاد و با قطع میدان از بین می‌رود. این سرعت بالا در کاربردهای کنترلی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است [۶].

^۱ Smart materials

^۴ Rheological properties

^۲ Piezoelectric

^۳ Magnetorheological materials (MR materials)

برای اولین بار ژاکوب رابینو^۱ [۷] با تحقیق بر روی سیال‌های مگنتورئولوژیکال^۲ (MRF) این مواد را معرفی کرد. پس از آن شیگا و همکاران^۳ [۸] الاستومر مگنتورئولوژیکال^۴ را معرفی کردند و بر روی خواص ویسکوالاستیک^۵ آن مطالعه کردند. مواد مگنتورئولوژیکال را می‌توان به سه گروه تقسیم کرد [۵]:

- ۱- سیال‌های مگنتورئولوژیکال ۲- الاستومرهای مگنتورئولوژیکال ۳- فوم‌های مگنتورئولوژیکال^۶.

اجزاء سازنده این مواد اغلب پودر آهن (سایز میکرون) و یک پلیمر غیر مغناطیسی می‌باشد. در حضور میدان مغناطیسی ذرات آهن در راستای میدان قرار گرفته و تشکیل زنجیره می‌دهند. این زنجیره در خواص مکانیکی و خواص رئولوژیکال ماده تأثیر گذاشته و باعث تغییر آن‌ها می‌گردد.

۳-۱ سیال‌های مگنتورئولوژیکال

سیال مگنتورئولوژیکال از مخلوط ذرات آهنی در یک سیال غیر مغناطیسی همراه با مقدار کمی مواد روان کننده تشکیل می‌شود. ذرات مغناطیسی در این مواد تا ۵۰ درصد وزنی و با ابعاد میکرون استفاده می‌شوند. از پودر آهن کربونیل^۷ به علت نفوذپذیری مغناطیسی بالا به عنوان ذرات مغناطیسی شونده و از موادی مانند روغن‌های معدنی، روغن سیلیکون، پلی‌استرها^۸، هیدروکربن‌های مصنوعی و آب به عنوان سیال حامل استفاده می‌گردد [۹]. در زمان اعمال میدان مغناطیسی ذرات فلزی قطبیده می‌شوند و تشکیل زنجیره می‌دهند، این زنجیره‌ها باعث افزایش ویسکوزیته^۹ سیال می‌شوند و آن را به حالت نیمه جامد^{۱۰} تبدیل می‌کنند. این عمل برگشت پذیر بوده و به آن اثر مگنتورئولوژیکال^{۱۱} (MR) می‌گویند [۱۰ و ۱۱]. در شکل ۱-۱ سیال مگنتورئولوژیکال در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی مشاهده می‌گردد و می‌توان زنجیره‌های ایجاد شده توسط ذرات مغناطیسی کروی و سیمی را مشاهده نمود.

¹ Jacob Rabinow

² Magnetorheological fluids (MRFs)

³ Shiga

⁴ Magnetorheological elastomers (MREs)

⁵ Viscoelastic

⁶ Magnetorheological foams (MR foams)

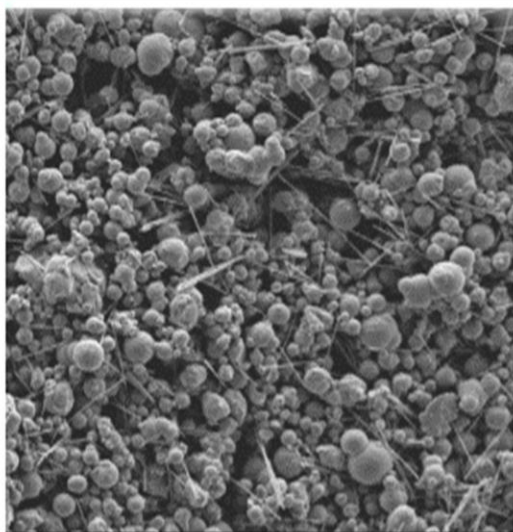
⁷ Carbonyl iron

⁸ Polyester

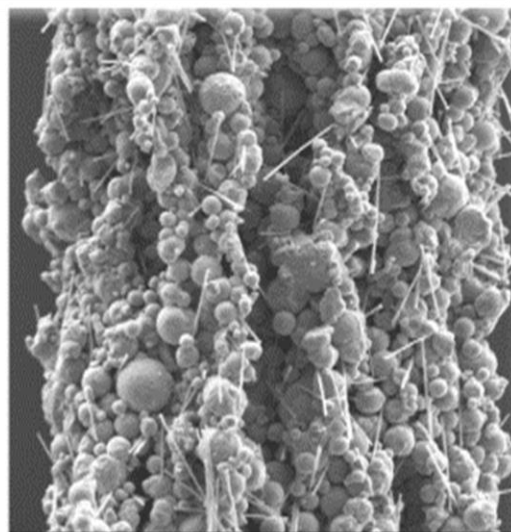
⁹ Viscosity

¹⁰ Semi-solid

¹¹ Magnetoreologic effect



(الف)



(ب)

شکل ۱-۱- عکس SEM (الف) سیال مگنتورئولوژیکال تحت عدم حضور میدان مغناطیسی (ب) سیال مگنتورئولوژیکال تحت حضور میدان مغناطیسی [۱۲].

از معایب این مواد می‌توان به ته‌نشینی ذرات در سیال و مشکل آب‌بندی در تجهیزات اشاره نمود [۱۳]. به منظور جلوگیری از ته‌نشینی ذرات راه‌حلهایی مورد پژوهش قرار گرفته است که می‌توان به پوشش‌دهی ذرات مغناطیسی، استفاده از افزودنی‌های پایدارساز، استفاده از ذرات با شکل‌های مختلف کروی و سیمی و ... اشاره نمود [۱۴].

۴-۱ الاستومرهای مگنتورئولوژیکال

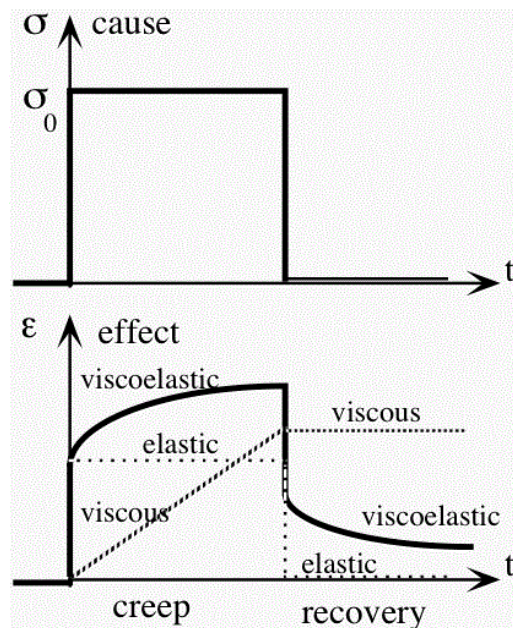
۱-۴-۱ مواد ویسکوالاستیک

طبق الاستیسیته کلاسیک، زمانی که تنش به یک ماده وارد می‌شود، بدون تاخیر زمانی کرنشی متناسب با آن در ماده ایجاد می‌گردد که این رابطه طبق قانون هوک^۱ بیان می‌شود. موادی مانند فلزات، چوب، سنگ و ... از این قانون پیروی می‌کنند. در سیالات نیوتنی^۲ تنش با نرخ کرنش ورودی در رابطه است، مانند آب که به این خاصیت، ویسکوزیته گفته می‌شود. گونه‌ای از مواد وجود دارند که هم خاصیت الاستیک دارند و هم خاصیت ویسکوز که به آن‌ها مواد ویسکوالاستیک گفته می‌شود، مانند پلیمرها.

^۱ Hooke's law

^۲ Newtonian fluids

این مواد دارای دو خاصیت ذخیره انرژی و اتلاف انرژی می‌باشند و تنش و کرنش در آن‌ها تابعی از زمان هستند. در شکل ۱-۲ نمودار نحوه رفتار کرنش مواد ویسکوالاستیک بر حسب زمان، تحت تنش پله‌ای نشان داده شده است. طبق این شکل پس از اعمال تنش آنی، کرنشی آنی در ماده ایجاد می‌گردد و پس از آن به صورت آهسته کرنش رشد خواهد کرد. به این نوع رفتار خزش^۱ می‌گویند.

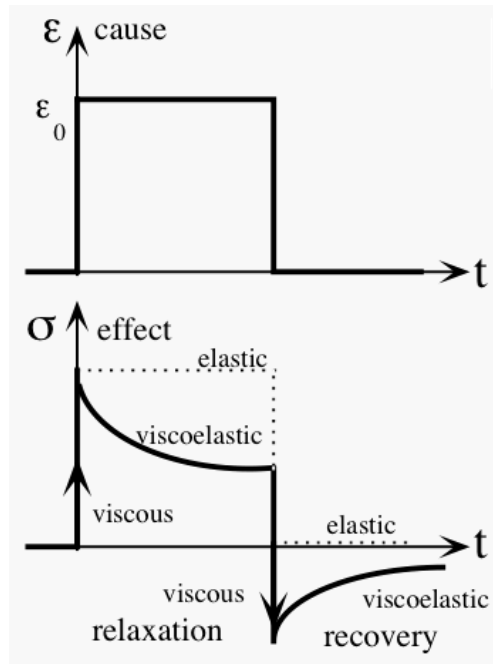


شکل ۱-۲- نمودار رفتار مواد ویسکوالاستیک بر حسب زمان در حالت خزش [۱۵].

مطابق شکل ۱-۳، در صورت اعمال کرنش آنی به مواد ویسکوالاستیک، تنش آنی در ماده ایجاد می‌گردد و پس از آن تنش به صورت آهسته نزول پیدا می‌کند. این نوع رفتار را رهایش^۲ می‌نامند.

^۱ Creep

^۲ Relaxation



شکل ۱-۳- نمودار رفتار مواد ویسکوالاستیک بر حسب زمان در حالت رهایش.

۱-۴-۲ ساختار الاستومرهای مگنتورئولوژیکال

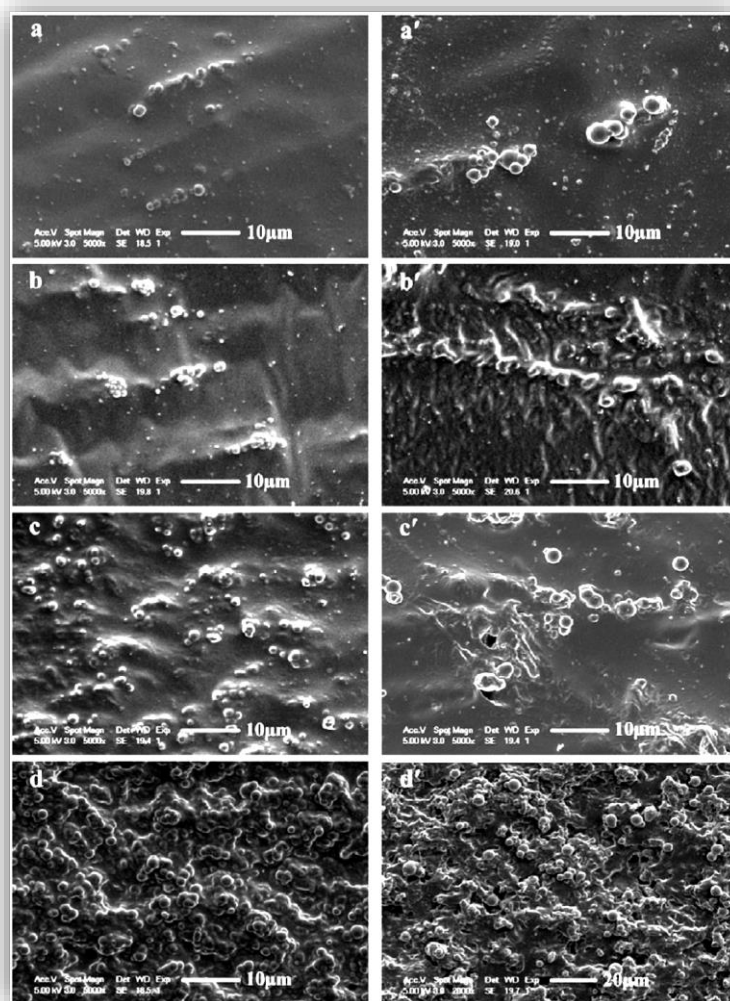
الاستومرهای مگنتورئولوژیکال (MRE) جزء مواد ویسکوالاستیک قرار می‌گیرند [۱۶]، به این معنی که در آن‌ها تنش هم به کرنش و هم به نرخ کرنش وابسته می‌باشد. در این مواد، ماتریس^۱ استفاده شده از جنس الاستومر می‌باشد و ذرات مغناطیسی معمولاً آهن کربنیل می‌باشند [۱۷]. بستر الاستومری باید دارای خاصیت نفوذپذیری مغناطیسی و ظرفیت اشباع مغناطیسی بالا و پسماند مغناطیسی پایین باشد که پلیمر سیلیکون و پلیمرهای طبیعی این خواص را دارا می‌باشند و مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۸]. همچنین ممکن است ترکیبی از پلیمرها مورد استفاده قرار گیرد [۱۹]. به منظور افزایش خاصیت پلاستیسیته^۲، یکنواختی ماده و پایداری خواص، معمولاً از افزودنی استفاده می‌گردد که روغن سیلیکون گزینه‌ای مناسب برای این منظور می‌باشد [۲۰].

در این مواد همانند سیال‌های مگنتورئولوژیکال با قرار گرفتن ماده درون میدان مغناطیسی، ذرات مغناطیس شونده در همسایگی خودشان جابه‌جا می‌شوند و در حوالی خطوط میدان، تشکیل زنجیره

^۱ Matrix

^۲ Plasticity

می‌دهند و باعث تغییر خواص رئولوژی ماده می‌شوند [۲۱]. به عنوان مثال با قرار گرفتن ذرات در یک جهت، سفتی معادل در این مواد بیشتر می‌شود و شیب نمودار تنش-کرنش بیشتر می‌گردد، این واکنش در زمان بسیار کوتاه کمتر از ۱۰ میلی ثانیه ایجاد می‌گردد [۶]. در شکل ۱-۴ عکس الاستومرهای مگنتورئولوژیکال شامل ذرات با سایزهای ۱/۱ میکرومتر و ۹ میکرومتر و درصد وزنی‌های مختلف نشان داده شده است.



شکل ۱-۴- عکس SEM از الاستومر مگنتورئولوژیکال در سایزها و درصد وزنی مختلف.
 (a)-(d) نمونه‌ها با اندازه‌ی ۱/۱ میکرومتر و درصدهای وزنی ۱۰٪ و ۳۰٪ و ۶۰٪ و ۸۰٪
 (a')-(d') نمونه‌ها با اندازه‌ی ۹ میکرومتر و درصدهای وزنی ۱۰٪ و ۳۰٪ و ۶۰٪ و ۸۰٪ [۲۲].

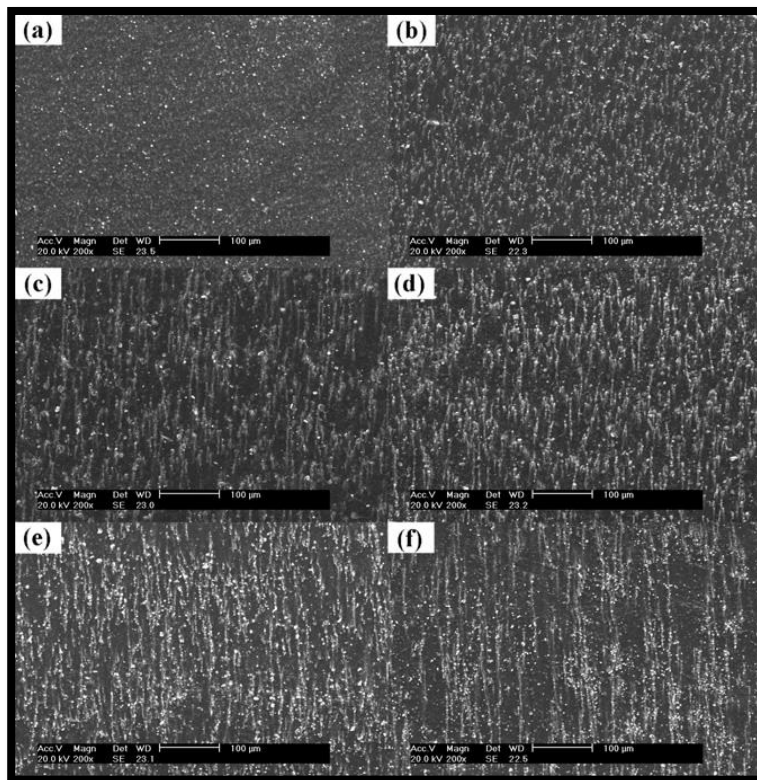
۱-۴-۳ انواع الاستومرهای مگنتورئولوژیکال

الاستومرهای مگنتورئولوژیکال به دو دسته‌ی ایزوتروپیک^۱ و غیرایزوتروپیک^۲ تقسیم می‌شوند. در نوع ایزوتروپیک، ذرات مغناطیس شونده به صورت اتفاقی درون ماتریس الاستومری پراکنده می‌شوند و نظم خاصی ندارند و در نوع غیرایزوتروپیک، ذرات مغناطیس شونده در حوالی خطوطی موازی قرار دارند. تفاوت این دو نوع الاستومر در فرایند پخت^۳ ماده ایجاد می‌گردد. در ایزوتروپیک زمان پخت ماده، میدان مغناطیسی بر روی ماده اعمال نمی‌گردد و در غیرایزوتروپیک هنگام پخت ماده بر روی آن میدان مغناطیسی در جهت دلخواه اعمال می‌گردد. زمانی که ماتریس خشک نشده است ذرات می‌توانند در مکانی دلخواه قرار بگیرند و با اعمال میدان مغناطیسی ذرات در جهت خطوط میدان تشکیل زنجیره می‌دهند [۲۳]. این زنجیره‌ها باعث می‌شوند خواص رئولوژیکال ماده طبق شرایط مختلف متفاوت باشند. جهت میدان مغناطیسی، جهت بارگذاری و راستای قرارگیری ذرات مغناطیس شونده باعث تغییر در سختی و میرایی می‌شوند [۲۴]. در شکل ۱-۵ نمونه‌هایی از الاستومر مگنتورئولوژیکال غیرایزوتروپیک نشان داده شده است که در میدان‌های مغناطیسی مختلف فرایند پخت را طی کرده‌اند. همان‌طور که در شکل مشخص است با افزایش شدت میدان مغناطیسی شکل‌گیری زنجیره‌ها بیشتر می‌شود.

¹ Isotropic

³ Curing process

² Anisotropic



شکل ۵-۱- عکس SEM از نمونه‌های الاستومر مگنتورئولوژیکال غیرایزوتروپیک تحت میدان‌های مغناطیسی مختلف (a) 0 mT (b) 200 mT (c) 400 mT (d) 600 mT (e) 800 mT (f) 1000 mT [۲۳].

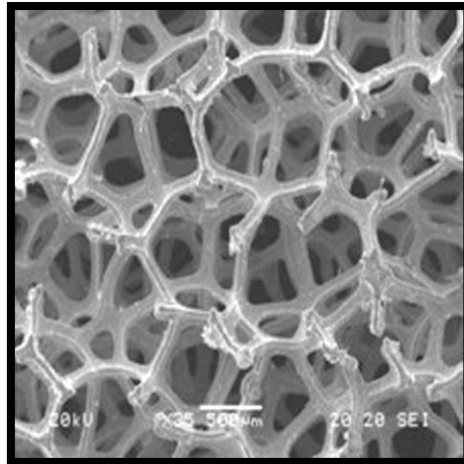
۵-۱ فوم‌های مگنتورئولوژیکال

طبق توضیحات قبلی یکی از مشکلات سیال‌های مگنتورئولوژیکال، مسئله‌ی آب‌بندی و ته‌نشینی بود. به منظور رفع این مشکل ساخت فوم‌های مگنتورئولوژیکال مورد پژوهش قرار گرفت. این مواد از ترکیب فوم‌های اسفنجی^۱ همراه با سیال مگنتورئولوژیکال تشکیل می‌شوند. فوم اسفنجی باعث می‌شود سیال درون حفره‌های آن قرار بگیرد و در یک ناحیه دچار ته‌نشینی نشود، همچنین اسفنج، خود مانند آب‌بند عمل می‌کند و هزینه آب‌بندی و مشکلات آن را برطرف می‌سازد [۲۵]. کارلسون^۲ [۲۶] ایده استفاده از اسفنج درون دمپر را مطرح کرد. به منظور مطمئن شدن از وجود مقدار کافی سیال مگنتورئولوژیکال درون دمپر، ضخامت اسفنج باید زیاد باشد. این ضخامت زیاد باعث ایجاد مشکلاتی از جمله کم شدن اثر میدان مغناطیسی و عدم دوام اسفنج تحت تنش‌های برشی بالا می‌گردد. به این منظور از اسفنج‌های

^۱ Sponge

^۲ Carlson

فلزی مانند آهن، نیکل و مس به عنوان نگهدارنده استفاده گردید که مشکلات قبلی را نداشت. در شکل ۶-۱ عکسی از فوم اسفنجی از جنس نیکل مشاهده می‌گردد.



شکل ۶-۱- عکس SEM از فوم اسفنجی [۲۵].

۶-۱ کاربرد مواد مگنتورئولوژیکال

۱-۶-۱ کاربرد سیال‌های مگنتورئولوژیکال

سیال‌های مگنتورئولوژیکال به علت داشتن توانایی در تغییر مقدار ویسکوزیته و تنش تسلیم، کاربرد فراوانی در بحث کنترل و تغییر میزان نیروها در وسایل مکانیکی دارند مانند کاهش و جذب ارتعاشات^۱، کنترل ماشین، جاذب شوک^۲، ترمز هوشمند^۳، کلاچ هوشمند^۴، سیستم تعلیق^۵، میرایی سازه و موارد دیگر [۲۷-۳۰]. شرکت لرد^۶ در دهه ۹۰ میلادی، اولین شرکتی بود که به طور صنعتی اقدام به ساخت میراگرهای مگنتورئولوژیکال نمود و اختراعات مختلفی در زمینه سیال مگنتورئولوژیکال به ثبت رسانید [۳۱-۳۳].

شکل ۷-۱ ساختار داخلی میراگر مگنتورئولوژیکال ساخته شده توسط شرکت لرد را نشان می‌دهد.

^۱ Absorb vibrations

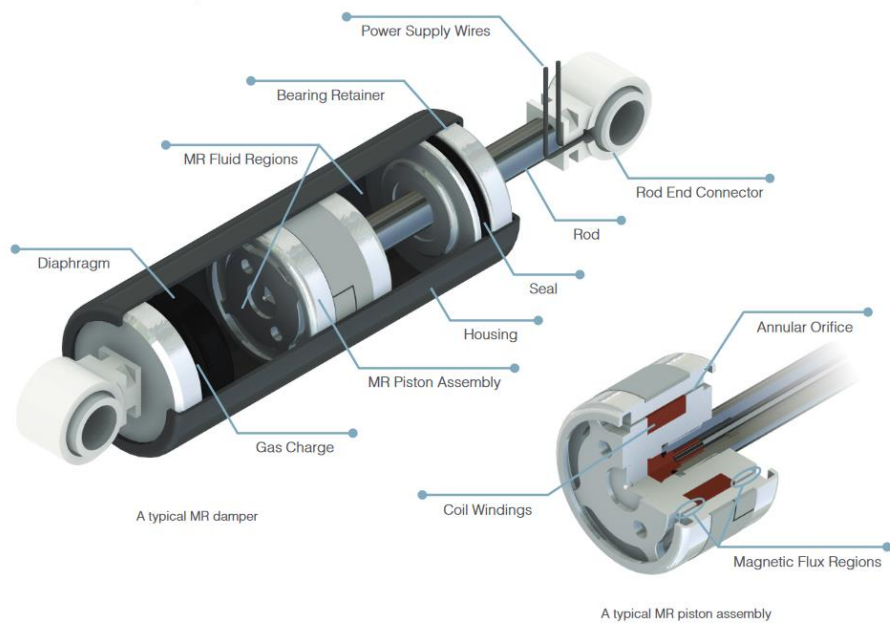
^۲ Shock absorber

^۳ Smart brake

^۴ Smart clutch

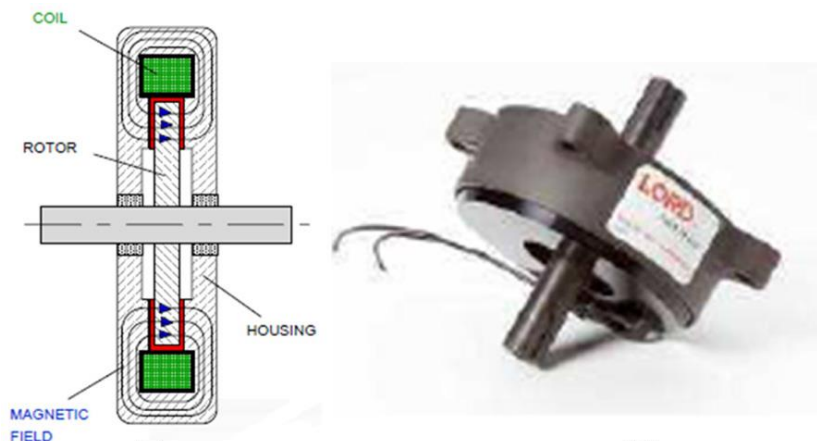
^۵ Suspension system

^۶ Lord



شکل ۷-۱- ساختار داخلی میراگر مگنتورئولوژیکال ساخته شده توسط شرکت لرد [۳۱].

شکل ۸-۱ ساختار داخلی و نمونه تولیدی ترمز مگنتورئولوژیکال را نشان می‌دهد.



شکل ۸-۱- ساختار داخلی و نمونه‌ی تولید شده ترمز هوشمند مگنتورئولوژیکال [۳۴].

شکل ۹-۱ نمونه‌ای از کاربرد میراگر مگنتورئولوژیکال در کنترل ارتعاشات سازه‌های عمرانی مانند

پل کابلی می‌باشد.



شکل ۹-۱- کاربرد میراگر مگنتورئولوژیکال در کنترل ارتعاشات پل سیتانگ^۱ در چین [۳۰].

۱-۶-۲ کاربرد الاستومرهای مگنتورئولوژیکال

الاستومرهای مگنتورئولوژیکال دارای توانایی در تغییر میزان میرایی و سفتی سیستم‌های مکانیکی می‌باشند. این توانایی باعث استفاده از این مواد در تجهیزات کنترلی الکترومکانیکی^۲ شده است. با استفاده از این مواد می‌توان ارتعاشات مکانیکی را کنترل و جذب نمود و یا خصوصیات ارتعاشی سیستم‌ها نظیر فرکانس‌های داخلی را متناسب با ورودی‌ها تغییر داد. تا به امروز استفاده از سیال‌های مگنتورئولوژیکال در صنعت سهم بالایی نسبت به الاستومرها داشته است، اما طی سالیان اخیر با توجه به مشکلات کمتر الاستومرها نظیر عدم ته‌نشینی و آب‌بندی استفاده از آنها رو به پیشرفت است. کاربرد این مواد موارد گوناگونی را شامل می‌شود، مانند جاذب ارتعاش قابل تنظیم، پایه ایزوله کننده ارتعاشی^۳، دسته موتور هوشمند، سیستم تعلیق هوشمند وسایل نقلیه، بوش هوشمند^۴، شیرهای هوشمند، وسایل پزشکی و موارد بسیار دیگر [۳۵-۴۴].

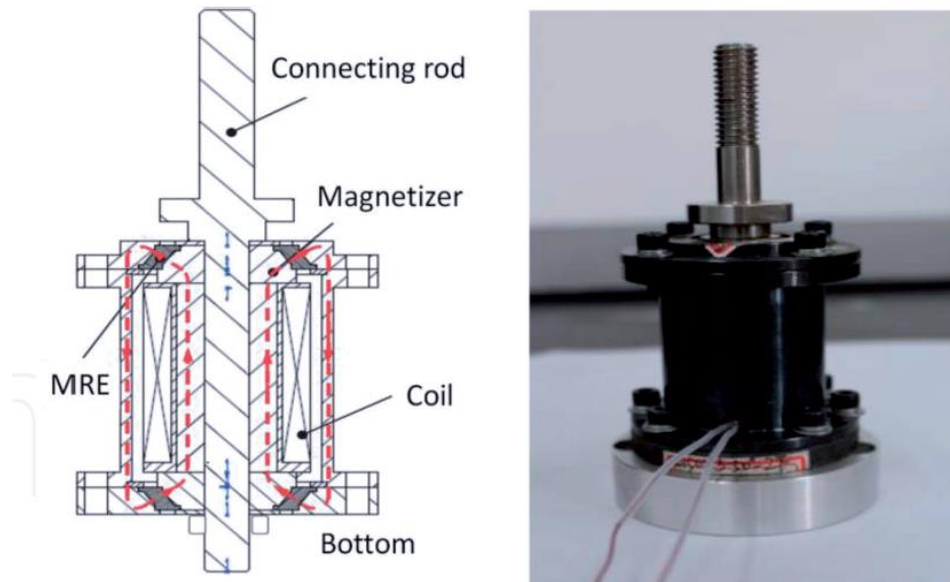
^۱ Sutong bridge

^۲ Electromechanical

^۳ Vibrating isolator base

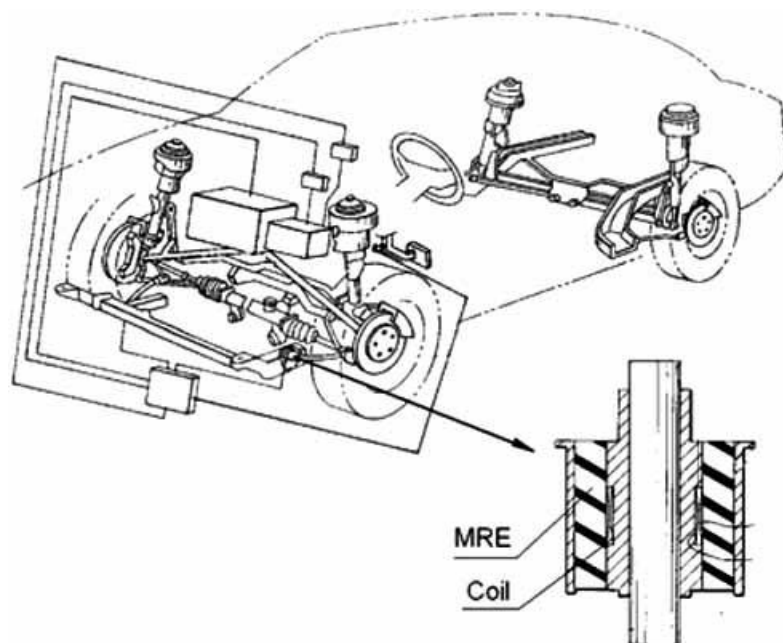
^۴ Smart bush

در شکل ۱۰-۱ نمونه‌ای از ایزولاتور هوشمند که با استفاده از MRE ساخته شده است نشان داده شده است.

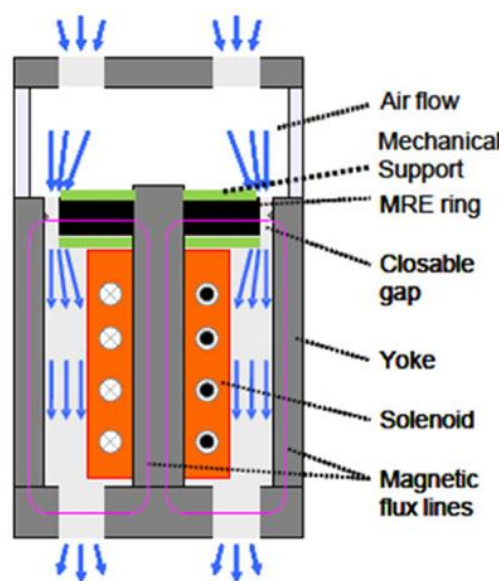


شکل ۱۰-۱- ایزولاتور هوشمند ساخته شده از MRE [۴۵].

در شکل ۱۱-۱ استفاده از MRE به عنوان بوش هوشمند در خودرو و در شکل ۱۲-۱ ساختار درونی شیر هوشمند MRE به منظور تنظیم خروجی هوا نشان داده شده است.



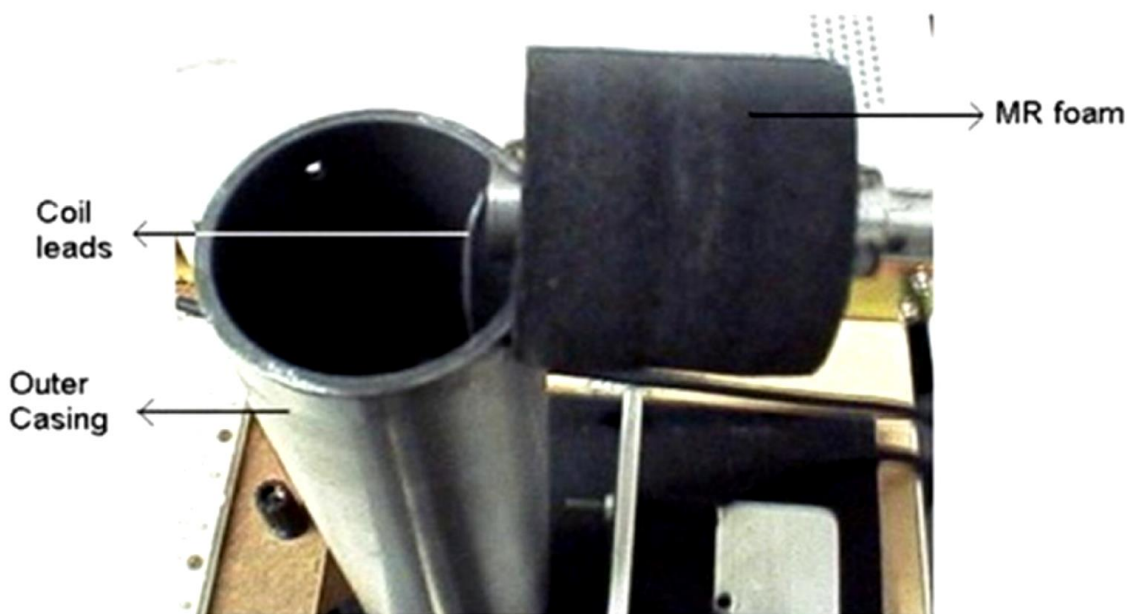
شکل ۱-۱۱- بوش هوشمند MRE استفاده شده در خودرو [۴۶].



شکل ۱-۱۲- ساختار شیر هوشمند MRE به منظور تنظیم خروجی هوا [۳۴].

۱-۶-۳ کاربرد فوم‌های مگنتورئولوژیکال

فوم‌های مگنتورئولوژیکال همانند MRE ها و MRF ها به علت قابلیت تنظیم خصوصیات ارتعاشی در مواردی که نیاز به کنترل ارتعاشات و نیرو می‌باشد استفاده می‌گردند. از این مواد در سیستم‌هایی که نیاز به نیروی کم و متوسط می‌باشد استفاده می‌شود. عمر این تجهیزات نسبت به MRF ها بسیار بیشتر می‌باشد. از کاربرد آن‌ها می‌توان به مواردی اشاره نمود: دمپر هوشمند، جاذب آکوستیک^۱، ترمز هوشمند [۳۴]. در شکل ۱-۱۳ نمونه ای از یک دمپر ساخته شده با استفاده از فوم مگنتورئولوژیکال نشان داده شده است.



شکل ۱-۱۳- دمپر هوشمند ساخته شده به وسیله فوم مگنتورئولوژیکال [۴۷].

^۱ Acoustic absorbent

۷-۱ پیشینه‌ی پژوهش

اثر مگنتورئولوژیکال^۱ (MR Effect) اولین بار توسط رابینو^۲ [۷] در دهه‌ی ۵۰ میلادی با مطالعه بر روی کلاچ مگنتورئولوژیکال ارائه شد. سپس کارها و مطالعات اولیه در سال ۱۹۹۵ توسط شیگا^۳ و همکاران [۸] بر روی الاستومرهای حساس به میدان مغناطیسی صورت گرفت. در ادامه تحقیقات بر روی ویژگی‌های فیزیکی MRE ها و عوامل موثر بر آنها مانند نوع و میزان مواد سازنده، نحوه‌ی اعمال کرنش ورودی و شرایط محیطی صورت پذیرفت.

در ابتدا می‌توان در پژوهش‌های صورت گرفته رابطه‌ی بین رفتار ماده و عواملی مثل فرکانس^۴، میدان مغناطیسی و کرنش را به صورت آزمایشگاهی مشاهده نمود.

شیگا و همکاران [۸] دریافتند وقتی دامنه‌ی کرنش فراتر از ۱ درصد رود، مدول ذخیره برشی^۵ شروع به کاهش می‌کند. ژولی^۶ و همکاران [۴۸] با طراحی تست آزمایشگاهی برشی، مدول برشی مختلط^۷ را در حالت‌های مختلفی از فرکانس ورودی، دامنه‌ی کرنش و شدت میدان مغناطیسی، برای نوعی از الاستومر ناهمسان‌گرد اندازه‌گیری کردند. بلوم^۸ و همکاران [۴۹] با انجام آزمایش‌های حالت برشی در فرکانس‌های بالا گزارش نمودند که با افزایش چگالی شار مغناطیسی مدول ذخیره افزایش پیدا خواهد کرد و مدول اتلاف^۹ کاهش پیدا خواهد کرد. زو^{۱۰} و همکاران [۵۰] نیز در پژوهشی مانند بلوم و همکاران، افزایش مدول ذخیره و کاهش مدول اتلاف را گزارش نمودند. لوکاندر^{۱۱} و همکاران [۵۱] نشان دادند نمونه‌ی MRE از جنس نیتریل^{۱۲} با قرار گرفتن در میدان مغناطیسی، با افزایش مدول ذخیره برشی به میزان ۲۵ درصد همراه خواهد بود. زو و همکاران نیز در پژوهشی دیگر بر روی MRE از جنس

¹ Magnetorheological effect

² Rabinow

³ Shiga

⁴ Frequency

⁵ Storage shear modulus

⁶ Jolly

⁷ Complex shear modulus

⁸ Blom

⁹ Loss modulus

¹⁰ Zhu

¹¹ Lokander

¹² Nitrile

پلی اورتان^۱ و در دو نوع همسان‌گرد و ناهمسان‌گرد گزارش نمودند که با افزایش میدان مغناطیسی، مدول ذخیره‌ی برشی در نمونه‌ی همسان‌گرد به میزان ۱۱۲۵ درصد و در نمونه‌ی ناهمسان‌گرد به میزان ۵۳۲ درصد افزایش پیدا خواهد کرد و مدول اتلاف برشی نیز در هر دو نمونه به طور قابل توجهی کاهش پیدا خواهد نمود. ضخامت نمونه‌ها در این پژوهش ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. جو^۲ و همکاران [۵۲] با آزمایش بر روی MRE سلیکونی، افزایش ۱۷۰ درصدی سختی در میدان ۶۰۰ میلی تسلا را ثبت کردند و عدم تاثیر پذیری عامل اتلاف را گزارش نمودند. پاپ^۳ و همکاران [۵۳] در پژوهشی موفق شدند با استفاده از MRE، فرکانس طبیعی یک جاذب ارتعاش فعال را در حالت برشی ۳۷ هرتز و در حالت فشاری ۲۸ هرتز افزایش دادند و نشان دادند اثر میدان مغناطیسی در حالت برشی، بیشتر می‌باشد. درگاهی و همکاران [۵۴] گزارش نمودند که در میدان مغناطیسی ۴۵۰ میلی تسلا، کرنش ۲/۵ درصد و فرکانس ۰/۱ هرتز، مدول ذخیره‌ی برشی ۱۶۷۲ درصد افزایش پیدا خواهد کرد در صورتیکه در کرنش ۲۰ درصد و فرکانس ۵۰ هرتز مدول ذخیره برشی ۲۵۲ درصد افزایش پیدا خواهد نمود. تاو^۴ و همکاران [۵۵] با ساخت یک جاذب ارتعاش توسط MRE ناهمسان‌گرد توانستند مدول ذخیره را ۶۶/۵۷ درصد و مدول اتلاف را ۴۵/۵۵ درصد افزایش بدهند. این جاذب ارتعاش در حالت ترکیبی کرنش برشی و کشش- فشار^۵ عمل می‌کند و توانایی افزایش فرکانس تشدید به میزان ۲۶/۳۶ درصد را دارا می‌باشد. ندجار^۶ و همکاران [۵۶] نمونه‌های MRE از جنس سیلیکون و حاوی درصدهای مختلف از ذرات مغناطیس شونده ساخته و در فرکانس‌های بالا مورد آزمایش قرار دادند. آن‌ها گزارش نمودند که با افزایش فرکانس به ۱۸۰ هرتز در نمونه‌هایی شامل ۲۵ درصد و ۴۰ درصد مواد مغناطیس شونده، مدول ذخیره‌ی برشی به ترتیب ۱۱۰ درصد و ۲۱۴ درصد افزایش پیدا کرده است و مدول اتلاف نیز به ترتیب ۷۰ درصد و ۳۱ درصد افزایش پیدا کرده است. یارا^۷ و همکاران [۵۷] در پژوهشی نشان دادند که در

¹ Polyurethane

² Ju

³ Popp

⁴ Tao

⁵ Tension Compression

⁶ Nedjar

⁷ Yarra

صورت اعمال نیروی فشاری همزمان با اعمال کرنش برشی به نمونه‌ی MRE در مقایسه با عدم وجود نیروی فشاری، اثر میدان مغناطیسی در مدول ذخیره از ۳۲ درصد به ۹۲ درصد در کرنش ۱۰ درصد افزایش پیدا خواهد کرد. عامل این پدیده نزدیک‌تر شدن ذرات مغناطیس شونده به یکدیگر می‌باشد. در تحقیقاتی دیگر، مطالعات و آزمایش‌ها در حالت کشش- فشار انجام گرفته است که در ادامه به آن‌ها اشاره شده است.

فرشاد و بنین^۱ [۵۸] نمونه‌هایی از دو نوع همسان‌گرد و ناهمسان‌گرد MRE بر پایه‌ی لاستیک سیلیکون را تحت بارهای کششی- فشاری و در حضور و همچنین عدم حضور میدان مغناطیسی، تست کرده‌اند و گزارش نموده‌اند که سختی نمونه‌ها از هر دو نوع همسان‌گرد و ناهمسان‌گرد با اعمال میدان مغناطیسی افزایش یافته است. لرنر^۲ و همکاران [۵۹] با ساخت یک جاذب ارتعاش فعال توسط MRE، توانستند فرکانس طبیعی سیستم را ۵۰۷ درصد افزایش دهند. این افزایش در دو حالت فشار و کشش ایجاد شده است. آن‌ها گزارش نمودند در حالت کشش، اشباع مغناطیسی^۳ دیده شده است، در صورتیکه در حالت فشار اشباع دیده نشده است و امکان ایجاد تغییر بیشتر در فرکانس طبیعی سیستم، نسبت به حالت کششی وجود دارد. لیاو^۴ و همکاران [۶۰] رفتار MRE را تحت فشار و در فرکانس‌های بالا بررسی کرده و وابستگی خواص نمونه به مقدار فرکانس ورودی و شدت میدان مغناطیسی را نشان داده‌اند. همچنین گزارش کرده‌اند که با افزایش شدت میدان و چگالی شار^۵ مدول ذخیره و تنش تسلیم به طور قابل توجهی افزایش خواهند یافت. بلان و بویس^۶ [۶۱] آزمایشی در حالت کشش طراحی نموده و گزارش نمودند که مدول ذخیره‌ی کششی به میزان ۴ مگا پاسکال در حضور میدان مغناطیسی افزایش پیدا کرده است و با افزایش میزان کرنش، کاهش پیدا کرده است و مدول اتلاف نیز با افزایش چگالی میدان مغناطیسی به میزان ۳۷/۵ درصد افزایش پیدا کرده است و با افزایش کرنش، کاهش پیدا کرده

^۱ Benine

^۵ Flux density

^۲ Lerner

^۶ Bellan & Bossis

^۳ Magnetic saturation

^۴ Liao

است. کو^۱ و همکاران [۶۲] به آزمایش نمونه‌ی MRE شامل ۳۰ درصد وزنی پودر آهن کربونیل با اندازه‌ی ۱۰ میکرومتر در حالت فشاری پرداختند. طبق نتایج این آزمایش مقدار اثر مگنتورئولوژیکال با افزایش فرکانس از ۰/۱ هرتز تا ۱ هرتز، افزایش پیدا می‌کند و همچنین با افزایش میدان مغناطیسی اثر مگنتورئولوژیکال افزایش پیدا می‌کند؛ این افزایش تا میدان مغناطیسی با چگالی ۴۰۰ میلی تسلا به صورت خطی می‌باشد و برای ۴۰۰ میلی تسلا تا ۶۰۰ میلی تسلا به صورت نمایی می‌باشد. مقدار اثر مگنتورئولوژیکال در میدان ۶۰۰ میلی تسلا برابر با ۴۰ درصد گزارش شده است. شوبرت و هریسون^۲ [۶۳] در پژوهشی به بررسی اثر میدان مغناطیسی در حالت استاتیکی فشاری و برشی پرداخته‌اند. طبق نتایج، اثر میدان مغناطیسی در مدول ذخیره برای نمونه‌ی همسان‌گرد در حالت فشاری بیشتر از حالت برشی می‌باشد و در نمونه‌ی ناهمسان‌گرد در حالت برشی بیشتر می‌باشد. اثر میدان مغناطیسی با افزایش کرنش ورودی در هر دو حالت کاهش پیدا می‌کند. در پژوهشی مشابه لی و سان^۳ [۶۴] نشان داده‌اند اثر میدان مغناطیسی در مدول ذخیره، در حالت دینامیکی فشاری بیشتر از حالت برشی می‌باشد و با افزایش کرنش ورودی کاهش پیدا خواهد کرد. یانگ^۴ و همکاران [۶۵] با ساخت یک جاذب ارتعاش در حالت ترکیبی فشاری و برشی به بررسی این نوع بارگذاری پرداختند. طبق گزارش آن‌ها با افزایش چگالی میدان مغناطیسی به ۵۰۰ میلی تسلا، فرکانس طبیعی سیستم ۱۰۳ درصد، مدول ذخیره ۳۲۹/۶۳ درصد و مدول اتلاف ۱۸۰/۳۱ درصد افزایش پیدا نموده‌اند و مقدار بیشینه‌ی دامنه در حالت تشدید کاهش پیدا کرده است. اولابید^۵ و همکاران [۶۶] در پژوهش خود از فرکانس بالا در حالت کشش-فشار استفاده نمودند. طبق نتایج بدست آمده میزان مدول ذخیره فشاری در میدان مغناطیسی ۸۵ میلی تسلا در فرکانس‌های ۵۰ و ۲۰۰ هرتز به میزان ۲۰ درصد افزایش پیدا کرده است. اسپونا^۶ و همکاران [۶۷] به بررسی خواص دینامیکی نمونه‌ی MRE که ترکیبی از نوع همسان‌گرد و ناهمسان‌گرد

¹ Koo

² Schubert & Harrison

³ Li & Sun

⁴ Yang

⁵ Olabide

⁶ Sapouna

می‌باشد پرداختند. نمونه‌ها به صورت موازی و سری ساخته شدند و اثر مگنتورئولوژیکال در میدان ۵۰۰ میلی تسلا به ترتیب از ۳۱ درصد و ۲۱ درصد به ۲۷ درصد و ۲۸ درصد تغییر نمود. همچنین در این پژوهش توانستند یک نمونه‌ی جدید شامل دو قسمت ناهمسان‌گرد در جهات مختلف را مورد آزمایش قرار بدهند. طبق گزارش آن‌ها در این حالت اثر مگنتورئولوژیکال ۱۰ درصد افزایش پیدا کرد. وطن دوست و همکاران [۶۸] در مطالعات خود به بررسی MRE های همسان‌گرد و ناهمسان‌گرد در حالت کشش-فشار و در معرض پیش‌بار^۱ ۲۱ درصدی پرداختند. طبق نتایج بدست آمده از آزمایش‌های انجام گرفته، بیشترین افزایش مدول ذخیره برای نمونه‌های همسان‌گرد و ناهمسان‌گرد به ترتیب ۳۴۰/۴۷ درصد و ۲۰۶/۴۷ درصد می‌باشد که در چگالی شار ۷۵۰ میلی تسلا، دامنه کرنش ۲/۵ درصد و فرکانس ۱۰ و ۳۰ هرتز به ترتیب، بدست آمده است. همچنین بیشترین افزایش مدول اتلاف برای نمونه‌های همسان‌گرد و ناهمسان‌گرد به ترتیب ۱۸۸/۳۲ درصد و ۲۱۶/۲۴ درصد می‌باشد که در چگالی شار ۷۵۰ میلی تسلا، دامنه کرنش ۲۰ درصد و فرکانس ۰/۱ هرتز، بدست آمده است.

در موارد دیگری می‌توان پژوهش‌های صورت گرفته مبتنی بر اثرات نوع جنس و اندازه‌ی ذرات مغناطیس شونده و جنس ماتریس به کار رفته، بر خواص مکانیکی مواد MRE را مورد بررسی قرار داد. در رابطه با جنس ماده‌ی ماتریس، به طور معمول استفاده از لاستیک طبیعی باعث بهبود خواص مکانیکی و اثر مگنتورئولوژیکال نسبت به بعضی از لاستیک‌های دیگر می‌شود. ژانگ^۲ و همکاران [۶۹] در تحقیقات خود این موضوع را مورد آزمایش قرار دادند و گزارش نمودند، خواص مکانیکی و اثر مگنتورئولوژیکال در MRE های از جنس لاستیک طبیعی بهتر از نمونه‌های از جنس بوتادین^۳ می‌باشد. زو و همکاران [۷۰] نشان دادند اثر مگنتورئولوژیکال در نمونه‌هایی از جنس لاستیک طبیعی بیشتر از نمونه‌هایی از جنس بروموتیل^۴ می‌باشد، اما توانایی اتلاف انرژی در لاستیک طبیعی کمتر می‌باشد. در

^۱ Preload

^۴ Bromobutyl

^۲ Zhang

^۳ Butadine

تحقیقات دیگری نشان داده شده است که استفاده از الاستومری که به نسبت نرم‌تر باشد باعث بهبود اثر مگنتورئولوژیکال می‌شود، مانند لاستیک پلی‌اورتان^۱. دلیل این امر نیز وجود اصطکاک کمتر بین ذرات مغناطیس‌شونده و ماتریس می‌باشد که باعث سهولت در حرکت این مواد درون ماتریس می‌گردد [۷۱ و ۷۲]. یکی از الاستومرهای پرکار، لاستیک سیلیکون می‌باشد. این الاستومر دارای پایداری شیمیایی و دمایی مناسب می‌باشد و نسبت به لاستیک طبیعی و بعضی دیگر از لاستیک‌های دیگر دارای خواص مکانیکی ضعیف‌تر و اثر مگنتورئولوژیکال کم‌تر می‌باشد اما نسبت به آن‌ها روش ساخت آسان‌تر و ایمن‌تری دارد به نحوی که ساخت آن نیاز به دما و فشار بالا ندارد. ندجار و همکاران [۷۳] در کار خود از الاستومر سیلیکونی استفاده نمودند و خواص مکانیکی مناسب و ویسکوزیته‌ی پایین آن در هنگام پراکنده شدن ذرات مغناطیسی را گزارش نمودند.

در رابطه با نوع و اندازه‌ی ذرات مغناطیس‌شونده نیز پژوهش‌های زیادی صورت گرفته است. طبق برخی پژوهش‌ها استفاده از پودر آهن کربونیل دارای اثر مگنتورئولوژیکال بالاتری نسبت به دیگر پودرهای مغناطیس‌شونده دارد. پدالکا^۲ و همکاران [۷۴] این نتیجه را در مقایسه‌ی با پودر نیکل و کوبالت^۳ بدست آوردند. همچنین اندرسون^۴ و همکاران [۷۵] هگزا فريت باریوم^۵ را با آهن کربونیل مقایسه نموده و استفاده از آهن کربونیل را در ساخت MRE پیشنهاد نمودند. کن^۶ و همکاران [۷۶] گزارش نمودند، استفاده از ذرات آهن کربونیل پوشش داده شده در MRE، باعث افزایش اثر مگنتورئولوژیکال می‌گردد. همچنین خواص مکانیکی از جمله مدول ذخیره کششی، مدول اتلاف و پدیده‌ی کرنش سخت شوندگی، افزایش پیدا می‌کند که دلیل آن افزایش انرژی پیوند بین ذرات مغناطیس‌شونده و ماتریس الاستومری می‌باشد. شی^۷ و همکاران [۷۷] در آزمایش خود از ذرات مغناطیس‌شونده‌ی آهن سیلیکون^۸

¹ Polyurethane

⁶ Kwon

² Padalka

⁷ Shi

³ Nickel and cobalt

⁸ Silicone iron

⁴ Anderson

⁵ Barium hexaferrite

استفاده نمودند. طبق نتایج در نمونه‌هایی با ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درصد وزنی از ذرات، اثر مگنتورئولوژیکال به ترتیب ۲۷/۴۹، ۳۶/۹۷ و ۴۲/۲۸ درصد می‌باشد. در این نمونه از MRE مدول ذخیره و مدول اتلاف با افزایش فرکانس ورودی افزایش یافته است و با افزایش دامن‌های کرنش ورودی، مدول ذخیره کاهش و مدول اتلاف افزایش پیدا کرده است. در قسمت دیگر از این پژوهش، میزان پایداری اکسیداسیون^۱ ذرات آهن سیلیکون در مقایسه با آهن کربونیل مورد آزمایش قرار گرفته است که طبق آن پایداری نمونه شامل ذرات آهن سیلیکون بیشتر بوده است.

طبق پژوهش‌های صورت گرفته، مقدار مناسب ذرات مغناطیس‌شونده جهت دستیابی به اثر مگنتورئولوژیکال مناسب در MRE ها، ۷۰ درصد وزنی و یا ۳۰ درصد حجمی گزارش شده است [۷۸]. هرناندز^۲ و همکاران [۷۹] نمونه‌های مختلفی از MRE با درصد وزنی‌های ۲۰ تا ۷۰ درصد از جنس آهن کربونیل را مورد آزمایش قرار دادند. طبق نتایج آن‌ها میزان اثر مگنتورئولوژیکال با افزایش مقدار ذرات مغناطیس‌شونده افزایش پیدا خواهد کرد که بیشترین مقدار آن در ۷۰ درصد وزنی بوده است. بوز و رودر^۳ [۸۰] در کار خود از ذرات ۴۰ میکرومتر و ۵ میکرومتر در نمونه‌های MRE استفاده نمودند. طبق نتایج، با افزایش سایز ذرات، اثر مگنتورئولوژیکال نیز افزایش می‌یابد و با کاهش سایز ذرات مدول ذخیره و اتلاف افزایش خواهند یافت. در پژوهشی دیگر گان^۴ و همکاران [۸۱] نمونه‌های MRE را از ذرات آهن کربونیل با اندازه‌های ۵۰۰ نانو متر، ۳ میکرومتر و ۲۰ میکرومتر ساخته و مورد آزمایش قرار دادند و مقدار اثر مگنتورئولوژیکال در آن‌ها به ترتیب ۲۲۸/۱۵ درصد، ۱۳۴/۵۷ درصد و ۲۰۳/۵ درصد گزارش شده است. مقدار بیشینه‌ی مدول ذخیره و اتلاف، در نمونه با سایز ۳ میکرومتر گزارش شده است.

عامل دما نیز توسط ژانگ^۵ و همکاران [۸۲] مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها دریافتند با افزایش دما مدول‌های ذخیره و اتلاف در MRE های ساخته شده از لاستیک طبیعی کاهش می‌یابد و در نوع ساخته شده از لاستیک

¹ Oxidation stability

⁴ Gan

² Hernandez

⁵ Zhang

³ Bose & Roder

پولی-بوتادین^۱ مدول ذخیره تا دمای ۵۰ درجه سانتی گراد کاهش می‌یابد و سپس با بالا رفتن دما، افزایش می‌یابد. مدول اتلاف نیز مانند لاستیک طبیعی به صورت پیوسته کاهش می‌یابد. وان^۲ و همکاران [۸۳] در پژوهش خود عامل دما را برای نمونه‌ی MRE غیرهمسان‌گرد مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج آن‌ها با افزایش دما مقدار مدول ذخیره فشاری کاهش پیدا خواهد نمود. این افزایش تا دمای ۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد وجود دارد و در آن دما مدول ذخیره فشاری افزایش پیدا می‌کند. علت این پدیده نرم شدن ماتریس سیلیکونی بیان شده است. نرم شدن ماتریس باعث افزایش نیروی مغناطیسی بین ذرات مغناطیسی می‌شود که در نهایت باعث افزایش مدول ذخیره و سفتی می‌گردد. در پژوهشی مشابه یونس و همکاران [۸۴] نیز کاهش و سپس افزایش مدول ذخیره برشی را گزارش نمودند، اما دمای گذار آن‌ها ۴۵ درجه‌ی سانتی‌گراد اعلام شده است.

از موارد دیگر که در خواص رئولوژیکال مواد MRE موثر می‌باشد، پیش‌بار گذاری می‌باشد. طبق نتایج بدست آمده از برخی پژوهش‌ها، با افزایش پیش‌بار گذاری سختی و اتلاف نیرو در ماده‌ی MRE افزایش پیدا می‌کند [۸۵]. فنگ^۳ و همکاران [۸۶] نشان دادند با افزایش پیش‌بار مدول ذخیره و مدول اتلاف افزایش پیدا خواهند نمود اما در پیش‌بار با مقدار بزرگ شروع به کاهش می‌نمایند. بستولا و لی^۴ [۸۷] در پژوهشی نشان دادند افزایش پیش‌بار و چگالی شار مغناطیسی باعث افزایش سفتی و اتلاف انرژی می‌شود و اثر پیش‌بار در حضور میدان مغناطیسی کمتر از زمان عدم حضور میدان مغناطیسی می‌باشد.

به منظور مدل سازی، دو رویکرد وجود دارد: ۱- میکروسکوپی^۵ ۲- ماکروسکوپی^۶. در دیدگاه میکروسکوپی با استفاده از محیط پیوسته^۷ و مدل‌های دو قطبی^۸، مواد مدل می‌شوند [۸۸-۹۲]. در

^۱ Poly-Butadiene Rubber (BR)

^۲ Wan

^۳ Feng

^۴ Bastola & Li

^۵ Microscopic

^۶ Macroscopic

^۷ Continuum

^۸ Bipolar model

رویکرد ماکروسکوپی مبنا بر اساس رابطه‌ی بین تنش و کرنش یا نیرو و جابجایی در حالت‌های برشی و کششی - فشاری می‌باشد که نسبت به میکروسکوپی دارای کاربرد بیشتری می‌باشد و تحقیق حاضر نیز بر این رویکرد استوار می‌باشد. در ابتدا MRE ها به صورت ویسکوالاستیک خطی در نظر گرفته شدند. چن^۱ و جرامز^۲ [۹۲] در پژوهش خود یک مدل رئولوژیکال پیشنهاد کردند. در این مدل، ویسکوالاستیسیته توسط بخش جامد استاندارد خطی که شامل دو المان فنری و یک المان استهلاکی است مدل می‌شود. سختی وابسته به میدان توسط یک المان فنری با سختی متغیر مدل خواهد شد. لغزش بین ماتریس و ذرات هم توسط یک فنر و کشوی اصطکاکی توضیح داده می‌شود. اما رابطه‌ی تنش و کرنش خطی نیست و باید اثر هیستریزیس^۳ نیز در مدل‌ها لحاظ شود که در کرنش‌های بالا این اثر بیشتر خود را نشان می‌دهد. در ابتدا مدل بوک-ون^۴ به عنوان یک مدل هیستریزیس کلاسیک ارائه شد [۹۴ و ۹۵]. یانگ و همکاران [۹۵] مدلی با استفاده از مدل بوک-ون معرفی کردند و اثر پارامترهای مختلف مدل بر شکل منحنی هیستریزیس را توضیح دادند. بهروز و همکاران [۹۶] نیز مدلی با اضافه کردن یک مدل جامد استاندارد سه جزئی به طور موازی به مدل بوک-ون ارائه کردند. در تحقیقی دیگر، لی و همکاران [۹۷] یک مدل کرنش سخت شونده^۵ برای ایزولاتورهای MRE ارائه کردند. نوروزی و همکاران [۹۸] با استفاده از تست‌های تجربی و پیشنهاد مدل کلین-ویت^۶ رابطه‌ی بین تنش و کرنش، مدول برشی و مدول اتلاف انرژی را بر اساس فرکانس، میدان مغناطیسی و درصد کرنش در حالت برشی و به وسیله‌ی پارامترهای ثابت بدست آوردند. نام^۷ و همکاران [۹۹] با استفاده از یک مدل چهار جزئی شامل بخش مشتق کسری^۸، رفتار ماده‌ی MRE را در حالت برشی مدل نمودند. در پژوهشی دیگر نوروزی و همکاران [۱۰۰] با استفاده از مدل ماکسول تعمیم یافته، توانستند مدلی برای حالت کش-

^۱ Chen

^۲ Jerrams

^۳ Hysteresis effect

^۴ Bouc-Wen

^۵ Hardening strain

^۶ Kelvin-Voigt

^۷ Nam

^۸ Fractional Derivative

فشار ارائه نمایند. این مدل شامل فنر و میراگر خطی می‌باشد و در کرنش‌هایی کمتر از ۸ درصد محاسبه شده است. در این مقدار از کرنش، رفتار MRE به صورت خطی در نظر گرفته شده است و نمودار تنش کرنش به صورت بیضی متقارن می‌باشد. وطن دوست و همکاران [۱۰۱] مدلی شامل فنر و میراگر غیر خطی^۱ و جزء هیستریزیس به صورت موازی در حالت کشش- فشار ارائه کردند که با توجه به تست‌های انجام شده تطابق خوبی را با داده‌های آزمایشگاهی نشان دادند. در مدل ارائه شده وابستگی مدول‌های ذخیره و اتلاف و هیستریزیس به فرکانس، میدان مغناطیسی و میزان کرنش با استفاده از ۱۰ پارامتر ثابت به خوبی ارائه شده است. لنگ^۲ و همکاران [۱۰۲] در پژوهش خود، یک جاذب ارتعاش از جنس MRE ساخته و رفتار آن را در حالت کشش فشار مدل نمودند. در مدل ارائه شده از ترکیب مدل کلونین به همراه قسمت هیستریزیس و اصطکاک داخلی استفاده شده است. پس از مدل سازی، با استفاده از کنترلر فازی^۳، جاذب مورد آزمایش قرار گرفته و کاهش حدود ۳۸ درصدی شتاب را حاصل نموده است که نشان از مدل سازی مناسب می‌باشد.

با بررسی پژوهش‌هایی که در زمینه الاستومرهای مگنتورئولوژیکال صورت گرفته است، کمبودهایی در این زمینه مشخص می‌گردد که لازم است در آینده توسط محققین برطرف گردد. از مواردی که می‌توان به آن اشاره نمود، پایین بودن و یا عدم وجود: ۱. آزمایش‌هایی در حالت دینامیکی کشش فشاری نسبت به حالت برشی^۲. پژوهش‌هایی که در آن تمام عوامل به صورت همزمان مورد آزمایش قرار بگیرند و تاثیر عوامل بر یکدیگر مشخص گردد^۳. پژوهش‌هایی در رابطه با شیوهی پخت و تاثیر آن بر خواص ماده.

۸-۱ چالش‌های فناوری الاستومر مگنتورئولوژیکال

استفاده از مواد هوشمند در تجهیزات مکانیکی همواره با چالش‌هایی همراه بوده است و به همین علت به طور پیوسته مواد جدیدی ارائه می‌گردند که چالش‌های موجود را برطرف سازند. به طور مثال به علت وجود ته‌نشینی در MRF ها، مواد MRE جایگزین مناسبی به منظور رفع این مسئله می‌باشند. اما

¹ Nonlinear

³ Fuzzy controller

² Leng

هر موادی خود بدون چالش نمی‌باشد، مانند کم بودن نیروی ایجاد شده توسط MRE ها، در صورتی که دمپرهای MRF دارای نیروی بالایی می‌باشند. به همین منظور باید محققان به طور پیوسته راه‌کارهایی برای به حداقل رساندن این چالش‌ها ارائه نمایند. در ادامه به مشکلات موجود در استفاده از MRE ها اشاره می‌شود که باید برای رفع آن‌ها پژوهش‌های جدیدی صورت پذیرد.

یکی از موارد موجود نبود تحقیقات بر روی نحوه پاسخ MRE ها به بارگذاری‌های ترکیبی می‌باشد. تا به امروز تحقیقات بر روی بارگذاری‌های برشی و فشاری انجام شده است، اما ترکیب آن‌ها ناکافی می‌باشد و با توجه به این که در کاربردهای عملی بارگذاری ترکیبی بر مواد اعمال می‌شود باید پژوهش در این زمینه بیشتر انجام گردد. دومین مشکل، استفاده از انرژی بالا به منظور تامین برق سیم پیچ‌ها^۱ برای ایجاد میدان مغناطیسی قوی که با شناسایی خصوصیات مغناطیسی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال می‌توان کنترل بر میدان و میزان آن را بهبود بخشید. سومین چالش در این مواد نبود مدل‌های جامع به منظور پیش‌بینی رفتار آن‌ها در شرایط گوناگون محیطی و ورودی‌های مختلف می‌باشد که به منظور طراحی بهتر کنترلرها، این مدل‌ها لازم می‌باشند [۱۰۳].

۹-۱ معرفی تحقیق حاضر

در این تحقیق به بررسی تجربی رفتار الاستومر مگنتورئولوژیکال تحت شرایط گوناگون فرکانس، کرنش، میدان مغناطیسی و عامل شکل پرداخته خواهد شد و در انتها یک مدل دینامیکی جامع ارائه خواهد گردید.

در ادامه در ابتدا به معرفی عامل شکل^۲ پرداخته خواهد شد و سپس مقادیر ورودی‌ها گزارش می‌گردد.

۹-۱-۱ عامل شکل (shape factor)

عامل شکل و یا Shape factor در واقع عاملی می‌باشد که به ابعاد و هندسه‌ی جسم بستگی دارد و مقدار آن برابر است با: مساحت قسمتی که به آن نیرو وارد می‌شود بر مساحت قسمتی که آزاد است.

^۱ Coil

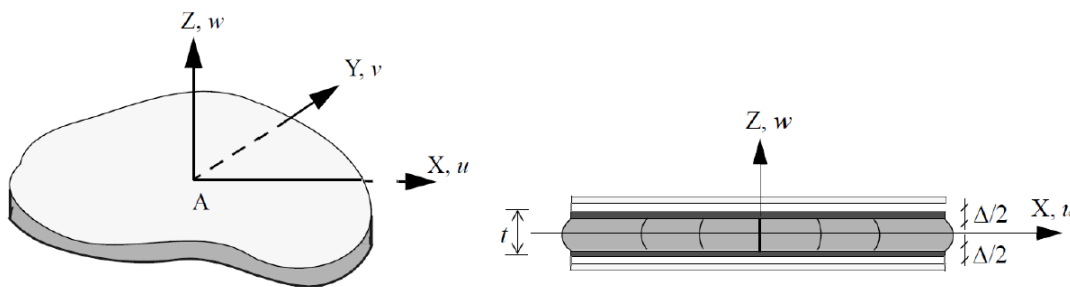
^۲ Shape factor

این عامل خود را با تغییر شکل در فشار نشان می دهد که ناشی از محدب شدن قسمت های آزاد می باشد. در شکل ۱۴-۱ نمونه ی MRE مشاهده می گردد که تحت فشار محوری، تغییر شکل محدب پیدا کرده است.



شکل ۱۴-۱- نمونه ی MRE تحت فشار محوری.

در شکل ۱۵-۱ شماتیک یک لایه الاستومر تحت فشار نرمال همراه با مختصات نشان داده شده است.



شکل ۱۵-۱- شماتیک لایه پلاستیک

مطابق با الاستیسیته ی سه بعدی رابطه ی تنش با کرنش در صورت صرف نظر از مدول بالک^۱ و تغییر حجم، معادله ی (۱-۱) می باشد.

$$\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} = 0 \quad (1-1)$$

^۱ Bulk module

مطابق با این فرمول مجموع کرنش های وارد شده به یک جسم در ناحیه‌ی الاستیک برابر با صفر است. بنابراین زمانی که به ناحیه‌ای از جسم نیرو وارد شود، ناحیه‌ای که تحت نیرو قرار ندارد دچار کرنش می‌شود. این خصوصیت را می‌توان با shape factor به یک جسم نسبت داد که برای اولین بار توسط کیز^۱ [۱۰۴] طبق معادله‌ی (۲-۱) معرفی گردید.

$$\text{shape factor} = \frac{\text{Load area}}{\text{force-free (bulge) area}} \quad (2-1)$$

زمانی که در ناحیه‌ی آزاد جسم، کرنش ایجاد می‌شود مقدار تنش در راستای اعمال نیرو کم می‌گردد. این کاهش تنش را طبق معادله‌ی (۳-۱) نیز می‌توان مشاهده نمود.

$$\sigma_{zz} = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} [(1 - \nu)\varepsilon_{zz} + \nu(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy})] \quad (3-1)$$

به علت مختلف بودن علامت کرنش‌ها با کرنش ε_{zz} ، مقدار تنش σ_{zz} کم می‌گردد. این کاهش تنش باعث کاهش مقدار مدول الاستیک^۲ می‌گردد. هر چه مقدار shape factor کوچکتر باشد مدول الاستیک متناظر با آن نیز کوچکتر می‌گردد و هر چه shape factor بزرگتر باشد مدول الاستیک نیز بزرگتر می‌شود زیرا میزان کرنش محیطی در این هندسه از جسم، نسبت به کرنش محوری کمتر می‌گردد. برای اولین بار هاتوری و تاکی^۳ [۱۰۵] رابطه‌ای به منظور ارتباط بین shape factor و مدول الاستیک موثر فشاری در نمونه‌ی استوانه‌ای لاستیکی ارائه نموده‌اند.

$$E_c = E(1 + 2S^2) \quad (4-1)$$

$$E = 3G \quad (5-1)$$

S در این معادله عامل شکل می‌باشد که برای سطح مقطع دایره‌ای برابر است با معادله‌ی (۶-۱):

¹ Keys

³ Hattori and Takei

² Elastic modulus

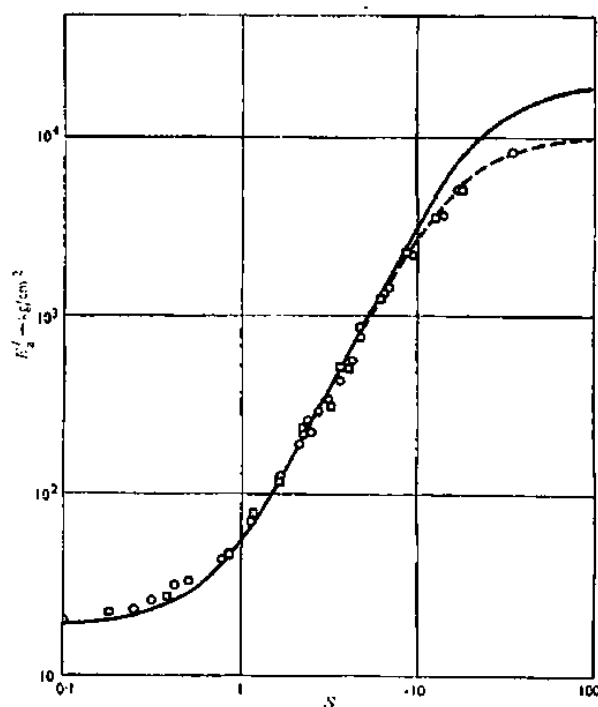
$$S = \frac{D}{4t} \quad (6-1)$$

D قطر سطح مقطع و t ضخامت نمونه می باشد.

جنت و لیندلی^۱ [۱۰۶] با انجام آزمایش های تجربی بر روی لاستیک ها، مطابقت خوبی بین معادله ی (۴-۱) و نتایج آزمایش بدست آوردند. آن ها همچنین نشان دادند در عامل شکل های بزرگ باید اثر مدول بالک را نیز در نظر گرفت و رابطه ی (۷-۱) را ارائه نمودند.

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{E_c} + \frac{1}{K} \quad (7-1)$$

در شکل ۱۵-۱ نمودار ارائه شده توسط جنت و لیندلی نشان داده شده است که در آن مقایسه بین نتایج تجربی و معادلات (۴-۱) و (۷-۱) صورت گرفته است.



شکل ۱۶-۱- نمودار مدول الاستیک فشاری موثر بر حسب عامل شکل به صورت لگاریتمی.
---- طبق معادله (۷-۱) و _____ طبق معادله (۴-۱)

^۱ Gent and Lindley

آن‌ها سپس مطابق رابطه‌ی (۸-۱) ارائه کردند که در آن مدول الاستیک به سختی ماده نیز مرتبط می‌باشد.

$$Ec = E (1 + 2kS) \quad (8-1)$$

K در این معادله مربوط به سختی ماده می‌باشد و به صورت تجربی به‌دست می‌آید (حدود ۱ تا ۲). دیویس^۱ [۱۰۶] در پژوهشی تأثیر عامل شکل بر لاستیک‌ها را تحت نیروی دینامیکی فشاری ارائه نمود. طبق نتایج او با افزایش عامل شکل، مدول الاستیک فشاری دینامیکی نیز افزایش پیدا می‌کند. در تحقیق دیگری توسط فدیک^۲ و همکاران بر روی الاستومرها در تست دینامیکی فشاری، افزایش مدول الاستیک با افزایش سختی و عامل شکل به‌دست آمد و داده‌های به‌دست آمده مطابقت خوبی با فرمول (۸-۱) نشان دادند [۱۰۷ و ۱۰۸].

گردانی‌نژاد و همکاران [۱۰۹] نشان دادند در حالت استاتیکی فشاری و برشی، اثر افزایش میدان مغناطیسی بر مدول‌های نمونه‌های MRE، مستقل از عامل شکل می‌باشند. ضخامت نمونه‌های استوانه‌ای در این مطالعه از ۶/۳۵ میلی‌متر تا ۲۵/۴ میلی‌متر انتخاب شده است. اوگورو و همکاران [۱۱۰] در پژوهش خود نشان دادند با افزایش قطر نمونه‌های MRE مدول ذخیره فشاری در حالت استاتیکی افزایش پیدا خواهد نمود.

طبق استاندارد^۳ ISO 7743 به منظور انجام تست بر روی الاستومرها و بدست آوردن مدول الاستیک آن‌ها، عامل شکل حدود ۰/۵۸ در نظر گرفته شده است [۱۱۱].

۲-۹-۱ مشخصات تحقیق

در تحقیق حاضر چهار نمونه‌ی الاستومر مگنتورئولوژیکال با عامل شکل‌های (قطر) مختلف تحت بارگذاری دینامیکی کششی- فشاری در چهار فرکانس و کرنش مختلف و چهار میدان مغناطیسی

¹ Davies

³ Standard

² Fediuc

متفاوت مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. مقادیر انتخابی متناسب با توانایی دستگاه‌ها و حسگرهای در دسترس انتخاب گشته است. به عنوان مثال اندازه میدان مغناطیسی تا میزان ۱ تسلا برای انجام آزمایش مناسب می‌باشد، اما با تعداد آهن‌رباهای موجود این میزان قابل دسترس نمی‌باشد. همچنین میزان فرکانس ورودی متناسب با توانایی دستگاه اعمال نیرو انتخاب گشته است که برای کاربردهایی با فرکانس بالا نیاز به دستگاهی با توانایی متفاوت می‌باشد. در ادامه نمودارهای هیستریزیس بر حسب تنش- کرنش ترسیم شده‌اند. در گام بعد نمودارها نویزگیری^۱ شده و با یک‌دیگر مقایسه شده‌اند. مدول‌های ذخیره و اتلاف برای حالت کشش و فشار جداگانه محاسبه شده و بر حسب مقادیر مختلف به صورت نمودار ارائه شده و تحلیل بر روی آن‌ها انجام گرفته است. به طور مثال مدول ذخیره بر حسب عامل شکل در میدان‌های مغناطیسی مختلف ترسیم گشته و تحلیل این که چه نوع رفتاری از خود نشان می‌دهند صورت گرفته است.

در جدول ۱-۱ مقادیر ورودی آزمایش ارائه شده است.

جدول ۱-۲۱- مقادیر ورودی آزمایش.

نام متغیر	مقادیر
میدان مغناطیسی (mT)	۰ - ۱۰۰ - ۲۰۰ - ۲۵۰
عامل شکل (shape factor)	۰/۴۶ - ۰/۶۲ - ۰/۷۸ - ۰/۹۳
قطر (mm)	۲۹/۷ - ۳۹/۵ - ۴۹/۹ - ۵۹/۶
ارتفاع (mm)	۱۶
کرنش (%)	۸ - ۱۰ - ۱۲ - ۱۴
فرکانس (Hz)	۱ - ۳ - ۵ - ۸

^۱ Noise reduction

۱۰-۱ ضرورت تحقیق

در دوران حاضر سرعت و دقت حرف اول را در دنیا می‌زند. به تبع آن در صنعت هم این دو امر از نکات کلیدی سیستم‌ها می‌باشد. برای رسیدن به دقت و سرعت در سیستم‌های مهندسی، اولین مورد که باید در دسترس مهندسان باشد، شناخت کافی از سیستم‌ها و نوع رفتارشان در محیط می‌باشد. اگر این شناخت وجود نداشته باشد دقت و سرعت دچار افت کیفیت می‌شوند و با توجه به تقاضای کیفیت بالا در بازارهای داخلی و خارجی نمی‌توان محصولی مناسب و قابل رقابت تولید نمود.

استفاده از مواد هوشمند دقت و سرعت را برای مهندسان فراهم نموده است، اما همان‌طور که گفته شد شناخت رفتار آن‌ها لازمی استفاده از آن‌ها می‌باشد. برای شناخت رفتار، انجام آزمایش‌های گوناگون لازم است و باید به گونه‌ای انجام شوند که طیف وسیعی از شرایط کارکرد عملی را پوشش دهند.

تا به امروز مطالعات و آزمایش‌های زیادی بر روی سیال‌های مگنتورئولوژیکال صورت گرفته است و استفاده از آن‌ها به صورت صنعتی انجام شده است. اما تحقیقات بر روی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال به صورت کافی انجام نگرفته است و استفاده از آن‌ها در صنعت به دلیل عدم شناخت و به تبع آن عدم کاربرد با دقت به طور مناسبی صورت نگرفته است. مطالعات انجام گرفته بیشتر به صورت تفکیک شده انجام شده است و مدلی جامع که بتواند در شرایط عملی کاربرد داشته باشد ارائه نشده است. به همین منظور ضرورت انجام تحقیقات در این زمینه نیاز می‌باشد.

۱۱-۱ نوآوری‌های تحقیق

در پژوهش ارائه شده تأثیر عامل شکل (shape factor) بر روی مدول مکانیکی MRE ها مورد آزمایش قرار گرفته است که این عمل با تغییر قطرهای انجام گرفت. تا به امروز هندسه‌ی الاستومرها نقشی در مدل‌سازی نداشته‌اند. همچنین برای اولین بار مدول‌های ذخیره و اتلاف در ناحیه‌ی کشش و در ناحیه‌ی فشار به طور جداگانه محاسبه شده و رابطه‌ی آن‌ها با تغییرات در میدان مغناطیسی، هندسه، فرکانس

و کرنش‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفت. در آخر نیز مدلی ارائه شده است که طیف وسیعی از ورودی‌ها را پوشش می‌دهد. لازم به ذکر است پژوهش‌های گذشته بیشتر معطوف به رژیم برشی بوده است و مدل‌های ارائه شده نیز از جامعیت کافی برخوردار نبوده‌اند.

۲ - ساخت نمونه‌ی الاستومتر مگنتورئولوژیکال و پیکربندی آزمایش

۱-۲ ساخت نمونه‌ی الاستومر مگنتورئولوژیکال

در این پژوهش آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های الاستومر مگنتورئولوژیکال در مد دینامیکی کشش-فشار صورت می‌پذیرد. به منظور مطالعه‌ی اثر عامل شکل بر روی خواص مکانیکی MRE، چهار نمونه با قطرهای مختلف و ارتفاع یکسان ساخته شده است.

نمونه‌ها از سه جزء تشکیل شده‌اند که عبارتند از پلیمر سیلیکن، پودر آهن کربونیل و روغن سیلیکن. مقدار وزنی هر کدام از این مواد طبق تحقیقات گذشته مشخص شده است که بیشترین بازدهی را در میدان مغناطیسی از خود نشان می‌دهند. MRE ساخته شده ایزوتروپیک می‌باشد و در زمان پخت تحت میدان مغناطیسی قرار نداشته است. در جدول ۱-۲ مشخصات مواد استفاده شده و مقدار درصد وزنی آن‌ها مشخص شده است.

جدول ۱-۲ - مشخصات مواد به کار رفته در ساخت MRE.

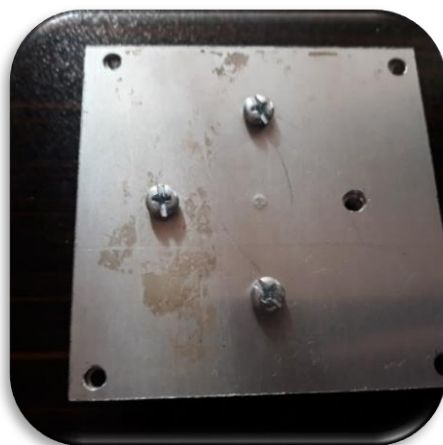
نام ماده	مشخصات	درصد وزنی
پودر کربونیل آهن	CI, BASF, Germany $5\mu\text{m}$ قطر متوسط	۷۰٪
پلیمر سیلیکن	RTV2 4405 PCC company	۲۰٪
روغن سیلیکن	Kcc company Viscosity = 100 cSt	۱۰٪

ابتدا چهار عدد قالب از جنس فولاد^۱ در اندازه‌های مورد نظر ساخته شده است. در شکل ۱-۲ تصویر این قالب‌ها به نمایش درآمده است.



شکل ۱-۲- قالب‌های ساخته شده به منظور قالب گیری MRE.

به منظور قالب گیری مناسب و عدم بیرون زدگی مواد یک صفحه آلومینیومی^۲ توسط چهار عدد پیچ به منظور قالب گیری مناسب و عدم بیرون زدگی مواد یک صفحه آلومینیومی^۲ توسط چهار عدد پیچ به قالب متصل می‌گردد. شکل ۲-۲ قالبی که سه عدد از پیچ‌های آن بسته شده است را نشان می‌دهد.

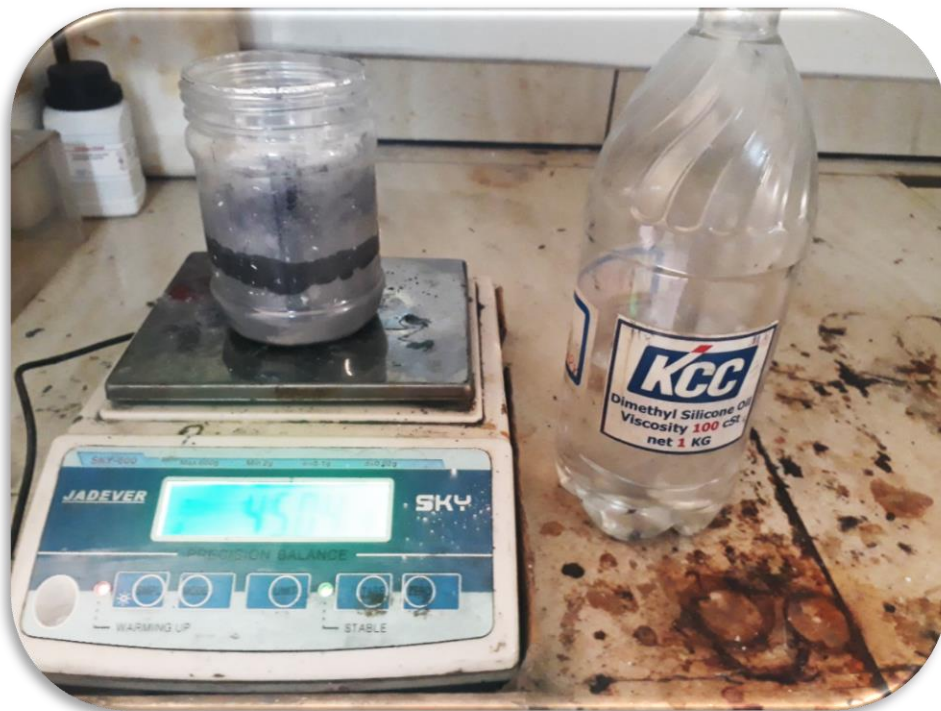


شکل ۲-۲ - تصویر پشت قالب.

^۱ Steel

^۲ Aluminium

پس از ساخت قالب، ساخت الاستومر مگنتورئولوژیکال انجام می‌گیرد. در ابتدا مقدار وزن مواد طبق درصد وزنی مشخص، محاسبه می‌گردد. در ادامه ظرف روی ترازو با دقت صدم گرم^۱ گذاشته می‌شود و عدد آن صفر می‌گردد. پودر آهن کربونیل به اندازه‌ی محاسبه شده درون ظرف ریخته شده و بعد از آن روغن سیلیکون اضافه می‌گردد. شکل ۲-۳ مخلوط روغن سیلیکون و پودر آهن را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳- مخلوط پودر آهن کربونیل و روغن سیلیکون.

بعد از ریختن مواد به مقدار مناسب درون ظرف، به مدت ۵ دقیقه [۱۰۱] با هم مخلوط می‌شوند. به منظور مخلوط شدن مناسب، این کار با استفاده از همزن انجام می‌شود. شکل ۲-۴ مواد را پس از مخلوط کردن نشان می‌دهد.

^۱ Gram



شکل ۴-۲ - پودر آهن و روغن سیلیکون پس از ۵ دقیقه مخلوط شدن.

در ادامه پلیمر سیلیکون به مخلوط اضافه می‌گردد و به مدت ۱۰ دقیقه [۱۰۱] کل مواد با هم مخلوط می‌شوند (مراجعه شود به شکل ۵-۲).



شکل ۵-۲- افزودن پلیمر سیلیکون به مخلوط ذرات آهن و روغن سیلیکون.

طبق شکل ۶-۲ و ۷-۲ در دوقیقه آخر می‌توان هاردنر^۱ را به مخلوط اضافه کرد. مقدار هاردنر طبق دستور شرکت سازنده ۲٪ می‌باشد. به این معنی که هر صد گرم سیلیکون باید دو گرم هاردنر اضافه نمود.



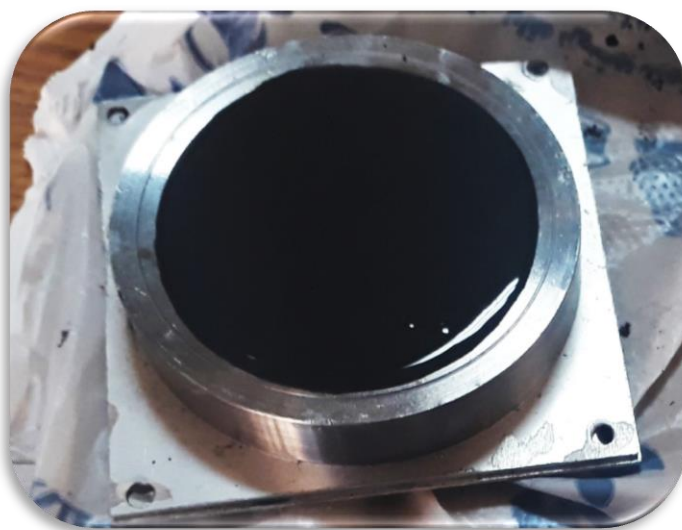
شکل ۶-۲- اضافه کردن هاردنر به مخلوط.



شکل ۷-۲- مخلوط کردن کل مواد تشکیل دهنده با یکدیگر.

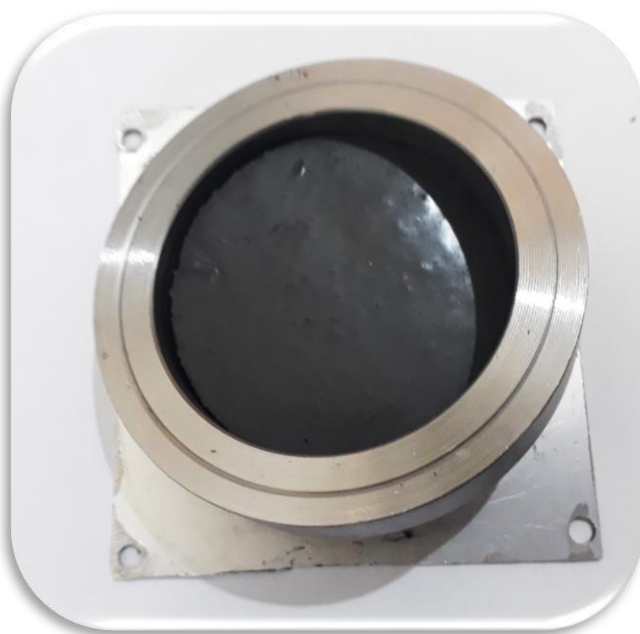
پس از آماده شدن مخلوط، طبق شکل ۸-۲ قالب‌ها از مواد پر می‌شوند و به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق قرار می‌گیرند تا نمونه به طور کامل خشک شود.

^۱ Hardner

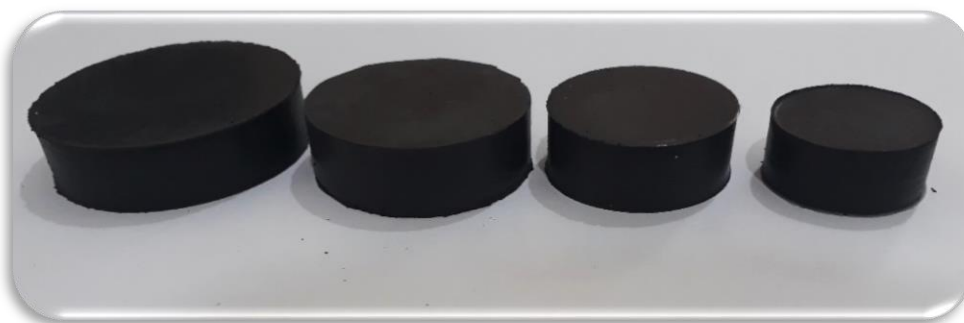


شکل ۸-۲- قالب پر شده از الاستومر مگنتورئولوژیکال.

پس از خشک شدن نمونه پیچ‌های قالب باز شده و نمونه‌ها با احتیاط از درون آن جدا می‌شوند
(مراجعه شود به شکل ۹-۲ و ۱۰-۲).



شکل ۹-۲- نمونه‌ی MRE در حال جدا شدن از قالب.



شکل ۱۰-۲- چهار عدد نمونه‌ی الاستومر مگنتورئولوژیکال ایزوتروپیک با shape factor های متفاوت.

به علت بوجد آمدن حباب در زمان پخت الاستومرها، نمونه‌ها از نظر وجود حباب مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در ابتدا چگالی چهار نمونه محاسبه گشته که تمامی آن‌ها دارای چگالی حدودا برابر و به میزان ۲۵۰۳ کیلوگرم بر متر مکعب بوده‌اند که می‌توان نتیجه گرفت حباب قابل توجهی درون نمونه‌ها وجود ندارد.

در ادامه به منظور بررسی بیشتر، یک عدد نمونه برش زده شده و لایه‌های مختلف آن مشاهده گشته است. همان‌طور که در شکل ۱۱-۲ مشاهده می‌گردد، اندازه‌ی حباب‌های درون نمونه ناچیز بوده و خطایی در حین آزمایش ایجاد نخواهد کرد.



شکل ۱۱-۲- نمونه برش خورده MRE.

۲-۲ ساخت و پیکربندی آزمایش

۱-۲-۲ تولید میدان مغناطیسی

به منظور تولید میدان مغناطیسی با شدت‌های مختلف، از ۶ عدد آهنربای نئودیمیوم^۱ با گرید N42 استفاده شده است. به منظور ایجاد شرایط متقارن سه عدد آهنربا در بالا و سه عدد در پایین نمونه قرار داده می‌شوند. برای ایجاد تغییر در شدت میدان، از ایجاد فاصله بین آهنرباها استفاده می‌گردد. به منظور حفظ آهنرباها، آن‌ها درون قاب چوبی قرار داده می‌شوند، زیرا بسیار شکننده می‌باشند. باید دقت داشت ضربه و گرما باعث کم شدن قدرت آن‌ها می‌شود. در شکل ۱۲-۲ یک عدد آهنربای نئودیمیومی با قطر ۱۰ سانتی متر و ضخامت ۱ سانتی متر قابل مشاهده است.



شکل ۱۲-۲- آهنربا نئودیمیوم N42.

مطابق با شکل ۱۳-۲ سه عدد آهنربا به هم متصل می‌گردد و درون جعبه که در زیر آن قرار دارد قرار داده می‌شود و اطراف آن نیز با استفاده از پنبه پر می‌شود تا از جابه‌جا شدن و ضربه خوردن جلوگیری شود. توجه شود به منظور چسباندن آهنرباها به یکدیگر، در ابتدا بین آن‌ها یک قطعه مانند فوم ضخیم که جنس نرم و ضخامت مناسب دارد قرار داده و کاملاً آرام آهنرباها به یکدیگر نزدیک می‌گردند، بعد از جذب آن‌ها توسط یکدیگر، هر دو به سمت لبه‌ی خارجی فوم کشیده شده و با احتیاط فوم از بین آن‌ها خارج می‌شود.

^۱ Neodymium magnet



شکل ۲-۱۳- سه عدد آهن ربا نئودیمیوم به هم چسبیده شده به همراه جعبه محافظ.

به منظور ایجاد میدان مغناطیسی مختلف، فاصله‌ی بین آهن رباها با استفاده از قطعات چوبی تغییر داده می‌شود. به منظور بدست آوردن فاصله‌ی مورد نظر، بین جعبه‌های محافظ به اندازه‌ی ضخامت نمونه فاصله ایجاد می‌شود، سپس با استفاده از دستگاه تسلا متر^۱، با دقت ۰/۱ میلی تسلا میدان مغناطیسی در وسط محل نمونه اندازه‌گیری می‌گردد و تعداد قطعات چوبی لازم به دست می‌آید. در شکل ۲-۱۴ نحوه اندازه‌گیری میدان مغناطیسی ۲۰۰ میلی تسلا نمایش داده شده است.

^۱ Teslameter



شکل ۲-۱۴- اندازه گیری میدان مغناطیسی بین آهن رباها.

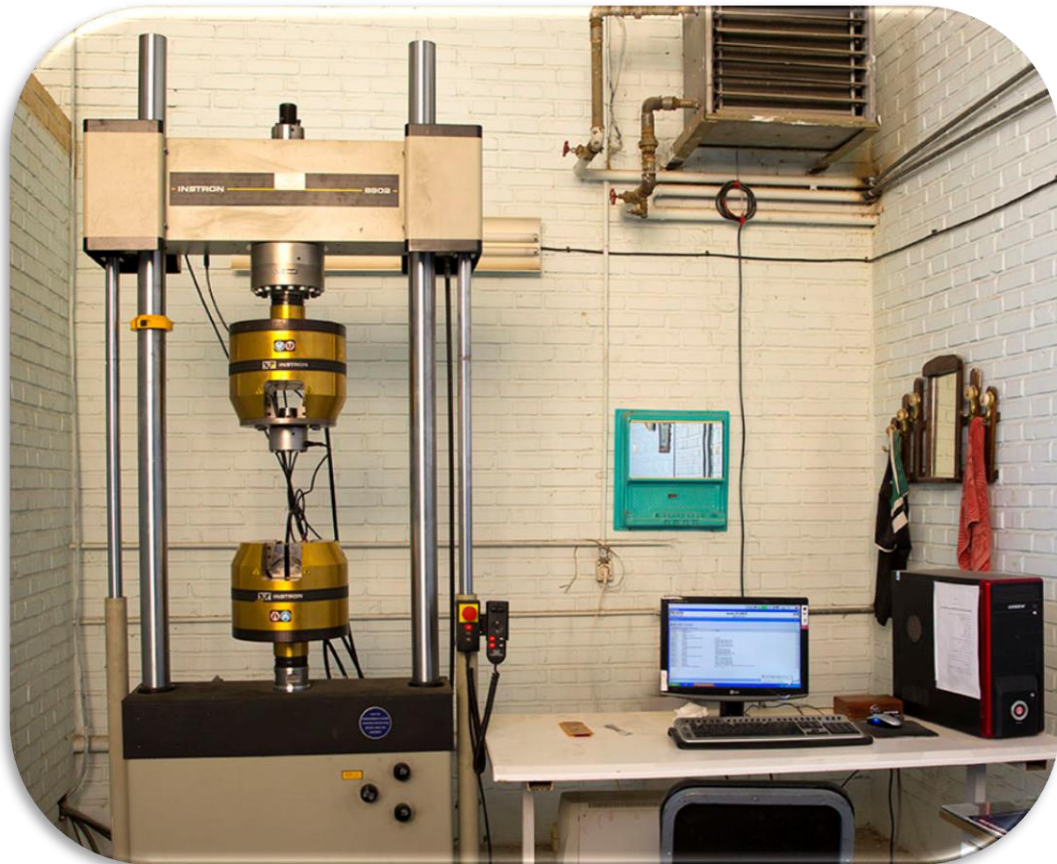
۲-۲-۲ ساخت فیکسچر

به منظور انجام تست دینامیکی کشش- فشار از دستگاه سرو هیدرولیک^۱ INSTRON 8802 استفاده شده است. این دستگاه شامل یک فک هیدرولیکی متحرک در پایین می باشد که کرنش و فرکانس کرنش را تولید می کند و دارای یک لودسل^۲ در بالا می باشد که میزان نیروی وارد شده از طرف نمونه را با دقت بالا (یک صدم نیوتون) و نرخ نمونه برداری مناسب (۵۰۰ هرتز) اندازه گیری می نماید. در شکل ۲-۱۵ و ۲-۱۶ تصویر دستگاه و لودسل دیده می شود. نحوه ی اعمال ورودی به نمونه و انجام آزمایش مشابه با استاندارد ISO 10846 می باشد. در این استاندارد نحوه بدست آوردن مشخصات دینامیکی قطعات ارتجاعی تعیین شده است. آزمایش انجام گرفته در این پژوهش بر اساس روش Direct method

^۱ Hydraulic servo

^۲ Load cell

استاندارد طراحی شده است. در این روش اعمال ورودی به نمونه از یک سمت به صورت جابه‌جایی بوده و خروجی مورد نظر، نیروی اعمالی از طرف نمونه به لود سل در سمت دیگر می‌باشد. مشخصات دینامیکی مطابق با نیروها و جابه‌جایی‌ها استخراج می‌گردد.



شکل ۲-۱۵- دستگاه سروهیدرولیک INSTRON 8802.



شکل ۲-۱۶- لودسل INSTRON.

فیکسچر^۱ مورد نیاز برای انجام تست باید قابلیت متصل شدن به دستگاه INSTRON و دارای محل قرارگیری آهنرباها باشد. جنس اجزا فیکسچر نیز باید به گونه ای باشد که میدان مغناطیسی را بدون تضعیف، بر روی نمونه منتقل کنند و از انتقال میدان به لودسل و خط کش مغناطیسی جلوگیری نمایند. در شکل ۲-۱۷ و ۲-۱۸ قسمت‌های بالا و پایین فیکسچر به همراه مشخصات جنس اجزا نشان داده شده است.

^۱ Fixture



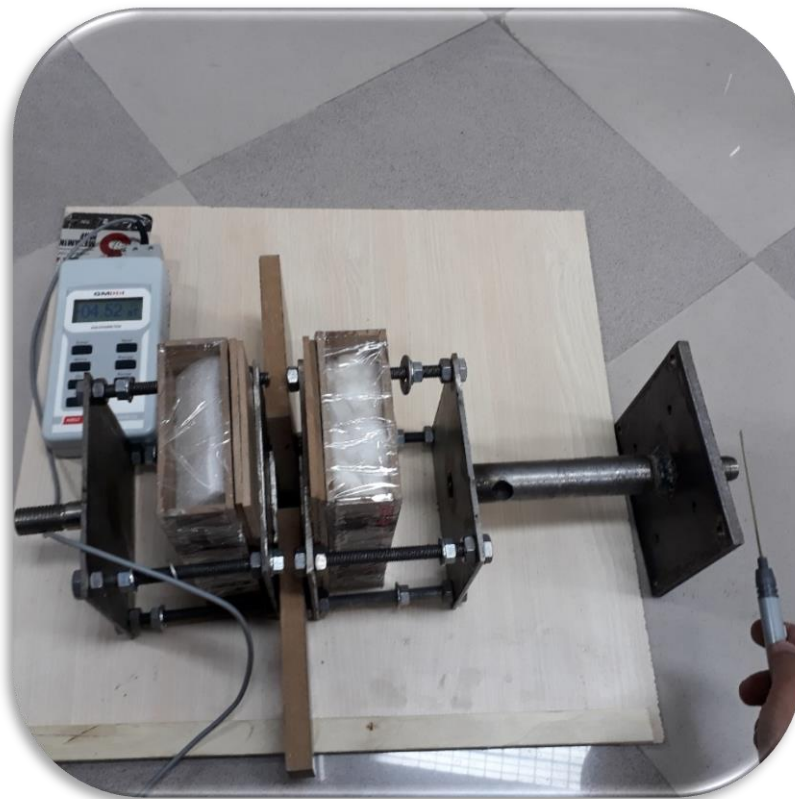
شکل ۱۷-۲- قسمت پایین فیکسچر.



شکل ۱۸-۲- قسمت بالای فیکسچر.

در قسمت بالای فیکسچر یک صفحه‌ی فولادی st37 قرار داده شده است. این عمل به منظور تضعیف میدان مغناطیسی انجام گرفته است تا به لودسل آسیبی وارد نشود. در قسمت‌های دیگر که میدان باید بدون تضعیف عبور کند از فولاد ضدزنگ^۱ ۳۱۶ استفاده شده است. این نوع از فولاد میدان را تضعیف نمی‌کند و غیر مغناطیسی می‌باشد.

به منظور اطمینان از عدم وجود میدان مغناطیسی در لودسل، با استفاده از تسلا متر میدان در بالای فیکسچر اندازه گیری شده و مقدار بدست آمده قابل صرف نظر می‌باشد (شکل ۲-۱۹).



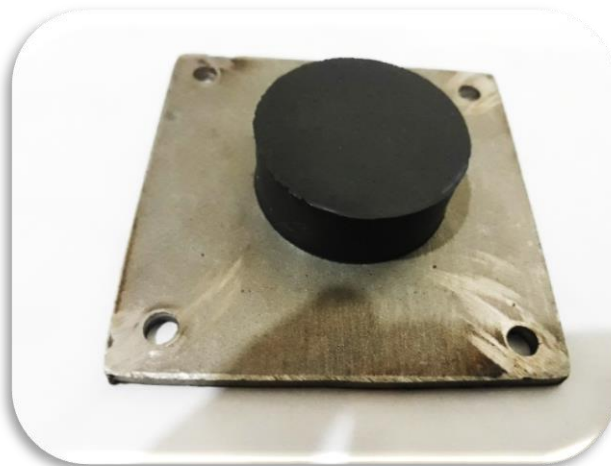
شکل ۲-۱۹- اندازه گیری میدان مغناطیسی در بالای فیکسچر.

لازم به ذکر است در پایین فک هیدرولیک یک عدد خط کش مغناطیسی به منظور اندازه گیری جابه جایی وجود دارد که آن در اطراف نیز باید میدان مغناطیسی وجود نداشته باشد که با توجه به

^۱ Stainless steel

وجود قسمت فولادی ضخیم و همچنین فاصله‌ی زیاد در بین فیکسچر پایین و خط کش مغناطیسی، میدان مغناطیسی به صورت کامل تضعیف شده و برابر با صفر می‌گردد.

برای متصل کردن نمونه‌های MRE به فیکسچر، با استفاده از چسب سیلیکون^۱ به دو صفحه استیل ضد زنگ ۳۱۶، در دو طرف چسبانده می‌شوند. این صفحات به وسیله‌ی هشت پیچ M4 به فیکسچر متصل می‌گردند (مراجعه شود به شکل ۲۰-۲ و ۲۱-۲).



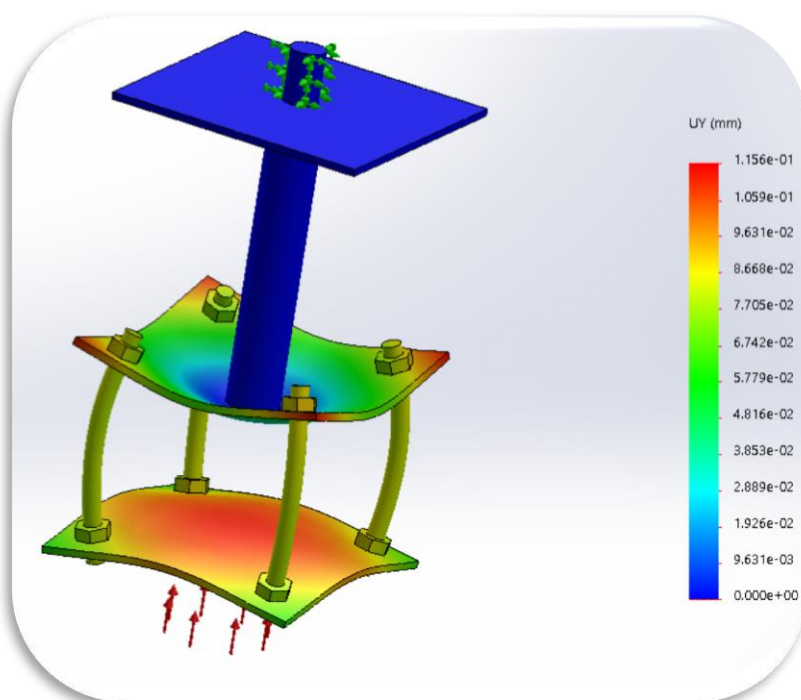
شکل ۲۰-۲- چسباندن نمونه‌ی MRE به صفحه فلزی.



شکل ۲۱-۲- نمونه‌ی MRE آماده شده جهت متصل کردن به فیکسچر.

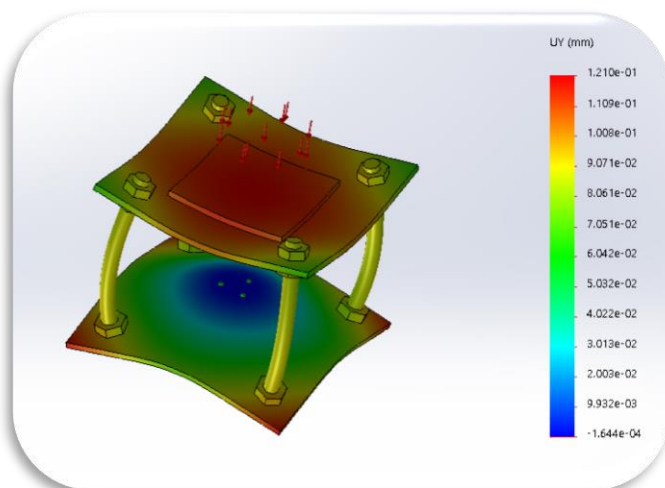
^۱ Silicone adhesive

برای اطمینان از عدم وجود آمدن تغییر شکل در فیکسچر، با استفاده از نرم افزار سالیدورک^۱ مدل سازی فیکسچرها انجام گرفته است. طبق نتایج بدست آمده بر اثر بیشترین نیروی اعمالی از طرف نمونه ها تغییر شکل ها قابل صرف نظر می باشند. در شکل های ۲-۲۲ و ۲-۲۳ نتایج شبیه سازی قابل مشاهده می باشد.



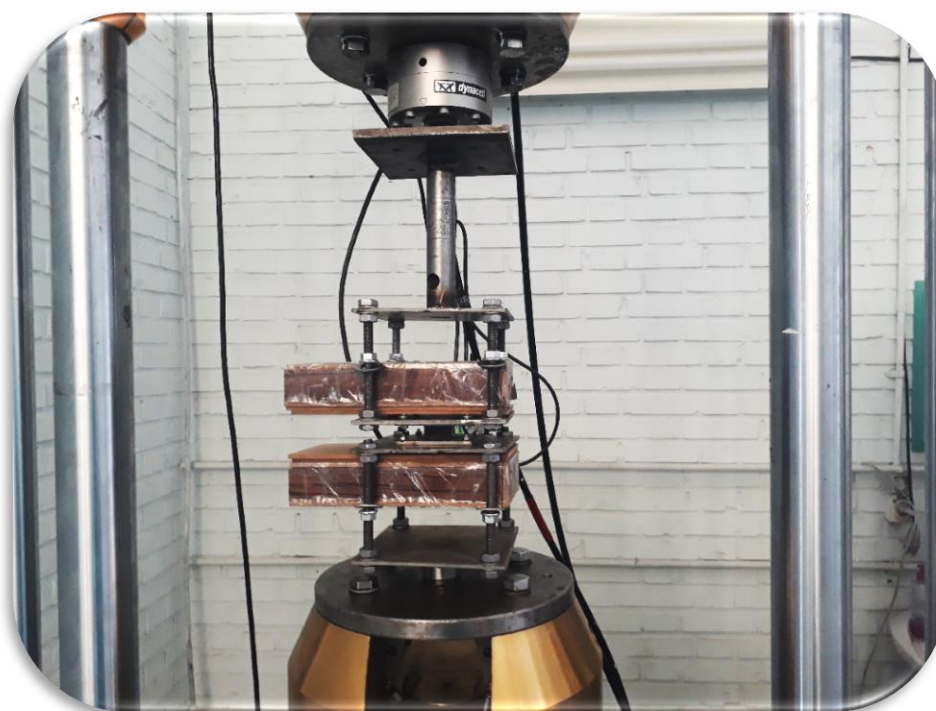
شکل ۲-۲۲- شبیه سازی اعمال نیرو به فیکسچر بالا.

^۱ Solidworks



شکل ۲-۲۳- شبیه سازی اعمال نیرو به فیکسچر پایین.

در شکل ۲-۲۴ تصویر فیکسچر بسته شده روی دستگاه به همراه نمونه‌ی MRE تحت میدان مغناطیسی آهن‌ریاها نشان داده شده است.



شکل ۲-۲۴- ستاپ^۱ بسته شده روی دستگاه INSTRON.

^۱ Setup

۳ - رفتار دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال

۱-۳ مقدمه

به منظور شناسایی یک سیستم، باید از نتایج تجربی به منظور ارائه نحوه رفتار و مدل استفاده نمود. در این فصل در ابتدا نحوه انجام تست کشش - فشار بر روی نمونه‌های الاستومر مگنتورئولوژیکال ارائه خواهد شد و در ادامه با استفاده از نرم‌افزار متلب^۱ داده‌های بدست آمده از آزمایش به صورت نمودارهای هیستریزیس از نوع تنش بر حسب کرنش، در فرکانس، کرنش، میدان مغناطیسی و قطرهای مختلف ترسیم خواهد شد. سپس مقدار مدول‌های ذخیره و اتلاف محاسبه شده و در نمودارهایی بر حسب شرایط مختلف آزمایش ترسیم می‌شوند. پس از ترسیم نمودارها تفسیر فیزیکی آن‌ها انجام خواهد گرفت.

۲-۳ آزمایش دینامیکی کشش - فشار

به منظور انجام تست کشش-فشار در ابتدا نمونه‌ها قالب گیری شده، سپس فیکسچر مورد نظر ساخته شده است. برای ایجاد شرایط ورودی مختلف، از دستگاه INSTRON و تعدادی آهن‌ربا استفاده گردیده است. با استفاده از کنترلر دستگاه مقادیر ورودی تعیین و به نمونه اعمال می‌گردد. در تصویر ۱-۳ صفحه‌ی رابط کاربری دستگاه نشان داده شده است که میزان جابه‌جایی، نرخ جابه‌جایی، نوع شکل جابه‌جایی، تعداد سیکل^۲ و نرخ نمونه برداری را می‌توان در آن تعیین نمود.

نوع شکل جابه‌جایی یعنی تابع جابه‌جایی بر حسب زمان که در این تحقیق تابع ورودی به صورت سینوسی^۳ انتخاب شده است و ورودی این آزمایش می‌باشد. خروجی، نیروی منتقل شده از طرف نمونه می‌باشد که توسط لودسل با نرخ نمونه برداری بالا اندازه‌گیری می‌گردد. جابه‌جایی و نیروی متناظر با آن به همراه زمان و شماره سیکل در یک سطر از فایل اکسل^۴ قرار می‌گیرد و در انتهای هر تست تمامی

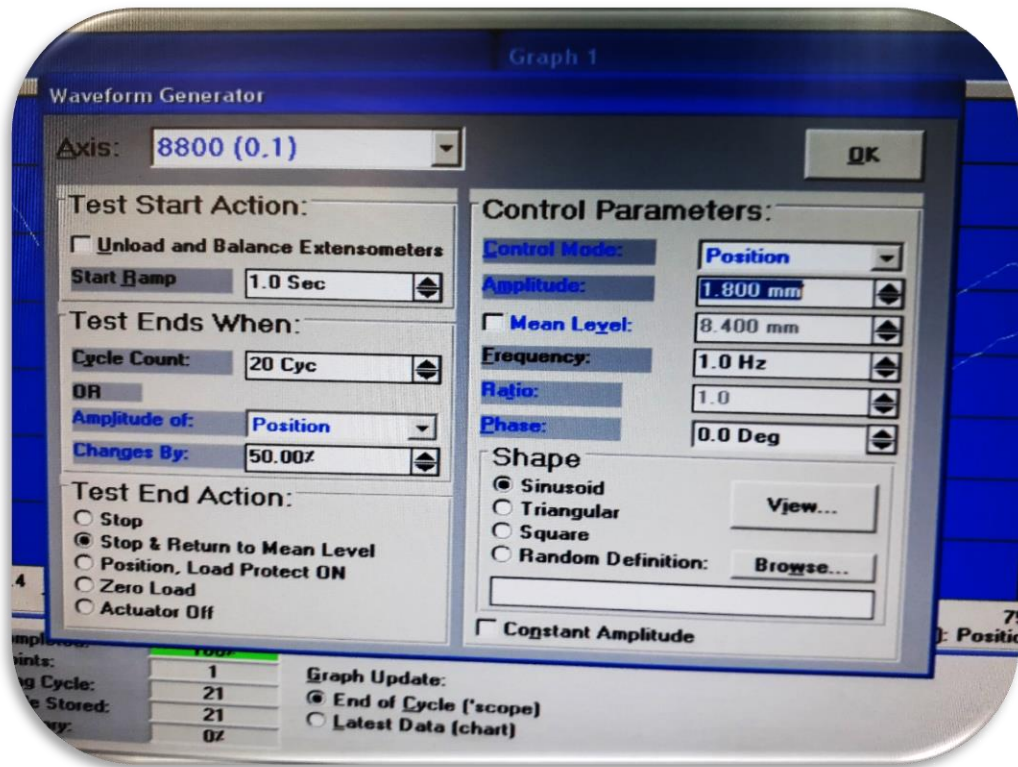
^۱ Matlab

^۴ Excel

^۲ Cycle

^۳ Sinusoidal

این داده‌ها در یک فایل نهایی اکسل در کامپیوتر^۱ متصل به کنترلر ذخیره می‌گردد. در شکل ۲-۳ بخش‌های مختلف ستاپ آزمایش روی تصویر نشان داده شده است.



شکل ۳-۱- صفحه رابط کاربری دستگاه INSTRON.

^۱ Computer



شکل ۳-۲- اجزاء ستاپ آزمایش.

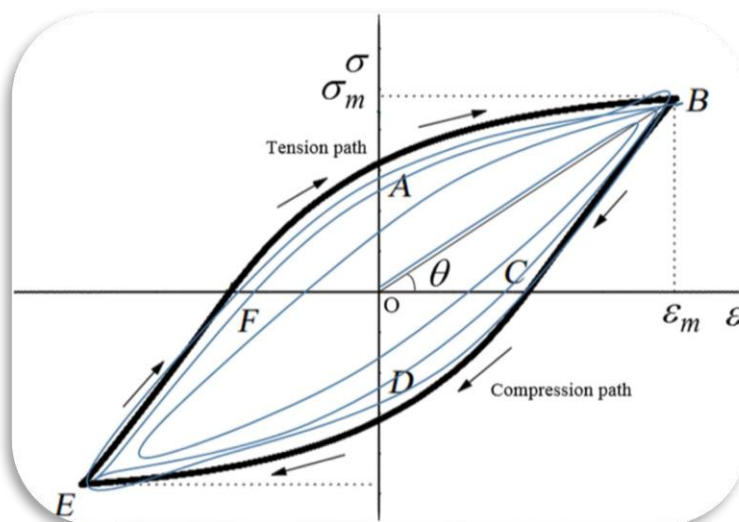
۳-۳ هیستریزیس

پسماند یا «هیستریزیس» (Hysteresis)، پدیده‌ای است که وابستگی حالت فعلی یک سیستم به حالت‌های قبلی (مسیر تغییرات) آن را نمایش می‌دهد. این پدیده کاربردهای زیادی در حوزه‌های مختلفی نظیر فیزیک، شیمی، مهندسی و زیست‌شناسی دارد. هیستریزیس الاستیک، از اولین انواع هیستریزیس بود که مورد توجه محققین قرار گرفت. در این پدیده، ناحیه‌ی مرکزی حلقه هیستریزیس اتلاف انرژی ناشی از اصطکاک داخلی^۱ ماده را نمایش می‌دهد. برای مثال زمانی که یک نوار لاستیکی کشیده شود، پس از برداشته شدن نیرو، نوار شروع به کاهش طول می‌کند اما این برگشت همانند مواد الاستیک نمی‌باشد و از لحاظ زمان و انرژی با حالت کشش متفاوت می‌باشد و دارای اختلاف فاز^۲ می‌باشد. اگر نمودار نیرو بر حسب جابه‌جایی را برای مواد ویسکوالاستیک ترسیم کنیم به مسیری بیضی شکل خواهیم رسید که به آن حلقه‌ی هیستریزیس می‌گویند. در شکل ۳-۳ شماتیک حلقه‌ی هیستریزیس

^۱ Internal friction

^۲ Phase

مشاهده می‌گردد. مطابق شکل به منظور رسیدن به حالت پایدار (خط مشکی رنگ) باید چند سیکل از مسیر طی شود. طبق گزارش فدیک [۱۰۸] برای چند نمونه الاستومر لاستیکی، ۵ تا ۷ سیکل برای رسیدن به حالت پایدار^۱ لازم می‌باشد.



شکل ۳-۳- نمودار حلقه هیستریزس وابسته به زمان [۱۰۱].

۳-۴ مدول ذخیره و مدول اتلاف

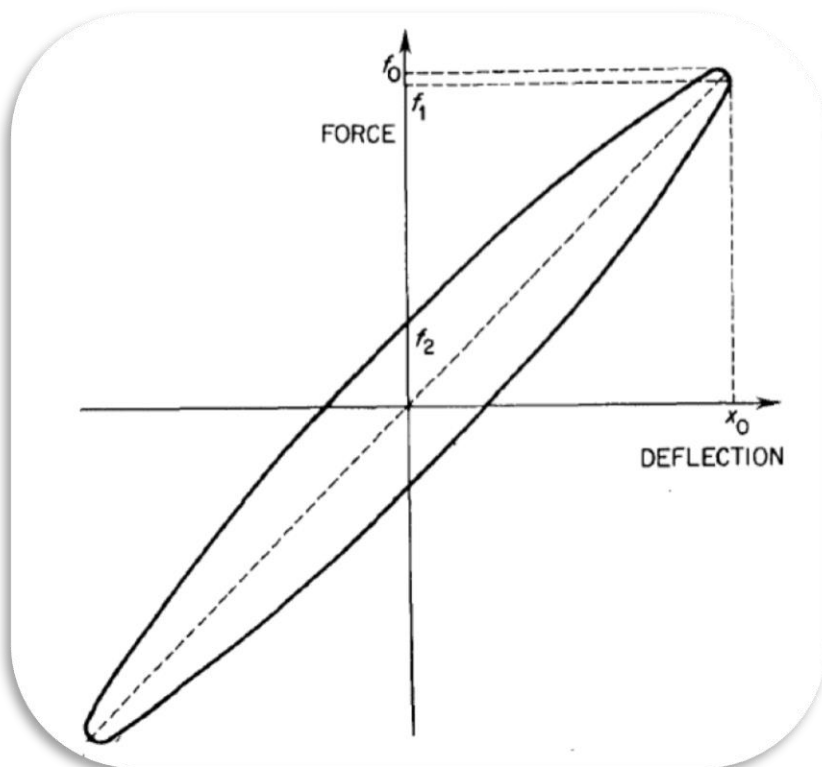
مدول ذخیره معیاری بر اساس توانایی جسم در ذخیره‌سازی انرژی می‌باشد و مدول اتلاف معیاری بر اساس میزان توانایی جسم در اتلاف انرژی می‌باشد. در مواد ویسکوالاستیک به منظور بیان مدول مکانیکی، از مدول مختلط^۲ استفاده می‌گردد. قسمت حقیقی آن مدول ذخیره می‌باشد که با E' نشان داده می‌شود و قسمت موهومی آن مدول اتلاfi می‌باشد که با E'' نشان داده می‌شود.

به منظور محاسبه‌ی این مدول‌ها از روش راجر براون^۳ [۱۱۲] استفاده شده است (شکل ۳-۴).

^۱ Steady state

^۳ Roger Brown

^۲ Complex modulus



شکل ۴-۳ - منحنی نیرو بر حسب جابجایی استفاده شده در روش براون.

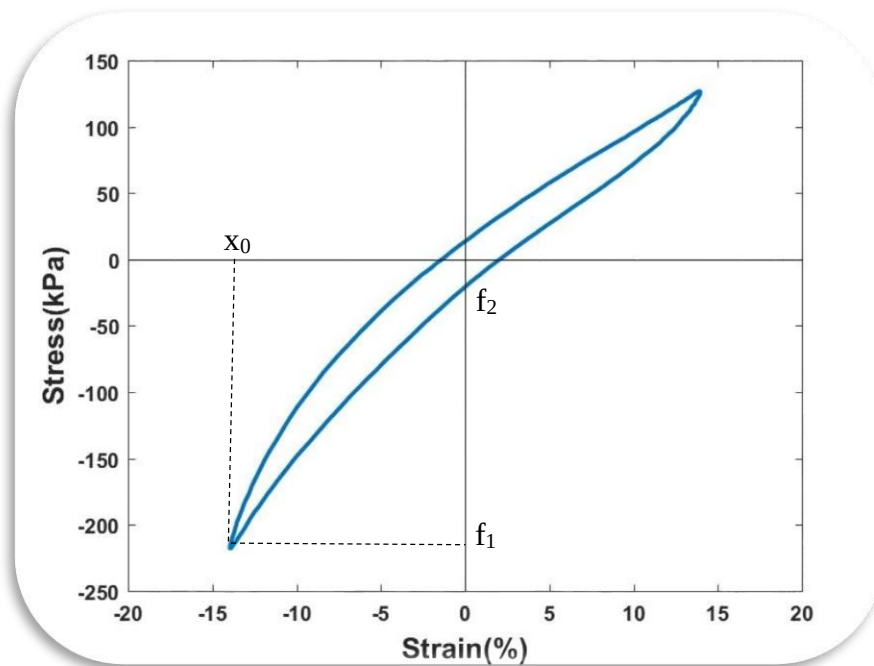
مطابق شکل ۴-۳ پارامترهای x_0 , f_0 , f_1 , f_2 به ترتیب بیشترین جابه‌جایی، بیشترین نیروی وارد شده به ماده، نیروی متناظر با بیشترین جابه‌جایی و نیروی متناظر با جابه‌جایی صفر می‌باشند. مقادیر E' و E'' طبق روابط (۱-۳) و (۲-۳) محاسبه خواهند شد. در این روابط h ضخامت نمونه، A سطح مقطع موثر و x_0 مقدار بیشینه‌ی جابه‌جایی یا تغییر شکل خواهد بود.

$$E' = \frac{f_1 h}{A x_0} \quad (۱-۳)$$

$$E'' = \frac{f_2 h}{A x_0} \quad (۲-۳)$$

حلقه‌های هیستریزیس همیشه به صورت متقارن نمی‌باشند و گاهی اوقات به صورت غیر خطی ظاهر می‌شوند. در این حالت قسمت مسیر فشاری نسبت به مسیر کشش، انرژی بیشتری را ذخیره می‌کند و دارای شیب بیشتری می‌باشد. این رفتار در کرنش‌های بزرگتر رخ می‌دهد. به منظور شناسایی کامل‌تر

این سیستم مدول‌های ذخیره و اتلاف به صورت جداگانه برای حالت فشار نیز محاسبه خواهند شد تا حالت غیر خطی آن بهتر مدل شود. برای این محاسبه مطابق شکل ۳-۵ از بیشترین جابه‌جایی و نیروی متناظرش در فشار و از مقدار نیرو در حالت فشار در جابه‌جایی صفر استفاده می‌شود.



شکل ۳-۵- منحنی نیرو بر حسب جابه‌جایی به منظور محاسبه مدول‌ها در حالت فشاری.

۳-۵ ترسیم نمودار تنش- کرنش

داده‌های به دست آمده از آزمایش به صورت نیرو بر حسب جابه‌جایی می‌باشند. به منظور مقایسه‌ی نمودارها با یکدیگر باید داده‌ها را به صورت تنش بر حسب کرنش تبدیل نمود و سپس ترسیم نمود. برای تبدیل نیرو به تنش، آن را بر سطح مقطع نمونه تقسیم می‌نماییم و برای تبدیل جابه‌جایی به کرنش، آن را بر ضخامت نمونه که ۱۶ میلی‌متر است تقسیم می‌کنیم.

پس از تبدیل داده‌ها باید آن‌ها را نویزگیری نمود. عوامل بسیار زیادی در طول آزمایش باعث به‌وجود آمدن نویز^۱ در داده‌ها می‌گردد، مانند اتصالاتی که کاملاً مقید نمی‌باشند.

برای عمل نویزگیری از دستور smooth در نرم‌افزار matlab استفاده می‌شود. این تابع به منظور اعمال فیلترهای مختلف بر روی سیگنال‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. کد مربوط به این تابع مطابق است با:

Smooth(y,span,method)

در این کد، y برابر است با بردار داده‌های سازنده سیگنال؛ span مقدار و یا درصدی از فضای بردار داده‌ها که در معادلات فیلتر مورد استفاده قرار می‌گیرند و method روشی می‌باشد که مطابق با آن عملیات فیلتر انجام می‌گیرد.

روش پیش فرض در این کد، فیلتر میانگین متحرک^۲ می‌باشد. این روش یک نوع فیلتر پایین‌گذر می‌باشد و با توجه به این که نویزهای موجود در سیگنال دارای فرکانس بالایی می‌باشند، توسط این فیلتر حذف خواهند شد. طبق این روش داده‌های جدید برابrand با میانگین داده‌های همسایه خود. رابطه‌ی مورد استفاده در این روش برابر است با:

$$y_i = \frac{1}{(2n+1)} \sum_{j=-n}^n [(x_i + j)] \quad (3-3)$$

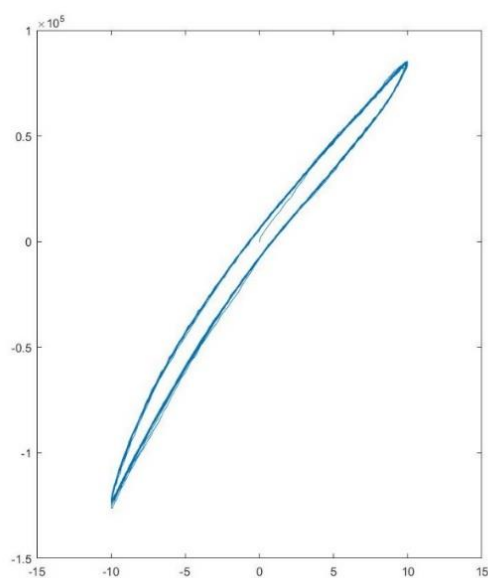
2n+1 در این رابطه برابر است با طول بازه‌ی فیلتر و یا طول پنجره^۳ که در دستور متلب با span تعیین می‌گردد. این مقدار به صورت پیش‌فرض برابر با ۵ می‌باشد.

¹ Noise

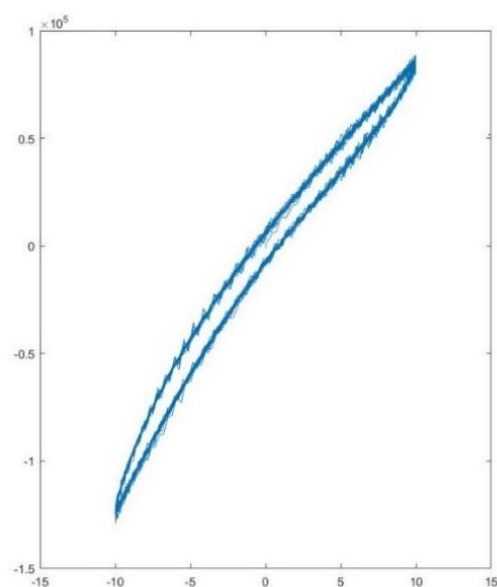
³ Window length

² Moving average filter

در شکل ۳-۶ نمونه‌ای از یک نمودار نمایش داده شده است که همراه با نویز می‌باشد و پس از نویزگیری در شکل ۳-۷ نشان داده شده است.



شکل ۳-۷ - نمودار هیستریزیس فیلتر شده.

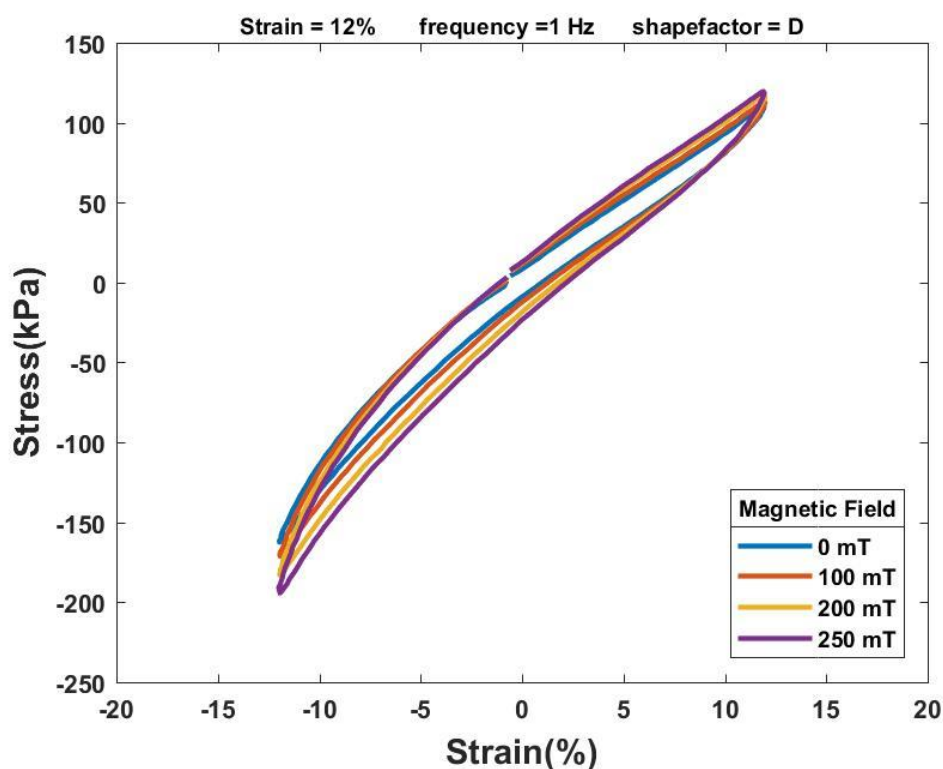


شکل ۳-۶ - نمودار هیستریزیس فیلتر نشده.

در ادامه بررسی تغییرات مدول‌ها بر حسب متغیرهای ورودی مورد تحلیل قرار خواهد گرفت.

۳-۶ تحلیل تغییرات مدول ذخیره و اتلاف در برابر چگالی شار مغناطیسی

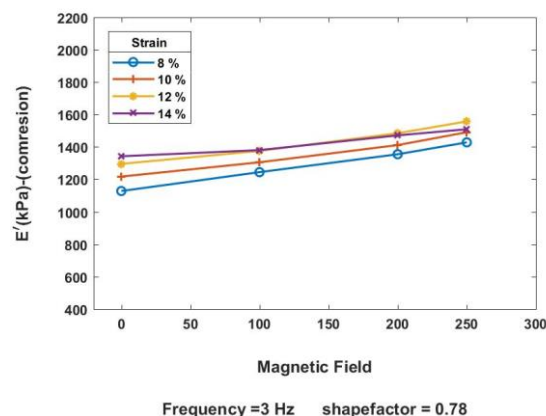
همان‌طور که در فصل اول بیان شد، زمانی که الاستومر مگنتورئولوژیکال در مسیر میدان مغناطیسی قرار بگیرد، به علت تشکیل زنجیره‌های ذرات فلزی، مقدار صلبیت بیشتر می‌شود. در شکل ۳-۸ می‌توان این رفتار را مشاهده نمود. در این شکل نمودارهای هیستریزیس مربوط به تست کشش- فشار نمونه با قطر ۵۹/۶، کرنش ۱۲ درصد و فرکانس ۱ هرتز در میدان‌های مغناطیسی مختلف با شدت‌های ۰ و ۱۰۰ و ۲۰۰ و ۲۵۰ میلی تسلا ترسیم شده است. طبق شکل با افزایش میدان مغناطیسی نمودارها شیب بیشتری پیدا می‌کنند و مقدار مدول ذخیره بیشتر می‌شود.



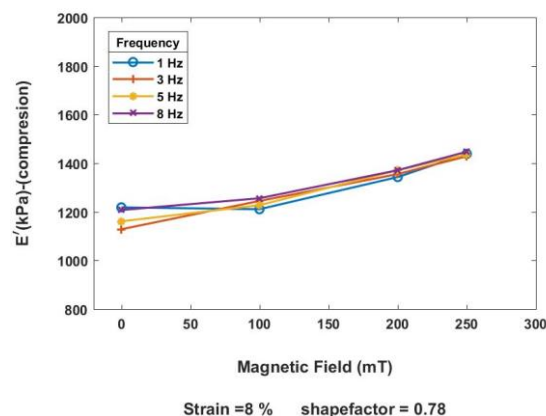
شکل ۳-۸- نمودارهای هیستریزیس MRE در شارهای مغناطیسی متفاوت.

۳-۶-۱ تغییرات E'

حالت فشاری



شکل ۳-۹- تغییرات مدول ذخیره فشاری نسبت به چگالی شار مغناطیسی در کرنش‌های متفاوت.



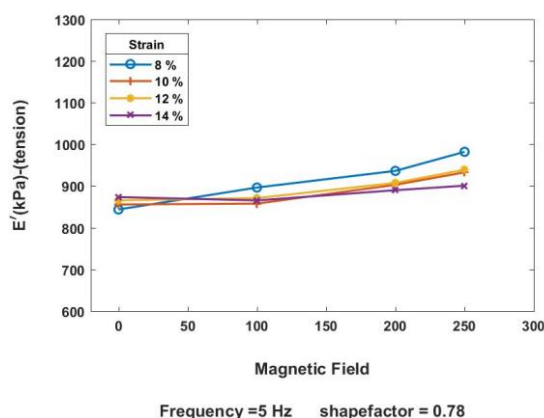
شکل ۳-۱۰- تغییرات مدول ذخیره فشاری نسبت به چگالی شار مغناطیسی در فرکانس‌های متفاوت.

مطابق شکل ۳-۹ در فرکانس ۳ هرتز و عامل شکل ۰/۷۸، با افزایش چگالی شار مغناطیسی در تمامی کرنش‌ها مدول ذخیره فشاری افزایش پیدا می‌کند. در کرنش‌های کوچکتر مثل ۴ درصد، تغییرات مدول ذخیره با افزایش میدان مغناطیسی میزان بیشتری نسبت به کرنش‌های بزرگتر مثل ۸ درصد دارد. بر اساس شکل ۳-۱۰ در کرنش ۸ درصد و عامل شکل ۰/۷۸ با افزایش چگالی شار مغناطیسی مدول ذخیره فشاری در تمامی فرکانس‌ها زیاد می‌شود.

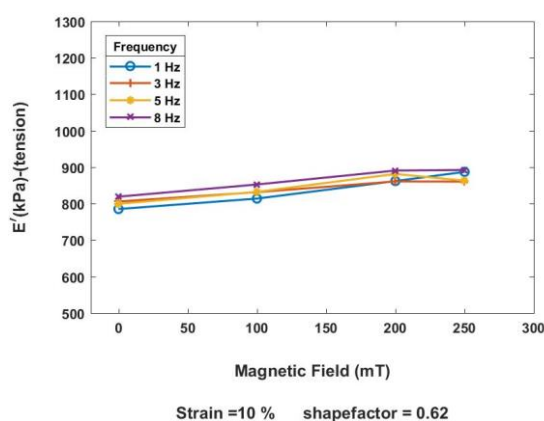
حالت کششی

مطابق شکل ۳-۱۱ با افزایش چگالی میدان مغناطیسی مدول ذخیره کششی نیز در تمامی کرنش‌ها افزایش پیدا می‌کند و این افزایش در کرنش‌های بالاتر به طور محسوسی کاهش پیدا می‌کند. با مقایسه‌ی این شکل و شکل ۳-۹ می‌توان مشاهده کرد که مقدار مدول ذخیره در حالت فشاری از کششی بیشتر می‌باشد.

مطابق شکل ۳-۱۲ در کرنش ۱۰ درصد و عامل شکل ۰/۶۲ با افزایش چگالی شار مغناطیسی مدول ذخیره کششی در تمامی فرکانس‌ها افزایش پیدا می‌کند.



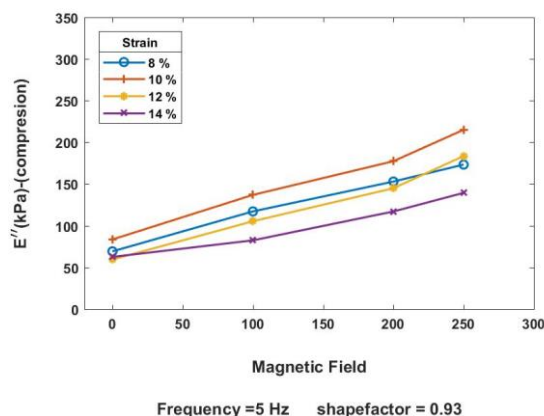
شکل ۳-۱۱- تغییرات مدول ذخیره کششی نسبت به چگالی شار مغناطیسی در کرنش‌های متفاوت.



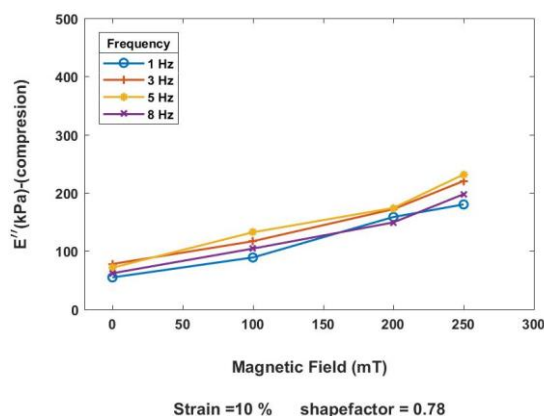
شکل ۳-۱۲- تغییرات مدول ذخیره فشاری نسبت به چگالی شار مغناطیسی در فرکانس‌های متفاوت.

۳-۶-۲ تغییرات E''

حالت فشاری



شکل ۳-۱۳- تغییرات مدول اتلاف فشاری نسبت به چگالی شار مغناطیسی در کرنش‌های متفاوت.



شکل ۳-۱۴- تغییرات مدول اتلاف فشاری نسبت به چگالی شار مغناطیسی در فرکانس‌های متفاوت.

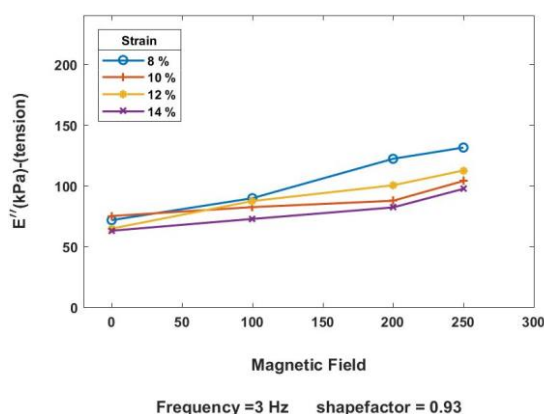
در شکل ۳-۱۳ مدول‌های اتلاف فشاری در فرکانس ۵ هرتز و عامل شکل ۰/۹۳ در کرنش‌های مختلف ترسیم شده است. مطابق شکل با افزایش چگالی شار مغناطیسی در تمامی کرنش‌ها مدول اتلاف فشاری افزایش پیدا می‌کند.

در شکل ۳-۱۴ مدول‌های اتلاف فشاری در کرنش ۱۰ درصد و عامل شکل ۰/۷۸ در فرکانس‌های مختلف ترسیم شده است. بر اساس این شکل با افزایش چگالی شار مغناطیسی در تمامی فرکانس‌ها مدول اتلاف فشاری افزایش پیدا می‌کند.

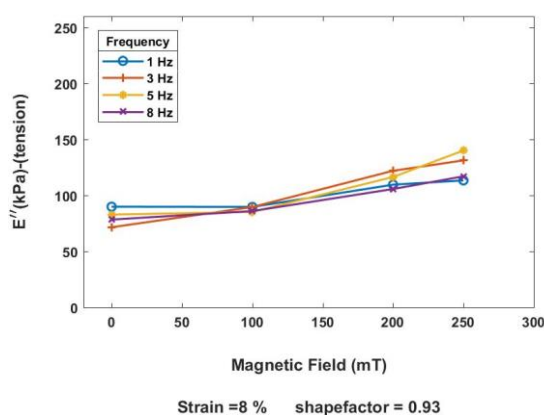
حالت کششی

در شکل ۳-۱۵ مدول‌های اتلاف کششی در فرکانس ۳ هرتز و عامل شکل ۰/۹۳ در کرنش‌های مختلف ترسیم شده است. مطابق شکل با افزایش چگالی شار مغناطیسی در تمامی کرنش‌ها مدول اتلاف کششی افزایش پیدا می‌کند.

در شکل ۳-۱۶ مدول‌های اتلاف کششی در کرنش ۸ درصد و عامل شکل ۰/۹۳ در فرکانس‌های مختلف ترسیم شده است. بر اساس این شکل با افزایش چگالی شار مغناطیسی در تمامی فرکانس‌ها مدول اتلاف کششی افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۳-۱۵- تغییرات مدول اتلاف کششی نسبت به چگالی شار مغناطیسی در کرنش‌های متفاوت.



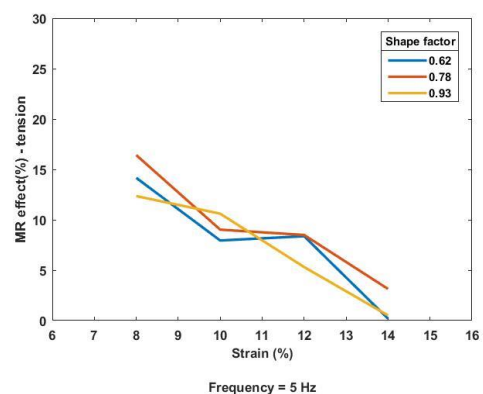
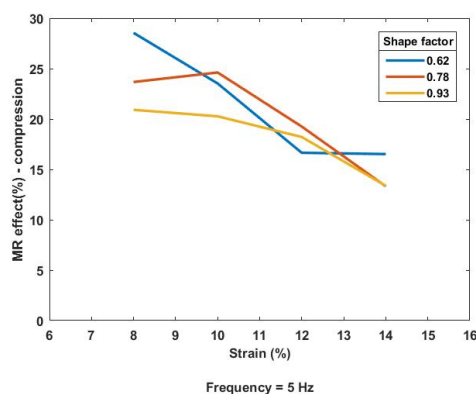
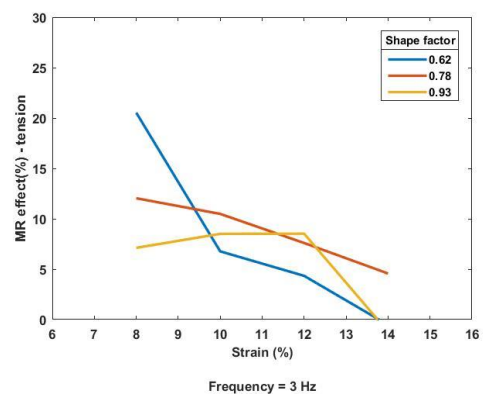
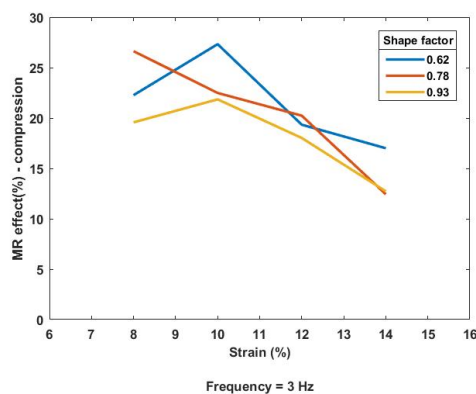
شکل ۳-۱۶- تغییرات مدول اتلاف کششی نسبت به چگالی شار مغناطیسی در فرکانس‌های متفاوت.

۳-۶-۳ اثر مگنتورئولوژیکال

در ادامه، تغییرات اثر مگنتورئولوژیکال بر حسب عوامل مختلف مورد بررسی قرار خواهد گرفت. این اثر طبق رابطه‌ی (۴-۳) محاسبه می‌گردد.

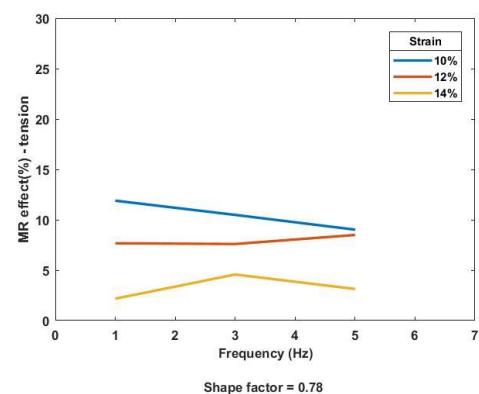
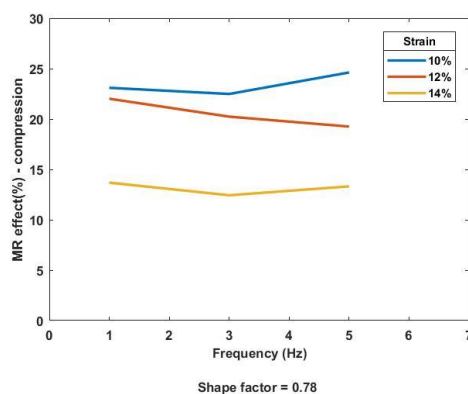
$$\%MR\ effect = \frac{E'_{Bmax} - E'_{Bmin}}{E'_{Bmin}} \times 100 \quad (4-3)$$

در شکل ۳-۱۷ تغییرات اثر مگنتورئولوژیکال بر حسب کرنش ورودی، در عامل شکل‌ها و فرکانس‌های مختلف ارائه شده است. طبق نمودارهای ترسیم شده، مقدار اثر مگنتورئولوژیکال در حالت فشاری بیشتر از حالت کششی می‌باشد و با افزایش کرنش ورودی، مقدار آن در هر دو حالت کششی و فشاری کاهش پیدا می‌کند.



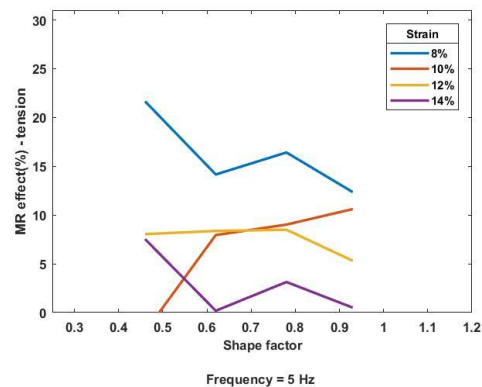
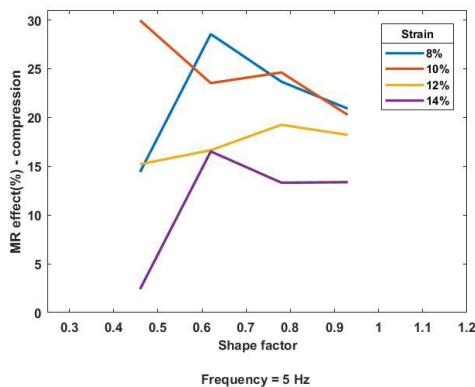
شکل ۳-۱۷- تغییرات اثر مگنتورئولوژیکال بر حسب کرنش، در فرکانس‌ها و عامل شکل‌های مختلف. ستون سمت راست) اثر مگنتورئولوژیکال کششی - ستون سمت چپ) اثر مگنتورئولوژیکال فشاری.

در شکل ۳-۱۸ تغییرات اثر مگنتورئولوژیکیال بر حسب فرکانس ورودی و کرنش‌های مختلف ارائه شده است. طبق نمودارهای ترسیم شده، مقدار اثر مگنتورئولوژیکیال در حالت فشاری بیشتر از حالت کششی می‌باشد و با افزایش فرکانس ورودی، مقدار آن در هر دو حالت کششی و فشاری تغییر به خصوصی پیدا نمی‌کند.



شکل ۳-۱۸- تغییرات اثر مگنتورئولوژیکیال بر حسب فرکانس، در کرنش‌های مختلف و عامل شکل ۰/۷۸. ستون سمت راست) اثر مگنتورئولوژیکیال کششی - ستون سمت چپ) اثر مگنتورئولوژیکیال فشاری.

در شکل ۳-۱۹ تغییرات اثر مگنتورئولوژیکیال بر حسب عامل شکل و کرنش‌های مختلف ارائه شده است. طبق نمودارهای ترسیم شده، مقدار اثر مگنتورئولوژیکیال در حالت فشاری بیشتر از حالت کششی می‌باشد و با افزایش عامل شکل، مقدار آن در هر دو حالت کششی و فشاری تغییر به خصوصی پیدا نمی‌کند.

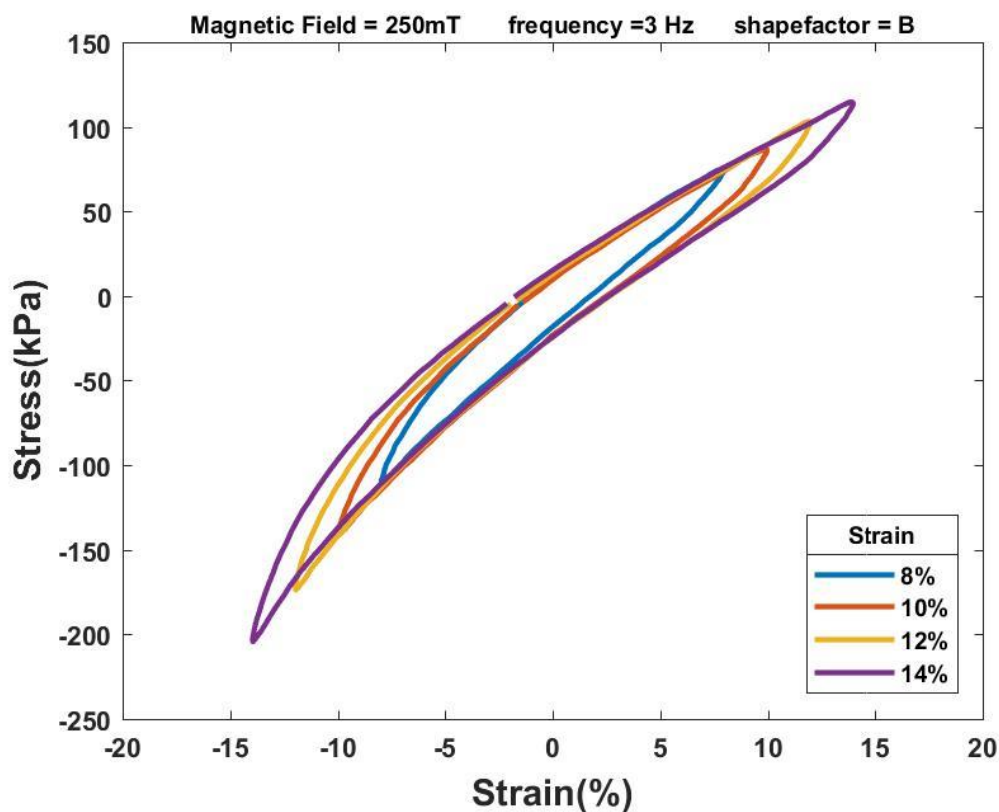


شکل ۳-۱۹- تغییرات اثر مگنتورئولوژیکال بر حسب عامل شکل، در کرنش‌های مختلف و فرکانس ۵ هرتز. ستون سمت راست) اثر مگنتورئولوژیکال کششی - ستون سمت چپ) اثر مگنتورئولوژیکال فشاری.

بیشترین اثر مگنتورئولوژیکال در حالت کششی به میزان ۲۱/۶۶ درصد در عامل شکل ۰/۴۲، فرکانس ۵ هرتز و کرنش ۸ درصد ایجاد شده است و همچنین بیشترین اثر مگنتورئولوژیکال در حالت فشاری به میزان ۲۹/۹۵ درصد در عامل شکل ۰/۴۲، فرکانس ۵ هرتز و کرنش ۱۰ درصد ایجاد شده است. اثر مگنتورئولوژیکال را می‌توان با استفاده از تاثیر در تغییر مدول اتلاف نیز محاسبه نمود؛ طبق این محاسبات روند مشخصی در تغییرات بر حسب ورودی‌های آزمایش وجود ندارد. بیشترین اثر مگنتورئولوژیکال در حالت کششی به میزان ۵۸۹ درصد در عامل شکل ۰/۴۲، فرکانس ۵ هرتز و کرنش ۱۴ درصد ایجاد شده است و همچنین بیشترین اثر مگنتورئولوژیکال در حالت فشاری به میزان ۱۷۹۴ درصد در عامل شکل ۰/۴۲، فرکانس ۵ هرتز و کرنش ۱۰ درصد ایجاد شده است.

۷-۳ تحلیل تغییرات مدول ذخیره و اتلاف در برابر کرنش ورودی

در شکل ۳-۲۰ نمودارهای هیستریزیس مربوط به تست کشش-فشار نمونه با عامل شکل ۰/۶۲، میدان مغناطیسی ۲۵۰ میلی تسلا و فرکانس ۳ هرتز در کرنش‌های مختلف ترسیم شده است. طبق شکل با افزایش کرنش نمودارها در قسمت فشاری شیب بیشتری و در قسمت کششی شیب کمتری پیدا می‌کنند. علت افزایش سختی در فشار، کاهش فاصله‌ی بین ذرات مغناطیسی می‌باشد زیرا کاهش فاصله، باعث افزایش نیروی مغناطیسی بین ذرات می‌گردد. به همین ترتیب با اعمال کشش به نمونه، فاصله‌ی بین ذرات زیاد شده و به تبع آن سختی کاهش پیدا می‌نماید.

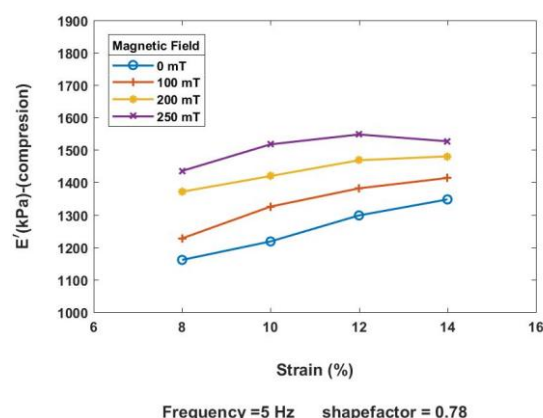


شکل ۳-۲۰- نمودارهای کشش-فشار هیستریزیس MRE در کرنش‌های ورودی متفاوت.

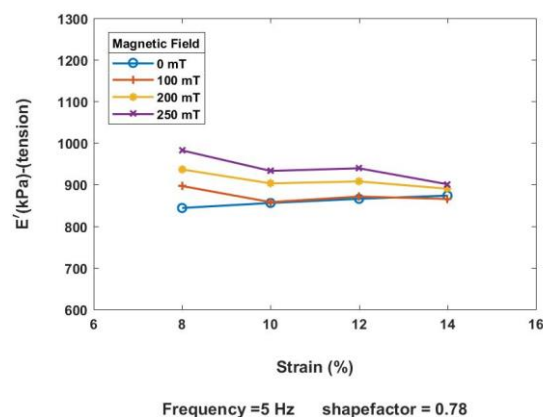
۳-۷-۱ تغییرات E'

در شکل ۳-۲۱ مدول‌های ذخیره فشاری برای نمونه با عامل شکل ۰/۷۸ در فرکانس ۵ هرتز و چگالی شارهای مغناطیسی مختلف بر حسب کرنش ترسیم شده است. مطابق این شکل با افزایش کرنش ورودی، مدول ذخیره فشاری در تمامی میدان‌های مغناطیسی افزایش پیدا می‌کند.

در شکل ۳-۲۲ مدول‌های ذخیره کششی برای نمونه با عامل شکل ۰/۷۸ در فرکانس ۵ هرتز و چگالی شارهای مغناطیسی مختلف بر حسب کرنش ترسیم شده است. مطابق این شکل با افزایش کرنش ورودی، مدول ذخیره فشاری در تمامی میدان‌های مغناطیسی کاهش پیدا می‌کند. و این کاهش در میدان‌های بزرگتر بیشتر می‌باشد.



شکل ۳-۲۱- تغییرات مدول ذخیره فشاری نسبت به کرنش ورودی در چگالی شارهای مغناطیسی متفاوت.

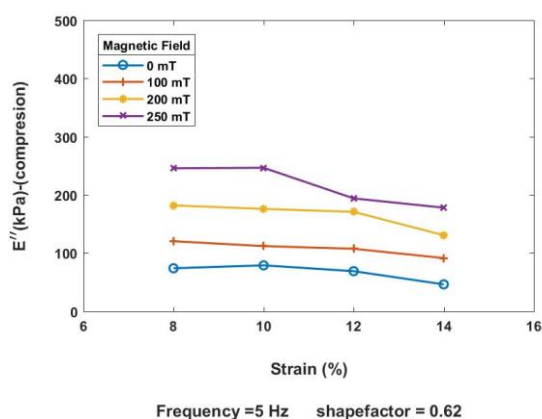


شکل ۳-۲۲- تغییرات مدول ذخیره کششی نسبت به کرنش ورودی در چگالی شارهای مغناطیسی متفاوت.

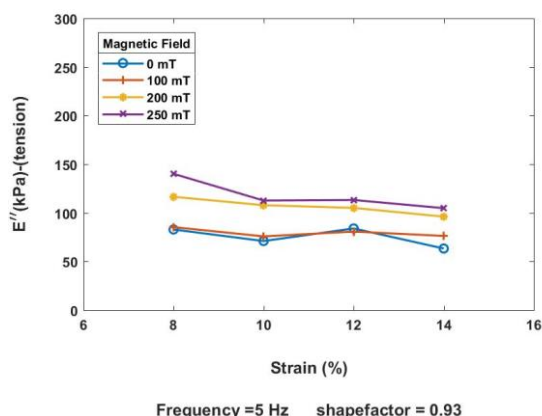
۳-۷-۲ تغییرات E''

در شکل ۳-۲۳ مدول‌های اتلاف فشاری برای نمونه با عامل شکل ۰/۶۲ در فرکانس ۵ هرتز و چگالی شارهای مغناطیسی مختلف بر حسب کرنش ترسیم شده است. مطابق این شکل با افزایش کرنش ورودی، مدول اتلاف فشاری در تمامی میدان‌های مغناطیسی کاهش پیدا می‌کند. و این کاهش در میدان‌های مختلف ثابت می‌باشد.

در شکل ۳-۲۴ مدول‌های اتلاف کششی برای نمونه با عامل شکل ۰/۹۳ در فرکانس ۵ هرتز و چگالی شارهای مغناطیسی مختلف بر حسب کرنش ترسیم شده است. مطابق این شکل با افزایش کرنش ورودی، مدول اتلاف کششی در تمامی میدان‌های مغناطیسی کاهش پیدا می‌کند.



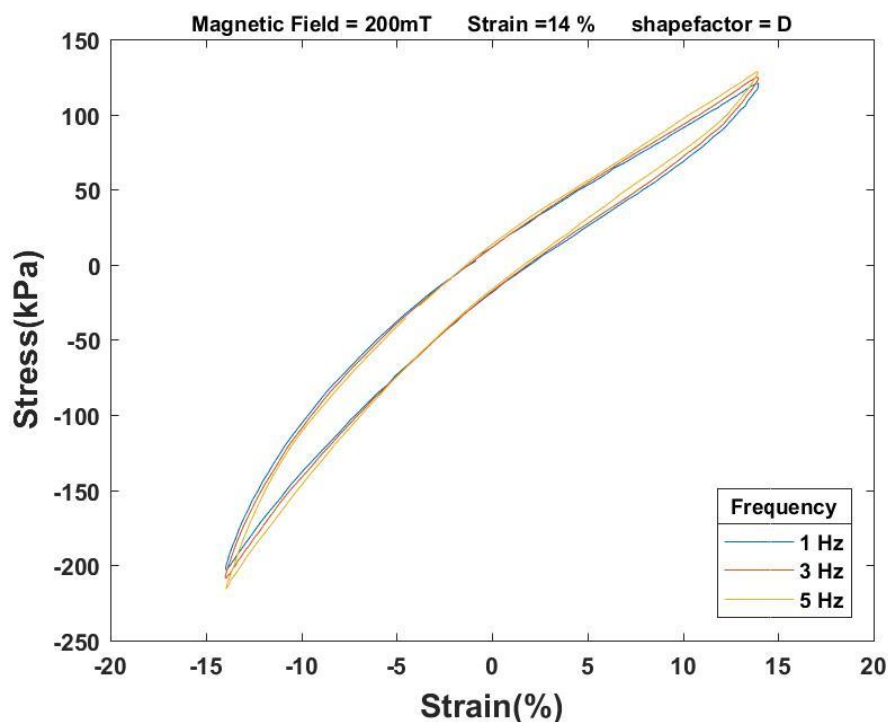
شکل ۳-۲۳- تغییرات مدول اتلاف فشاری نسبت به کرنش ورودی در چگالی شارهای مغناطیسی متفاوت.



شکل ۳-۲۴- تغییرات مدول اتلاف کششی نسبت به کرنش ورودی در چگالی شارهای مغناطیسی متفاوت.

۳-۸ تحلیل تغییرات مدول ذخیره و اتلاف در برابر فرکانس ورودی

در شکل ۳-۲۵ نمودارهای هیستریزیس مربوط به تست کشش- فشار نمونه با عامل شکل ۰/۹۳، میدان مغناطیسی ۲۰۰ میلی تسلا و کرنش ۱۴ درصد در فرکانس‌های مختلف ترسیم شده است. طبق شکل با افزایش فرکانس نمودارها شیب بیشتری پیدا می‌کنند.



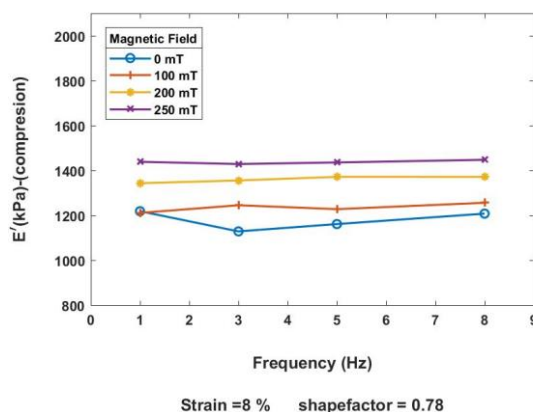
شکل ۳-۲۵- نمودارهای کشش-فشار هیستریزیس نمونه MRE در فرکانس‌های ورودی متفاوت.

۳-۸-۱ تغییرات E'

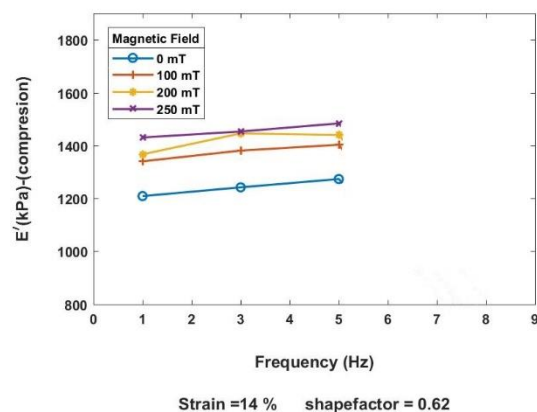
در شکل ۳-۲۶ مدول‌های ذخیره فشاری برای نمونه با عامل شکل ۰/۷۸ در کرنش ۸ درصد و چگالی شارهای مغناطیسی مختلف بر حسب فرکانس ترسیم شده است. مطابق این شکل با افزایش فرکانس ورودی، مدول ذخیره فشاری در تمامی میدان‌های مغناطیسی افزایش پیدا می‌کند. این افزایش در این کرنش مقدار کمی دارد اما در کرنش‌های بالاتر قابل توجه تر می‌باشد. این رفتار را می‌توان در شکل ۳-۲۴ که در کرنش ۱۴ درصد رسم شده است مشاهده نمود.

در شکل ۳-۲۷ مدول‌های ذخیره فشاری برای نمونه با عامل شکل ۰/۶۲ در کرنش ۱۴ درصد و چگالی شارهای مغناطیسی مختلف بر حسب فرکانس ترسیم شده است. به دلیل محدودیت در دستگاه تست، تست در فرکانس ۸ هرتز و کرنش ۱۴ درصد انجام پذیر نبوده است و با توجه به این که تغییرات نسبت به فرکانس در کرنش‌های بالا قابل تشخیص می‌باشد در ادامه از نمودارهایی استفاده شده که تا فرکانس ۵ هرتز را پوشش می‌دهند.

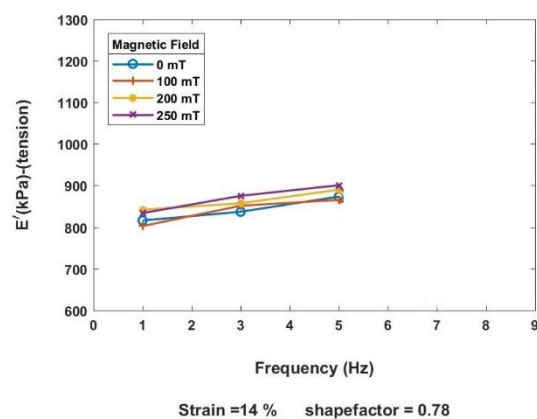
در شکل ۳-۲۸ مدول‌های ذخیره کششی برای نمونه با عامل شکل ۰/۷۸ در کرنش ۱۴ درصد و چگالی شارهای مغناطیسی مختلف بر حسب فرکانس ترسیم شده است. مطابق این شکل با افزایش فرکانس ورودی، مدول ذخیره کششی در تمامی میدان‌های مغناطیسی افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۳-۲۶- تغییرات مدول ذخیره فشاری نسبت به تمام فرکانس‌های ورودی در چگالی شارهای مغناطیسی متفاوت.



شکل ۳-۲۷- تغییرات مدول ذخیره فشاری نسبت به فرکانس ورودی در چگالی شارهای مغناطیسی متفاوت.

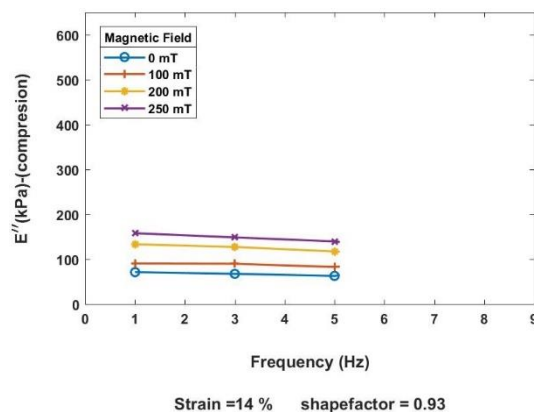


شکل ۳-۲۸- تغییرات مدول ذخیره کششی نسبت به فرکانس ورودی در چگالی شارهای مغناطیسی متفاوت.

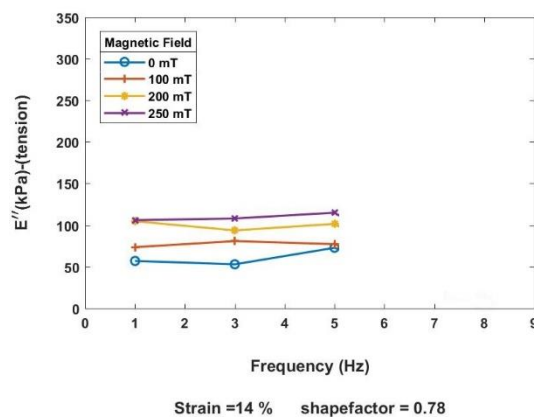
۳-۸-۲ تغییرات E''

در شکل ۳-۲۹ مدول‌های اتلاف فشاری برای نمونه با عامل شکل ۰/۹۳ در کرنش ۱۴ درصد و چگالی شارهای مغناطیسی مختلف بر حسب فرکانس ترسیم شده است. مطابق این شکل با افزایش فرکانس ورودی، مدول اتلاف فشاری در تمامی میدان‌های مغناطیسی کاهش پیدا می‌کند. و این کاهش در میدان‌های مختلف ثابت می‌باشد.

در شکل ۳-۳۰ مدول‌های اتلاف کششی برای نمونه با عامل شکل ۰/۷۸ در کرنش ۱۴ درصد و چگالی شارهای مغناطیسی مختلف بر حسب فرکانس ترسیم شده است. مطابق این شکل با افزایش فرکانس ورودی، مدول اتلاف کششی در تمامی میدان‌های مغناطیسی افزایش پیدا می‌کند.



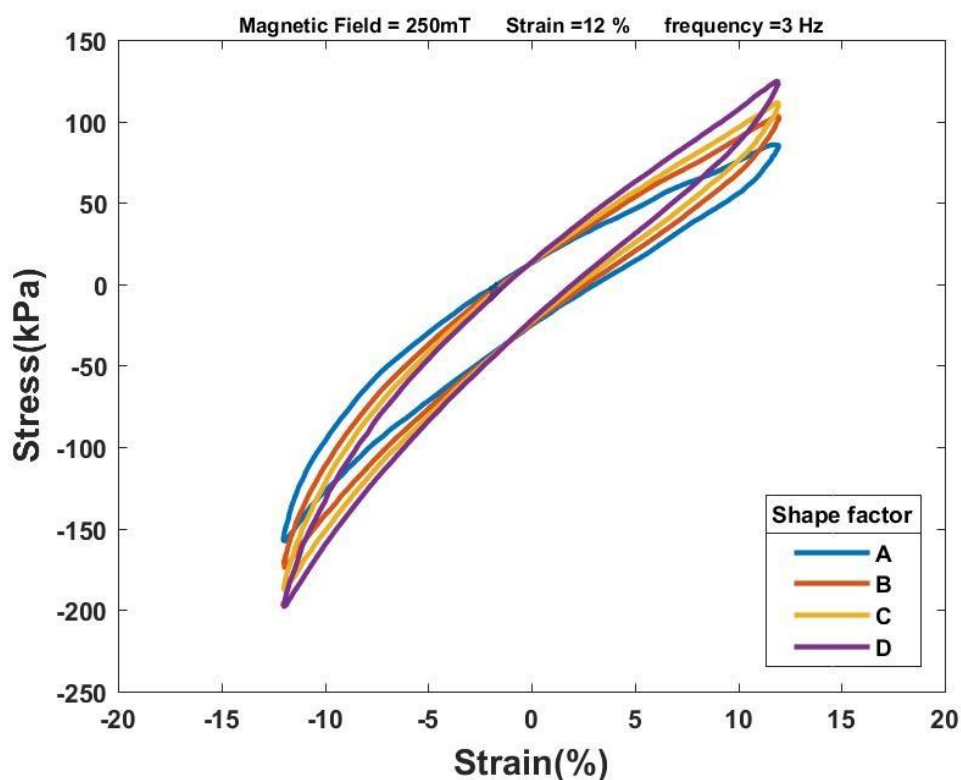
شکل ۳-۲۹- تغییرات مدول اتلاف فشاری نسبت به فرکانس ورودی در چگالی شارهای مغناطیسی متفاوت.



شکل ۳-۳۰- تغییرات مدول اتلاف کششی نسبت به فرکانس ورودی در چگالی شارهای مغناطیسی متفاوت.

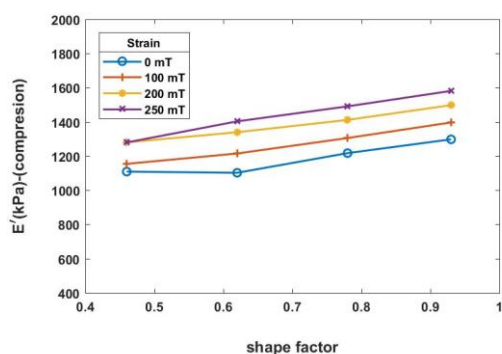
۳-۹ تحلیل تغییرات مدول ذخیره و اتلاف در برابر عامل شکل

در شکل ۳-۳۱ نمودارهای هیستریزیس مربوط به تست کشش- فشار در میدان مغناطیسی ۲۵۰ میلی تسلا، کرنش ۱۲ درصد و فرکانس ۳ هرتز در عامل شکل‌های مختلف ترسیم شده است. طبق شکل با افزایش عامل شکل، نمودارها شیب بیشتری پیدا می‌کنند. علت افزایش سختی در عامل شکل‌های بالاتر، کاهش کرنش‌های جانبی نسبت به کرنش محوری می‌باشد. طبق روابط الاستیسیته، این کاهش باعث افزایش در تنش محوری گشته که به تبع آن سختی افزایش پیدا خواهد کرد. در فصل اول این روابط به صورت کامل بیان شده است.

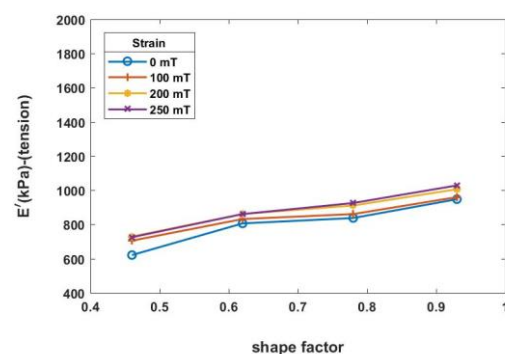


شکل ۳-۳۱ - نمودارهای کشش- فشار هیستریزیس نمونه MRE در عامل شکل‌های (قطرهای) متفاوت.

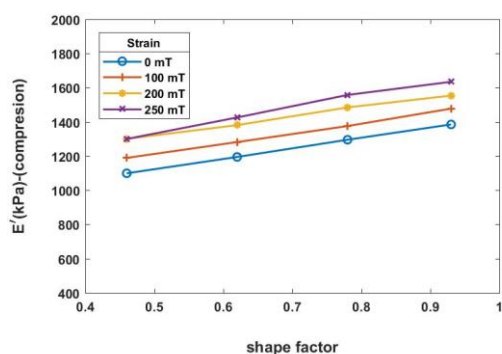
۳-۹-۱ تغییرات E'



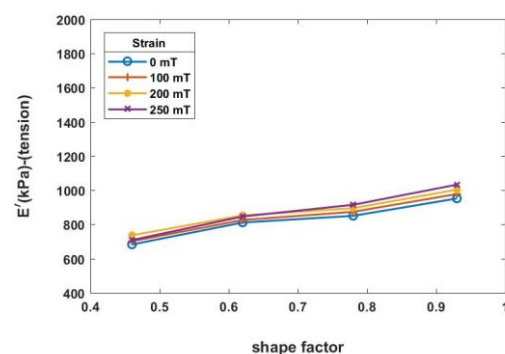
Frequency = 3 Hz Strain = 10%



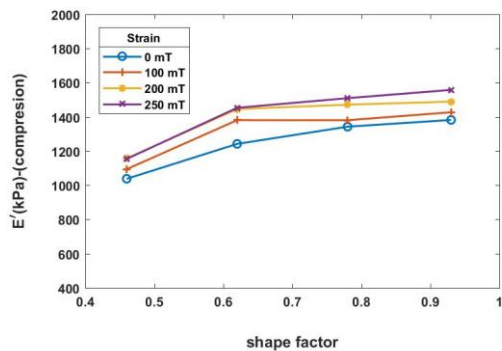
Frequency = 3 Hz Strain = 10%



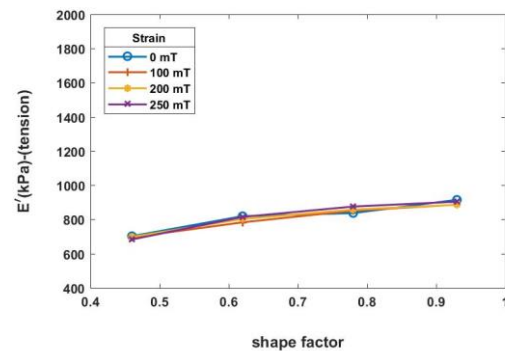
Frequency = 3 Hz Strain = 12%



Frequency = 3 Hz Strain = 12%



Frequency = 3 Hz Strain = 14%



Frequency = 3 Hz Strain = 14%

شکل ۳-۳۲- تغییرات مدول ذخیره بر حسب عامل شکل و در میدان‌های مغناطیسی و کرنش‌های مختلف. ستون سمت راست) مدول ذخیره کششی - ستون سمت چپ) مدول ذخیره فشاری.

در شکل ۳-۳۲ تغییرات مدول ذخیره کششی و فشاری بر حسب عامل شکل و در میدان‌های مغناطیسی و کرنش‌های مختلف ترسیم شده است. طبق نمودارهای ترسی شده با افزایش عامل شکل، مقدار مدول

ذخیره در حالت کششی و فشاری افزایش پیدا می‌کند. این افزایش در تمامی میداهای مغناطیسی و کرنش‌های ورودی وجود دارد.

در تمامی میدان‌ها و عامل شکل‌ها، مقدار مدول ذخیره فشاری بزرگ‌تر از مدول ذخیره کششی می‌باشد و بیشترین تغییر در مدول ذخیره فشاری، در افزایش عامل شکل از ۰/۴۶ به ۰/۹۳ در فرکانس ۱ هرتز، کرنش ۸ درصد و میدان مغناطیسی ۰ میلی تسلا صورت گرفته است که برابر با ۳۹/۸۷ درصد می‌باشد و بیشترین تغییر در مدول ذخیره کششی، در افزایش عامل شکل از ۰/۴۶ به ۰/۹۳ در فرکانس ۳ هرتز، کرنش ۱۰ درصد و میدان مغناطیسی ۰ میلی تسلا صورت گرفته است که برابر با ۵۲/۷۰ درصد می‌باشد.

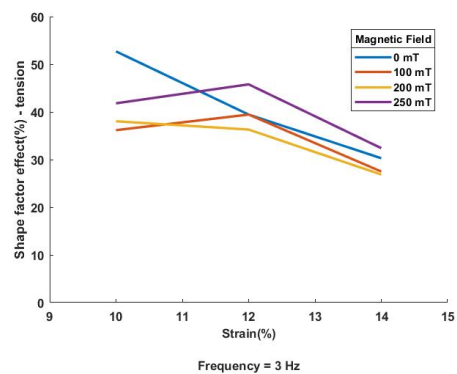
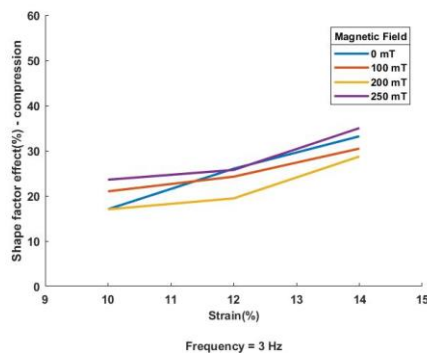
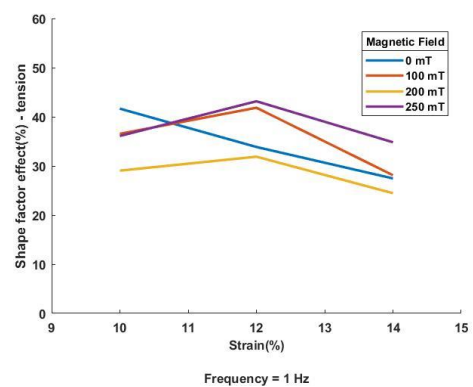
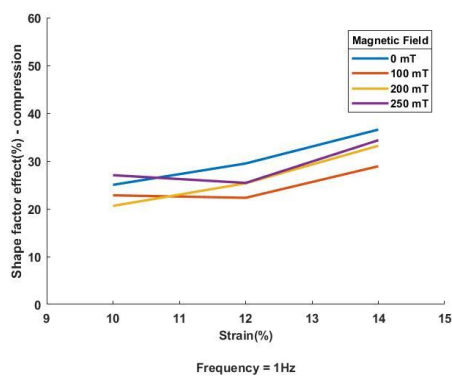
در کرنش ۱۴ درصد، افزایش مدول ذخیره فشاری برای شیب کمتری بوده و متمایل به حالت اشباع می‌باشد. در حالت کششی، افزایش عامل شکل از ۰/۶۲ به ۰/۷۸ برای تاثیر کمتر در افزایش مدول ذخیره نسبت به تغییر عامل شکل‌های دیگر می‌باشد. همچنین با افزایش کرنش به ۱۴ درصد تاثیر افزایش عامل شکل در مدول ذخیره‌ی کششی، به حالت اشباع نزدیک می‌گردد.

اثر عامل شکل را می‌توان همانند اثر مگنتورئولوژیکال، برای تغییرات عامل شکل‌های مختلف و طبق فرمول (۵-۳) محاسبه نمود.

$$\% \text{ Shape factor effect} = \frac{E'_{Smax} - E'_{Smin}}{E'_{Smin}} \times 100 \quad (5-3)$$

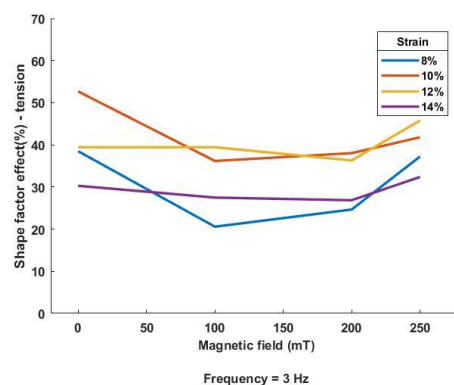
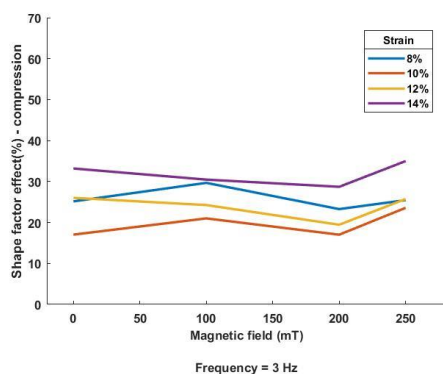
در شکل ۳-۳۳ تغییرات اثر عامل شکل بر حسب کرنش، در میدان‌های مغناطیسی و فرکانس‌های مختلف ارائه شده است.

طبق نمودارها با افزایش کرنش از ۱۰ درصد به ۱۴ درصد، اثر عامل شکل در حالت کششی کاهش می‌یابد و در حالت فشاری افزایش می‌یابد؛ همچنین در کرنش ۱۰ درصد اثر عامل شکل کششی بیشتر از فشاری می‌باشد و در کرنش ۱۴ درصد اثر عامل شکل فشاری بیشتر از کششی می‌باشد.



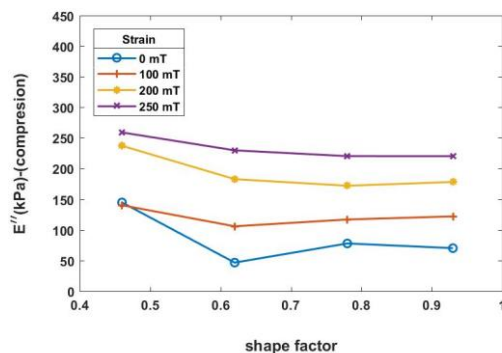
شکل ۳-۳۳- اثر عامل شکل بر حسب کرنش، در میدان‌های مغناطیسی و فرکانس‌های مختلف. ستون سمت راست) اثر عامل شکل کششی - ستون سمت چپ) اثر عامل شکل فشاری.

در شکل ۳-۳۴ اثر عامل شکل بر حسب چگالی شار میدان مغناطیسی، در کرنش‌های متفاوت و در فرکانس ۳ هرتز رسم شده است. طبق نمودارهای رسم شده افزایش میدان مغناطیسی تاثیر به خصوصی بر روی تغییرات اثر عامل شکل ندارد و مستقل از آن می‌باشد.

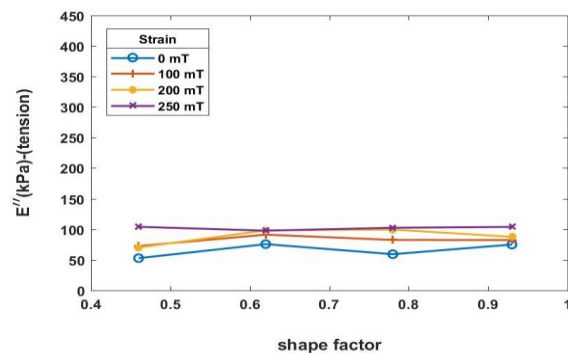


شکل ۳-۳۴- اثر عامل شکل بر حسب میدان مغناطیسی، در کرنش‌ها و فرکانس‌های مختلف. ستون سمت راست) اثر عامل شکل کششی - ستون سمت چپ) اثر عامل شکل فشاری.

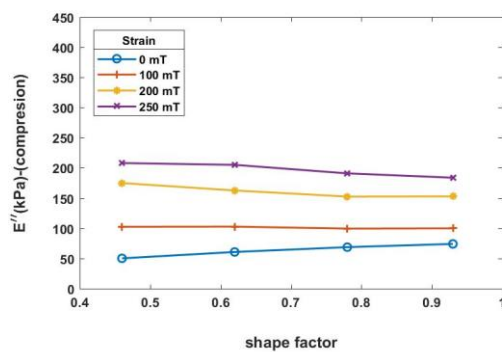
۳-۹-۲ تغییرات E''



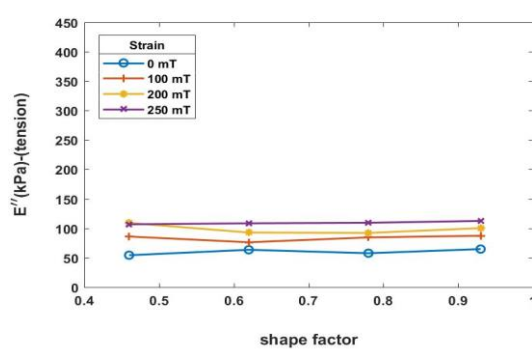
Frequency = 3 Hz Strain = 10%



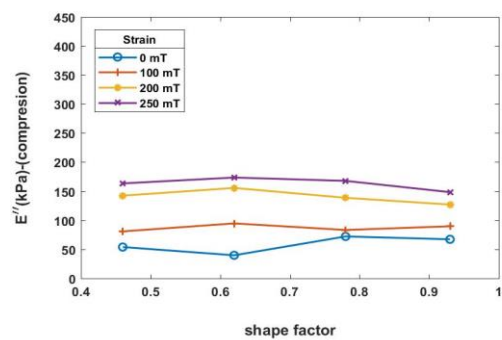
Frequency = 3 Hz Strain = 10%



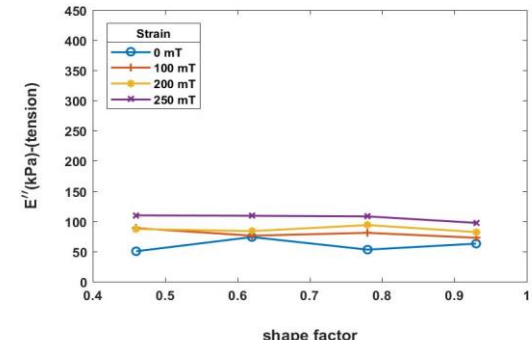
Frequency = 3 Hz Strain = 12%



Frequency = 3 Hz Strain = 12%



Frequency = 3 Hz Strain = 14%



Frequency = 3 Hz Strain = 14%

شکل ۳-۳۵- تغییرات مدول اتلاف بر حسب عامل شکل و در میدان‌های مغناطیسی و کرنش‌های مختلف.

ستون سمت راست) مدول اتلاف کششی - ستون سمت چپ) مدول اتلاف فشاری

در شکل ۳-۳۵ تغییرات مدول اتلاف کششی و فشاری بر حسب عامل شکل و در میدان‌های

مغناطیسی و کرنش‌های مختلف ترسیم شده است. با مشاهده‌ی این نمودارها نتایج مختلفی حاصل

می‌گردد.

با افزایش عامل شکل، در بیشتر حالت‌ها، تغییر به خصوصی در مدول اتلاف کششی و فشاری ایجاد نمی‌گردد که می‌توان نتیجه گرفت مدول اتلاف مستقل از عامل شکل می‌باشد. همچنین می‌توان با مقایسه‌ی نمودارها دریافت که مدول اتلاف فشاری بزرگتر از مدول اتلاف کششی می‌باشد.

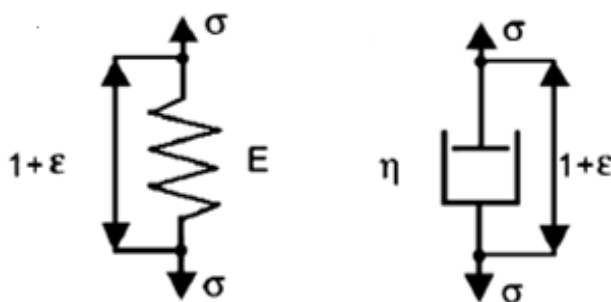
۴ - مدل سازی

۱-۴ پیش‌گفتار

پس از بررسی نتایج آزمون‌ها در فصل قبل، در این فصل به مدل‌سازی این نتایج بر حسب توابع ریاضی می‌پردازیم. در ابتدا به معرفی تعدادی از مدل‌های ارائه شده در پژوهش‌های پیشین پرداخته می‌شود و در ادامه نحوه‌ی انجام مدل‌سازی در این پژوهش و اعتبارسنجی آن ارائه می‌گردد.

همان‌طور که در فصل اول اشاره شد، مواد ویسکوالاستیک دارای دو نوع رفتار مکانیکی می‌باشند. اولین رفتار همانند مواد الاستیک می‌باشد که در آن تنش با کرنش ورودی رابطه‌ی مستقیم دارد و دومین رفتار مانند مواد ویسکوز می‌باشد که در آن تنش با نرخ کرنش ورودی رابطه‌ی مستقیم دارد. این دو نوع از رفتار، باعث ایجاد توانایی ذخیره و اتلاف انرژی در این مواد می‌گردد.

در مبحث شبیه‌سازی می‌توان خاصیت الاستیک را با یک فنر خطی مدل نمود که در آن تنش با کرنش به واسطه‌ی مدول الاستیک رابطه‌ی مستقیم دارد و خاصیت ویسکوز را با استفاده از یک میراگر مدل نمود که در آن تنش با نرخ کرنش به واسطه‌ی مدول اتلاف رابطه‌ی مستقیم دارد. در شکل ۱-۴ نمادهای فنر و میراگر به همراه ثوابت فیزیکی مربوط به آن‌ها نشان داده شده است.

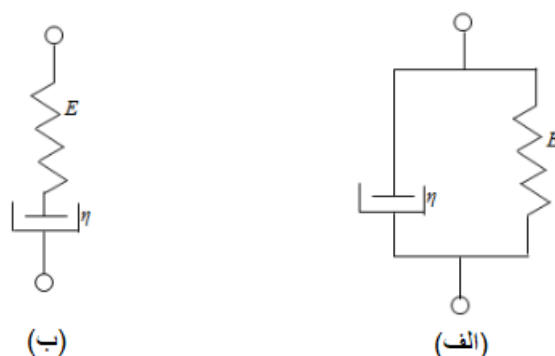


شکل ۱-۴- نمادهای فنر و میراگر.

۲-۴ مدل‌های ویسکوالاستیک

۱-۲-۴ مدل‌های پایه

در پژوهش‌های گذشته به منظور مدل‌سازی مواد ویسکوالاستیک، از اتصال دو المان فنر و میراگر به صورت‌های مختلف و اعمال تغییرات بر روی آن‌ها، مدل‌های مختلفی ارائه شده است. در بیشتر موارد از دو مدل پایه به نام ماکسول و کلوین استفاده شده است. در مدل ماکسول، یک عدد فنر بدون جرم خطی به همراه یک عدد میراگر به صورت سری به یکدیگر متصل شده‌اند و در مدل کلوین، فنر و میراگر به صورت موازی به یکدیگر متصل گشته‌اند. در شکل ۲-۴ می‌توان نمادهای این دو مدل و نحوه‌ی اتصال آن‌ها را مشاهده نمود.



شکل ۲-۴- نماد مدل‌های پایه ویسکوالاستیک به همراه ثوابت فیزیکی : (الف) مدل کلوین (ب) مدل ماکسول.

در ادامه روابط ساختاری مدل‌های ماکسول و کلوین، طبق معادله‌ی (۱-۴) و (۲-۴) ارائه گردیده است.

روابط مدل ماکسول:

$$\epsilon_{\text{total}} = \epsilon_{\text{spring}} + \epsilon_{\text{dashpot}} \quad (۱-۴)$$

$$\sigma_{\text{total}} = \sigma_{\text{spring}} = \sigma_{\text{dashpot}}$$

$$\sigma_{\text{dashpot}} = \eta \times \dot{\epsilon}$$

$$\sigma_{\text{spring}} = E \times \varepsilon_{\text{spring}}$$

روابط مدل کلونین:

$$\sigma_{\text{total}} = \sigma_{\text{spring}} + \sigma_{\text{dashpot}} \quad (2-4)$$

$$\varepsilon_{\text{total}} = \varepsilon_{\text{spring}} = \varepsilon_{\text{dashpot}}$$

$$\sigma_{\text{dashpot}} = \eta \times \dot{\varepsilon}$$

$$\sigma_{\text{spring}} = E \times \varepsilon_{\text{spring}}$$

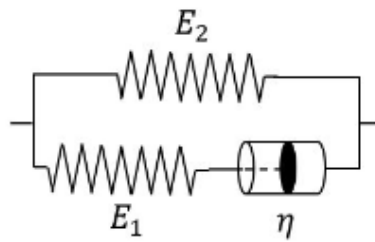
در مدل‌های تعمیم یافته، فنر و میراگر علاوه بر حالت خطی به صورت غیرخطی نیز در نظر گرفته می‌شوند.

۴-۲-۲ مدل جامد خطی استاندارد^۱

با توجه به این که مدل‌های پایه، خود به تنهایی قابلیت ارائه مدل مناسبی برای مواد ویسکوالاستیک ندارند، مدل‌هایی ارائه شده است که از ترکیب مدل‌های پایه به روش‌های گوناگون ساخته شده‌اند. یکی از مدل‌های پرکاربرد، مدل سه پارامتری استاندارد جامد خطی (SLS) می‌باشد. در این مدل یک عدد فنر به صورت موازی با یک مدل ماکسول و یا کلونین قرار گرفته است (شکل ۴-۳).

مدل ماکسول توانایی شبیه‌سازی خزش و مدل کلونین توانایی شبیه‌سازی رهایش را دارا نمی‌باشند و برخلاف آن‌ها مدل استاندارد جامد خطی توانایی شبیه‌سازی خزش و رهایش را به طور هم‌زمان دارد.

^۱ Standard linear solid model



شکل ۳-۴- مدل سه پارامتری استاندارد جامد خطی در حالت ماکسول.

معادله‌ی ساختاری بر اساس این مدل، طبق رابطه‌ی (۳-۴) برابر است با:

$$\sigma + p_1 \times \dot{\sigma} = q_0 \times \varepsilon + q_1 \times \dot{\varepsilon} \quad (۳-۴)$$

$$p_1 = \frac{\eta}{E_1} \quad , \quad q_0 = E_2 \quad , \quad q_1 = \frac{E_1 + E_2}{E_1} \times \eta$$

۳-۲-۴ مدل‌های تعمیم یافته^۱

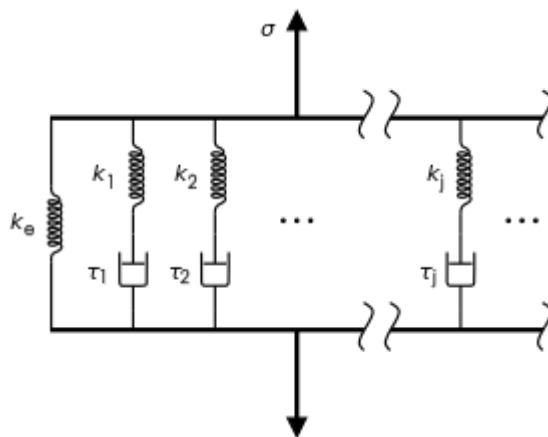
در پژوهش‌های مختلف، ارائه‌ی مدل‌های جدید بر اساس خواص مختلف مواد ویسکوالاستیک در طی مرور زمان صورت پذیرفت. مدل‌های جدید، ترکیبی از مدل‌های پایه و استاندارد جامد و ... می‌باشند که هر کدام دارای توانایی در پیش‌بینی نوع خاصی از مواد ویسکوالاستیک می‌باشند.

۱- مدل تعمیم یافته ماکسول (ویکرت)^۲:

دراین مدل، تعدادی مدل ماکسول و یک فنر با یکدیگر به صورت موازی قرار می‌گیرند (شکل ۴-۴). علت این نوع مدل‌سازی، وجود زمان‌های متفاوت رهايش، در قسمت‌های مختلف ماده می‌باشد. وجود یک فنر و یا یک میراگر به صورت موازی که مقدار آن به نسبت بیشتر است، باعث بهبود مدل می‌شود [۱۱۳].

^۱ Generalized models

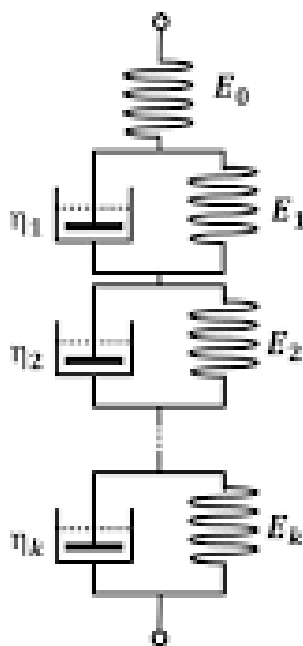
^۲ Wiechert



شکل ۴-۴ - مدل تعمیم یافته ماکسول.

۲- مدل تعمیم یافته کلوین :

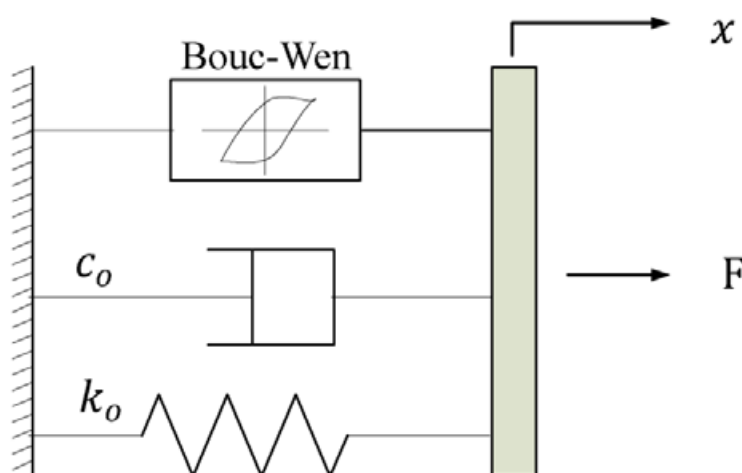
در این مدل، تعدادی مدل کلوین و یک فنر با یکدیگر به صورت سری قرار می گیرند (شکل ۴-۵). علت این نوع مدل سازی، وجود زمان های متفاوت رهايش، در قسمت های مختلف ماده می باشد. وجود یک فنر و یا یک میراگر به صورت سری که مقدار آن به نسبت بیشتر است، باعث بهبود مدل می شود [۱۱۳].



شکل ۴-۵ - مدل تعمیم یافته کلوین.

۴-۲-۴ مدل بوک - ون

در مواردی از مواد ویسکوالاستیک، رفتار رئولوژی مربوط به ماده به صورت غیرخطی رفتار می‌کند. به همین علت هیستریزیس تنش- کرنش این مواد به شکل غیرخطی مشاهده می‌گردد و دارای عدم تقارن^۱ می‌باشد. به منظور مدل‌سازی این نوع رفتار مدل‌های مختلفی ارائه شده است. مدل بوک - ون دارای توانایی مناسب در مدل‌سازی مواد ویسکوالاستیک جامد که رفتار غیرخطی دارند می‌باشد [۵۵ و ۵۶]. این مدل از معادلات دیفرانسیل مرتبه اول^۲ تشکیل شده است که دارای ضرایب ثابتی می‌باشد. در پژوهش‌های مختلف مقدار و نوع این ضرایب ثابت، متناسب با نوع رفتار ماده ارائه شده است. این مدل در ابتدا به صورت کلاسیک ارائه شده است، ولی به دلیل عدم توانایی در شبیه‌سازی حالت سخت شوندگی مجدد، مورد تغییر قرار گرفته و مدل‌های تعمیم یافته‌ای از آن ارائه گشته است. استفاده از این مدل در مواد MRE نیز به دلیل رفتار غیرخطی مورد استقبال قرار گرفته است. یانگ و همکاران [۹۵] در پژوهشی از مدل بوک - ون تعمیم یافته به منظور مدل‌سازی ایزولاتور MRE استفاده نموده‌اند (شکل ۴-۶).



شکل ۴-۶- مدل تعمیم یافته بوک - ون.

^۱ Asymmetry

^۲ First order differential equations

معادلات ساختاری این مدل طبق رابطه‌ی (۴-۴) به صورت زیر می‌باشد:

$$f = \alpha k_0 x + (1 - \alpha) k_0 z + c_0 \dot{x} \quad (4-4)$$

$$\dot{z} = A\dot{x} - \beta|\dot{x}||z|^{n-1}z - \gamma x|\dot{z}|^n$$

در این معادله، α تعیین کننده‌ی میزان غیرخطی بودن مدل می‌باشد و ثوابت A, β, γ, n تابعی

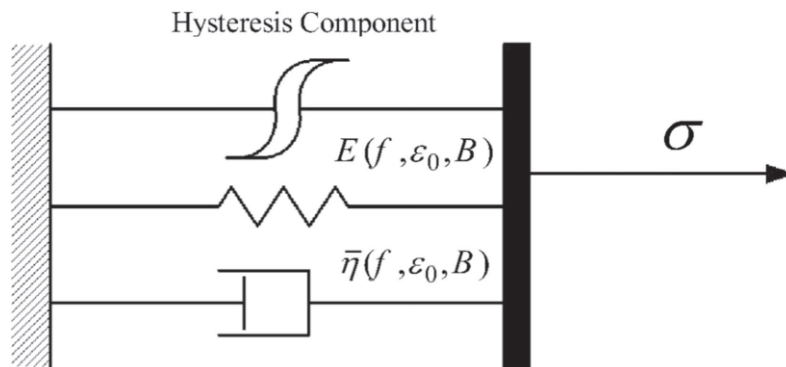
از میدان مغناطیسی می‌باشند که بر اساس داده‌های آزمایشگاهی تعیین می‌گردند.

۴-۲-۵ مدل وطن دوست و همکاران

طبق پژوهشی که وطن دوست و همکاران بر روی مواد MRE انجام داده‌اند، مدلی تقریباً جامع در حالت

کشش- فشار ارائه گشته است. این مدل همانند مدل بوک-ون از یک جز هیستریزیس و دو جز فنر و

میراگر تشکیل شده است (شکل ۴-۷).



شکل ۴-۷- مدل ویسکوالاستیک وطن دوست و همکاران.

در این مدل فنر و میراگر به صورت اجزا غیر خطی در نظر گرفته شده‌اند که تابعی از شار میدان مغناطیسی، فرکانس و کرنش ورودی می‌باشند. جز هیستریزیس نیز تابعی از شار میدان مغناطیسی، فرکانس و کرنش ورودی می‌باشد که با کرنش‌های مرتبه دوم و سوم نسبت مستقیم دارد.

معادله‌ی ساختاری این مدل طبق رابطه‌ی (۴-۵) به صورت زیر می‌باشد:

$$\sigma_{MRE} = \sigma_{Viscoelastic} + \sigma_{Hysteresis} \quad (۴-۵)$$

$$\sigma_{Viscoelastic} = E(f, \varepsilon_0, B) \varepsilon(t) + \bar{\eta}(f, \varepsilon_0, B) \dot{\varepsilon}(t)$$

$$\sigma_{Hysteresis} = K_1(f, \varepsilon_0, B) \varepsilon^2(t) + K_2(B) \varepsilon^3(t)$$

با در نظر گرفتن کرنش ورودی به صورت تابعی سینوسی ضرایب مدل به صورت معادله‌های (۴-۶)

الی (۴-۱۰) در نظر گرفته شده‌اند:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(2\pi f t) \quad (۴-۶)$$

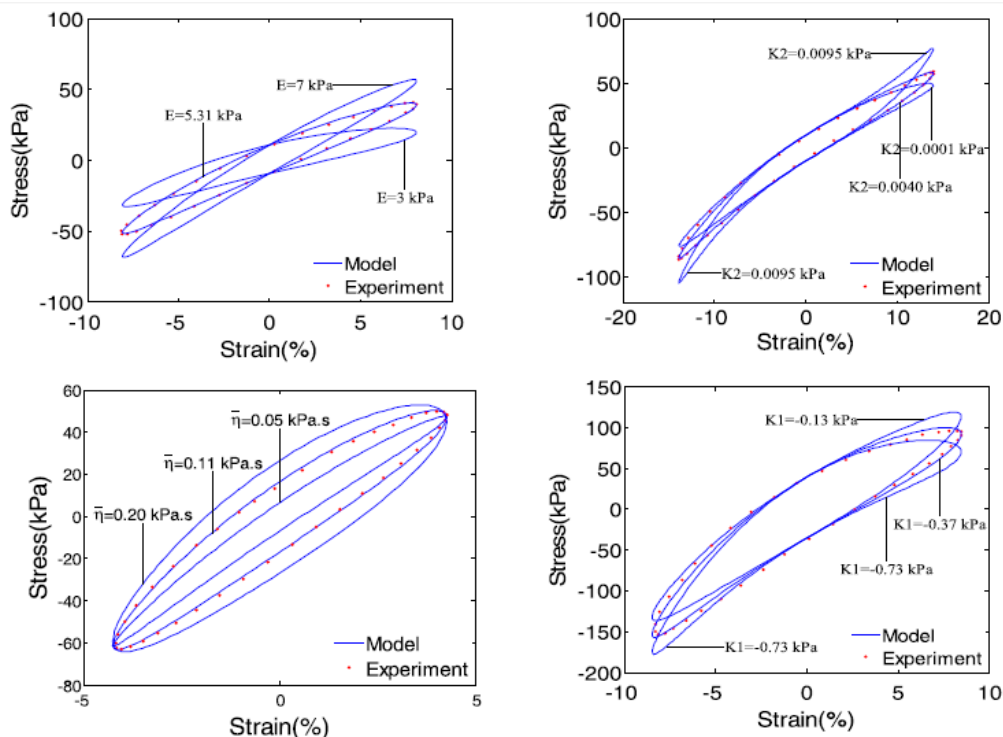
$$E(f, \varepsilon_0, B) = \alpha_B (f)^{b_B} (\varepsilon)^{c_B} \quad (۴-۷)$$

$$\bar{\eta}(f, \varepsilon_0, B) = \alpha_B (f)^{\beta} (\varepsilon)^{\lambda} \quad (۴-۸)$$

$$K_1(f, \varepsilon_0, B) = k_{11B} (f)^{K_{12B}} (\varepsilon)^{K_{13B}} \quad (۴-۹)$$

$$K_2(B) = k_{21B} \quad (۴-۱۰)$$

ثوابت موجود در این معادلات مطابق با نتایج آزمایشگاهی، به صورت توابعی از میدان مغناطیسی به دست می‌آیند. بنابراین با تعیین فرکانس و کرنش ورودی، می‌توان میزان تنش وارده به نمونه را در شارهای مغناطیسی مختلف محاسبه نمود. در شکل ۴-۸ می‌توان نحوه‌ی تغییر رفتار ماده را بر اساس تغییر میزان ثوابت مشاهده نمود.



شکل ۴-۸- تغییر شکل هیستریزیس MRE بر اساس تغییر ثوابت در مدل وطن دوست و همکاران.

با مقایسه‌ی این مدل و نتایج آزمایشگاهی، میزان مطابقت آن، به صورت میانگین ۹۰ درصد محاسبه شده است. با توجه به مطابقت مناسب این مدل، در پژوهش حاضر نیز مدلی بر اساس این مدل ارائه شده است.

۴-۳ معرفی مدل

همان‌طور که در فصل‌های پیشین اشاره شد، رفتار رئولوژی مواد MRE به شار میدان مغناطیسی، فرکانس و کرنش ورودی وابسته می‌باشد. علاوه بر موارد ذکر شده عامل شکل نیز یکی از عوامل تاثیر گذار بر رفتار این مواد می‌باشد. در مدل جدید این پژوهش، عامل شکل نیز در روابط حضور پیدا کرده است و مدلی جامع‌تر نسبت به مدل‌های قبلی ارائه شده است.

به منظور ایجاد مدل، از مدل وطن‌دوست و همکاران به عنوان مدل پایه استفاده شده است و در ادامه، ثابت عامل شکل به مدل اضافه گردیده است.

مطابق با شکل ۷-۴، مدل حاضر نیز از یک جز هیستریزیس و دو جز فنر و میراگر غیرخطی تشکیل شده است.

با توجه به اضافه نمودن عامل شکل (S) به مدل، روابط ساختاری به صورت معادله‌ی (۴-۱۱) پیش‌بینی می‌گردد:

$$\sigma_{MRE} = \sigma_{Viscoelastic} + \sigma_{Hysteresis} \quad (۴-۱۱)$$

$$\sigma_{Viscoelastic} = E(f, \varepsilon_0, B, S) \varepsilon(t) + \bar{\eta}(f, \varepsilon_0, B, S) \dot{\varepsilon}(t)$$

$$\sigma_{Hysteresis} = K_1(f, \varepsilon_0, B, S) \varepsilon^2(t) + K_2(f, \varepsilon_0, B, S) \varepsilon^3(t)$$

در ادامه به منظور استخراج ثوابت ($E, \bar{\eta}, K_1, K_2$) از الگوریتم ژنتیک^۱ نرم‌افزار متلب استفاده شده است. در این الگوریتم تابع خطا، مربع جمع اختلاف بین داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های معادله‌ی (۴-۱۱) در نظر گرفته شده است. با توجه به نوع محاسبات این الگوریتم، بهترین ثوابت که باعث کمینه شدن تابع خطا گردند، استخراج می‌شوند.

پس از استخراج ثوابت اصلی و بررسی آن‌ها بر اساس ورودی‌های مختلف، روابط (۴-۱۱) به صورت زیر اصلاح گشته‌اند:

$$\sigma_{MRE} = \sigma_{Viscoelastic} + \sigma_{Hysteresis} \quad (۴-۱۲)$$

$$\sigma_{Viscoelastic} = E(f, \varepsilon_0, B, S) \varepsilon(t) + \bar{\eta}(f, \varepsilon_0, B) \dot{\varepsilon}(t)$$

$$\sigma_{Hysteresis} = K_1(f, \varepsilon_0, B, S) \varepsilon^2(t) + K_2(B) \varepsilon^3(t)$$

^۱ Genetic algorithm

این معادلات به این معنا می‌باشند که عامل شکل در مدول‌های ذخیره و عدم تقارن هیستریزس تاثیر مستقیم دارد و در مدول اتلاف و مدول سخت‌شوندگی تاثیری ندارد.

پس از بدست آمدن ثوابت اصلی مدل، بر حسب توابع توانی که بر حسب ورودی‌ها می‌باشند پیش‌بینی می‌گردند:

ورودی کرنش مطابق با معادله‌ی (۴-۶) می‌باشد.

$$E(f, \varepsilon_0, B, S) = a_B (f)^{b_B} (\varepsilon)^{c_B} (S)^{d_B} \quad (۱۳-۴)$$

$$\bar{\eta}(f, \varepsilon_0, B) = \alpha_B (f)^\beta (\varepsilon)^\lambda \quad (۱۴-۴)$$

$$K_1(f, \varepsilon_0, B, S) = k_{11B} (f)^{K_{12B}} (\varepsilon)^{K_{13B}} (S)^{k_{14B}} \quad (۱۵-۴)$$

$$K_2(B) = k_{21B} \quad (۱۶-۴)$$

در جدول ۴-۱ تفاسیر فیزیکی ثوابت موجود در معادلات (۴-۱۳) الی (۴-۱۶) را می‌توان مشاهده نمود.

جدول ۴-۱- تفاسیر فیزیکی ثابت‌های مدل پیشنهادی.

ضرایب	تفسیر فیزیکی
$a_B (kPa)$	اثر میدان مغناطیسی بر روی مدول ذخیره
b_B	اثر نرخ کرنش بر روی مدول ذخیره
c_B	اثر کرنش بر روی مدول ذخیره
d_B	اثر عامل شکل بر روی مدول ذخیره
$\alpha_B (kPa)$	اثر میدان مغناطیسی بر روی مدول اتلاف
β	اثر نرخ کرنش بر روی مدول اتلاف
λ	اثر کرنش بر روی مدول اتلاف
$k_{11B} (kPa)$	اثر میدان مغناطیسی بر روی مدول عدم تقارن هیستریزس
k_{12B}	اثر نرخ کرنش بر روی مدول عدم تقارن هیستریزس
k_{13B}	اثر کرنش بر روی مدول عدم تقارن هیستریزس
k_{14B}	اثر عامل شکل بر روی مدول عدم تقارن هیستریزس
$k_{21B} (kPa)$	اثر میدان مغناطیسی بر روی مدول کرنش- سخت شوندگی

۴-۴ محاسبه‌ی ضرایب مدل

به منظور بدست آوردن مقادیر ثابت‌های موجود، همانند مرحله‌ی قبل از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. این مقادیر برای میدان‌های مختلف به صورت جداگانه محاسبه شده است. در جدول ۲-۴ مقادیر استخراج شده از الگوریتم ژنتیک ارائه شده است.

جدول ۲-۴- مقادیر پارامترهای مدل پیشنهادی.

چگالی شار مغناطیسی (mT)	.	۱۰۰	۲۰۰	۲۵۰
a_B (kPa)	۱۱/۵۲۸۹	۱۴/۷۳۱۴	۱۹/۵۶۹۹	۲۶/۷۰۵۳
b_B	۰/۰۰۴۴	۰/۰۱۷۵	۰/۰۱۹۰	۰/۰۲۱۰
c_B	-۰/۰۶۵۵	-۰/۱۶۱۲	-۰/۲۷۲۰	-۰/۳۹۶۹
d_B	۰/۲۶۲۳	۰/۳۱۵۹	۰/۳۹۶۸	۰/۴۴۲۱
α_B (kPa)	۰/۲۶۰۱	۰/۳۲۰۲	۰/۳۹۴۸	۰/۴۷۴۱
λ	-۰/۱۷۲۰	-۰/۱۷۲۰	-۰/۱۷۲۰	-۰/۱۷۲۰
β	-۱/۰۸۰	-۱/۰۸۰	-۱/۰۸۰	-۱/۰۸۰
k_{11B} (kPa)	-۰/۱۶۶۱	-۰/۱۹۴۰	-۰/۲۱۴۰	-۰/۲۳۷۰
k_{12B}	-۰/۰۰۱۶۵	-۰/۰۰۱۹۰	-۰/۰۰۲۲	-۰/۰۰۲۹
k_{13B}	۰/۰۰۰۷۶	۰/۰۰۰۰۹	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۱۳
k_{14B}	-۰/۲۵۱۸	-۰/۲۸۲۴	-۰/۳۰۵۲	-۰/۳۹۷۹
k_{21B} (kPa)	۰/۰۰۶۰	۰/۰۱۰۰	۰/۰۱۴	۰/۰۱۷

در مرحله‌ی پایانی ثوابت موجود در جدول ۲-۴ به صورت توابعی بر حسب میدان مغناطیسی نوشته می‌شوند. برای انجام این عمل از جعبه ابزار برازش منحنی^۱ نرم‌افزار متلب استفاده شده است. این توابع مطابق با معادله‌های (۴-۱۷) الی (۴-۲۶) به صورت توابع چندجمله‌ای درجه دو و سه و تابع نمایی استخراج شده‌اند.

^۱ Curve fit tool

$$a_B = a_1 B^3 + a_2 B^2 + a_3 B + a_4 \quad (17-4)$$

$$b_B = b_1 B^2 + b_2 B + b_3 \quad (18-4)$$

$$c_B = c_1 B^2 + c_2 B + c_3 \quad (19-4)$$

$$d_B = d_1 B^2 + d_2 B + d_3 \quad (20-4)$$

$$\alpha_B = \alpha_1 \exp(\alpha_2 B) \quad (21-4)$$

$$k_{11B} = k_{111} B^2 + k_{112} B + k_{113} \quad (22-4)$$

$$k_{12B} = k_{121} B^2 + k_{122} B + k_{123} \quad (23-4)$$

$$k_{13B} = k_{131} B^2 + k_{132} B + k_{133} \quad (24-4)$$

$$k_{14B} = k_{141} B^2 + k_{142} B + k_{143} \quad (25-4)$$

$$k_{21B} = k_{211} B^2 + k_{212} B + k_{213} \quad (26-4)$$

در جدول ۳-۴ مقادیر عددی ثابت‌های معادله‌های (۱۷-۴) الی (۲۶-۴) ارائه شده است.

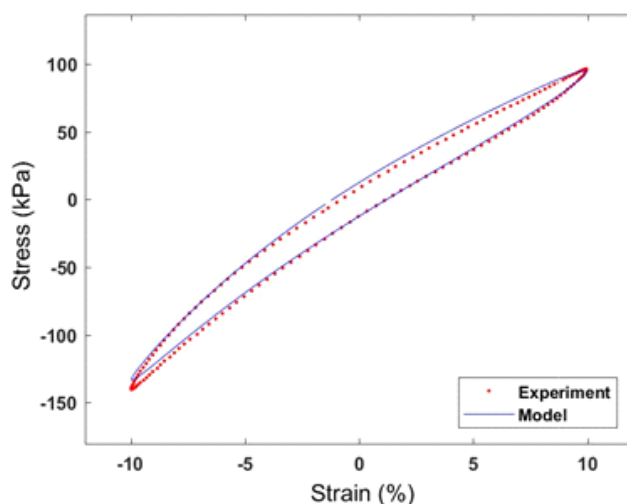
جدول ۳-۴- ضرایب ثابت مدل پیشنهادی.

ردیف	ضرایب ثابت	مقدار
۱	a_1	$2/19 \times 10^{-6}$
۲	a_2	$-0/0005746$
۳	a_3	$0/06761$
۴	a_4	$11/53$
۵	b_1	$-3/66 \times 10^{-7}$
۶	b_2	$0/000153$
۷	b_3	$0/004738$
۸	c_1	$-3/19 \times 10^{-6}$
۹	c_2	$-0/0004709$
۱۰	c_3	$-0/06935$

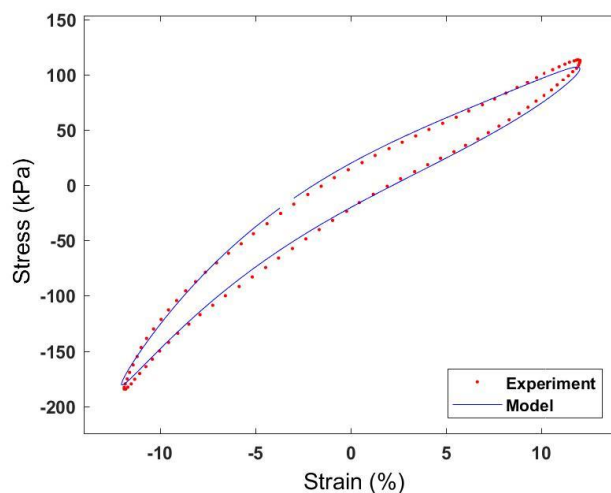
ردیف	ضرایب ثابت	مقدار
۱۱	d_1	$1/16 \times 10^{-6}$
۱۲	d_2	0.0004342
۱۳	d_3	0.262
۱۴	a_1	0.2534
۱۵	a_2	0.002407
۱۶	β	-1.08
۱۷	λ	-0.172
۱۸	k_{111}	2.15×10^{-7}
۱۹	k_{112}	-0.0002158
۲۰	k_{113}	-0.1671
۲۱	k_{121}	2.28×10^{-8}
۲۲	k_{122}	1.17×10^{-6}
۲۳	k_{123}	-0.001682
۲۴	k_{131}	5.96×10^{-9}
۲۵	k_{132}	6.02×10^{-7}
۲۶	k_{133}	0.0007647
۲۷	k_{141}	2.83×10^{-6}
۲۸	k_{142}	0.0001967
۲۹	k_{143}	-0.2569
۳۰	k_{211}	3.82×10^{-8}
۳۱	k_{212}	3.36×10^{-5}
۳۲	k_{213}	0.00606

۴-۵ اعتبارسنجی^۱ مدل

در شکل‌های ۴-۹ الی ۴-۱۲، نمودارهای تست‌های مختلف، بر اساس مدل پیشنهادی و داده‌های آزمایشگاهی ارائه شده است. از این تصاویر می‌توان اعتبار مدل را به صورت کیفی مشاهده نمود.

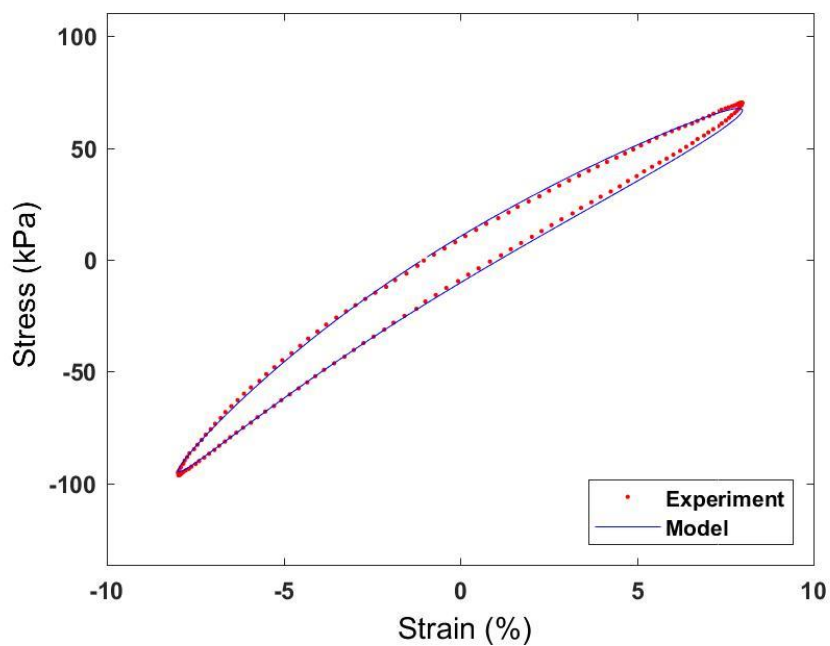


شکل ۴-۹- حلقه هیستریزیس تنش-کرنش برای داده‌های آزمایشگاهی و مدل پیشنهادی در عامل شکل ۰/۹۳، میدان مغناطیسی ۲۰۰ میلی تسلا، فرکانس ۳ هرتز و کرنش ۸ درصد.

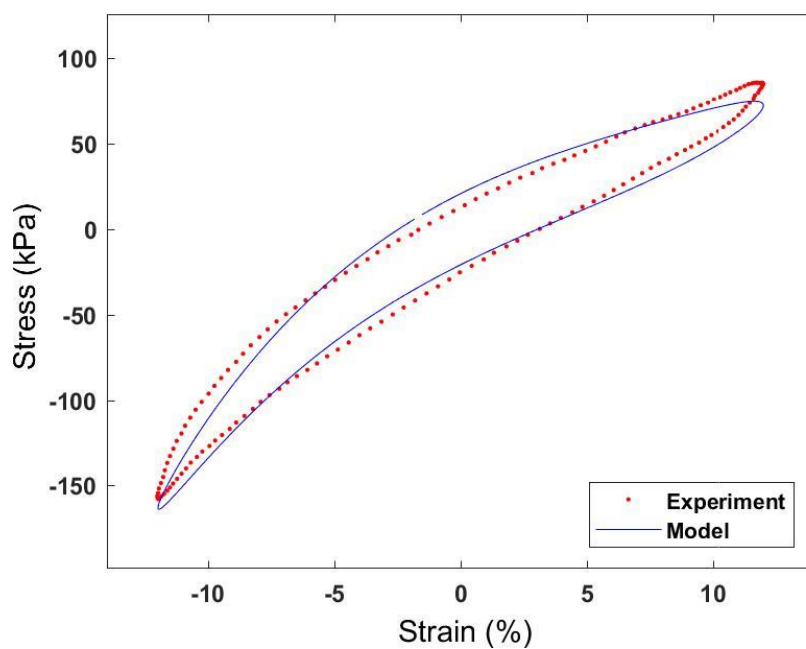


شکل ۴-۱۰- حلقه هیستریزیس تنش-کرنش برای داده‌های آزمایشگاهی و مدل پیشنهادی در عامل شکل ۰/۷۸، میدان مغناطیسی ۲۵۰ میلی تسلا، فرکانس ۵ هرتز و کرنش ۱۲ درصد.

^۱ Validation



شکل ۴-۱۱- حلقه هیستریزیس تنش-کرنش برای داده‌های آزمایشگاهی و مدل پیشنهادی در عامل شکل ۰/۶۲، میدان مغناطیسی ۱۰۰ میلی تسلا، فرکانس ۵ هرتز و کرنش ۸ درصد.



شکل ۴-۱۲- حلقه هیستریزیس تنش-کرنش برای داده‌های آزمایشگاهی و مدل پیشنهادی در عامل شکل ۰/۴۶، میدان مغناطیسی ۲۵۰ میلی تسلا، فرکانس ۵ هرتز و کرنش ۱۲ درصد.

به منظور ارزیابی و اعتبار سنجی مدل پیشنهادی در مطابقت با داده‌های آزمایشگاهی، از مطالعه‌ی عددی در شرایط مختلف میدان مغناطیسی، فرکانس، کرنش و عامل شکل‌های مختلف توسط تابع میانگین نرمال^۱ استفاده گردیده است. این تابع طبق معادله‌ی (۴-۲۷) محاسبه می‌گردد:

$$fitnessvalue(\%) = 100 \times \left[1 - \frac{norm(\tau_{Model} - \tau_{Exp})}{norm(\tau_{Exp} - mean(\tau_{Exp}))} \right] \quad (۴-۲۷)$$

مقدار تطابق مدل با داده‌ای آزمایشگاهی توسط این معادله به صورت مجزا برای هر آزمایش محاسبه گردیده است که مقادیر آن‌ها را می‌توان در جدول ۴-۴ مشاهده نمود. این مقادیر به صورت میانگین در حدود ۹۰ درصد می‌باشند. این میزان از تطابق نشان از مناسب بودن این مدل در پیش‌بینی رفتار مواد MRE در شرایط فیزیکی مختلف دارد.

جدول ۴-۴- میزان درصد تطابق برای مدل پیشنهادی.

$\varepsilon_0 = 8\%$, $f = 1\text{ Hz}$				
B = 0 mT	B = 100 mT	B = 200 mT	B = 250 mT	عامل شکل
۸۶/۶۲۶۲۳	۸۸/۱۲۲۴۱	۹۱/۲۷۰۹	۹۱/۴۳۱۵۳	S=0.46
۹۲/۳۶۳۲۵	۹۶/۰۷۱۷۴	۸۸/۱۴۷۹۴	۹۴/۴۰۷۷۸	S=0.62
۹۲/۸۱۴۵۸	۹۳/۷۱۸۱۹	۹۳/۲۵۱۸۹	۹۳/۱۵۵۸۳	S=0.78
۹۱/۰۰۶۰۲	۹۲/۷۳۱۷۱	۹۴/۲۰۷۶	۹۰/۸۹۶۷۴	S=0.93
$\varepsilon_0 = 10\%$, $f = 1\text{ Hz}$				
B = 0 mT	B = 100 mT	B = 200 mT	B = 250 mT	عامل شکل
۹۲/۸۱۲۷۷	۹۴/۱۸۰۹	۸۷/۱۷۰۴۴	۸۹/۴۸۲۱۵	S=0.46
۹۳/۶۱۴۶۲	۹۵/۰۴۹۶۱	۹۰/۰۰۶۱۶	۹۳/۴۷۲۳۱	S=0.62
۹۴/۴۵۷۰۶	۹۴/۷۹۷۳۹	۹۳/۲۴۳۴۷	۹۵/۹۰۰۹	S=0.78
۹۳/۳۰۱۴۹	۹۵/۳۴۲۳۶	۹۰/۹۴۷۱۷	۹۶/۰۱۰۲۶	S=0.93

^۱ Normal mean function

$\varepsilon_0 = 12 \%$, $f = 1 \text{ Hz}$				
B = 0 mT	B = 100 mT	B = 200 mT	B = 250 mT	عامل شكل
۸۷/۰.۵۶۱۵	۹۲/۵۵.۰۶	۸۷/۳۳۵۵۱	۸۹/۰.۵۳۵۸	S=0.46
۹۳/۲۹۷۸۲	۹۴/۵۹۲۱۷	۳۲/۹۳۹۲۱	۹۳/۰.۳۷۲	S=0.62
۹۵/۱۴۵۷۵	۹۵/۲۱۴۸۳	۹۳/۱۸۲۵۲	۹۴/۸۷۸۴۶	S=0.78
۹۳/۴۶۶۳۵	۹۶/۲۳۶.۳	۹۱/۲۱۵۲۲	۹۴/۰.۴۵۳۲	S=0.93
$\varepsilon_0 = 14 \%$, $f = 1 \text{ Hz}$				
B = 0 mT	B = 100 mT	B = 200 mT	B = 250 mT	عامل شكل
۷۹/۲۴۹۹۴	۸۰/۴۴۲۴۸	۷۷/۰.۸۹۴۳	۷۴/۲۰.۸۳۲	S=0.46
۹۲/۶۰.۵۵	۹۴/۷۶۷۵۸	۹۰/۰.۹۹۵۲	۹۱/۶۷۵۸۱	S=0.62
۹۵/۳۵۷۵۲	۹۲/۶۹۷۶۳	۹۴/۰.۴۵۹۵	۹۲/۸۹۴۱۸	S=0.78
۹۵/۴۹۶۳۶	۹۲/۰.۳۴۴۸	۹۴/۸۵۵۹۴	۹۱/۹۰.۰۶۳	S=0.93
$\varepsilon_0 = 8 \%$, $f = 3 \text{ Hz}$				
B = 0 mT	B = 100 mT	B = 200 mT	B = 250 mT	عامل شكل
۸۹/۱۱.۰۲۷	۸۸/۲۸۹۴	۹۲/۵۱۱.۰۱	۹۰/۳۰.۴۲۲	S=0.46
۹۴/۲۶۹	۹۶/۵۹۵۹۱	۸۸/۸۵۱.۰۶	۹۴/۹۷۲.۰۴	S=0.62
۹۵/۰.۹۰۶۳	۹۴/۵۸.۰۸۳	۹۴/۱۶۹۷۸	۹۵/۹۳۴۷۳	S=0.78
۹۵/۴۰.۸۵۲	۹۳/۵۸۷.۰۷	۹۵/۹۹۵۷۲	۹۲/۵۰.۹۴۸	S=0.93
$\varepsilon_0 = 10 \%$, $f = 3 \text{ Hz}$				
B = 0 mT	B = 100 mT	B = 200 mT	B = 250 mT	عامل شكل
۸۹/۳۳۷۷۳	۹۴/۸۲۴۴۴	۸۸/۹۲۱۶۹	۹۲/۱۳۸۸۹	S=0.46
۹۳/۷۶۹۲۲	۹۵/۷۳۷۹۶	۹۰/۴۴۶۷۸	۹۳/۲۶۶۳۳	S=0.62
۹۵/۶۲۳۳۵	۹۵/۱۶۸۹۶	۹۲/۵۴.۰۶۱	۹۴/۰.۹۸۹	S=0.78
۹۲/۹۸۶۹۸	۹۵/۷۰.۰۲۴	۹۰/۹۱۸۶۳	۹۴/۲۰.۹۷۲	S=0.93
$\varepsilon_0 = 12 \%$, $f = 3 \text{ Hz}$				
B = 0 mT	B = 100 mT	B = 200 mT	B = 250 mT	عامل شكل
۹۲/۶۳۱۴۴	۹۲/۱۷۴۸۷	۸۹/۱۴۴.۰۲	۹۰/۱۱۴۳۲	S=0.46
۹۳/۶۵۴۶۳	۹۵/۴۳۸۵۷	۹۰/۳۷۸۴۵	۹۳/۴۹۳۶۹	S=0.62
۹۴/۵۹۰.۲۲	۹۵/۸۴۲۳۴	۹۲/۲۷۲۳۵	۹۴/۷۲۴۱۴	S=0.78
۹۱/۳۳۹۸۵	۹۵/۳۲۵۶۱	۹۰/۰.۷۹۶۹	۹۳/۷۲۶۹۶	S=0.93
$\varepsilon_0 = 14 \%$, $f = 3 \text{ Hz}$				
B = 0 mT	B = 100 mT	B = 200 mT	B = 250 mT	عامل شكل
۸۷/۳۸۴۸۴	۹۴/۴۴۳۹	۸۸/۴۲۱۹۴	۹۲/۰.۶۸۰۲	S=0.46
۹۶/۰.۷۲۱۸	۹۶/۲۳۸۲۵	۹۰/۸۸۹۳۷	۹۲/۴۷۷۱۸	S=0.62

$\varepsilon_0 = 14 \% \quad , \quad f = 3 \text{ Hz}$				
B = 0 mT	B = 100 mT	B = 200 mT	B = 250 mT	عامل شكل
۸۴/۱۵۵۷۹	۸۰/۴۰۳۹۴	۸۱/۴۵۲۰۹	۷۳/۷۸۰۳۴	S=0.46
۹۱/۴۹۹۲۱	۹۵/۳۲۷۶	۹۱/۷۴۷۸۶	۹۱/۴۲۳۹۳	S=0.62
۹۴/۷۶۰۹۳	۹۳/۸۰۱۸۴	۹۴/۳۶۶۴۳	۹۳/۷۸۵۴۷	S=0.78
۹۴/۵۳۳۳۵	۹۳/۴۷۸۲۶	۹۵/۳۸۷۴۲	۹۳/۴۴۹۷۶	S=0.93
$\varepsilon_0 = 8 \% \quad , \quad f = 5 \text{ Hz}$				
B = 0 mT	B = 100 mT	B = 200 mT	B = 250 mT	عامل شكل
۸۸/۹۱۶۸۹	۸۶/۲۱۷۵۶	۹۳/۲۹۲۲۷	۸۹/۰۴۱۸۵	S=0.46
۹۶/۱۰۷۱۲	۹۷/۲۹۹۷۴	۹۰/۳۶۰۸۷	۹۳/۵۸۴۹۱	S=0.62
۹۷/۱۳۳۹	۹۵/۷۲۴۳۹	۹۴/۵۴۷۱۶	۹۵/۳۲۸۷۱	S=0.78
۹۷/۴۷۵۱۳	۹۳/۲۷۹۹۲	۹۵/۹۹۳۵۵	۹۲/۸۶۸۷۶	S=0.93
$\varepsilon_0 = 10 \% \quad , \quad f = 5 \text{ Hz}$				
B = 0 mT	B = 100 mT	B = 200 mT	B = 250 mT	عامل شكل
۸۷/۳۸۴۸۴	۹۴/۴۴۳۹	۸۸/۴۲۱۹۴	۹۲/۰۶۸۰۲	S=0.46
۹۶/۰۷۲۱۸	۹۶/۲۳۸۲۵	۹۰/۸۸۹۳۷	۹۲/۴۷۷۱۸	S=0.62
۹۶/۱۲۷۳۴	۹۴/۵۳۶۰۵	۹۲/۰۸۷۸۴	۹۳/۶۲۸۹۷	S=0.78
۹۲/۷۸۳۸۴	۹۵/۱۱۱۶۲	۹۱/۴۱۰۲۳	۹۵/۱۳۶	S=0.93
$\varepsilon_0 = 12 \% \quad , \quad f = 5 \text{ Hz}$				
B = 0 mT	B = 100 mT	B = 200 mT	B = 250 mT	عامل شكل
۹۴/۴۸۷۸۷	۹۴/۰۳۸۲	۹۰/۰۵۵۹۸	۸۹/۳۳۲۷۶	S=0.46
۹۳/۴۱۰۷۲	۹۳/۵۱۳۷۶	۹۰/۷۷۹۰۲	۹۱/۶۰۷۹۳	S=0.62
۹۳/۰۶۹۹۶	۹۴/۳۷۶۵	۹۲/۸۷۹۱۹	۹۵/۲۶۵۶۲	S=0.78
۹۰/۹۷۳۲۶	۹۴/۸۵۳۳۸	۹۱/۳۷۶۵۲	۹۵/۰۰۹۸	S=0.93
$\varepsilon_0 = 14 \% \quad , \quad f = 5 \text{ Hz}$				
B = 0 mT	B = 100 mT	B = 200 mT	B = 250 mT	عامل شكل
۸۵/۶۶۶۰۸	۸۰/۳۷۷۵۳	۷۶/۹۶۷۲۴	۶۸/۹۲۸۸۷	S=0.46
۸۷/۵۹۳۶۸	۸۷/۸۹۵۳۶	۸۷/۸۷۰۵۵	۸۷/۴۱۵۰۳	S=0.62
۸۷/۶۹۶۶۹	۸۴/۹۴۴۶۵	۸۹/۲۵۳۳۸	۸۶/۶۰۰۵۳	S=0.78
۸۸/۶۸۲۱۱	۸۴/۷۶۳۲۵	۸۹/۵۷۶۹۸	۸۶/۰۸۰۹۶	S=0.93

$\varepsilon_0 = 8 \%$, $f = 8 \text{ Hz}$				
B = 0 mT	B = 100 mT	B = 200 mT	B = 250 mT	عامل شکل
۸۱/۹۳۱۴۳	۷۸/۵۷۰۵۴	۸۷/۵۴۹۱۸	۸۶/۲۱۲۴۳	S=0.46
۶۹/۳۱۸۳۲	۸۹/۹۲۶۳۸	۸۸/۲۳۲۶۲	۹۱/۶۸۷۶۹	S=0.62
۸۶/۷۷۰۷۹	۸۶/۵۹۴۵۴	۸۹/۸۴۱۵۱	۸۹/۲۰۱۷۸	S=0.78
۸۸/۵۸۹۹۳	۸۶/۰۵۴۶۴	۸۸/۸۴۰۱۷	۸۶/۱۲۱۶	S=0.93
$\varepsilon_0 = 10 \%$, $f = 8 \text{ Hz}$				
B = 0 mT	B = 100 mT	B = 200 mT	B = 250 mT	عامل شکل
۷۳/۶۵۹۸۶	۷۷/۲۵۲۱۶	۷۹/۶۵۷۸۹	۷۹/۵۶۹۱	S=0.46
۷۲/۶۰۳۱	۷۵/۵۵۹۹۹	۸۰/۰۸۴۷۳	۷۹/۵۶۳۵۷	S=0.62
۷۴/۸۸۴۷۳	۷۴/۰۰۱۱۷	۷۸/۳۹۱۸	۷۷/۳۷۷۷۳	S=0.78
۷۶/۴۶۱۷۶	۷۶/۰۵۷۴۹	۷۸/۸۴۶۷۴	۷۶/۹۰۱۲	S=0.93
میانگین تطابق کل = ۹۰/۰۲ %				

۵ - نتیجه گیری

۵-۱ جمع‌بندی نتایج

در پژوهش انجام گرفته، در ابتدا مواد هوشمند معرفی شده و در ادامه مواد مگنتورئولوژیکال به عنوان زیرمجموعه‌ای از آن‌ها بررسی گشته‌اند. سه دسته از انواع مواد مگنتورئولوژیکال به صورت سیالات مگنتورئولوژیکال، الاستومرهای مگنتورئولوژیکال و فوم‌های مگنتورئولوژیکال مورد بررسی قرار گرفتند. خواص رئولوژیکال، مزایا و معایب و کاربردهای آن‌ها معرفی گشت. در ادامه به طور خاص الاستومرهای مگنتورئولوژیکال مورد مطالعه قرار گرفتند و پیشینه‌ی پژوهش و لزوم ادامه‌ی پژوهش بر روی آن‌ها تشریح گردید.

متغیر مورد مطالعه، عامل شکل معرفی گردید که در پژوهش‌های پیشین به طور جامع مورد تحقیق قرار نگرفته بود. این عامل در ابتدا معرفی گردید و نحوه‌ی بدست آوردن نوع اثر آن بر روی رفتار رئولوژیکال ماده ارائه گردید.

در بخش بعد، طریقه‌ی ساخت نمونه MRE در آزمایشگاه و نوع مواد به کار رفته در آن ارائه گردید. ماده‌ی الاستومری، سیلیکن و ماده‌ی مغناطیسی پودر آهن استفاده گردید. از روغن سیلیکن نیز به عنوان افزودنی استفاده شده است. نمونه‌ها در چهار قطر مختلف و ضخامت یکسان قالب ریزی شدند که علت این کار، ایجاد عامل شکل‌های مختلف به منظور آزمایش بوده است. چهار نمونه با عامل شکل‌هایی به مقادیر ۰/۴۶، ۰/۶۲، ۰/۷۸ و ۰/۹۳ ساخته گشت.

پس از ساخت نمونه، نحوه‌ی انجام تست‌های دینامیکی کشش فشار تشریح گردید. جنس و نوع فیکسچرها و دستگاه تست معرفی شدند. تست‌ها در چهار فرکانس ۱، ۳، ۵ و ۸ هرتز و در چهار کرنش ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ درصد انجام گرفتند که این دو متغیر توسط دستگاه INSTRUN به نمونه‌ها اعمال شده‌اند. میدان‌های مغناطیسی با شارهای مختلف ۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ میلی تسلا توسط شش آهن‌ربای نئودیمی در طول آزمایش ایجاد شدند و نمونه‌های MRE در مسیر آن‌ها قرار گرفتند.

پس از اجرا تست‌ها، داده‌ها جهت حذف نویز، فیلتر شده و به نمودارهای تنش کرنش تبدیل گشتند.

با مشاهده‌ی نمودارها می‌توان دریافت که با افزایش و یا کاهش ورودی‌های آزمایش، شیب و مساحت داخلی حلقه‌ی هیستریزیس دچار تغییر می‌شوند. وجود تغییرات نشان‌دهنده‌ی وجود روابط فیزیکی مشخص بین ورودی‌ها و خروجی‌ها می‌باشد. در ادامه مدول‌های ذخیره و اتلاف در حالت کشش و حالت فشار به صورت جداگانه بر حسب ورودی‌های سیستم ترسیم شدند.

بر اساس این نمودارها نتایج زیر حاصل گردید:

۱. با افزایش چگالی شار مغناطیسی، مدول ذخیره در حالت کششی و حالت فشاری افزایش پیدا می‌کند و مدول اتلاف در حالت کششی و حالت فشاری نیز افزایش پیدا می‌کند. مقدار اثر مگنتورئولوژیکال در حالت فشاری بیشتر از حالت کششی می‌باشد و با افزایش کرنش ورودی، مقدار آن در هر دو حالت کششی و فشاری کاهش پیدا می‌کند. بیشترین اثر مگنتورئولوژیکال مربوط به مدول ذخیره در حالت کششی به میزان $21/66$ درصد در عامل شکل $0/42$ ، فرکانس 5 هرتز و کرنش 8 درصد ایجاد شده است و همچنین بیشترین اثر مگنتورئولوژیکال در حالت فشاری به میزان $29/95$ درصد در عامل شکل $0/42$ ، فرکانس 5 هرتز و کرنش 10 درصد ایجاد شده است. بیشترین اثر مگنتورئولوژیکال مربوط به مدول اتلاف در حالت کششی به میزان 589 درصد در عامل شکل $0/42$ ، فرکانس 5 هرتز و کرنش 14 درصد ایجاد شده است و همچنین بیشترین اثر مگنتورئولوژیکال در حالت فشاری به میزان 1794 درصد در عامل شکل $0/42$ ، فرکانس 5 هرتز و کرنش 10 درصد ایجاد شده است.

۲. با افزایش کرنش ورودی، مدول ذخیره در حالت فشاری افزایش و در حالت کششی کاهش پیدا می‌کند و مدول اتلاف در حالت کششی و حالت فشاری کاهش پیدا می‌کند.

۳. با افزایش فرکانس ورودی، مدول ذخیره در حالت کششی و حالت فشاری افزایش پیدا می‌کند و مدول اتلاف در حالت کششی افزایش و در حالت فشاری کاهش پیدا می‌کند.

۴. با افزایش عامل شکل، مدول ذخیره در حالت کششی و حالت فشاری افزایش پیدا می‌کند و مدول اتلاف در حالت کششی و حالت فشاری تغییری پیدا نمی‌کند و مستقل از این عامل

می‌باشد. طبق نتایج با افزایش کرنش از ۱۰ درصد به ۱۴ درصد، اثر عامل شکل در حالت کششی کاهش می‌یابد و در حالت فشاری افزایش می‌یابد؛ همچنین در کرنش ۱۰ درصد اثر عامل شکل کششی بیشتر از فشاری می‌باشد و در کرنش ۱۴ درصد اثر عامل شکل فشاری بیشتر از کششی می‌باشد. بیشترین تغییر در مدول ذخیره فشاری، در افزایش عامل شکل از ۰/۴۶ به ۰/۹۳ در فرکانس ۱ هرتز، کرنش ۸ درصد و میدان مغناطیسی ۰ میلی تسلا صورت گرفته است که برابر با ۳۹/۸۷ درصد می‌باشد و بیشترین تغییر در مدول ذخیره کششی، در افزایش عامل شکل از ۰/۴۶ به ۰/۹۳ در فرکانس ۳ هرتز، کرنش ۱۰ درصد و میدان مغناطیسی ۰ میلی تسلا صورت گرفته است که برابر با ۵۲/۷۰ درصد می‌باشد.

مورد چهارم اصلی‌ترین نتیجه‌ی این آزمایش می‌باشد که نشان‌دهنده‌ی تاثیر عامل شکل بر خواص رئولوژیکال MRE می‌باشد.

در فصل آخر از این پژوهش به مبحث مدل‌سازی پرداخته شده است. در ابتدا انواع مدل‌های ارائه شده در رابطه با مواد ویسکوالاستیک و MRE ها بیان شده و در ادامه به مدل پیشنهادی پرداخته شده است.

به منظور مدل‌سازی، از مدل وطن دوست و همکاران به عنوان مدل پایه استفاده شده است. در ادامه به منظور تعمیم مدل، عامل شکل نیز به عنوان یک متغیر وارد معادلات گشت. از الگوریتم ژنتیک نرم‌افزار متلب برای استخراج ثوابت مدل استفاده شده است به صورتی که نزدیک‌ترین حالت، به داده‌های آزمایشگاهی را داشته باشد.

بر اساس این مدل، تنش به وجود آمده در نمونه، حاصل ترکیب چهار مدول می‌باشد: مدول‌های ذخیره، اتلاف، عدم تقارن و سخت شوندگی مجدد. این مدول‌ها به ترتیب با کرنش، نرخ کرنش، مربع کرنش و مکعب کرنش مرتبط می‌باشند. این مدول‌ها خود وابسته به ورودی‌های آزمایش می‌باشند. طبق ثوابت بدست آمده از الگوریتم ژنتیک، نتایج زیر حاصل شده است:

۱. شار میدان مغناطیسی به صورت تابع چند جمله‌ای درجه سه، کرنش، فرکانس و عامل شکل به صورت تابع چندجمله‌ای درجه دو بر حسب شار میدان مغناطیسی بر روی مدول ذخیره اعمال می‌شوند.
 ۲. شار میدان مغناطیسی به صورت تابع نمایی^۱، کرنش و فرکانس ورودی به صورت تابعی خطی بر حسب شار میدام مغناطیسی بر روی مدول اتلاف اعمال می‌شوند.
 ۳. شار میدان مغناطیسی، کرنش، فرکانس و عامل شکل به صورت تابع چندجمله‌ای درجه دو بر حسب شار میدان مغناطیسی بر روی مدول عدم تقارن اعمال می‌شوند.
 ۴. در مدول سخت شوندگی مجدد، تنها شار میدان مغناطیسی تاثیرگذار می‌باشد که به صورت تابع چندجمله‌ای درجه دو بیان می‌گردد.
- در پایان اعتبارسنجی مدل انجام گرفته که نتیجه‌ی آن، نود درصد تطابق مدل با داده‌های آزمایشگاهی بوده است که نشان از مناسب بودن این مدل در پیش‌بینی رفتار دینامیکی نمونه‌های MRE دارد.

^۱ Exponential function

۵-۲ پیشنهاد‌های پژوهشی

در این بخش به تعدادی از پژوهش‌های مورد نیاز که می‌تواند در آینده مورد مطالعه قرار بگیرد اشاره می‌گردد:

- بررسی خواص رئولوژیکال مواد مگنتورئولوژیکال با نمونه‌هایی با سطح مقاطع مختلف.
- بررسی خواص رئولوژیکال مواد مگنتورئولوژیکال در عامل شکل‌های بزرگتر.
- بررسی خواص رئولوژیکال مواد مگنتورئولوژیکال در عامل شکل‌های متفاوت و وجود پیش‌بار.
- بررسی خواص رئولوژیکال مواد مگنتورئولوژیکال بر روی MRE های غیر ایزوتروپیک.
- بررسی خواص رئولوژیکال مواد مگنتورئولوژیکال با استفاده از سیلیکن‌های مختلف.
- بررسی خواص رئولوژیکال مواد مگنتورئولوژیکال با روش‌های پخت متفاوت.
- بررسی خواص رئولوژیکال مواد مگنتورئولوژیکال در میدان مغناطیسی‌های با شار بزرگتر.
- بررسی خواص رئولوژیکال مواد مگنتورئولوژیکال در فرکانس و کرنش‌های بزرگتر و کوچک‌تر.
- بررسی خواص رئولوژیکال مواد مگنتورئولوژیکال در شرایط محیطی متفاوت.
- ساخت ایزولاتور مگنتورئولوژیکال جدید.
- مدل سازی MRE توسط نرم‌افزارهای اجزا محدود^۱.
- بررسی روش‌های کاربردی در ایجاد میدان مغناطیسی برای MRE ها.

^۱ Finite element

- [1] Kamila S., (2013), "Introduction, classification and applications of smart materials: An overview", **Am. J. Appl. Sci.**, 10, 8, pp. 876–880.
- [2] Kang I., Schulz M. J., Kim J. H., Shanov V., and Shi D., (2006), "A carbon nanotube strain sensor for structural health monitoring", **Smart Mater. Struct.**, 15, 3, pp. 737–748.
- [3] Shahinpoor M. and Kim K. J., (2005), "Ionic polymer-metal composites: IV. Industrial and medical applications", **Smart Mater. Struct.**, 14, 1, pp. 197–214.
- [4] Sadeghipour K., Salomon R., and Neogi S., (1992), "Development of a novel electrochemically active membrane and “smart” material based vibration sensor/damper", **Smart Mater. Struct.**, 1, 2, pp. 172–179.
- [5] Balbas L. C., Borstel G., and Alonso J. A., (1986), "Nonlocal density functional calculation of the electron affinity of atoms", **Phys. Lett. A**, 114, 5, pp. 236–240.
- [6] Ginder J. M., Nichols M. E., Elie L. D., and Clark S. M., (2000), "Controllable-stiffness components based on magnetorheological elastomers", **Smart Struct. Mater. 2000 Smart Struct. Integr. Syst.**, 3985, , p. 418.
- [7] Rabinow J, (1948), "The magnetic fluid clutch Electr", **Eng**, 2, 67, pp. 1308–15.
- [8] Shiga T., Okada A., and Kurauchi T., (1995), "Magnetorheological behavior of composite gels", **J. Appl. Polym. Sci.**, 58, 4, pp. 787–792.
- [9] De Vicente J., Klingenberg D. J., and Hidalgo-Alvarez R., (2011), "Magnetorheological fluids: A review", **Soft Matter**, 7, 8, pp. 3701–3710.
- [10] Liu Y. D. and Choi H. J., (2013), "Recent progress in smart polymer composite particles in electric and magnetic fields", **Polym. Int.**, 62, 2, pp. 147–151.
- [11] Spaggiari A., (2012), "Properties and applications of magnetorheological fluids", **Frat. ed Integrita Strutt.**, 23, , pp. 57–61.
- [12] Ngatu G. T., Wereley N. M., Karli J. O., and Bell R. C., (2008), "Dimorphic magnetorheological fluids: exploiting partial substitution of microspheres by nanowires", **Smart Mater. Struct.**, 17, 4, p. 45022.
- [13] Turczyn R., Kciuk M., Turczyn R., and Kciuk M., (2008), "Preparation and study of

- model magnetorheological fluids", **J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.**, 27, 2, pp. 131–134.
- [14] Ashtiani M., Hashemabadi S. H., and Ghaffari A., (2015), "A review on the magnetorheological fluid preparation and stabilization", **J. Magn. Magn. Mater.**, 374, , pp. 711–715.
- [15] Lakes, Roderic and R. S. L., (2009), "**Viscoelastic materials**", Cambridge university press.
- [16] Guo F., Du C. Bin, and Li R. P., (2014), "Viscoelastic parameter model of magnetorheological elastomers based on abel dashpot", **Adv. Mech. Eng.**, 2014, .
- [17] Li W. H., Zhou Y., and Tian T. F., (2010), "Viscoelastic properties of MR elastomers under harmonic loading", **Rheol. Acta**, 49, 7, pp. 733–740.
- [18] Lokander M. and Stenberg B., (2003), "Performance of isotropic magnetorheological rubber materials", **Polym. Test.**, 22, 3, pp. 245–251.
- [19] Ge L., Gong X., Fan Y., and Xuan S., (2013), "Preparation and mechanical properties of the magnetorheological elastomer based on natural rubber/rosin glycerin hybrid matrix", **Smart Mater. Struct.**, 22, 11.
- [20] Hu Y. *et al.*, (2005), "Magnetorheological elastomers based on polyurethane/Si-rubber hybrid", **Int. J. Mod. Phys. B**, 19, 7–9, pp. 1114–1120.
- [21] Jolly M. R., Carlson J. D., and Muñoz B. C., (1996), "A model of the behaviour of magnetorheological materials", **Smart Mater. Struct.**, 5, 5, pp. 607–614.
- [22] Fan Y., Gong X., Xuan S., Zhang W., Zheng J., and Jiang W., (2011), "Interfacial friction damping properties in magnetorheological elastomers", **Smart Mater. Struct.**, 20, 3.
- [23] Chen L., Gong X. L., and Li W. H., (2007), "Microstructures and viscoelastic properties of anisotropic magnetorheological elastomers", **Smart Mater. Struct.**, 16, 6, pp. 2645–2650.
- [24] Kallio M., (2005), "**The elastic and damping properties of magnetorheological elastomers**", 565.
- [25] Liu X., Gao X., Yu H., and Ye D., (2015), "Dynamic Performance of Different Metal Foam Magnetorheological Fluid Materials", 9464, c.

- [26] Costello-Nichitas D. M., (1999), "Low-cost MR fluid sponge devices", **Intell. Mater. Syst. Struct.**, 10, 8, pp. 589–594.
- [27] Avraam M. T., (2009), "MR-fluid brake design and its application to a portable muscular rehabilitation device", **Dr. Eng. Sci. Thesis**.
- [28] Liu B., Li W. H., Kosasih P. B., and Zhang X. Z., (2006), "Development of an MR-brake-based haptic device", **Smart Mater. Struct.**, 15, 6, pp. 1960–1966.
- [29] Rosiakowski A., (2012), "Research on clutch with magnetorheological fluid", **Arch. Mech. Technol. Autom.**, 32, 1, pp. 47–54.
- [30] Weber F. and Distl H., (2015), "Amplitude and frequency independent cable damping of Sutong Bridge and Russky Bridge by magnetorheological dampers", **Struct. Control Heal. Monit.**, 22, 2, pp. 237–254.
- [31] Carlson J. D. and Chrzan M. J., (1994), "Magnetorheological fluid dampers".
- [32] Carlson J. D., Clair K. A. S., Chrzan M. J., and Prindle D. R., (1999), "Controllable vibration apparatus".
- [33] Jolly M. R. and Chrzan M. J., (1999), "Passive magnetorheological fluid device with excursion dependent characteristic".
- [34] Ahamed R. and Choi S., (2018), "A state of art on magneto-rheological materials and their potential applications", **J. Intell. Mater. Syst. Struct.**, 29, 10.
- [35] Sun S. S. *et al.*, (2014), "The development of an adaptive tuned magnetorheological elastomer absorber working in squeeze mode", **Smart Mater. Struct.**, 23, 7, p. 75009.
- [36] Stewart W. M., Ginder J. M., Elie L. D., and Nichols M. E., Patent, (1998), "Method and apparatus for reducing brake shudder", U.S. Patent No. 5,816,587.
- [37] Watson J. R., (1997), "Method and apparatus for varying the stiffness of a suspension bushing".
- [38] Xu Z., Gong X., Liao G., and Chen X., (2010), "An active-damping-compensated magnetorheological elastomer adaptive tuned vibration absorber", **J. Intell. Mater. Syst. Struct.**, 21, 10, pp. 1039–1047.
- [39] Bica I., (2011), "Magnetoresistor sensor with magnetorheological elastomers", **J. Ind. Eng. Chem.**, 17, 1, pp. 83–89.
- [40] Deng H., Gong X., and Wang L., (2006), "Development of an adaptive tuned

- vibration absorber with magnetorheological elastomer", **Smart Mater. Struct.**, 15, 5, p. N111.
- [41] Nayak B., Dwivedy S. K., and Murthy K., (2012), "Multi-frequency excitation of magnetorheological elastomer-based sandwich beam with conductive skins", **Int. J. Non. Linear. Mech.**, 47, 5, pp. 448–460.
 - [42] Xing Z.-W., Yu M., Fu J., Wang Y., and Zhao L.-J., (2015), "A laminated magnetorheological elastomer bearing prototype for seismic mitigation of bridge superstructures", **J. Intell. Mater. Syst. Struct.**, 26, 14, pp. 1818–1825.
 - [43] Lerner A. A. and Cunefare K. A., Patent, (2006), "Adaptable vibration absorber employing a magnetorheological elastomer with variable gap length and methods and systems therefor", U.S. Patent 7,102,474,.
 - [44] Deng Y. C., Bian Y. S., and Gao Z. H., (2013), "Study and Manufacture of Magneto-Rheological Vibration Absorber Based on Internal Resonance", *Applied Mechanics and Materials*, 389, .
 - [45] Liu T. and Xu Y., (2019), "Magnetorheological Elastomers: Materials and Applications", *Smart and Functional Soft Materials*.
 - [46] Li W. and Zhang X., (2008), "Research and Applications of MR Elastomers", **Recent Patents Mech. Eng.**, 1, 3, pp. 161–166.
 - [47] Web Page, "Force feedback systems using MR fluid device", Intelligent Structures and Systems Laboratory, (2016), [Online]. Available: <http://issl.eng.uci.edu/force-feedback-systems-usingmr-%0Afluid-device>.
 - [48] Jolly M. R., Carlson J. D., and Munoz B. C., (1996), "A model of the behaviour of magnetorheological materials", **Smart Mater. Struct.**, 5, 5, p. 607.
 - [49] Blom P. and Kari L., (2011), "A nonlinear constitutive audio frequency magneto-sensitive rubber model including amplitude, frequency and magnetic field dependence", **J. Sound Vib.**, 330, 5, pp. 947–954.
 - [50] Zhu J.-T., Xu Z.-D., and Guo Y.-Q., (2012), "Magnetoviscoelasticity parametric model of an MR elastomer vibration mitigation device", **Smart Mater. Struct.**, 21, 7, p. 75034.
 - [51] Lokander M. and Stenberg B., (2003), "Improving the magnetorheological effect in isotropic magnetorheological rubber materials", **Polym. Test.**, 22, 6, pp. 677–

680.

- [52] Ju B. X., Yu M., Fu J., Yang Q., Liu X. Q., and Zheng X., (2012), "A novel porous magnetorheological elastomer: preparation and evaluation", **Smart Mater. Struct.**, 21, 3, p. 35001.
- [53] Popp K. M., Kröger M., Li W., Zhang X. Z., and Kosasih P. B., (2010), "MRE properties under shear and squeeze modes and applications", **J. Intell. Mater. Syst. Struct.**, 21, 15, pp. 1471–1477.
- [54] Dargahi A., Sedaghati R., and Rakheja S., (2019), "On the properties of magnetorheological elastomers in shear mode: Design, fabrication and characterization", **Compos. Part B Eng.**, 159, , pp. 269–283.
- [55] Tao Y. *et al.*, (2018), "Design and experimental research of a magnetorheological elastomer isolator working in squeeze/elongation–shear mode", **J. Intell. Mater. Syst. Struct.**, 29, 7, pp. 1418–1429.
- [56] Nedjar A., Aguib S., Djedid T., Nour A., and Meloussi M., (2019), "Measurements and identification of smart magnetomechanical elastomer composite materials properties in shear mode", **Mater. Res. Express**, 6, 8.
- [57] Yarra S., Gordaninejad F., Behrooz M., and Pekcan G., (2019), "Performance of natural rubber and silicone-based magnetorheological elastomers under large-strain combined axial and shear loading", **J. Intell. Mater. Syst. Struct.**, 30, 2, pp. 228–242.
- [58] Farshad M. and Benine A., (2004), "Magnetoactive elastomer composites", **Polym. Test.**, 23, 3, pp. 347–353.
- [59] Lerner A. A. and Cunefare K. A., (2008), "Performance of MRE-based vibration absorbers", **J. Intell. Mater. Syst. Struct.**, 19, 5, pp. 551–563.
- [60] Liao G., Gong X., and Xuan S., (2013), "Magnetic field-induced compressive property of magnetorheological elastomer under high strain rate", **Ind. Eng. Chem. Res.**, 52, 25, pp. 8445–8453.
- [61] Bellan C. and Bossis G., (2002), "Field dependence of viscoelastic properties of MR elastomers", **Int. J. Mod. Phys. B**, 16, 17n18, pp. 2447–2453.
- [62] Koo J.-H., Khan F., Jang D.-D., and Jung H.-J., (2010), "Dynamic characterization and modeling of magneto-rheological elastomers under compressive loadings",

- Smart Mater. Struct.**, 19, 11, p. 117002.
- [63] Schubert G. and Harrison P., (2015), "Large-strain behaviour of magneto-rheological elastomers tested under uniaxial compression and tension, and pure shear deformations", **Polym. Test.**, 42, , pp. 122–134.
 - [64] Li R. and Sun L. Z., (2013), "Viscoelastic responses of silicone-rubber-based magnetorheological elastomers under compressive and shear loadings", **J. Eng. Mater. Technol.**, 135, 2.
 - [65] Yang C. Y., Fu J., Yu M., Zheng X., and Ju B. X., (2015), "A new magnetorheological elastomer isolator in shear–compression mixed mode", **J. Intell. Mater. Syst. Struct.**, 26, 10, pp. 1290–1300.
 - [66] Agirre-Olabide I. and Elejabarrieta M. J., (2018), "A new magneto-dynamic compression technique for magnetorheological elastomers at high frequencies", **Polym. Test.**, 66, , pp. 114–121.
 - [67] Sapouna K., Xiong Y. P., and Shenoi R. A., (2017), "Dynamic mechanical properties of isotropic/anisotropic silicon magnetorheological elastomer composites", **Smart Mater. Struct.**, 26, 11, p. 115010.
 - [68] Vatandoost H., Hemmatian M., Sedaghati R., and Rakheja S., (2020), "Dynamic characterization of isotropic and anisotropic magnetorheological elastomers in the oscillatory squeeze mode superimposed on large static pre-strain", **Compos. Part B Eng.**, 182, , p. 107648.
 - [69] Zhang W., Gong X. L., Jiang W. Q., and Fan Y. C., (2010), "Investigation of the durability of anisotropic magnetorheological elastomers based on mixed rubber", **Smart Mater. Struct.**, 19, 8, p. 85008.
 - [70] Zhu J.-T., Xu Z.-D., and Guo Y.-Q., (2013), "Experimental and modeling study on magnetorheological elastomers with different matrices", **J. Mater. Civ. Eng.**, 25, 11, pp. 1762–1771.
 - [71] Mitsumata T. and Ohori S., (2011), "Magnetic polyurethane elastomers with wide range modulation of elasticity", **Polym. Chem.**, 2, 5, pp. 1063–1067.
 - [72] Xu Y., Gong X., Xuan S., Zhang W., and Fan Y., (2011), "A high-performance magnetorheological material: preparation, characterization and magnetic-mechanic coupling properties", **Soft Matter**, 7, 11, pp. 5246–5254.

- [73] Nedjar A., Aguib S., Djedid T., Nour A., Settet A., and Tourab M., (2019), "Analysis of the Dynamic Behavior of Magnetorheological Elastomer Composite: Elaboration and Identification of Rheological Properties", **Silicon**, 11, 3, pp. 1287–1293.
- [74] Padalka O., Song H. J., Wereley N. M., Filer II J. A., and Bell R. C., (2010), "Stiffness and damping in Fe, Co, and Ni nanowire-based magnetorheological elastomeric composites", **IEEE Trans. Magn.**, 46, 6, pp. 2275–2277.
- [75] Anderson K., Bravoco R., Hargrave W., Roche J., Von Lockette P., and Lofland S. E., (2015), "Dynamic shear response of hard versus soft magnetic magnetoactive elastomers", **Smart Mater. Struct.**, 24, 2, p. 25022.
- [76] Kwon S. H., Lee J. H., and Choi H. J., (2018), "Magnetic particle filled elastomeric hybrid composites and their magnetorheological response", **Materials (Basel)**, 11, 6, p. 1040.
- [77] Shi G., Wang W., Wang G., Yang F., and Rui X., (2019), "Dynamic mechanical properties of FeSi alloy particles-filled magnetorheological elastomers", **Polym. Technol. Mater.**, 00, 00, pp. 1–13.
- [78] Popp K. M., Kröger M., Li W. hua, Zhang X. Z., and Kosasih P. B., (2010), "MRE properties under shear and squeeze modes and applications", **J. Intell. Mater. Syst. Struct.**, 21, 15, pp. 1471–1477.
- [79] Soria-Hernández C. G., Palacios-Pineda L. M., Elías-Zúñiga A., Perales-Martínez I. A., and Martínez-Romero O., (2019), "Investigation of the Effect of Carbonyl Iron Micro-Particles on the Mechanical and Rheological Properties of Isotropic and Anisotropic MREs: Constitutive Magneto-Mechanical Material Model", **Polymers (Basel)**, 11, 10, p. 1705.
- [80] Böse H. and Röder R., (2009), "Magnetorheological elastomers with high variability of their mechanical properties", *Journal of physics: Conference series*, 149, 1.
- [81] Gan R., Li Y., Qi S., Zhu M., and Yu M., (2019), "Study on the Effect of Particle Size on Viscoelastic Properties of Magnetorheological Elastomers", **Curr. Smart Mater.**, 4, 1, pp. 59–67.
- [82] Zhang W., Gong X., Xuan S., and Jiang W., (2011), "Temperature-dependent

- mechanical properties and model of magnetorheological elastomers", **Ind. Eng. Chem. Res.**, 50, 11, pp. 6704–6712.
- [83] Wan Y., Xiong Y., and Zhang S., (2018), "Temperature effect on viscoelastic properties of anisotropic magnetorheological elastomers under compression", **Smart Mater. Struct.**, 28, 1, p. 15005.
- [84] Yunus N. A. *et al.*, (2019), "Thermal stability and rheological properties of epoxidized natural rubber-based magnetorheological elastomer", **Int. J. Mol. Sci.**, 20, 3, p. 746.
- [85] Thorin A., Azoug A., and Constantinescu A., (2012), "Influence of prestrain on mechanical properties of highly-filled elastomers: Measurements and modeling", **Polym. Test.**, 31, 8, pp. 978–986.
- [86] Feng J. *et al.*, (2015), "The prestress-dependent mechanical response of magnetorheological elastomers", **Smart Mater. Struct.**, 24, 8, p. 85032.
- [87] Bastola A. K. and Li L., (2018), "A new type of vibration isolator based on magnetorheological elastomer A new type of vibration isolator based on magnetorheological elastomer", **Mater. Des.**, 157, August, pp. 431–436.
- [88] Danas K., Kankanala S. V, and Triantafyllidis N., (2012), "Experiments and modeling of iron-particle-filled magnetorheological elastomers", **J. Mech. Phys. Solids**, 60, 1, pp. 120–138.
- [89] Galipeau E. and Castañeda P. P., (2013), "A finite-strain constitutive model for magnetorheological elastomers: magnetic torques and fiber rotations", **J. Mech. Phys. Solids**, 61, 4, pp. 1065–1090.
- [90] Yao J., Yang W., Gao Y., Scarpa F., and Li Y., (2019), "Magnetorheological elastomers with particle chain orientation: modelling and experiments", **Smart Mater. Struct.**, 28, 9, p. 95008.
- [91] Khanouki M. A., Sedaghati R., and Hemmatian M., (2019), "Experimental characterization and microscale modeling of isotropic and anisotropic magnetorheological elastomers", **Compos. Part B**, 176, August, p. 107311.
- [92] Chen L. and Jerrams S., (2011), "A rheological model of the dynamic behavior of magnetorheological elastomers", **J. Appl. Phys.**, 110, 1, p. 13513.
- [93] Bouc R., (1967), "Forced vibrations of mechanical systems with hysteresis", *Proc.*

- of the Fourth Conference on Nonlinear Oscillations, Prague, 1967.
- [94] Wen Y. X., (1976), "Method for random vibration of hysteretic systems", **J. Eng. Mech. Div.**, 102, 2, pp. 249–263.
 - [95] Yang J. *et al.*, (2013), "Experimental study and modeling of a novel magnetorheological elastomer isolator", **Smart Mater. Struct.**, 22, 11, p. 117001.
 - [96] Behrooz M., Wang X., and Gordaninejad F., (2014), "Performance of a new magnetorheological elastomer isolation system", **Smart Mater. Struct.**, 23, 4, p. 45014.
 - [97] Li Y., Li J., Tian T., and Li W., (2013), "A highly adjustable magnetorheological elastomer base isolator for applications of real-time adaptive control", **Smart Mater. Struct.**, 22, 9, p. 95020.
 - [98] Norouzi M., Sajjadi Alehashem S. M., Vatandoost H., Ni Y. Q., and Shahmardan M. M., (2016), "A new approach for modeling of magnetorheological elastomers", **J. Intell. Mater. Syst. Struct.**, 27, 8, pp. 1121–1135.
 - [99] Nam T. H., Petříková I., and Marvalová B., (2020), "Experimental characterization and viscoelastic modeling of isotropic and anisotropic magnetorheological elastomers", **Polym. Test.**, 81, , p. 106272.
 - [100] Norouzi M., Gilani M., Alehashem S. M. S., and Vatandoost H., (2017), "Dynamic characterization and modeling of isotropic magnetorheological elastomers under tensile-compressive loadings", **IEEE Trans. Magn.**, 53, 9, pp. 1–12.
 - [101] Vatandoost H., Norouzi M., Alehashem S. M. S., and Smoukov S. K., (2017), "A novel phenomenological model for dynamic behavior of magnetorheological elastomers in tension–compression mode", **Smart Mater. Struct.**, 26, 6, p. 65011.
 - [102] Leng D., Sun S., Xu K., and Liu G., (2020), "A physical model of magnetorheological elastomer isolator and its dynamic analysis", **J. Intell. Mater. Syst. Struct.**, 31, 9, pp. 1141–1156.
 - [103] Li Y., (2014), "A state-of-the-art review on magnetorheological elastomer devices", **Smart Mater. Struct.**, 23, 12, pp. 1–24.
 - [104] Keys W. C., (1937), "Rubber springs", **Mech. Eng.**, 59, 5, pp. 345–349.
 - [105] Hattori R. and Takei K., (1950), "Spring constants of compressive rubber blocks", **J. Soc. Rubb. Ind. Japan**, 23, , p. 194.

- [106] Gent A. N. and Lindley P. B., (1959), "The compression of bonded rubber blocks", **Proc. Inst. Mech. Eng.**, 173, 1, pp. 111–122.
- [107] Fediuc D. O., Budescu M., and Venghiac V.-M., (2013), "The Behaviour under Compression of Elastomers Used in Base Isolation Bearings", **Bul. Institutului Politeh. din Iasi. Sect. Constr. Arhit.**, 59, 6, p. 119.
- [108] Fediuc D. O., Budescu M., Fediuc V., and Venghiac V.-M., (2013), "Compression modulus of elastomers", **Bul. Institutului Politeh. din Iasi. Sect. Constr. Arhit.**, 59, 2, p. 157.
- [109] Gordaninejad F., Wang X., and Mysore P., (2012), "Behavior of thick magnetorheological elastomers", **J. Intell. Mater. Syst. Struct.**, 23, 9, pp. 1033–1039.
- [110] Oguro T. *et al.*, (2017), "Sample size effect of magnetomechanical response for magnetic elastomers by using permanent magnets", **J. Nanomater.**, 2017, .
- [111] Standardization I. O. for, (2011), "**ISO 7743: 2011: Rubber, Vulcanized Or Thermoplastic. Determination of Compression Stress-strain Properties**", ISO.
- [112] Brown R., (2006), "**Physical testing of rubber**", Springer Science & Business Media.
- [113] Findley W. N. and Davis F. A., (2013), "**Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials**", Courier Corporation.

Abstract

Magnetoreological elastomers are a group of smart materials that are made from a combination of polymer and magnetized particles, such as iron powder. These materials react in the presence of a magnetic field, which appears as a change in rheological properties, such as stiffness and damping. The reason of changes is forming the chains of magnetized particles in the presence of a magnetic field. The existence of this feature has led to the use of these materials in the field of mechanical vibration control, which has considered the need to identify the dynamic behavior of these materials. Several factors affect the dynamic response, such as the type and amount of construction materials, environmental conditions, the type and amount of input strain, and more.

One of the effective factors is the shape factor. This factor expresses the ratio of the area that is under the mechanical load to the area of the non-load section. In the present research, the aim is to identify the effect of shape factor on the amount of vibrational properties of material in the dynamic state of tension-compression. For this purpose, samples with different shape factor (different diameters) From 0.42 to 0.93 and a combination of silicone polymer, iron powder and silicone oil have been molded and subjected to various dynamic tests. The applied magnetic field is from 0 to 250 mT, the input strain is from 8% to 14% and the input strain rate is from 1Hz to 8 Hz.

After performing the desired experiments, the data were filtered using a low-pass filter and their hysteresis diagrams were drawn. The storage and loss modules are calculated for each experiment. According to the results, as the shape factor increases, the amount of compression and tension modulus will increase and the modulus of loss will not change privately. The maximum effect of increasing the shape factor was obtained in compression 39.87% and in tension 52.70%. Another result that can be mentioned is the increase of the storage module and the loss module by increasing the density of the magnetic field. maximum MR effect up to 29.95% for the compression and 21.66% for the tensile storage moduli.

Finally, by using the data that obtained from the experiments, a comprehensive model is presented in the state of tension-compression. This model includes the hysteresis section and the nonlinear stiffness and loss section. These components include constants, each is related to the effect of a factor. by using the genetic algorithm of MATLAB software, the recommended values of the proposed dynamic model are optimally obtained. The coefficients of this model are only in terms of magnetic field density and

they are independent from strain and strain rate and shape factor. Then, the error value of the presented model with the practical results was calculated, which showed an acceptable value.

Keywords: Magnetoreological Elastomer, Dynamic Model, Vibration Properties, Shape Factor, Genetic Algorithm, Hysteresis.



Shahrood University of Technology
Faculty of Mechanic Engineering

Experimental investigation of the effect of shape factor on storage and loss coefficients of MR Elastomers and system identifications of these coefficients

Amirhossein Yghoobi

Supervisors

Dr. Amir Jalali

Dr. Mahmood Norouzi

Advisor

Dr. Mojtaba Ghatte

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

August 2020