

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مکانیک

گروه حرارت و سیالات

ساخت و مدل سازی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال

حسین وطن دوست

اساتید راهنما:

دکتر محمود نوروزی

دکتر محمد محسن شاه مردان

استاد مشاور:

دکتر مسعود سجادی آل هاشم

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ۹۴



تبصره ۵: ارائه مقاله در کنفرانسهای دانشجویی امتیاز ندارد.

امضاء:

رئیس (یا معاون آموزشی و پژوهشی) دانشکده:

فرم شماره ۶: 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 حسین وطن دوست به شماره دانشجویی ۹۱۰۷۸۴۴ رشته مکانیک گرایش تبدیل انرژی تحت عنوان ساخت و مدل سازی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال که در تاریخ ۱۳۹۴/۱۱/۲۶ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه: عالی - امتیاز ۲۰)	<input checked="" type="checkbox"/>	دفاع مجدد	<input type="checkbox"/>	مردود	<input type="checkbox"/>
----------------------------------	-------------------------------------	-----------	--------------------------	-------	--------------------------

۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۸/۹۹)

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

۴- قابل قبول (۱۴ - ۱۵/۹۹)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
		دکتر محمد محسن شاهمردان	۱- استاد راهنمای اول
		دکتر محمود نوروزی	۲- استاد راهنمای دوم
—		دکتر مسعود سجادی آل هاشم	۳- استاد مشاور
		دکتر پوریا اکبرزاده	۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
		دکتر حسن کیهانی	۵- استاد ممتحن اول
		دکتر علی خالقی	۶- استاد ممتحن دوم

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه صنعتی شاهرود
رئیس دانشکده:

تقدیم به

پدر، مادر و برادر عزیزم

به پاس زحماتشان...

تقدیر و سپاس

منت خدای را عزّو جل که مسیر زندگییم را با چراغ دانش روشن کرد. بر خود لازم می‌دانم که از اساتید راهنمای گرامی به ویژه جناب آقای دکتر محمود نوروزی، که همواره مشوق بنده بوده و تاثیر بسیار زیادی در انجام پایان نامه داشته اند و جناب آقای دکتر محمد محسن شاه مردان که در به انجام رساندن این پژوهش مرا یاری فرمودند، سپاسگزاری نمایم.

همچنین از آقای دکتر مسعود سجادی آل هاشم که به عنوان استاد مشاور که همواره نگارنده را مورد لطف و محبت خود قرار داده اند، کمال تشکر را دارم و از زحمات بی دریغشان صمیمانه تشکر و قدردانی می‌کنم.

از آقای دکتر فرشیدیان فر، استاد نگارنده در درس کنترل ارتعاشات در دانشگاه فردوسی مشهد، که در اهداف، مسیر زندگی و انتخاب پروژه ارشد تاثیر بسزایی داشته اند، کمال سپاسگذاری را دارم. از آقای دکتر استویان اسمو کو^۱، جهت تنظیم دعوتنامه جهت همکاری در پروژه ای مرتبط با پایان نامه ارشد در آزمایشگاه مواد فعال و هوشمند دانشگاه کمبریج انگلستان قدر دانی و تشکر می‌کنم.

برخود لازم می‌دانم از اساتید نامبرده در ذیل، که در طی دوره ارشد، همواره پاسخگوی سوالات متعدد نگارنده در خصوص پایان نامه بوده اند، تشکر و قدردانی نمایم.

Dr. Yancheng Li	University of Technology Sydney
Prof Weihua. Li	University of Wollongong
Prof. Gordaninejad	University of Nevada Reno
Dr. Majid Behrooz	University of Nevada Reno
Dr. Reza salehyan and Dr. Kyu Hyun	Pusan National University

حسین وطن دوست – بهمن ماه ۹۴

^۱Stoyan Smoukov

تعهد نامه

اینجانب حسین وطن دوست دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود، نویسنده پایان نامه "ساخت و مدل سازی الاستومر مگنتورئولوژیکال" تحت راهنمایی دکتر محمد محسن شاهمردان 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 آنها) 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 و نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحوی 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 دسته‌ای از مواد فعال و هوشمند می‌باشند که خواص مکانیکی آن‌ها به‌ویژه خواص رئولوژیک در حضور میدان مغناطیسی خارجی تغییر می‌کنند. الاستومرهای مگنتورئولوژیکال با قرار دادن ذرات بسیار ریز آهنی (در حدود چند میکرو متر) در یک محیط لاستیکی مثل الاستومر، تشکیل می‌شوند. این ذرات آهنی می‌توانند هم به صورت هموزن (ایزوتروپ) در محیط الاستومری پخش شوند و هم به صورت غیر ایزوتروپ که در این حالت زنجیره‌هایی از ذرات آهنی را در الاستومر تشکیل می‌دهند. الاستومرهای مگنتورئولوژیکال دارای دو ویژگی منحصر به فرد سختی و میرایی قابل تنظیم می‌باشند که بیشتر به منظور کنترل ارتعاشات و تغییر فرکانس طبیعی سیستم‌های مکانیکی، مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین برای ساخت و آماده سازی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال در کاربردهای گوناگون، مدل سازی این مواد دارای اهمیت فراوان می‌باشد. اولین قدم جهت مدل سازی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال، شناسایی و تفسیر رفتارهای ویسکوالاستیک و مکانیکی این مواد در حضور میدان مغناطیسی و تحت بارگذاری‌های مختلف دینامیکی می‌باشد.

در این پژوهش رفتار ویسکوالاستیک یک نمونه الاستومر مگنتورئولوژیکال، با استفاده از نتایج آزمایشگاهی موجود در رژیم برشی نوسانی تفسیر و تحلیل شده است و به صورت نمودارهای تنش- کرنش نشان داده شده اند. جهت مطالعه رفتار دینامیکی، نمودارهای تنش بر حسب کرنش الاستومر مگنتورئولوژیکال ترسیم و مورد بررسی قرار گرفته است. این نمودارها به شکل هیستریزیس‌های بیضی شکل پدیدار می‌شوند. این نمودارهای هیستریزیس بیانگر رفتار ویسکوالاستیک، میزان سختی معادل (شیب نمودار هیستریزیس) و میرایی معادل (مساحت محصور هیستریزیس) الاستومرهای مگنتورئولوژیکال می‌باشند که شکل آن‌ها با توجه به نتایج داده‌های آزمایشگاهی علاوه بر چگالی شار میدان مغناطیسی خارجی، وابسته به شرایط بارگذاری دینامیکی از جمله کرنش (جابجایی) و نرخ کرنش (فرکانس) می‌باشند.

در رژیم برشی، نمودارهای تنش- کرنش برای الاستومر مگنتورئولوژیکال به شکل منحنی هیستریزس متقارن، پدیدار می‌شوند. همچنین رفتار مدول ذخیره برشی الاستومر مگنتورئولوژیکال در بازه فرکانسی بین یک دهم هرتز تا هشت هرتز کاملاً غیر خطی است که نشان دهنده وابستگی این مواد به نرخ کرنش می‌باشد. برای مدل سازی این رفتار یک معادله ویسکوالاستیک نوین که تعمیم یافته مدل ویسکوالاستیک کلوین-ویت می‌باشد، معرفی می‌گردد. این مدل رفتار ویسکوالاستیک و رابطه بین تنش و کرنش الاستومر مگنتورئولوژیکال را برحسب اندازه شار میدان مغناطیسی خارجی، کرنش و نرخ کرنش به خوبی پیش بینی می‌کند. ضرایب این مدل که از دو روش کمترین مربعات و الگوریتم ژنتیک بدست آمده است بر خلاف مدل‌های موجود، در بارگذاری‌های مختلف از کرنش و نرخ کرنش، ثابت می‌مانند و فقط تابع اندازه شار میدان مغناطیسی خارجی می‌باشند. با ثابت بودن ضرایب مدل پیشنهادی نسبت به تغییرات کرنش و نرخ کرنش، نیازی به انجام الگوریتم‌های بهینه سازی برای محاسبه و به روز رسانی این ضرایب در بارگذاری‌های دینامیکی مختلف نمی‌باشد. در نتیجه خواص سختی و میرایی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال را می‌توان فقط از طریق شار میدان مغناطیسی خارجی در هر شرایطی کنترل کرد. بنابراین مدل پیشنهادی در الگوریتم‌های کنترلی بسیار سریعتر عمل خواهد کرد.

کلمات کلیدی: الاستومر مگنتورئولوژیکال، مدل سازی، ویسکوالاستیک، هیستریزس، میدان مغناطیسی، کرنش، نرخ کرنش.

A new approach for modeling of magneto-rheological elastomers

Mahmoud Norouzi¹, Seyed Masoud Sajjadi Alehashem², Hossein Vatandoost¹, Yi Qing Ni³ and M. M. Shahmardan¹

¹Department of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

²Department of Civil Engineering, Kharazmi University, Karaj Campus, Iran.

³Department of Civil and Environmental Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong, China.

Corresponding author:

Mahmoud Norouzi, ¹Department of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

Email: mnorouzi@shahroodut.ac.ir

Journal of Intelligent Material Systems and Structures

1–15

The Author(s) 2015

Reprints and permissions:

sagepub.co.uk/journalsPermissions.nav

DOI: 10.1177/1045389X15615966

jim.sagepub.com

فهرست مطالب

۱ فصل اول	۱
۱-۱ تاریخچه و مروری بر مواد مگنتورئولوژیکال	۲
۲-۱ سیال‌های مگنتورئولوژیکال	۳
۱-۲-۱ کاربردهای سیالهای مگنتورئولوژیکال	۵
۳-۱ الاستومرهای مگنتورئولوژیکال	۸
۱-۳-۱ اجزای تشکیل دهنده الاستومرهای مگنتورئولوژیکال	۱۰
۲-۳-۱ کاربردهای الاستومرهای مگنتورئولوژیکال	۱۳
۴-۱ پلاستومرهای مگنتورئولوژیکال	۱۸
۵-۱ ژل‌های مگنتورئولوژیکال	۱۹
۶-۱ فوم‌های مگنتورئولوژیکال	۲۰
۷-۱ چالش‌های استفاده از الاستومرهای مگنتورئولوژیکال	۲۲
۸-۱ مدل سازی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال	۲۳
۱-۸-۱ مدل‌های ریزساختار	۲۴
۲-۸-۱ مدل‌های ویسکوالاستیک	۲۶
۹-۱ اثر ضخامت، پیش بارگذاری و دما بر روی رفتار الاستومرهای مگنتورئولوژیکال	۳۴
۱-۹-۱ تاثیر دما بر روی رفتار الاستومرهای مگنتورئولوژیکال	۳۴
۲-۹-۱ تاثیر پیش بارگذاری بر روی رفتار الاستومرهای مگنتورئولوژیکال	۳۵
۳-۹-۱ تاثیر ضخامت بر روی رفتار الاستومرهای مگنتورئولوژیکال	۳۵
۱۰-۱ معرفی تحقیق حاضر	۳۵

۳۶	۱۱-۱ ضرورت تحقیق و کاربرد آن
۳۷	۱۲-۱ تعریف مساله و نوآوری تحقیق
۳۹	۲ فصل دوم
۴۰	۱-۲ تولید یک نمونه الاستومر مگنتورئولوژیکال
۴۰	۱-۱-۲ مقدمه
۴۱	۲-۱-۲ ساخت یک نمونه الاستومر مگنتورئولوژیکال
۴۸	۲-۲ آزمایش‌های رایج رئومتری
۵۱	۳ فصل سوم
۵۲	۱-۳ مقدمه
۵۲	۲-۳ تست نوسان در حالت برشی
۵۴	۳-۳ تفسیر فیزیکی داده‌های تست برشی
۵۸	۴-۳ رفتار ویسکوالاستیک و نمودارهای هیستریزیس
۵۸	۱-۴-۳ تاثیر میدان مغناطیسی بر روی رفتار الاستومر مگنتورئولوژیکال
۶۱	۲-۴-۳ تاثیر کرنش برشی بر روی رفتار الاستومر مگنتورئولوژیکال
۶۳	۳-۴-۳ تاثیر نرخ کرنش برشی بر روی رفتار الاستومر مگنتورئولوژیکال
۶۷	۴ مدل سازی الاستومر مگنتورئولوژیکال
۶۸	۱-۴ مقدمه
۶۸	۲-۴ مدل سازی الاستومر مگنتورئولوژیکال در حالت نوسان برشی
۶۸	۱-۲-۴ مدل تعمیم یافته ماکسول
۷۱	۲-۲-۴ مدل تعمیم یافته ماکسول با دو شاخه
۷۸	۳-۲-۴ مدل گسترش یافته ماکسول با سه شاخه

۸۲	.....	مدل گسترش یافته ماکسول با چهار شاخه	۴-۲-۴
۸۵	.....	مدل جدیدی از مدل گسترش یافته ماکسول	۳-۴
۸۶	.....	مدل جدید گسترش یافته ماکسول با دو شاخه	۱-۳-۴
۸۹	.....	مدل جدید تعمیم یافته ماکسول با سه شاخه	۲-۳-۴
۹۳	.....	مدل پیشنهادی گسترش یافته کلونین-ویت	۴-۴
۹۳	.....	مدل معرفی	۱-۴-۴
۹۶	.....	تعیین ضرایب و پارامترهای مدل	۲-۴-۴
۹۹	.....	مقایسه مدل پیشنهادی و نتایج آزمایشگاهی (آنالیز کیفی)	۳-۴-۴
۱۰۴	.....	محاسبه میزان عملکرد مدل پیشنهادی (آنالیز کمی)	۴-۴-۴
۱۰۷	.....	نتیجه گیری و پیشنهادات	۵
۱۰۸	.....	جمع بندی نتایج	۱-۵
۱۰۹	.....	پژوهش های پیشنهادی	۲-۵
۱۱۱	.....	مراجع	۶

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱- شماتیک ساده ای از سیال‌های مگنتورئولوژیکال [۴]. ۴
- شکل ۲-۱- رفتار سیال‌های مگنتورئولوژیکال در حضور میدان مغناطیسی [۶]. ۴
- شکل ۳-۱- شماتیک و اجزای دمپر سیال مگنتورئولوژیکال شرکت لورد در مقیاس بزرگ [۱۷]. ۶
- شکل ۴-۱- سیستم میرایی تنظیم شونده شامل دمپر سیال مگنتورئولوژیکال در ماشین لباسشویی [۲۰]. ۶
- شکل ۵-۱- کاربرد دمپر سیال مگنتورئولوژیکال در خودروهای نظامی هامر [۲۱]. ۷
- شکل ۶-۱- دمپ‌های سیال مگنتورئولوژیکال نصب شده بر روی پل کابلی دریاچه دانگتینگ [۲۲]. ۷
- شکل ۷-۱- الف. اجزای دمپر سیال مگنتورئولوژیکال ب. ترمز چرخشی سیال مگنتورئولوژیکال [۱]. ۸
- شکل ۸-۱- شماتیک ساده ای از مراحل ساخت الاستومر مگنتورئولوژیکال ایزوتروپ و غیر ایزوتروپ [۷]. ۹
- شکل ۹-۱- یک نمونه ساخته شده از الاستومر مگنتورئولوژیکال ایزوتروپ [۱۲]. ۹
- شکل ۱۰-۱- شماتیک ساده ای از دو نوع توزیع ذرات مغناطیس شونده. الف. غیر ایزوتروپ، ب. ایزوتروپ [۴]. ۱۳
- شکل ۱۱-۱- جاذب ارتعاشی قابل تنظیم شامل الاستومر مگنتورئولوژیکال شامل یک کوئل مغناطیسی [۴۵]. ۱۴
- شکل ۱۲-۱- جاذب ارتعاشی قابل تنظیم شامل الاستومر مگنتورئولوژیکال شامل دو کوئل مغناطیسی. الف. جاذب ارتعاشی. ب. شماتیک جاذب ارتعاشی: (۱) نوسانگر (۲) الاستومر مگنتورئولوژیکال (۳) هادی مغناطیسی (۴) کوئل [۳۵]. ۱۵
- شکل ۱۳-۱- عنصر فنری قابل تنظیم شامل الاستومر مگنتورئولوژیکال [۴۶]. ۱۶
- شکل ۱۴-۱- ایزوله کننده سختی و میرایی تنظیم شونده دارای چهار الاستومر مگنتورئولوژیکال دوزنقه‌ای شکل [۴۷]. ۱۶
- شکل ۱۵-۱- غلاف الاستومر مگنتورئولوژیکال در سیستم‌های تعلیق خودرو [۴۸]. ۱۷
- شکل ۱۶-۱- نمونه اولیه ساخته پای مصنوعی شامل الاستومر مگنتورئولوژیکال [۳۸]. ۱۸
- شکل ۱۷-۱- پلاستومرهای مگنتورئولوژیکال a. در اشکال هندسی مختلف b. تحت میدان مغناطیسی. ۱۹
- شکل ۱۸-۱- تاثیر میدان مغناطیسی بر ژل مگنتورئولوژیکال a. رئومتر MCR ۳۰۱ b. در غیاب میدان مغناطیسی c. در حضور میدان مغناطیسی [۵۳]. ۲۰
- شکل ۱۹-۱- دستگاه‌های فوم مگنتورئولوژیکال a. دمپر فوم مگنتورئولوژیکال b. عملکرد دمپر c. ترمز چرخشی فوم مگنتورئولوژیکال [۱]. ۲۲
- شکل ۲۰-۱- مدل چهار پارامتری ویسکوالاستیکی پیشنهاد شده توسط لی و همکاران [۱۱۵]. ۲۷

- شکل ۱-۲۱- مدل چهار پارامتری ویسکوالاستیک مشتق کسری ارائه شده توسط ژو و همکاران [۱۱۶]..... ۲۸
- شکل ۱-۲۲- مدل دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال پیشنهاد شده توسط ام و همکاران [۱۱۷]..... ۲۹
- شکل ۱-۲۳- مدل ساختاری الاستومرهای مگنتورئولوژیکال. ۱- فنر هوک ۲- جز میرایی آبل ۳- جز فنری غیر خطی [۹۶]..... ۲۹
- شکل ۱-۲۴- یک مدل رئولوژی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال ارائه شده توسط چن و جرام [۱۱۹]. a: جز ویسکوالاستیک ماتریس b: جز القای میدان مغناطیسی c: جز اصطکاکی بین ماتریس و ذرات مغناطیسی..... ۳۰
- شکل ۱-۲۵- مدل پیشنهادی کرنش-سخت شوندگی توسط یو و همکاران [۱۲۱]..... ۳۱
- شکل ۱-۲۶- مدل پدیده‌های-شناختی پیشنهادی برای ایزولاتورهای شامل الاستومرهای مگنتورئولوژیکال توسط بهروز و همکاران [۱۲۳]..... ۳۲
- شکل ۱-۲۷- شماتیک مدل پیشنهادی برای ایزولاتورهای شامل الاستومرهای مگنتورئولوژیکال توسط یانگ و همکاران [۱۲۴]..... ۳۳
- شکل ۱-۲- ظرف مخلوط برای اجزای لازم به همراه یک ترازو دیجیتالی با دقت ۰,۱ گرم..... ۴۲
- شکل ۲-۲- چهار عدد فاصله انداز..... ۴۳
- شکل ۲-۳- دو عدد شیشه پیرکس و دو نایلون..... ۴۳
- شکل ۲-۴- ذرات آهنی به میزان ۵۰ گرم..... ۴۴
- شکل ۲-۵- افزودن روغن سیلیکون به ذرات آهنی..... ۴۴
- شکل ۲-۶- افزودن سیلیکون به مخلوط ذرات آهنی و روغن سیلیکون..... ۴۵
- شکل ۲-۷- مجموع وزنی ۷۱,۴ گرم شامل اجزای تشکیل دهنده نمونه الاستومر مگنتورئولوژیکال..... ۴۵
- شکل ۲-۸- مخلوط هم زده شده شامل تمام اجزای تشکیل دهنده الاستومر مگنتورئولوژیکال..... ۴۶
- شکل ۲-۹- اجزای مخلوط شده آماده برای مرحله پخت..... ۴۶
- شکل ۲-۱۰- نمونه هم زده شده بین دو صفحه شیشه‌ای فشرده می‌شود..... ۴۷
- شکل ۲-۱۱- نمونه الاستومر مگنتورئولوژیکال ساخته شده به همراه یک برش عرضی از این نمونه..... ۴۷
- شکل ۲-۱۲- دستگاه رئومتر- مدل MCR ۳۰۰..... ۴۸
- شکل ۳-۱- طراحی اجزای آزمایش نوسان برشی به همراه دو آهنربا در طرفین و دو نمونه الاستومر مگنتورئولوژیکال..... ۵۳
- شکل ۳-۲- نصب اجزای آزمایش نوسان برشی در دستگاه MTS..... ۵۴
- شکل ۳-۳- حلقه‌های هیستریزیس در غیاب میدان مغناطیسی ($B = 0mT$). (a) : $f = 0.1 Hz$; (b) : $f = 1Hz$

- ۵۵ $f = 8Hz$: (d) ، $f = 3Hz$: (c) ،
- شکل ۳-۴- حلقه‌های هیستریزیس در میدان مغناطیسی ($B = 272mT$) . (a) : $f = 0.1 Hz$ ، (b) : $f = 1Hz$ ،
- ۵۶ $f = 8Hz$: (d) ، $f = 3Hz$: (c)
- شکل ۳-۵- حلقه‌های هیستریزیس در فرکانس‌های مختلف و کرنش ۱۶ درصد. (a) : $B = 0mT$ ، (b) : z
- ۵۷ $B = 272mT$
- شکل ۳-۶- حلقه‌های هیستریزیس در میدان‌های مغناطیسی مختلف در کرنش ۴ درصد. (a) : $f = 0.1 Hz$ ، (b) : .
- ۵۷ $f = 3Hz$
- شکل ۳-۷- نمودار هیستریزیس نیرو-جابه‌جایی در بارگذاری نوسانی مواد لاستیک مانند [۱۴۲].
- شکل ۳-۸- مدول ذخیره برشی بر حسب میدان مغناطیسی در فرکانس‌های مختلف. (a) : $\gamma_0 = 4\%$ ، (b) : .
- ۶۰ $\gamma_0 = 16\%$
- شکل ۳-۹- ضریب تلفات بر حسب میدان مغناطیسی در فرکانس‌های مختلف. (a) : $\gamma_0 = 4\%$ ، (b) : $\gamma_0 = 16\%$.
- ۶۱
- شکل ۳-۱۰- مدول ذخیره برشی بر حسب کرنش در میدان‌های مغناطیسی مختلف. (a) : $f = 0.1 Hz$ ، (b) :
- ۶۲ $f = 3Hz$
- شکل ۳-۱۱- ضریب تلفات بر حسب کرنش در میدان‌های مغناطیسی مختلف. (a) : $f = 0.1 Hz$ ، (b) : $f = 3Hz$
- ۶۲
- شکل ۳-۱۲- مدول ذخیره برشی بر حسب فرکانس در میدان‌های مغناطیسی مختلف. (a) : $\gamma_0 = 4\%$ ، (b) : $\gamma_0 = 16\%$
- ۶۴
- شکل ۳-۱۳- ضریب تلفات بر حسب فرکانس در میدان‌های مغناطیسی مختلف. (a) : $\gamma_0 = 4\%$ ، (b) : $\gamma_0 = 16\%$
- ۶۹ شکل ۴-۱- مدل کلونین-ویت.
- ۷۰ شکل ۴-۲- مدل سه پارامتره استاندارد.
- ۷۰ شکل ۴-۳- مدل سه پارامتری تعمیم یافته ماکسول.
- ۷۱ شکل ۴-۴- مدل زرنر.
- ۷۱ شکل ۴-۵- مدل عمومی تعمیم یافته ماکسول.
- ۷۲ شکل ۴-۶- شماتیک مدل تعمیم یافته ماکسول در مد دوم.
- ۷۲ شکل ۴-۷- مدل ساده ماکسول.

- شکل ۸-۴- پاسخ مدل تعمیم یافته ماکسول با دو شاخه (مد دوم) در میدان ($B = 0 \text{ mT}$)، کرنش ۲ درصد و فرکانس ۵ هرتز.....۷۶
- شکل ۹-۴- پاسخ مدل تعمیم یافته ماکسول با دو شاخه در میدان ($B = 0 \text{ mT}$)، کرنش ۱۶ درصد و فرکانس ۸ هرتز.....۷۷
- شکل ۱۰-۴- پاسخ مدل تعمیم یافته ماکسول با دو شاخه در میدان ($B = 272 \text{ mT}$)، کرنش ۲ درصد و فرکانس ۱ هرتز.....۷۷
- شکل ۱۱-۴- پاسخ مدل تعمیم یافته ماکسول با دو شاخه در میدان ($B = 272 \text{ mT}$)، کرنش ۲ درصد و فرکانس ۸ هرتز.....۷۸
- شکل ۱۲-۴- پاسخ مدل تعمیم یافته ماکسول با سه شاخه در میدان ($B = 100 \text{ mT}$)، کرنش ۴ درصد و فرکانس ۸ هرتز.....۸۰
- شکل ۱۳-۴- پاسخ مدل تعمیم یافته ماکسول با سه شاخه در میدان ($B = 100 \text{ mT}$)، کرنش ۱۶ درصد و فرکانس ۸ هرتز.....۸۰
- شکل ۱۴-۴- پاسخ مدل تعمیم یافته ماکسول با سه شاخه در میدان ($B = 230 \text{ mT}$)، کرنش ۲ درصد و فرکانس ۸ هرتز.....۸۱
- شکل ۱۵-۴- پاسخ مدل تعمیم یافته ماکسول با سه شاخه در میدان ($B = 230 \text{ mT}$)، کرنش ۸ درصد و فرکانس ۵ هرتز.....۸۱
- شکل ۱۶-۴- پاسخ مدل تعمیم یافته ماکسول با چهار شاخه در میدان ($B = 0 \text{ mT}$)، کرنش ۲ درصد و فرکانس ۱ هرتز.....۸۳
- شکل ۱۷-۴- پاسخ مدل تعمیم یافته ماکسول با چهار شاخه در میدان ($B = 0 \text{ mT}$)، کرنش ۱۶ درصد و فرکانس ۵ هرتز.....۸۳
- شکل ۱۸-۴- پاسخ مدل تعمیم یافته ماکسول با چهار شاخه در میدان ($B = 272 \text{ mT}$)، کرنش ۸ درصد و فرکانس ۰/۵ هرتز.....۸۴
- شکل ۱۹-۴- پاسخ مدل تعمیم یافته ماکسول با چهار شاخه در میدان ($B = 0 \text{ mT}$)، کرنش ۱۶ درصد و فرکانس ۸ هرتز.....۸۴
- شکل ۲۰-۴- مدل بهبود یافته‌ای از تعمیم یافته ماکسول.....۸۵
- شکل ۲۱-۴- پاسخ مدل جدید تعمیم یافته ماکسول با دو شاخه در میدان ($B = 0 \text{ mT}$)، کرنش ۴ درصد و فرکانس ۸ هرتز.....۸۷

- شکل ۴-۲۲- پاسخ مدل جدید تعمیم یافته ماکسول با دو شاخه در میدان ($B = 0 \text{ mT}$)، کرنش ۱۶ درصد و فرکانس ۵ هرتز. ۸۸
- شکل ۴-۲۳- پاسخ مدل جدید تعمیم یافته ماکسول با دو شاخه در میدان ($B = 272 \text{ mT}$)، کرنش ۸ درصد و فرکانس ۸ هرتز. ۸۸
- شکل ۴-۲۴- پاسخ مدل جدید تعمیم یافته ماکسول با دو شاخه در میدان ($B = 272 \text{ mT}$)، کرنش ۱۶ درصد و فرکانس ۰/۱ هرتز. ۸۹
- شکل ۴-۲۵- پاسخ مدل جدید تعمیم یافته ماکسول با سه شاخه در میدان ($B = 0 \text{ mT}$)، کرنش ۱۶ درصد و فرکانس ۳ هرتز. ۹۰
- شکل ۴-۲۶- پاسخ مدل جدید تعمیم یافته ماکسول با سه شاخه در میدان ($B = 0 \text{ mT}$)، کرنش ۱۶ درصد و فرکانس ۸ هرتز. ۹۱
- شکل ۴-۲۷- پاسخ مدل جدید تعمیم یافته ماکسول با سه شاخه در میدان ($B = 272 \text{ mT}$)، کرنش ۸ درصد و فرکانس ۰/۵ هرتز. ۹۱
- شکل ۴-۲۸- پاسخ مدل جدید تعمیم یافته ماکسول با سه شاخه در میدان ($B = 272 \text{ mT}$)، کرنش ۱۶ درصد و فرکانس ۸ هرتز. ۹۲
- شکل ۴-۲۹- شماتیک مدل پیشنهادی در این پژوهش. ۹۴
- شکل ۴-۳۰- حلقه‌های هیستریزس شکل تنش-کرنش برای داده‌های آزمایشگاهی و پاسخ مدل ویسکوالاستیک پیشنهادی. (a): میدان ۱۰۰ میلی تسلا و فرکانس ۰/۵ هرتز، (b): میدان ۲۳۰ میلی تسلا و فرکانس ۵ هرتز [۱۴۳]. ۱۰۰
- شکل ۴-۳۱- حلقه‌های هیستریزس شکل تنش-کرنش برای داده‌های آزمایشگاهی و پاسخ مدل ویسکوالاستیک پیشنهادی. (a): میدان صفر میلی تسلا و کرنش ۲ درصد، (b): میدان ۲۷۲ میلی تسلا و کرنش ۱۶ درصد [۱۴۳]. ۱۰۱
- شکل ۴-۳۲- حلقه‌های هیستریزس شکل تنش-کرنش برای داده‌های آزمایشگاهی و پاسخ مدل ویسکوالاستیک پیشنهادی. (a): فرکانس ۵ هرتز و کرنش ۸ درصد، (b): فرکانس ۰/۵ هرتز و کرنش ۲ درصد [۱۴۳]. ۱۰۱
- شکل ۴-۳۳- روند تغییرات مدول ذخیره برشی و ضریب تلفات میرایی برحسب میدان برای داده‌های آزمایشگاهی و پاسخ مدل پیشنهادی. (a): مدول ذخیره برشی در کرنش ۴ درصد، (b): ضریب تلفات میرایی در کرنش ۱۶ درصد [۱۴۳]. ۱۰۲
- شکل ۴-۳۴- روند تغییرات مدول ذخیره برشی و ضریب تلفات میرایی برحسب فرکانس برای داده‌های آزمایشگاهی و

پاسخ مدل پیشنهادی. (a) : مدول ذخیره برشی در کرنش ۱۶ درصد ، (b) : ضریب تلفات میرایی در کرنش ۱۶ درصد
[۱۴۳].....۱۰۳

شکل ۴-۳۵- روند تغییرات مدول ذخیره برشی و ضریب تلفات میرایی برحسب کرنش برای داده‌های آزمایشگاهی و
پاسخ مدل پیشنهادی. (a) : مدول ذخیره برشی در فرکانس ۳ هرتز ، (b) : ضریب تلفات میرایی در فرکانس ۰/۱ هرتز
[۱۴۳].....۱۰۳

فهرست جداول

- جدول ۱-۲- اجزای تشکیل دهنده نمونه الاستومر مگنتورئولوژیکال ایزوتروپ ۴۱
- جدول ۱-۴- پارامترهای تابع میدان در مدل تعمیم یافته ماکسول در مد دوم ۷۵
- جدول ۲-۴- پارامترهای تابع میدان مدل تعمیم یافته ماکسول با سه شاخه (مد سوم) ۷۹
- جدول ۳-۴- پارامترهای تابع میدان مدل تعمیم یافته ماکسول با چهار شاخه ۸۲
- جدول ۴-۴- پارامترهای تابع میدان مدل جدید تعمیم یافته ماکسول با دو شاخه ۸۷
- جدول ۵-۴- پارامترهای تابع میدان مدل جدید تعمیم یافته ماکسول با سه شاخه ۹۰
- جدول ۶-۴- تفسیر فیزیکی پارامترهای مدل پیشنهادی ۹۶
- جدول ۷-۴- پارامترهای مدل پیشنهادی ۹۸
- جدول ۸-۴- ضرایب ثابت پارامترهای تابع میدان در مدل ویسکوالاستیک پیشنهادی ۹۹
- جدول ۹-۴- میزان تطابق برای مدل پیشنهادی ۱۰۶

فهرست علائم و اختصارات

عنوان	علامت اختصاری	عنوان	علامت اختصاری
دامنه جابجایی	A	مجموع خطا	RMS
چگالی میدان مغناطیسی	B	تابع مینیمم	ff
فرکانس بارگذاری	f	زمان	t
فرکانس مرجع ۱ هرتز	f_0	مدول ذخیره دینامیکی	E
مدول ذخیره برشی	G'	ویسکوزیته کششی	$\bar{\eta}$
مدول تلفات برشی	G''	ضریب اول تابع هیستریزیس	k_1
دامنه کرنش	ε_0	ضریب دوم تابع هیستریزیس	k_2
تنش برشی	τ	نرخ کرنش برشی	$\dot{\gamma}$
تنش کششی-فشاری	σ	تابع اندازه در متلب	norm
دامنه کرنش	γ_0	نرخ کرنش کششی-فشاری	$\dot{\varepsilon}$
زمان رهایی از تنش	λ	اندازه میدان مغناطیسی	H
ضریب ویسکوز	η	مگنتورئولوژیکیال	MR
ضریب ویسکوز مختلط	η^*	سیال مگنتورئولوژیکیال	MRF
ضریب ویسکوز ماکسول	η_i	الاستومر مگنتورئولوژیکیال	MRE
ضریب ذخیره ماکسول	λ_i	پلاستومر مگنتورئولوژیکیال	MRP
فرکانس زاویه‌ای	ω	ژل مگنتورئولوژیکیال	MRG
مدول ذخیره ماکسول	G_0	اختلاف فاز	φ

فصل اول

مقدمه، مفاهیم و مروری بر مواد مگنتورئولوژیکال

۱-۱ تاریخچه و مروری بر مواد مگنتورئولوژیکال

مواد مگنتورئولوژیکال^۱، مانند سیال‌های مگنتورئولوژیکال^۲، فوم‌های مگنتورئولوژیکال^۳، ژل‌های مگنتورئولوژیکال^۴، پلاستومرهای مگنتورئولوژیکال^۵ و الاستومرهای مگنتورئولوژیکال^۶، گروهی از مواد هوشمندی^۷ هستند که خواص مکانیکی، رئولوژی و ویسکوالاستیک آن‌ها با اعمال میدان مغناطیسی خارجی تغییر می‌کنند. این تغییر با حذف میدان مغناطیسی به سرعت برگشت پذیر بوده و اندازه آن با میزان میدان مغناطیسی متناسب است [۱-۴].

مواد مگنتورئولوژیکال با قرار دادن ذرات ریز آهنی (در حد میکرون) در یک محیط^۸ پلیمری غیر مغناطیسی از جمله سیال، ژل، و یا مواد لاستیک مانند ساخته می‌شوند. در حضور میدان مغناطیسی ذرات آهنی در جهت میدان جهت گیری کرده و تشکیل زنجیره‌هایی از ذرات را می‌دهند. این ساختارهای زنجیری در محیط‌های سیال مانند، مانع جاری شدن سیال می‌گردند و در نتیجه باعث افزایش تنش تسلیم ماده می‌شوند که این افزایش تنش تسلیم سیال، باعث افزایش ظرفیت میرایی آن در بارگذاری‌های دینامیکی می‌گردد. این ساختارهای زنجیری در محیط‌های الاستومری باعث افزایش مدول ذخیره برشی می‌گردد. هنگامی که میدان مغناطیسی حذف می‌گردد این مواد به حالت اولیه باز خواهند گشت [۵].

تحقیق در زمینه مواد هوشمند اولین بار توسط ژاکوب رابینو^۹ [۶] با مطالعه بر روی سیال‌های مگنتورئولوژیکال صورت گرفت. در سال ۱۹۹۵ نیز شیگا^{۱۰} و همکاران [۷] الاستومرهای

^۱ *Magnetorheological materials (MR materials)*

^۲ *Magnetorheological fluids (MRFs)*

^۳ *Magnetorheological foams (MR foams)*

^۴ *Magnetorheological gels (MRGs)*

^۵ *Magnetorheological plastomers (MRPs)*

^۶ *Magnetorheological elastomers (MREs)*

^۷ *Smart material*

^۸ *Medium*

^۹ *Jacob Rabinow*

^{۱۰} *Shiga*

مگنتورئولوژیکال را مطرح کردن و پس از ساخت آن به کمک ترکیب ذرات آهنی و سیلیکون^۱، خواص ویسکوالاستیک آن‌ها را مورد ارزیابی قرار دادند. جولی^۲ و همکاران [۸] خواص رئولوژی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال را بررسی و افزایش ۴۰ درصدی در اندازه مدول ذخیره برشی این مواد در حضور میدان مغناطیسی یک تسلا گزارش کردند. دی ویس^۳ [۹] برای دست یابی به بیشترین افزایش در مدول ذخیره برشی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال، درصد حجمی بهینه ۲۷ درصد را برای ذرات آهنی را در این مواد گزارش کرد.

۲-۱ سیال‌های مگنتورئولوژیکال

سیالات مگنتورئولوژیکال محلول‌هایی شامل ذرات آهنی معلق در اندازه میکرون می‌باشند. این سیالات وقتی در برابر میدان مغناطیسی خارجی حضور می‌یابند، خواص رئولوژی آن‌ها از جمله ویسکوزیته در یک فرایند پیوسته، سریع و بازگشت پذیر تغییر می‌کنند. به میزان این تغییر در حضور میدان مغناطیسی، اثر (MR) مگنتورئولوژیکال^۴ گفته می‌شود [۱۰]. به طور کلی سیال‌های مگنتورئولوژیکال شامل تجمع بالایی از ذرات مغناطیس شونده در یک محیط غیر مغناطیس می‌باشند. تفاوت در اندازه و نحوه قرارگیری ذرات مغناطیس شونده منجر به رفتار رئولوژیکی متفاوت می‌گردد. به طور کلی سایز و درصد حجمی این ذرات به ترتیب بین ۰/۱ تا ۱۰ میکرومتر و ۱۰ تا ۵۰ درصد می‌باشند. در سیالات مگنتورئولوژیکال برهم کنش بین ذرات مغناطیس شده، باعث تشکیل ساختارهای زنجیری محکم به صورت ستونی و در جهت میدان مغناطیسی می‌گردند. این ستون‌های ذرات باعث افزایش چشمگیری در ویسکوزیته^۵ می‌گردند. شکل و استواری این ستون‌ها بستگی به پارمترهای مختلفی از جمله اندازه میدان مغناطیسی، درصد حجمی، اندازه و توزیع ذرات مغناطیس شونده دارد. مثلاً، ذرات مغناطیس

^۱ Silicone

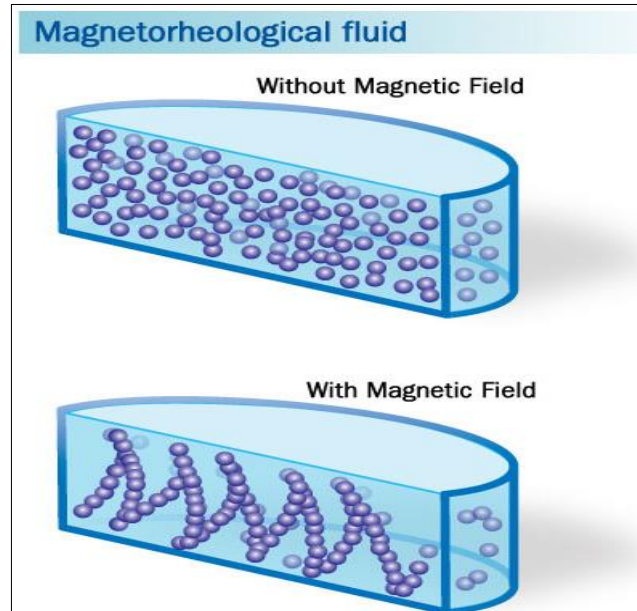
^۲ Jolly

^۳ Davis

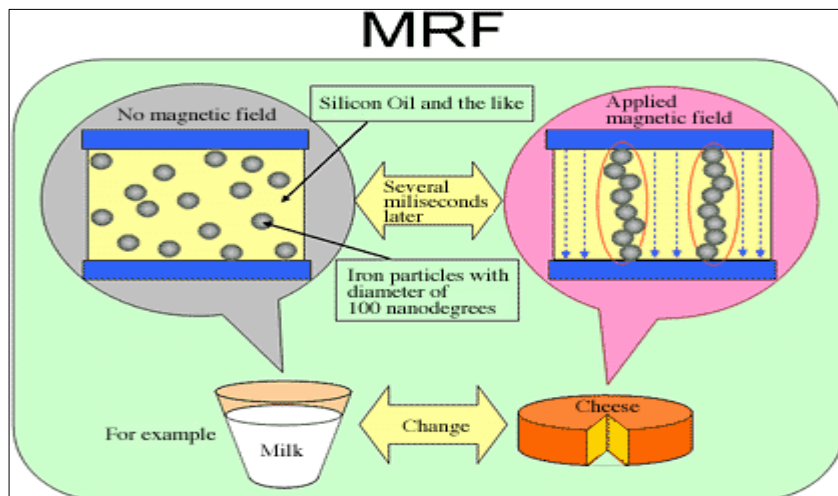
^۴ Magnetorheological effect (MR effect)

^۵ Viscosity

شونده ریز از ته نشین شدن این ذرات جلوگیری می کند و از طرف دیگر تنش تسلیم^۱ سیالات مگنتورئولوژیکال با افزایش ذرات، بیشتر می گردد [۱۱-۱۴].



شکل ۱-۱- شماتیک ساده ای از سیال های مگنتورئولوژیکال [۴].



شکل ۲-۱- رفتار سیال های مگنتورئولوژیکال در حضور میدان مغناطیسی [۶].

شکل ۱-۱ و شکل ۲-۱ شماتیک ساده ای از عملکرد سیالات مگنتورئولوژیکال در غیاب و حضور

میدان مغناطیسی نشان می دهند.

^۱ Yield stress

در سیالات مگنتورئولوژیکال سیال حامل^۱ عموماً براساس خواص رئولوژی و پایداری دمایی انتخاب می‌شوند. برای مثال می‌توان به روغن، سیلیکون، پلی استرها^۲، و روغن‌های هیدروکربنی مصنوعی^۳ اشاره کرد. سیالات مگنتورئولوژیکال اغلب حاوی افزودنی‌هایی جهت افزایش خواص روان‌کنندگی، ضد انباشتگی و از همه مهم‌تر ضد ته‌نشینی می‌باشند. ته‌نشینی ذرات مغناطیس شونده تا حدودی توسط سیالات تیکسوتروپیک^۴، صمغ زانتان^۵ و ژل سیلیکا^۶ و کربوکسیلیک اسید^۷ کنترل می‌شوند. در کنار ویژگی‌های منحصربه‌فرد سیالات مگنتورئولوژیکال، از جمله قابلیت میرایی بسیار زیاد ناشی از افزایش تنش تسلیم در حضور میدان مغناطیسی، این مواد دارای معایب بزرگی چون ته‌نشینی ذرات مغناطیس شونده با گذر زمان، مشکل آب بندی سیالات مگنتورئولوژیکال در داخل دمپر سیال مگنتورئولوژیکال^۸، آسیب پذیری و آلودگی شیمیایی می‌باشند. [۱۳، ۱۵ و ۱۶].

۱-۲-۱ کاربردهای سیال‌های مگنتورئولوژیکال

سیالات مگنتورئولوژیکال به دلیل دارا بودن ویژگی میرایی قابل تنظیم دارای کاربردهای بسیار گسترده در زمینه کاهش و جذب ارتعاشات و کنترل سیستم‌های مکانیکی می‌باشد. این سیالات در کنترل میرایی سازه‌ها، ساختمان‌ها، پل‌ها، سیستم‌های تعلیق، جاذب شوک^۹، راه انداز چرخشی^{۱۰}، ماشین ظرفشویی، کلاچ و ترمز هوشمند کاربرد دارند. [۱۷-۲۰].

شکل ۱-۳ یک دمپر سیال مگنتورئولوژیکال با ظرفیت نیرویی ۲۰۰ تن را نشان می‌دهد که توسط شرکت لورد^{۱۱} ساخته شده است. طول و وزن این دمپر به ترتیب یک متر و دویست و پنجاه کیلوگرم

^۱ Carrier fluid

^۲ polyesters

^۳ Synthetic hydrocarbon oil

^۴ Thixotropic

^۵ Xanthan gum

^۶ Silica gel

^۷ Carboxylic acid

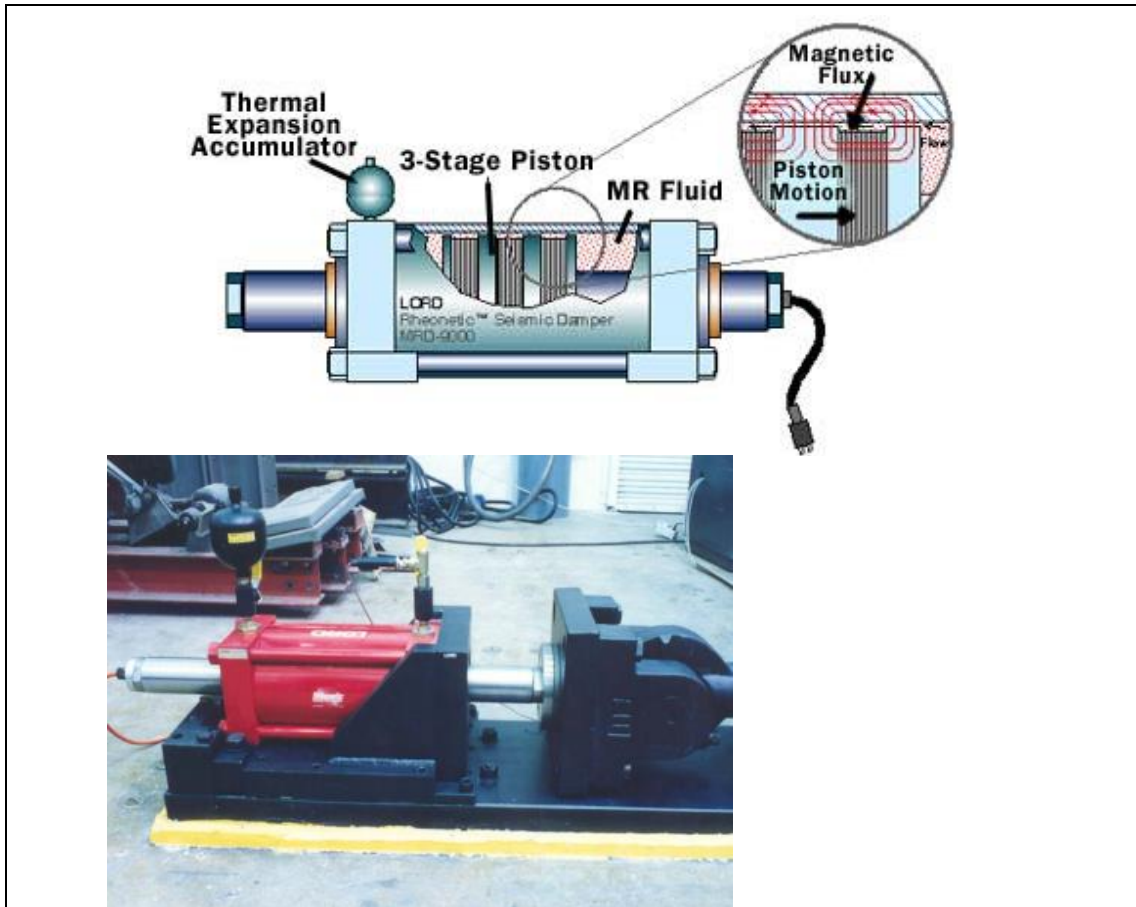
^۸ Magnetorheological fluid damper

^۹ Shock absorber

^{۱۰} Rotary actuator

^{۱۱} Lord Company

می باشد.



شکل ۳-۱- شماتیک و اجزای دمپر سیال مگنتورئولوژیکال شرکت لورد در مقیاس بزرگ [۱۷].

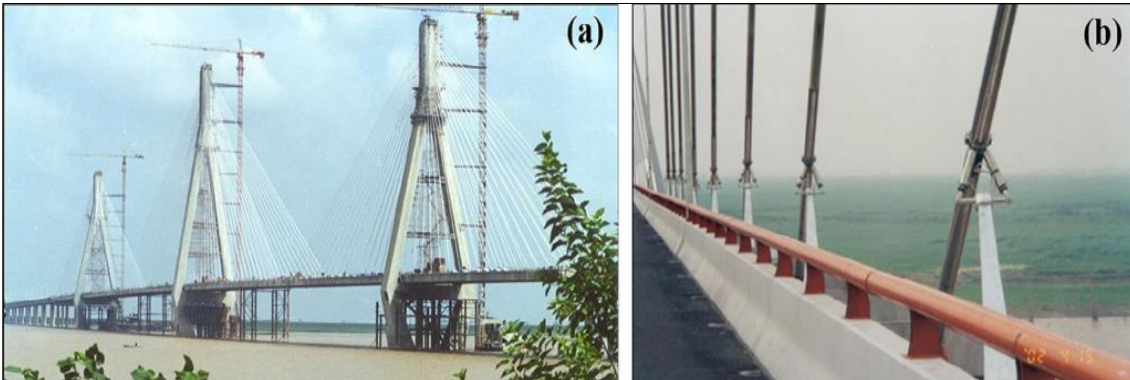


شکل ۴-۱- سیستم میرایی تنظیم شونده شامل دمپر سیال مگنتورئولوژیکال در ماشین لباسشویی [۲۰].



شکل ۱-۵- کاربرد دمپر سیال مگنتورئولوژیکیال در خودروهای نظامی هامر [۲۱].

شکل ۱-۴ کاربرد دمپر سیال مگنتورئولوژیکیال را در ماشین لباسشویی نشان می دهد. میزان میرایی، هنگام عبور سرعت موتور از سرعت رزونانس، تغییر می یابد و میزان جابجایی ماشین لباسشویی به حداقل خود می رسد. شکل ۱-۵ کاربرد دیگری از دمپر سیال مگنتورئولوژیکیال در سیستم تعلیق^۱ خودروهای نظامی هامر^۲ نشان می دهد. این دمپر هوشمند^۳ نیز توسط شرکت لورد ساخته شده است.



شکل ۱-۶- دمپرهای سیال مگنتورئولوژیکیال نصب شده بر روی پل کابلی^۴ دریاچه دانگتینگ^۵ [۲۲].

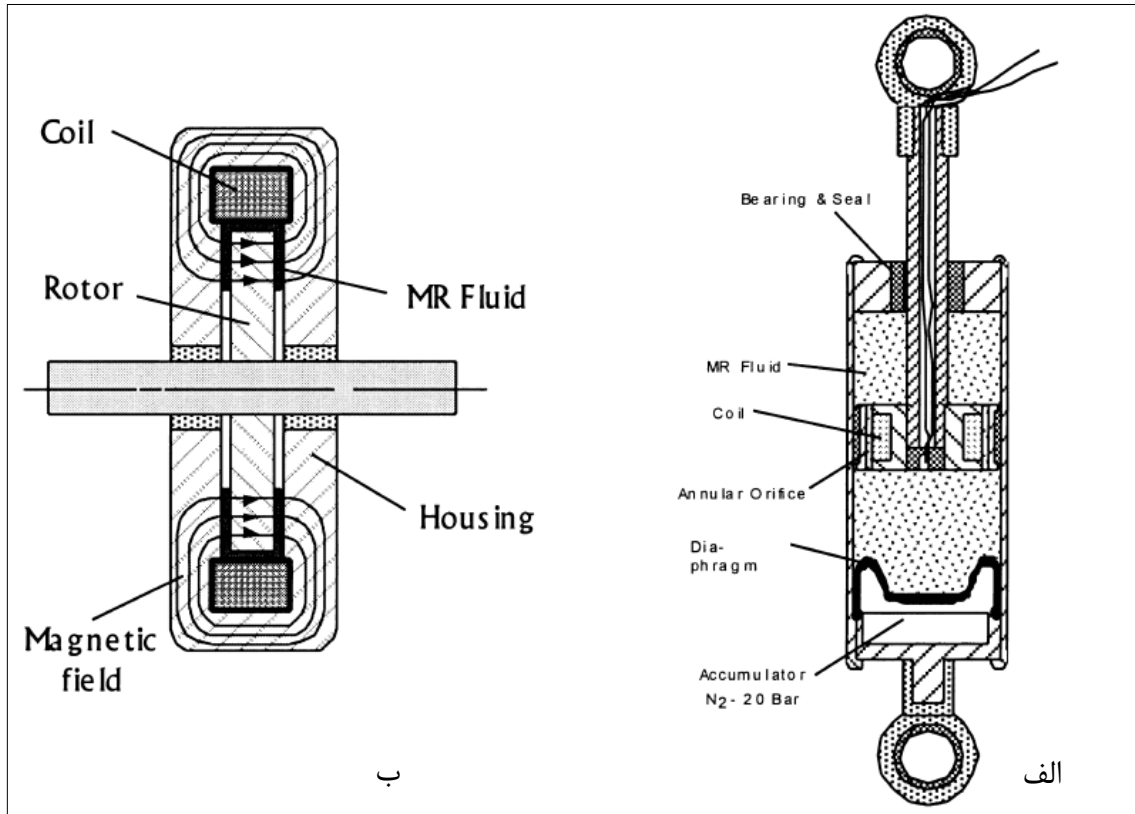
^۱ Suspension system

^۲ Hummer vehicle

^۳ Smart damper

^۴ Cable stayed bridge

^۵ Dongting Lake



شکل ۱-۷-الف. اجزای دمپر سیال مگنتورئولوژیکال ب. ترمز چرخشی سیال دمپر مگنتورئولوژیکال [۱].

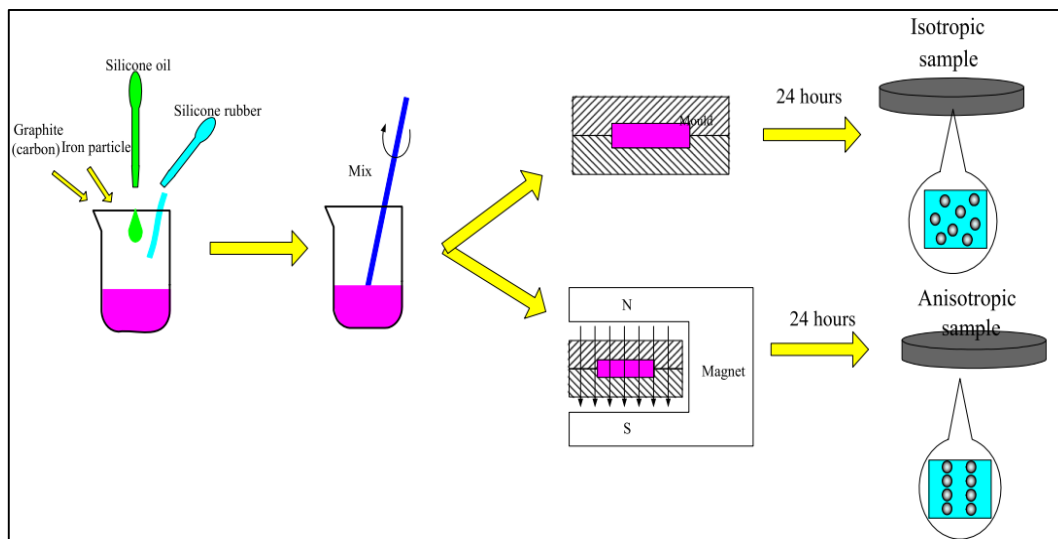
شکل ۱-۶ کاربرد دیگری از دمپره‌های سیال مگنتورئولوژیکال را در پل‌های کابلی جهت کنترل ارتعاشات طبیعی مثل باد را نشان داده شده‌است. در قسمت الف شکل ۱-۷ اجزای تشکیل دهنده دمپر سیال مگنتورئولوژیکال را نشان می‌دهد. در قسمت ب شکل ۱-۷ اجزای تشکیل دهنده ترمز چرخشی سیال مگنتورئولوژیکال را نشان می‌دهد. اگر قسمت غلاف^۱ پایین متحرک شود این سیستم تبدیل به کلاچ سیال مگنتورئولوژیکال می‌شود. انتقال گشتاور مهمترین کاربرد سیال مگنتورئولوژیکال پس از کنترل ارتعاشات می‌باشد [۱].

۱-۳ الاستومرهای مگنتورئولوژیکال

الاستومرهای مگنتورئولوژیکال با قرار دادن ذرات ریز مغناطیس شونده در داخل یک محیط الاستومری تشکیل شده‌اند. این ذرات می‌توانند هم به صورت هموزن و یکنواخت داخل محیط الاستومری و هم به

^۱ Housing

صورت زنجیره‌هایی از ذرات پخش شوند که در حالت اول تشکیل الاستومرهای مگنتورئولوژیکال ایزوتروپ^۱ و در حالت دوم تشکیل الاستومرهای غیر ایزوتروپ^۲ را می‌دهند.



شکل ۸-۱- شماتیک ساده ای از مراحل ساخت الاستومر مگنتورئولوژیکال ایزوتروپ و غیر ایزوتروپ [۷].



شکل ۹-۱- یک نمونه ساخته شده از الاستومر مگنتورئولوژیکال ایزوتروپ [۱۲].

ساخت این دو نوع از الاستومرهای مگنتورئولوژیکال بستگی به حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی در خلال فرایند پخت^۳ دارد [۲۳-۲۵]. شکل ۸-۱ شمای ساده ای از مراحل ساخت این دو نوع از الاستومر را نشان می‌دهد. شکل ۹-۱ یک نمونه از الاستومر مگنتورئولوژیکال ایزوتروپ

^۱ Isotropic magnetorheological elastomer

^۲ Anisotropic magnetorheological elastomer

^۳ Curing process

ساخته شده را نشان می دهد.

در سال های اخیر علاقه به استفاده از الاستومرهای مگنتورئولوژیکال به دلیل خواص منحصر به فرد سختی و میرایی قابل تنظیم افزایش چشمگیری داشته است. با این وجود نسبت به سیالات مگنتورئولوژیکال کمتر شناخته شده هستند. تفاوت الاستومرهای مگنتورئولوژیکال در مقایسه با سیالات مگنتورئولوژیکال عوض شدن سیال با یک ماده لاستیکی مثل سیلیکون یا لاستیک طبیعی^۱ می باشد. همانند سیالات مگنتورئولوژیکال ذرات مغناطیس شونده در این مواد، هنگام اعمال میدان مغناطیسی، تمایل به جهت گیری در راستای میدان مغناطیسی دارند. اما برخلاف سیالات مگنتورئولوژیکال، ذرات مغناطیس شونده در این مواد پس از فرایند پخت در جای خود مستقر می شوند. بنابراین مشکل ته نشینی و آلودگی شیمیایی ذرات مغناطیس شونده در الاستومرهای مگنتورئولوژیکال وجود ندارند [۲۶ و ۲].

خواص رئولوژی و اثر MR در هر دو حالت الاستومر ایزوتروپ و الاستومر غیر ایزوتروپ در حضور و غیاب میدان مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته است و تغییر برگشت پذیر برای مدول ذخیره برشی الاستومر مگنتورئولوژیکال توسط کالیو^۲ [۲۷] مشاهده شده است. براساس این نتایج هر دو خاصیت سختی^۳ و میرایی^۴ الاستومرهای مگنتورئولوژیکال غیرایزوتروپ، بستگی به جهت بارگذاری، جهت اعمال میدان مغناطیسی و راستای قرارگیری ذرات مغناطیس^۵ شونده دارد.

۱-۳-۱ اجزای تشکیل دهنده الاستومرهای مگنتورئولوژیکال

الاستومرهای مگنتورئولوژیکال شامل مواد مغناطیس شونده مانند ذرات آهنی یا سایر ذرات فرو آهنی^۶ می باشند که به مواد پلیمری ویسکوالاستیک اضافه می شوند. سائز این ذرات مغناطیس شونده

^۱ Natural rubber

^۲ Kallio

^۳ Stiffness

^۴ Damping

^۵ Magnetic particle alignment

^۶ Ferromagnetic particle

در الاستومرهای مگنتورئولوژیکال بین ۰/۱ تا ۱۰ میکرومتر می باشند و عموماً این ذرات دارای خواص اشباع مغناطیسی بالا^۱ و پسماند پایین مغناطیسی^۲ می باشند. براساس مطالعات انجام شده تعداد، اندازه و جهت گیری ذرات مغناطیس شونده و هم چنین نوع پلیمر به کار رفته بر روی خواص رئولوژی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال تاثیر فراوانی دارد. الاستومرهای مگنتورئولوژیکال با توجه به پارامترهای مختلفی چون نوع ذرات مغناطیس شونده، نوع محیط یا ماتریس^۳، ساختار و توزیع ذرات مغناطیس شونده، تقسیم بندی می شوند [۲۸]. این تقسیم بندی به صورت زیر بیان می شود.

۱. براساس نوع ذرات مغناطیس شونده

الف. ذرات مغناطیس شونده نرم

ب. ذرات مغناطیس شونده سخت

۲. براساس نوع ماتریس

الف. ماتریس جامد

ب. ماتریس متخلخل^۴

۳. براساس نوع توزیع ذرات مغناطیس شونده

الف. ایزوتروپ

ب. غیر ایزوتروپ

معمولاً میدان مغناطیسی در مرحله آخر فرایند پخت الاستومرهای مگنتورئولوژیکال اعمال می گردد که باعث شکل گیری زنجیره‌های ذرات مغناطیس شونده و همچنین به دام افتادن آن‌ها در داخل الاستومر می شود. در الاستومرهای مگنتورئولوژیکال غیر ایزوتروپ برای اعمال نیروی برشی در حضور میدان مغناطیسی در مقایسه با الاستومرهای مگنتورئولوژیکال ایزوتروپ، نیروی بیشتری لازم

^۱ High saturation magnetization

^۲ Low remanent magnetization

^۳ Matrix or medium

^۴ Porous matrix

است که نهایتاً باعث افزایش مدول برشی می شود. مقدار این نیرو و مدول برشی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال با افزایش میدان مغناطیسی بیشتر می گردد [۲۹].

بنابراین تغییر در خواص مکانیکی و رئولوژی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال به شدت وابسته به اعمال میدان مغناطیسی خارجی می باشد. هنگام اعمال میدان مغناطیسی برهم کنش بین ذرات آهنی باعث می گردد این ذرات به هم نزدیکتر شده و در نتیجه باعث افزایش سختی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال می گردد. این تغییر باعث افزایش شیب منحنی تنش-کرنش که نماینگر سختی معادل^۱ الاستومرهای مگنتورئولوژیکال است، می گردد [۳۰].

ماتریس الاستومرهای مگنتورئولوژیکال می توانند جامد و یا متخلخل باشند. نام دیگر الاستومرهای مگنتورئولوژیکال با ماتریس متخلخل، فوم مگنتورئولوژیکال نامیده می شود. اکثر ماتریس های به کار رفته در الاستومرهای مگنتورئولوژیکال نارسانا می باشند. در بعضی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال ماتریس به کار رفته مانند پلی پیروول رسانا می باشند. با این وجود الاستومرهای مگنتورئولوژیکال با ماتریس رسانا تاثیر چشمگیری در تغییر خواص رئولوژی و یا مکانیکی در حضور میدان مغناطیسی دیده نمی شود [۳۱].

توزیع فضایی^۲ ذرات مغناطیس شونده در فرایند پخت تعیین می شود. اعمال میدان مغناطیسی در فرایند پخت باعث تولید الاستومرهای مگنتورئولوژیکال غیر ایزوتروپ شامل ساختارهای ستون مانند مطابق قسمت الف در شکل ۱-۱۰ می گردد. حذف میدان مغناطیسی در فرایند پخت باعث تولید الاستومرهای مگنتورئولوژیکال ایزوتروپ مطابق قسمت ب در شکل ۱-۱۰ می گردد.

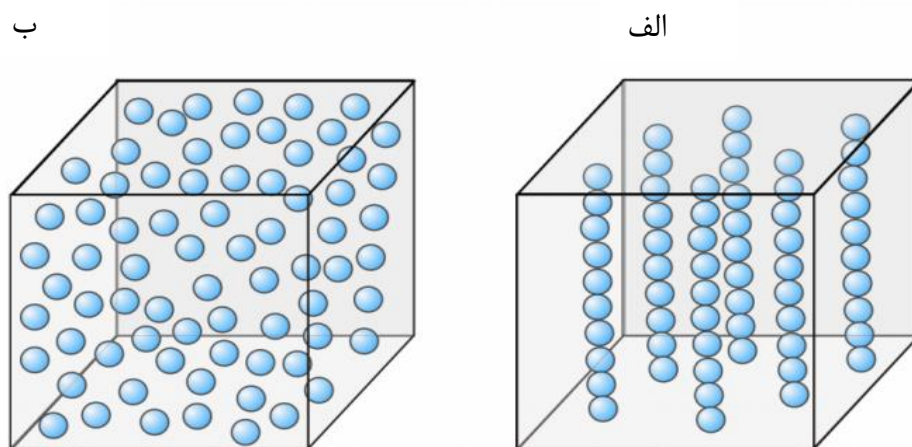
معمولاً از روغن سیلیکون^۳ به عنوان یک افزودنی در ساخت الاستومرهای مگنتورئولوژیکال استفاده می گردد. با افزودن روغن سیلیکون به ماتریس الاستومرهای مگنتورئولوژیکال، فاصله بین

^۱ Equivalent stiffness

^۲ Spatial distribution

^۳ Silicone oil

مولکول‌های ماتریس افزایش یافته و چسبیدگی مولکول‌های ماتریس^۱ کاهش می‌یابد.



شکل ۱-۱۰-۱- شماتیک ساده ای از دو نوع توزیع ذرات مغناطیس شونده. الف. غیر ایزتروپ، ب. ایزوتروپ [۴].

روغن سیلیکون علاوه بر افزایش سیالیت^۲ و پلاستیسیته^۳ ماتریس، که باعث افزایش توزیع یکنواخت تنش داخلی در ماتریس می‌گردد، باعث می‌شود تا ذرات مغناطیس شونده به راحتی در حضور میدان مغناطیسی جهت‌گیری کنند [۳۲].

۱-۳-۲ کاربردهای الاستومرهای مگنتورئولوژیکال

در سال‌های اخیر دو ویژگی منحصر به فرد سختی و میرایی قابل تنظیم الاستومرهای مگنتورئولوژیکال باعث استفاده چشمگیر آن‌ها در کاربردهای مختلف مهندسی شده است. این مواد دارای پتانسیل بسیار بالایی به عنوان یک عضو فعال و وفق‌پذیر^۴ می‌باشند که در سیستم‌های مکانیکی توسط کنترل‌کننده‌های الکترونیکی عمل می‌کنند. الاستومرهای مگنتورئولوژیکال دارای کاربردهایی در جاذب‌های ارتعاشی قابل تنظیم^۵، فوندانسیون‌های ایزوله‌کننده هوشمند^۶، ایزوله‌کننده‌های سختی و میرایی

^۱ *conglutination*

^۲ *Fluidity*

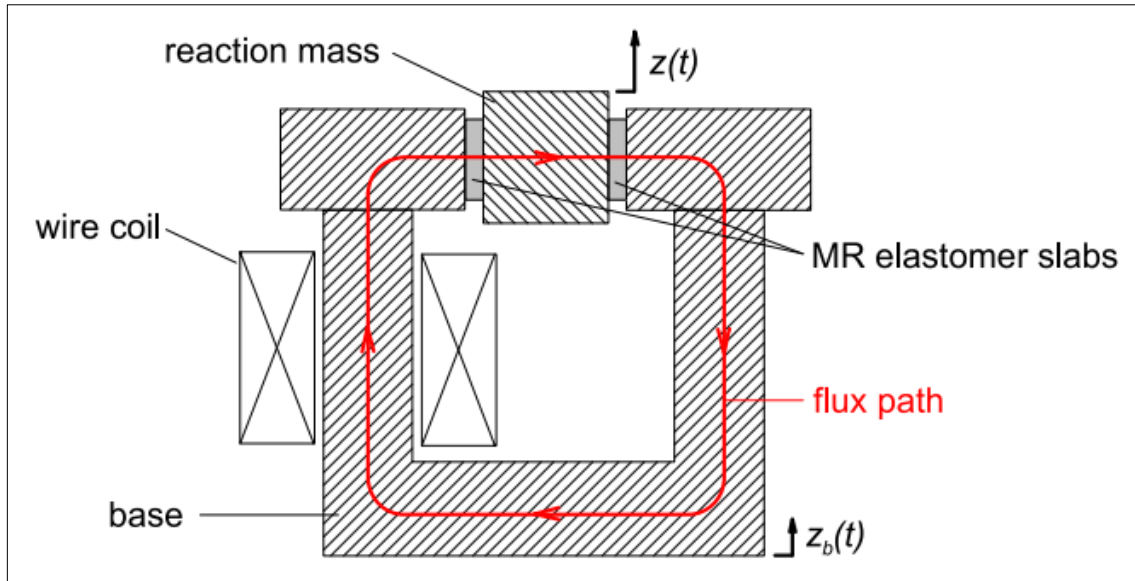
^۳ *Plasticity*

^۴ *Adjustable*

^۵ *Adaptive tuned vibration absorbers (ATVAs)*

^۶ *Smart-based isolators*

تنظیم شونده^۱، سیستم‌های تعلیق خودرو^۲، دسته موتورها^۳، کامپوزیت‌های هوشمند^۴، سنسورها^۵، وسایل پزشکی^۶، سیستم‌های نویز گیر^۷، ایزوله‌کننده‌های دارای سختی متغیر منفی^۸، کنترل ارتعاشات و سختی فعال^۹، فضاپیماها^{۱۰}، سپر خودروها^{۱۱}، و به طور خاص در تغییر فرکانس‌های طبیعی سیستم های مکانیکی می باشد [۳۳-۸۸].



شکل ۱-۱۱- جاذب ارتعاشی قابل تنظیم شامل الاستومر مگنتورئولوژیکی شامل یک کویل مغناطیسی [۴۵].

گیندر^{۱۲} و همکاران [۴۵] یک جاذب ارتعاشی قابل تنظیم (منظور از قابل تنظیم، تغییر سختی و میرایی توسط میدان می باشد) شامل الاستومر مگنتورئولوژیکی طراحی کردند که میدان مغناطیسی

^۱ Variable stiffness and damping isolators (VSDIs)

^۲ Vehicle suspension systems

^۳ Engine mounts

^۴ Smart composites

^۵ sensors

^۶ Prosthetic devices

^۷ Noise barrier systems

^۸ Negative changing stiffness isolators

^۹ Vibration control and active stiffness

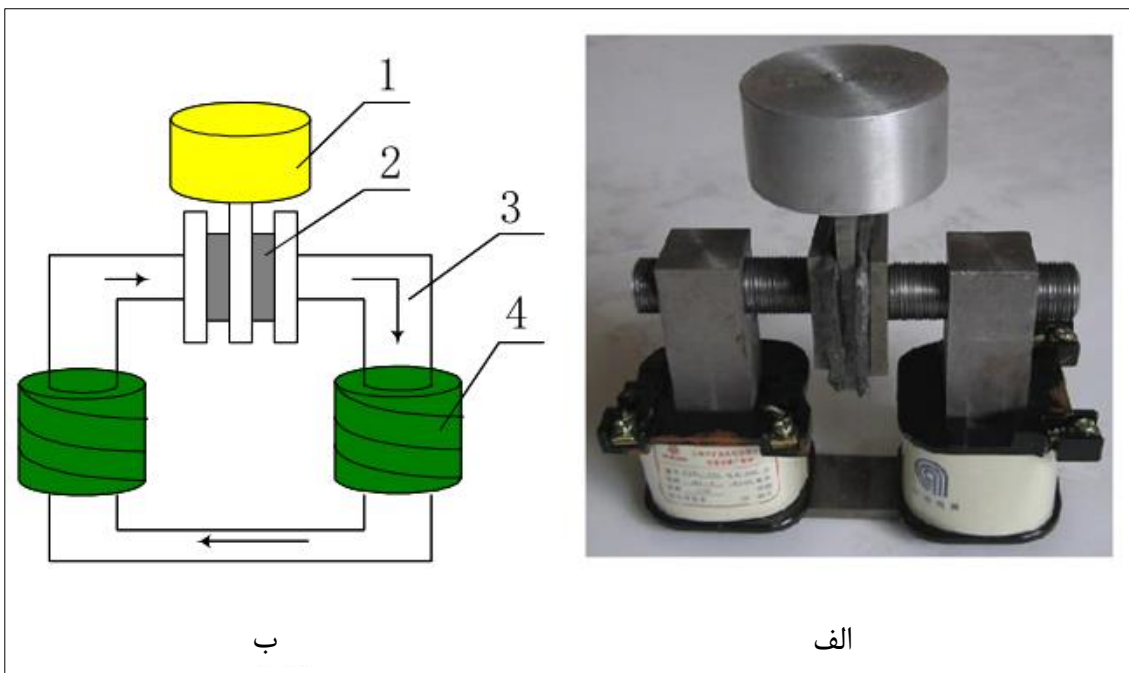
^{۱۰} Spacecrafts

^{۱۱} Bumper of vehicle

^{۱۲} Ginder

جهت تغییر سختی و میرایی سیستم توسط یک سیم پیچ (کویل^۱) تامین می گردد.

شکل ۱-۱۱ شماتیک این جاذب ارتعاشی قابل تنظیم و مسیر شار میدان مغناطیسی تولید شده توسط کویل را به خوبی نشان می دهد. دنگ^۲ و همکاران [۳۵] یک جاذب ارتعاش قابل تنظیم دیگری با اضافه کردن یک کویل نسبت شکل ۱-۱۱ طراحی کردند. شکل ۱-۱۲ شماتیک جاذب ارتعاشی قابل تنظیم و مسیر شار میدان مغناطیسی تولید شده توسط دو کویل را نشان می دهد. کالیو^۳ و همکاران [۴۶] یک عنصر فنری قابل تنظیم^۴ را طراحی کردند که شامل الاستومر مگنتورئولوژیکال می باشد. این دستگاه در حالت فشاری عمل می کند و میدان مغناطیسی تولید شده توسط کویل مدول فشاری این عنصر فنری را تنظیم می کند. این عنصر فنری قابل تنظیم در شکل ۱-۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۱-۱۲- جاذب ارتعاشی قابل تنظیم شامل الاستومر مگنتورئولوژیکال شامل دو کویل مغناطیسی. الف. جاذب

ارتعاشی. ب. شماتیک جاذب ارتعاشی: (۱) نوسانگر (۲) الاستومر مگنتورئولوژیکال (۳) هادی مغناطیسی^۵ (۴) کویل [۳۵].

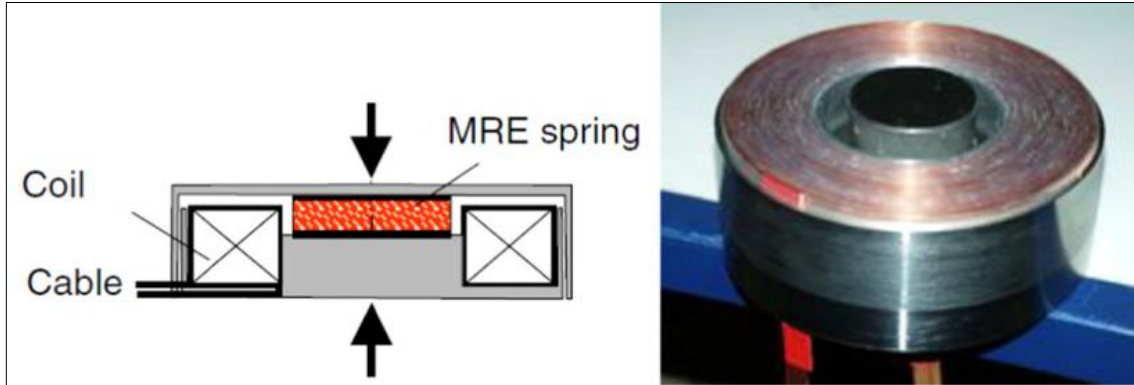
^۱ Coil

^۲ Deng

^۳ Kallio

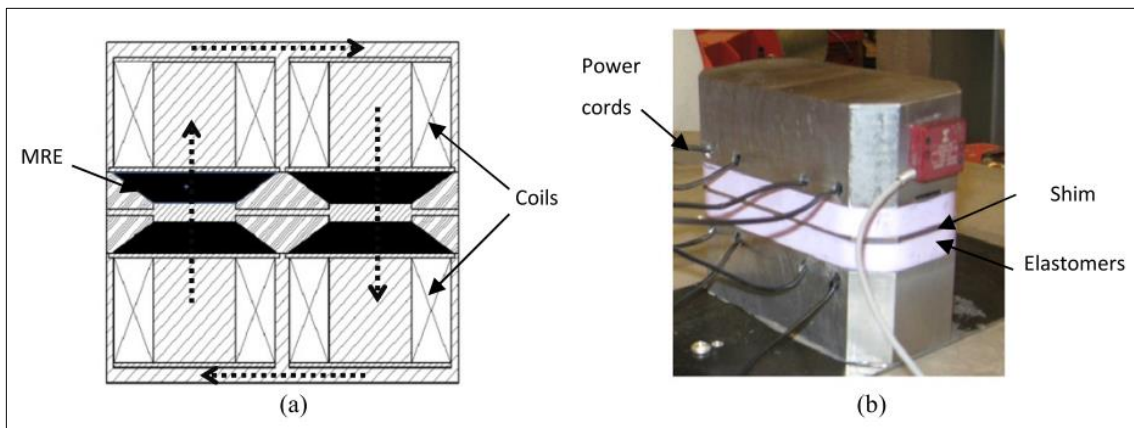
^۴ Tunable spring element

^۵ Magnetic conductor



شکل ۱-۱۳- عنصر فنری قابل تنظیم شامل الاستومر مگنتورئولوژیکال [۴۶].

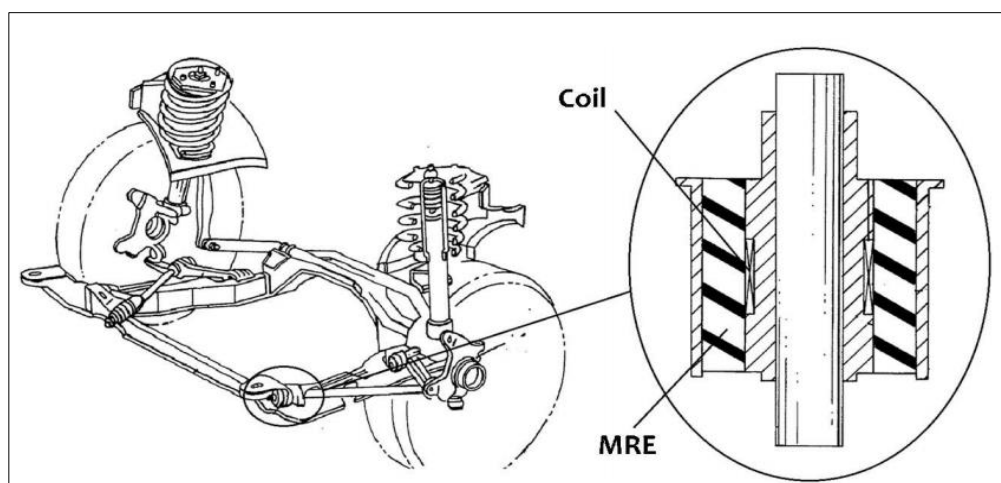
بهرز و همکاران [۴۷] یک ایزوله کننده دارای خاصیت سختی و میرایی تنظیم شونده را طراحی کردند که در فوندانسیون‌های سازه‌های ساختمانی جهت ایزوله کردن ارتعشات مورد استفاده قرار می‌گیرند. مطابق شکل ۱-۱۴ ایزوله کننده دارای خاصیت سختی و میرایی تنظیم شونده، دارای چهار نمونه الاستومر مگنتورئولوژیکال دوزنقه‌ای شکل به ضخامت ۱۲ میلی متر می‌باشد که توسط یک واشر به دو قسمت بالایی و پایینی تقسیم شده اند. در ایزوله کننده دارای خاصیت سختی و میرایی تنظیم شونده، از چهار کوئل مغناطیسی نیز جهت ایجاد چگالی شار مغناطیسی استفاده می‌شود که در بالا و پایین چهار نمونه الاستومر مگنتورئولوژیکال قرار گرفته اند.



شکل ۱-۱۴- ایزوله کننده سختی و میرایی تنظیم شونده دارای چهار الاستومر مگنتورئولوژیکال دوزنقه‌ای شکل

[۴۷].

واتسنونین^۱ [۴۸] یک غلاف شامل الاستومر مگنتورئولوژیکال^۲ جهت کاهش ارتعاشات و نویز در سیستم‌های تعلیق خودرو جهت آسایش مسافرین اختراع کرده است. با توجه به شکل ۱-۱۵ این غلاف شامل یک الاستومر مگنتورئولوژیکال که به سیستم تولید نیروی محرکه خودرو^۳ متصل بوده و در هر فرکانس تحریک ورودی، جابجایی سیستم تعلیق را از طریق یک سیستم کنترلی با تغییر سختی^۴ الاستومر مگنتورئولوژیکال به حداقل ممکن می‌رساند. جانسداتیر^۵ و همکاران [۳۸] یک پای مصنوعی را طراحی کردند که از یک الاستومر مگنتورئولوژیکال در ساختار آن جهت افزایش میرایی استفاده شده است. مزیت طراحی فعال^۶ سیستم میرایی در این پای مصنوعی این است که فرد استفاده کننده قادر است با توجه به نوع فعالیتش، اندام خود را از نظر دینامیکی سازگار کند و در نتیجه در حین حرکت نیروی کمتری به دیگر اندام‌های او وارد می‌شود.



شکل ۱-۱۵- غلاف الاستومر مگنتورئولوژیکال در سیستم‌های تعلیق خودرو [۴۸].

^۱ *Watsonin*

^۲ *MRE bushing*

^۳ *Driveline*

^۴ *Stiffness*

^۵ *Jonsdottir*

^۶ *Active design*



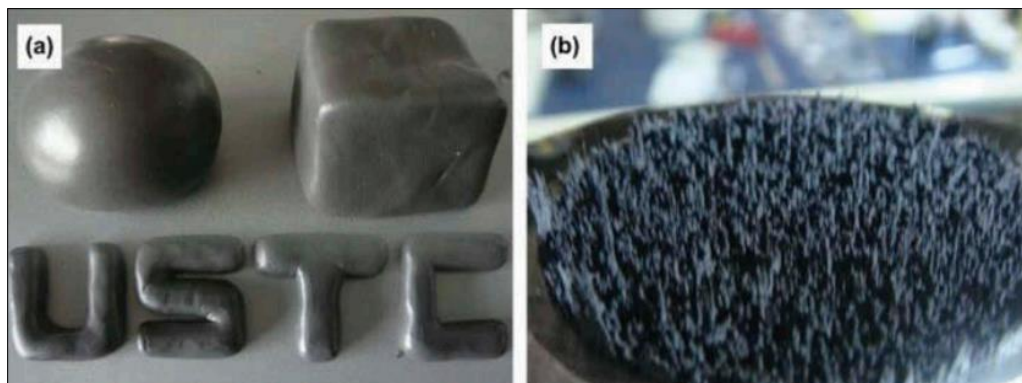
شکل ۱-۱۶- نمونه اولیه ساخته پای مصنوعی شامل الاستومر مگنتورئولوژیکال [۳۸].

۴-۱ پلاستومرهای مگنتورئولوژیکال

پلاستومرهای مگنتورئولوژیکال یکی دیگر از مواد هوشمند می‌باشند که نسبت به الاستومرهای مگنتورئولوژیکال دارای ماتریس پلیمری نرم‌تری می‌باشند. پلاستومرهای مگنتورئولوژیکال با پراکنده کردن ذرات میکرونی مغناطیس شونده در یک ماتریس پلیمری نرم غیر مغناطیسی ساخته می‌شوند. پلاستومرهای مگنتورئولوژیکال از لحاظ رفتاری بین سیالات مگنتورئولوژیکال و الاستومرهای مگنتورئولوژیکال عمل می‌کند. نسبت به سیالات مگنتورئولوژیکال دارای خواص تهنشینی کمتر و نسبت به الاستومرهای مگنتورئولوژیکال دارای خاصیت اثر MR بیشتری می‌باشند [۳ و ۴۹].

پلاستومرهای مگنتورئولوژیکال به دلیل دارا بودن ویژگی‌های مواد پلاستیکی قادر هستند در قالب‌های مختلفی تولید شوند. پلاستومرهای مگنتورئولوژیکال دارای کاربردهای چند منظوره هستند. پلاستومرهای مگنتورئولوژیکال حساس به دمای محیط می‌باشند که در شرایط دمای محیط بیش از ۵۰ درجه انٹیگراد تقریباً مانند سیالات مگنتورئولوژیکال عمل می‌کنند در حالیکه در دمای پایین این مواد دارای قابلیت تبدیل شدن به حالت جامد می‌باشند. بنابراین پلاستومرهای مگنتورئولوژیکال با

توجه به دمای محیط می توانند بین دو حالت سیالات مگنتورئولوژیکال و الاستومرهای مگنتورئولوژیکال عمل کنند. [۵۰].



شکل ۱-۱۷- پلاستومرهای مگنتورئولوژیکال a. در اشکال هندسی مختلف b. تحت میدان مغناطیسی.

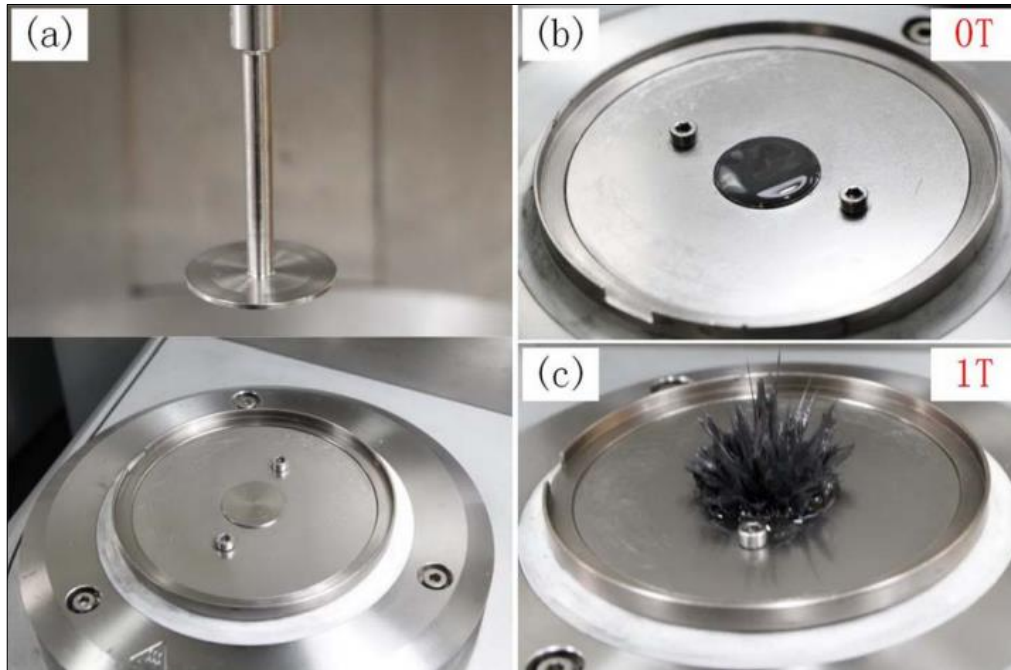
شکل ۱-۱۷ چند نمونه از پلاستومرهای مگنتورئولوژیکال را در اشکال هندسی مختلف نشان می دهد. پلاستومرهای مگنتورئولوژیکال دارای کاربردهای مختلفی از جمله کنترل ارتعاشات، راه اندازها^۱ و بازوهای مصنوعی^۲ دارند [۵۱].

۵-۱ ژل های مگنتورئولوژیکال

ژل های مگنتورئولوژیکال دسته ای دیگر از مواد هوشمند می باشد که از یک ژل پلیمری با ویسکوزیته بالا به عنوان ماتریس استفاده می شود و نسبت به سیالات مگنتورئولوژیکال دارای خواص ته نشینی کمتری می باشند. ژل های مگنتورئولوژیکال همانند پلاستومرهای مگنتورئولوژیکال از لحاظ رفتاری بین سیالات مگنتورئولوژیکال و الاستومرهای مگنتورئولوژیکال عمل می کند [۵۲].

^۱ Actuators

^۲ Artificial muscles



شکل ۱-۱۸- تاثیر میدان مغناطیسی بر ژل مگنتورئولوژیکال a. رئومتر MCR 301 b. در غیاب میدان مغناطیسی c. در حضور میدان مغناطیسی [۵۳].

عملکرد میرایی قابل تنظیم^۱ ژل‌های مگنتورئولوژیکال نقش عمده ای در کاربردهای گوناگون از جمله کنترل ارتعاشات مکانیکی دارد. ژل‌های مگنتورئولوژیکال اولین بار توسط شیگا^۲ و همکاران [۷] مطرح شد. شکل ۱-۱۸ رفتار ژل‌های مگنتورئولوژیکال را در حضور و غیاب میدان مغناطیسی به تصویر می‌کشد. ژل‌های مگنتورئولوژیکال به عنوان دسته جدیدی از مواد هوشمند، دارای کاربردهای مختلفی از جمله کنترل ارتعاشات، میراگرها، کلاچ‌ها و دیگر جاذب‌های ارتعاشی می‌باشند [۵۴].

۱-۶ فوم‌های مگنتورئولوژیکال

فوم‌های مگنتورئولوژیکال دسته‌ای دیگر از مواد هوشمند می‌باشند که از یک فوم یا اسفنج^۳ به عنوان ماتریس استفاده می‌شود. دستگاه‌های شامل فوم‌های مگنتورئولوژیکال دارای سیالات مگنتورئولوژیکال داخل یک اسفنج یا فوم می‌باشند. این سیالات مگنتورئولوژیکال در داخل ماتریس‌های فوم مانند به

^۱ Tunable damping

^۲ Shiga

^۳ Sponge

خاطر خاصیت مویینگی^۱ مجبور به حضور می‌گردند و سیال در نقطه خاصی در داخل ماتریس ته نشین نمی‌گردد. این ماتریس‌های فوم مانند، سیالات مگنتورئولوژیکال را در ناحیه ای نزدیک به کویل مغناطیسی در داخل خود نگه می‌دارند. ماتریس جاذب نه تنها نیاز به آب بندی^۲ و یاتاقان^۳ ندارد، بلکه حجم کمتری از سیال مگنتورئولوژیکال را مورد استفاده قرار می‌دهد [۱].

با اعمال میدان مغناطیسی میزان تنش تسلیم^۴ در سیال مگنتورئولوژیکال افزایش یافته و از حرکت برشی پیستون ممانعت به عمل می‌آورد. دمپ‌های فوم مگنتورئولوژیکال برای کاربردهایی مناسب است که نیاز به نیروی کم تا متوسط دارد درحالی‌که دمپ‌های سیالات مگنتورئولوژیکال برای میرایی سیستم‌ها در مقیاس نیروی نسبتاً زیاد، کاربرد دارند. شکل ۱-۱۹ دو نوع کاربرد از دستگاه‌های شامل فوم مگنتورئولوژیکال را نشان می‌دهد. قسمت a از شکل ۱-۱۹ دمپ فوم مگنتورئولوژیکال را نشان می‌دهد. مطابق این شکل یک لایه فوم اشباع شده^۵ از سیال مگنتورئولوژیکال در اطراف استیل^۶ و کویل محیط شده است. این اجزا به همراه یک دیگر مجاز به حرکت در راستای پیستون می‌باشد. این دمپ فوم مگنتورئولوژیکال شامل ۳ میلی لیتر از سیال مگنتورئولوژیکال بوده و با اعمال میدان مغناطیسی باعث افزایش میرایی می‌گردد. قسمت c از شکل ۱-۱۹ ترمز چرخشی فوم مگنتورئولوژیکال^۷ را نشان می‌دهد که عملکردی مشابه با دمپ فوم مگنتورئولوژیکال دارد. قسمت b از شکل ۱-۱۹ ماکزیمم نیروی دمپ فوم مگنتورئولوژیکال را در جریان الکتریکی ۲ میلی آمپر (وارد به سیم پیچ) نشان می‌دهد [۱].

^۱ Capillary action

^۲ Sealing

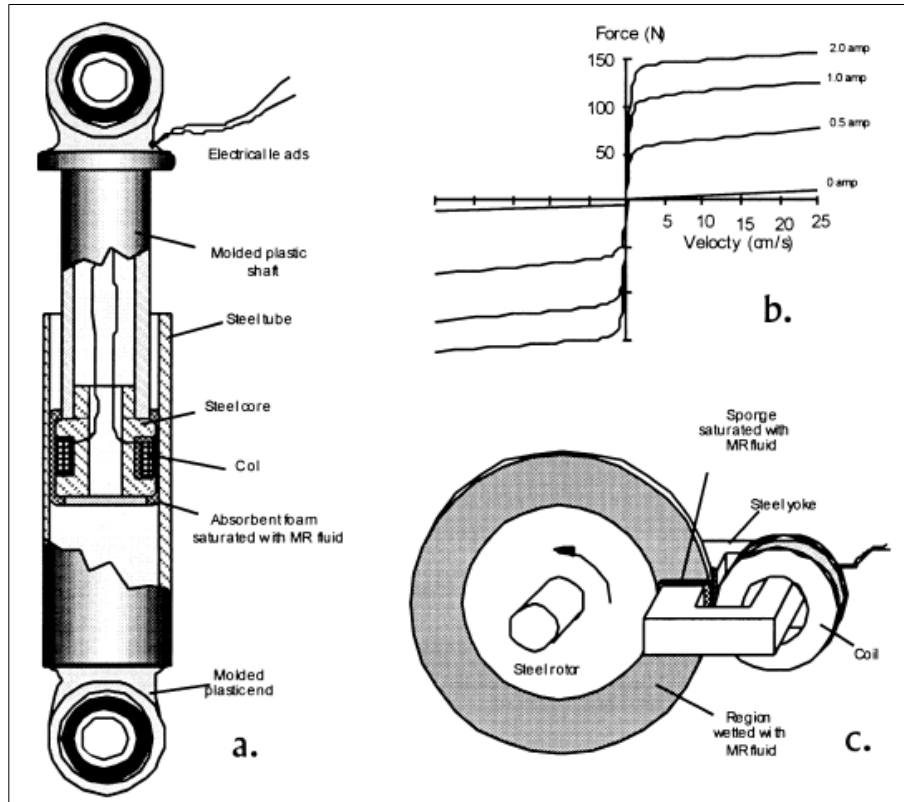
^۳ Bearings

^۴ Yield stress

^۵ Saturated foam layer

^۶ Steel

^۷ Magnetorheological foam rotary brake



شکل ۱-۱۹- دستگاه‌های فوم مگنتورئولوژیکال a. دمپر فوم مگنتورئولوژیکال b. عملکرد دمپر c. ترمز چرخشی فوم مگنتورئولوژیکال [۱].

۷-۱ چالش‌های استفاده از الاستومرهای مگنتورئولوژیکال

بر اساس نوع عملکرد هر یک از انواع مواد هوشمند، کاربردهای آن‌ها در سیستم‌های مکانیکی منحصر به فرد می‌باشند. برای مثال الاستومرهای مگنتورئولوژیکال به اندازه سیالات مگنتورئولوژیکال دارای ظرفیت میرا کنندگی بالا نمی‌باشند و در کاربردهایی مثل سیستم ترمز از سیالات مگنتورئولوژیکال استفاده می‌گردد. هم چنین پلاستومرهای مگنتورئولوژیکال از نظر عملکرد بین سیالات و الاستومرهای مگنتورئولوژیکال می‌باشند. اگرچه الاستومرهای مگنتورئولوژیکال به خاطر دارا بودن ماتریس نسبتاً سفت، نسبت به پلاستومرهای مگنتورئولوژیکال دارای خاصیت MR کمتری می‌باشند ولی این امکان وجود دارد که کامپوزیتی شامل الاستومرهای مگنتورئولوژیکال تولید شود که علاوه بر ماتریس سفت دارای خاصیت MR بالایی باشد.

دستگاه‌های شامل الاستومرهای مگنتورئولوژیکال در صورتی می‌توانند باعث کاهش ارتعاشات

سیستم‌های مکانیکی شوند که چهار اصل زیر مورد توجه قرار گیرد: اولاً الاستومرهای مگنتورئولوژیکال براساس درصد وزنی بهینه از ذرات آهنی و ماتریس مشخصی تشکیل گردند، دوما جهت طراحی و بهینه سازی سیم پیچ مغناطیسی از نمودارهای B-H مربوط به الاستومر جهت تولید میدان مغناطیسی استفاده گردد، سوماً یک مدل رفتاری جامع معرفی گردد که رفتار الاستومرهای مگنتورئولوژیکال را در انواع بارگذاری دینامیکی به خوبی پیش بینی کند، چهارماً یک سیستم کنترلی مناسب که به سرعت رابطه بین تحریک ورودی و میزان جریان الکتریکی (تولید میدان مغناطیسی) را تنظیم کند، در نظر گرفته شود. دستگاه‌های شامل الاستومرهای مگنتورئولوژیکال می‌توانند از سه روش غیر فعال، نیمه فعال و فعال کنترل شوند. اکثر پژوهشگرها بر روی روش نیمه فعال، به دلیل هزینه و مصرف جریان الکتریکی کمتر نسبت به روش فعال و کنترل بهتر نسبت به روش غیر فعال، تمرکز بیشتری دارند [۲].

۸-۱ مدل سازی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال

مدل سازی و پیدا کردن رفتار دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال تحت بارهای مختلف دینامیکی و مغناطیسی، جهت طراحی دستگاه‌های شامل الاستومرهای مگنتورئولوژیکال در کنترل ارتعاشات بسیار ضروری می‌باشد. تا کنون مدل سازی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال در دو گروه مختلف بررسی شده است:

- دیدگاه ریزساختاری^۱

- دیدگاه ویسکو الاستیک^۲

این دو دیدگاه مدل سازی در بخش‌های بعدی به طور مفصل شرح داده خواهند شد.

^۱ *Micro Model*

^۲ *Viscoelastic*

۱-۸-۱ مدل‌های ریزساختار

دیدگاه مدل‌سازی ریزساختار شامل دو بخش می‌باشد. بخش اول بر پایه مکانیک پیوسته^۱ است. در این مدل‌ها تئوری کرنش محدود^۲ جهت مطالعه رفتار مکانیکی و مغناطیسی الاستومرهای مگنتورئولوژیکیال به صورت کوپل‌شده استفاده می‌شود. این مدل‌ها اثر شکل، جهت‌گیری، اندازه و توزیع ذرات آهنی در الاستومرهای مگنتورئولوژیکیال و همچنین ساختارهای زنجیرشکل ناشی از ذرات مغناطیسی را با توجه سهم آن‌ها در تنش ایجاد شده در ماده، نظر می‌گیرند [۸۹ و ۹۰]. مطالعات انجام شده به روش تئوری کرنش محدود بر روی مدل‌سازی الاستومرهای مگنتورئولوژیکیال که تحت اثر میدان مغناطیسی قرار گرفته‌اند، عموماً بر پایه‌ی اصل کمینه انرژی^۳ و اشکال مختلف روش مکانیک کوانتینوم بررسی شده است [۹۱-۹۳].

بخش دوم دیدگاه مدل‌سازی ریزساختار بر پایه‌ی مدل‌سازی میکرو-مکانیک^۴ است؛ عمدتاً مطالعه و مدل‌سازی در این روش بر اساس تابعیت مدول ذخیره^۵ و میرایی^۶ الاستومرهای مگنتورئولوژیکیال نسبت به میدان مغناطیسی، اثر مگنتورئولوژیکیال و تنش، در مد برشی می‌باشد. این شاخه از مدل‌سازی بر پایه‌ی محاسبه نیروی مغناطیسی ایجاد شده بین ذرات مغناطیسی می‌باشد. دانشمندان جهت محاسبه این نیرو از ساده‌سازی‌ها و فرض‌های بسیاری بر پایه‌ی کرنش محلی^۷ و میدان مغناطیسی انجام داده‌اند [۳۶ و ۳۷]. در این تحقیقات، الاستومرهای مگنتورئولوژیکیال اکثراً در بارگذاری برشی مورد مطالعه قرار می‌گیرند و مدول برشی مختلط^۸ و تلفات^۹ محاسبه می‌شوند. اخیراً رفتار دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکیال در رژیم کششی-فشاری جهت به دست آوردن مدول

^۱ Continuum Mechanic^۲ Finite Strain^۳ Minimum energy principle^۴ Micro-Mechanic^۵ Storage Modulus^۶ Lost Modulus^۷ local strain^۸ Complex Shear Modulus^۹ Loss Factor

سختی و میرایی کششی-فشاری بررسی شده است [۲ و ۲۶]. مدل نقطه-قطبی^۱، یک مدل معروف در این بخش می‌باشد که برهم‌کنش بین دو ذره مغناطیسی که در همسایگی یکدیگر قرار گرفته‌اند (در طول زنجیره‌های ذرات مغناطیسی) را در نظر می‌گیرد و سپس از طریق میانگین مجموع این برهم‌کنش‌ها در طول زنجیره ذرات مغناطیسی، تنش تسلیم و رابطه بین تنش و کرنش را بر اساس میدان مغناطیسی خارجی تعیین می‌کند [۷۹ و ۹۴].

از طرفی دیگر، الاستومرهای مگنتورئولوژیکال دارای پتانسیل و کاربردهای بسیار زیادی در سیستم‌های دینامیکی می‌باشند که مدل‌سازی‌ها می‌بایست بر پایه‌ی رابطه‌ی بین تنش و کرنش در الاستومرهای مگنتورئولوژیکال بنا شوند. دلیل این امر، آماده‌سازی و به کارگیری الاستومرهای مگنتورئولوژیکال در کنترل ارتعاشات سیستم‌های مکانیکی می‌باشد که نیاز است بر پایه‌ی آن یک مدل کنترلی به صورت ساده طراحی شود [۹۸-۱۱۱]. مدل‌های قبلی مانند مدل مدول مختلط^۲ یا مدل نقطه-قطبی، به خوبی رفتار دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال را شامل رفتار ویسکوالاستیک غیرخطی در کرنش‌های بسیار زیاد، اثر کرنش و نرخ کرنش بر روی مدول ذخیره و میرایی، به طور همزمان پیش‌بینی نمی‌کنند. از مدل‌های موجود می‌توان به یک مدل ویسکوالاستیک خطی بر پایه رابطه تنش-کرنش الاستومرهای مگنتورئولوژیکال و یک مدل مشتق کسری بر پایه فرکانس بارگذاری یا مدول مختلط اشاره کرد که ضرایب این دو مدل تابع میدان مغناطیسی خارجی می‌باشند [۱۵ و ۱۱۲]. در اکثر این مدل‌سازی‌ها الاستومرهای مگنتورئولوژیکال عموماً به عنوان یک ماده ویسکوالاستیک خطی در نظر گرفته می‌شوند که نهایتاً رفتار ویسکوالاستیک یا هیستریزس غیرخطی آن‌ها در کرنش‌ها و نرخ کرنش‌های بسیار زیاد در نظر گرفته نمی‌شوند. بنابراین، جهت مدل‌سازی رفتار دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال به یک مدل بسیار جامع نیاز می‌باشد که علاوه بر تعیین پاسخ ماده نسبت به میدان مغناطیسی خارجی، تاثیر انواع بارگذاری‌های دینامیکی

^۱ Point-Dipole Model

^۲ Complex modulus model

وارد به الاستومرهای مگنتورئولوژیکال شامل کرنش، نرخ کرنش را در یک بازه وسیع و پیوسته در نظر گیرد.

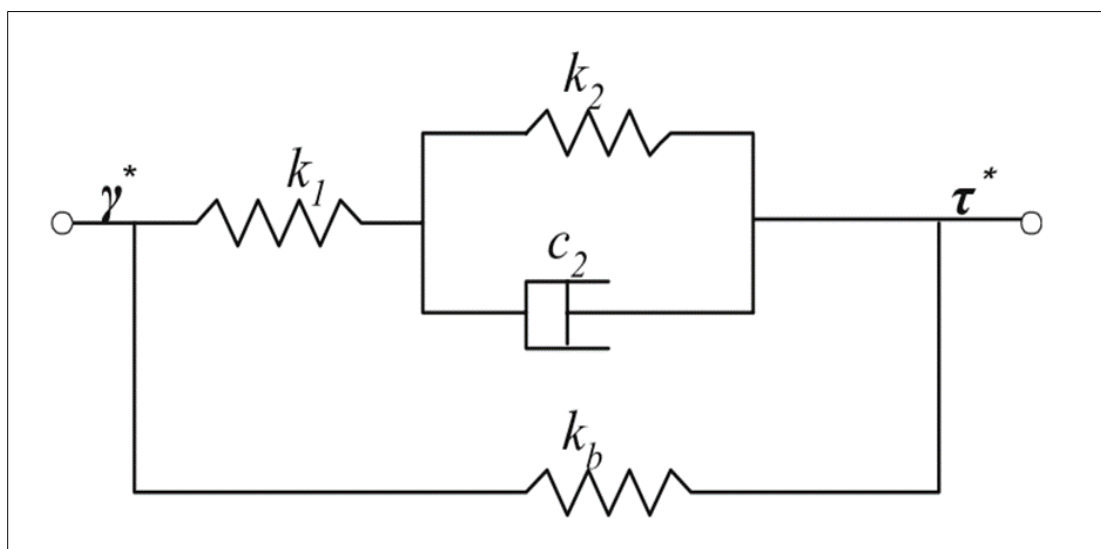
۱-۸-۲ مدل‌های ویسکوالاستیک

دیدگاه مدل‌سازی ویسکوالاستیک عموماً بر پایه رابطه بین نیرو-جابجایی یا تنش-کرنش الاستومرهای مگنتورئولوژیکال در رژیم‌های مختلف مخصوصاً رژیم برشی و فشاری شامل دو بخش ویسکوالاستیک و ریاضی-تجربی می‌باشد. این مدل‌ها به سبب قابلیت استفاده راحت‌تر و سریع‌تر در شبیه‌سازی و کنترل سیستم‌های مکانیکی نسبت به مدل‌های ریزساختار دارای کاربرد بیش‌تری می‌باشند. رفتار رئولوژی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال علاوه بر میدان مغناطیسی خارجی، به کرنش و نرخ کرنش وابسته می‌باشد. این وابستگی در مطالعات مختلف مورد بررسی قرار گرفته است [۱۱۳ و ۱۱۴].

کنترل و شبیه‌سازی کارآمد دستگاه‌های شامل الاستومرهای مگنتورئولوژیکال توسط میدان مغناطیسی، از طریق یک مدل رفتاری مناسب در سیستم کنترلی صورت می‌گیرد که این مدل می‌بایست علاوه بر تعیین پاسخ ماده نسبت به میدان مغناطیسی به طور همزمان اثر تغییر کرنش، نرخ کرنش ناشی از بارگذاری را بر روی رفتار دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال در نظر بگیرد. در دو دهه اخیر، مدل‌های مختلفی جهت بررسی رفتار دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال ارائه شده است. در اکثر این مدل‌ها ضرایب تابع میدان در یک کرنش ثابت یا در یک نرخ کرنش ثابت بدست آمده‌اند. بنابراین ضرایب مدل‌های قبلی علاوه بر میدان مغناطیسی تابع شرایط بارگذاری از جمله کرنش، نرخ کرنش و یا هر دو بوده و در بارگذاری‌های مختلف تغییر می‌کنند. در نتیجه این ضرایب باید در بارگذاری‌های مختلف از طریق بهینه‌سازی به روز رسانی شوند. یک مدل چهار پارامتری ویسکوالاستیکی خطی جهت پیش‌بینی رفتار دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال توسط لی^۱ و همکاران [۱۱۵] ارائه شده است که ضرایب آن علاوه بر میدان مغناطیسی، تابع کرنش می‌باشند.

^۱ Li

شماتیک این مدل در شکل ۱-۲۰ نشان داده شده است. ژو^۱ و همکاران [۱۱۶] یک مدل چهار پارامتری ویسکوالاستیک مشتق کسری^۲ ارائه داده‌اند. در این مدل، پارامترها تابع نرخ کرنش نبوده و در فرکانس‌های مختلف بین ۱ تا ۱۰ هرتز، رفتار دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال را پیش‌بینی می‌کنند در حالیکه، این پارامترها تابع کرنش می‌باشد.



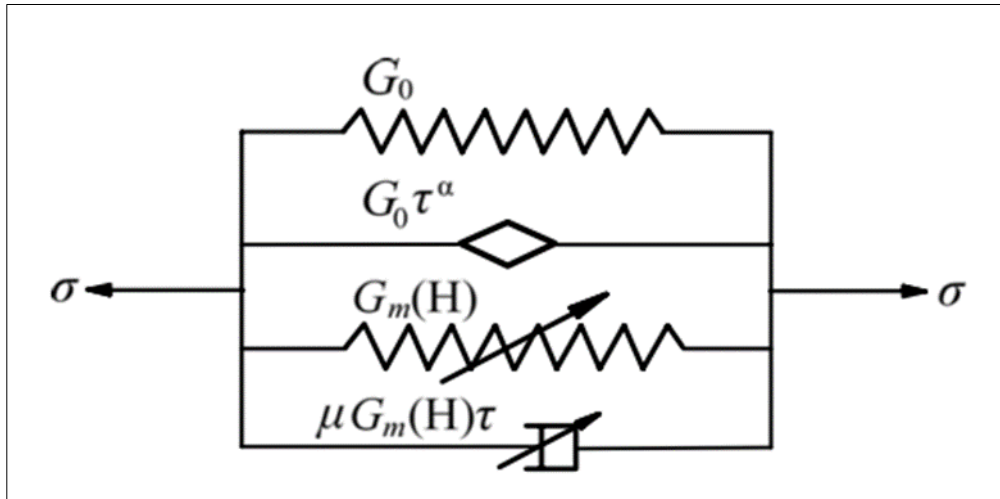
شکل ۱-۲۰- مدل چهار پارامتری ویسکوالاستیکی پیشنهاد شده توسط لی و همکاران [۱۱۵].

در این مدل، مطابق شکل ۱-۲۱، یک جزء فنری با یک جزء میرایی مشتق کسری، جهت نشان‌دادن رفتار ویسکوالاستیک ماتریس الاستومرهای مگنتورئولوژیکال، موازی شده است. در این شکل یک جزء فنری غیر خطی نیز تابعیت الاستومرهای مگنتورئولوژیکال به میدان مغناطیسی خارجی را نشان می‌دهد. یک جزء میرایی دیگر جهت متغیر بودن خواص میرایی با میدان مغناطیسی نیز ارائه شده است. چهار پارامتر ذکر شده در این مدل، در یک دامنه کرنش^۳ ثابت ۲۵ درصد تخمین زده شده‌اند و متعاقباً پارامترهای این مدل تابع کرنش می‌باشد. بنابراین، با تغییر کرنش در بارگذاری جدید، پارامترهای این مدل جهت به دست آوردن تنش می‌بایست مجدداً بهینه‌سازی و محاسبه گردند که زمان زیادی صرف انجام الگوریتم بهینه‌سازی می‌گردد.

^۱ Zhu

^۲ Fractional derivative model

^۳ Strain amplitude or strain



شکل ۱-۲۱- مدل چهار پارامتری ویسکوالاستیک مشتق کسری ارائه شده توسط ژو و همکاران [۱۱۶].

ام^۱ و همکاران [۱۱۷] مدلی دینامیکی شامل دو جزء رامبرگ-اوسگود^۲ و ماکسول^۳ جهت تخمین رفتار ویسکوالاستیک الاستومرهای مگنتورئولوژیکال ارائه دادند که در شکل ۱-۲۲ رسم شده است. این مدل شامل ۴ پارامتر تابع میدان و یک پارامتر ثابت می‌باشد. اگرچه پارامترهای این مدل مستقل از کرنش و نرخ کرنش می‌باشند، جزء رامبرگ-اوسگود کرنش را به صورت تابعی از تنش بیان می‌کند و یک رابطه صریح برای تنش بر مبنای کرنش در نظر نمی‌گیرد. بنابراین جهت محاسبه پارامترها، زمان نسبتاً زیادی صرف خواهد شد. یک مدل ساختاری غیرخطی بر پایه‌ی میدان مغناطیسی، کرنش و نرخ کرنش توسط بلوم و کاری^۴ [۱۱۸] پیشنهاد شده است. دو جزء ویسکوالاستیک و اصطکاکی^۵ این مدل نیز نیاز به صرف زمان بسیار زیاد جهت محاسبه پارامترها دارد. این مدل جهت مطالعه رفتار دینامیکی دستگاه‌های شامل الاستومرهای مگنتورئولوژیکال که در فرکانس‌های بسیار بالایی کار می‌کنند، مانند دسته موتورها و یاتاقان‌ها، مناسب است.

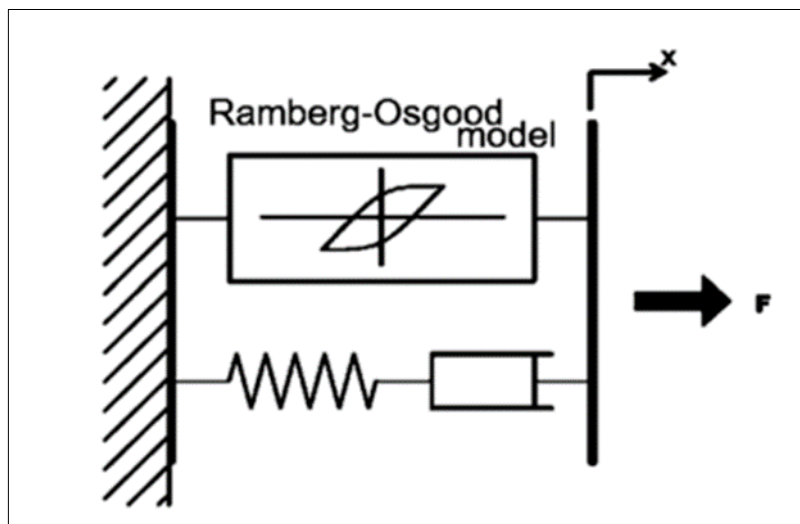
^۱ Eem

^۲ Ramberg-Osgood component

^۳ Maxwell component

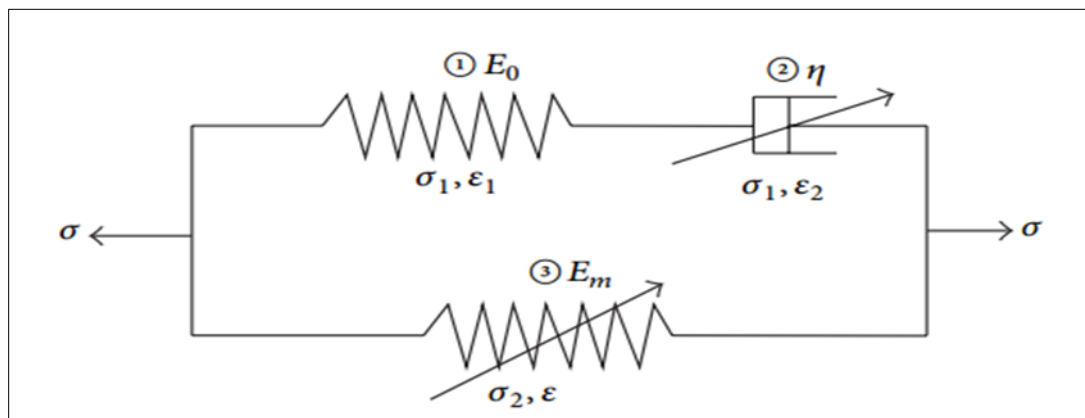
^۴ Blom and Kari

^۵ Frictional part



شکل ۱-۲۲- مدل دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال پیشنهاد شده توسط ام و همکاران [۱۱۷].

جئو^۱ و همکاران [۹۶] یک مدل ساختاری بر مبنای جزء میرایی آبل^۲ جهت پیش‌بینی رفتار دینامیکی مدول الاستومرهای مگنتورئولوژیکال پیشنهاد داده‌اند. طبق شماتیک این مدل در شکل ۱-۲۳، جزء میرایی آبل به همراه اپراتور کسری، به جای جزء میرایی نیوتونی رایج جایگزین شده و به صورت سری با یک فنر خطی جهت رسیدن به مدل ماکسول قرار گرفته است.



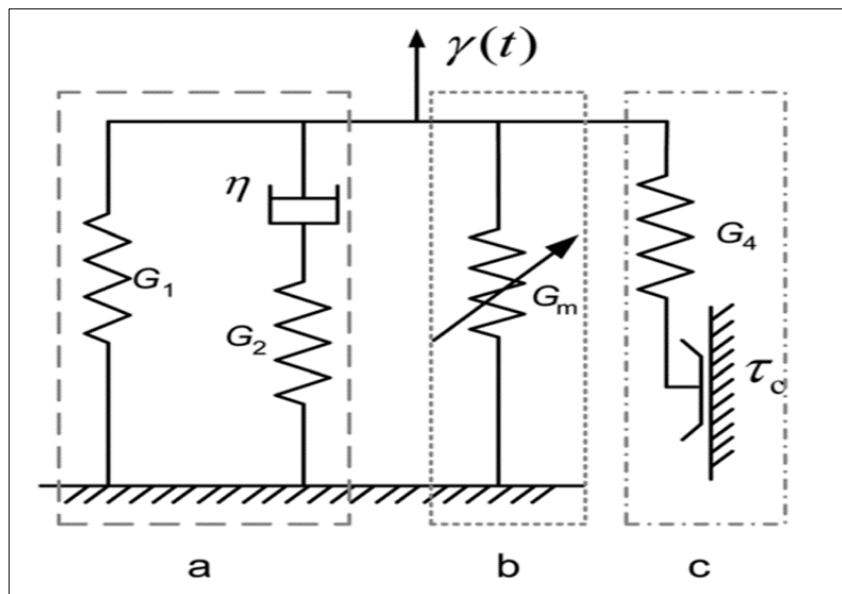
شکل ۱-۲۳- مدل ساختاری الاستومرهای مگنتورئولوژیکال. ۱- فنر هوک ۲- جز میرایی آبل ۳- جز فنری غیر

خطی [۹۶].

^۱ Guo

^۲ Abel dashpot element

چن و جرام^۱ [۱۱۹] یک مدل رئولوژی معرفی کرده است که خواص ویسکوالاستیک ماتریس الاستومرهای مگنتورئولوژیکال، خواص تابع میدان و اصطکاک بین ماتریس و ذرات مغناطیسی را در نظر می‌گیرد. جزء ویسکوالاستیک در این مدل، توسط یک مدل جامد خطی استاندارد که خود شامل دو جزء فنری و میرایی می‌باشد، بیان می‌گردد. خواص سختی تابع میدان الاستومرهای مگنتورئولوژیکال توسط یک فنر با قابلیت تنظیم سختی بیان می‌شود. همچنین اصطکاک بین ذرات مغناطیسی و ماتریس با استفاده از یک فنر و لغزنده اصطکاکی کولومب^۲ بیان می‌شود. علاوه بر این‌ها، الاستومرهای مگنتورئولوژیکال و همچنین دستگاه‌های شامل الاستومرهای مگنتورئولوژیکال، در کرنش‌های زیاد رفتار هیستریزیس^۳ شکل (رفتار هیستریزیس شامل رفتار ویسکوالاستیک خطی و غیر خطی می‌باشد که در تحقیقات عموماً به شکل نمودار تنش-کرنش غیر خطی اطلاق می‌شود) رایجی را از خود نشان می‌دهند.



شکل ۱-۲۴- یک مدل رئولوژی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال ارائه شده توسط چن و جرام [۱۱۹]. a: جز

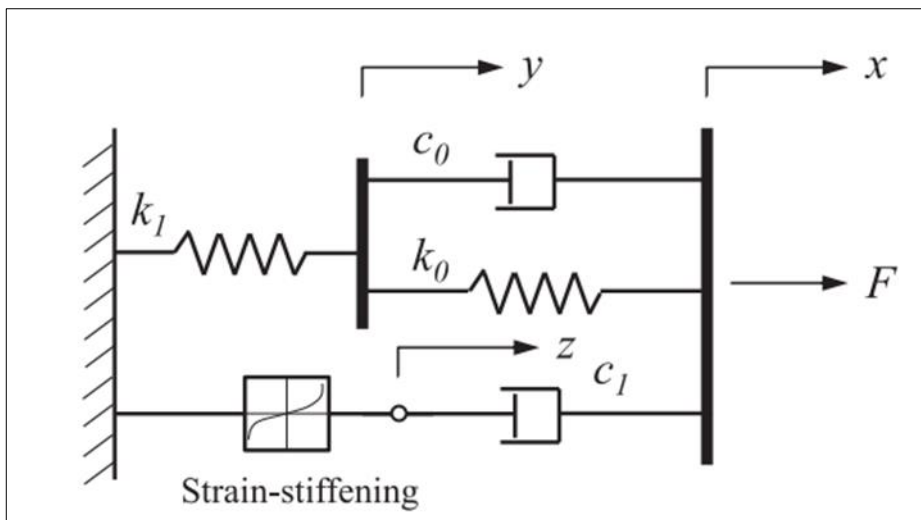
ویسکوالاستیک ماتریس b: جز القای میدان مغناطیسی c: جز اصطکاکی بین ماتریس و ذرات مغناطیسی.

^۱ Chen and Jerrams

^۲ Spring-Coulomb friction slider

^۳ Hysteresis Behavior

این رفتار هیستریزیس در کرنش‌های زیاد غیرخطی بوده و عموماً توسط مدل بوک-ون^۱ [۱۲۰] پیش‌بینی می‌شود. اگرچه این پیش‌بینی تا حدودی قابل قبول می‌باشد، یکی از مشکلات عمده مدل بوک-ون، تخمین هفت پارامتر به خصوص تخمین پارامتر متغیر آن می‌باشد. برای تعیین این پارامترها نیاز به انجام عملیات بهینه‌سازی بسیار سنگین و پیچیده‌ای می‌باشد. به علاوه، پارامترهای این مدل در اکثر مطالعات گذشته یا در یک کرنش ثابت و یا در یک فرکانس ثابت (نرخ کرنش ثابت) محاسبه شده‌اند. در نظر گرفتن اثر فرکانس در رفتار غیر خطی هیستریزیس‌ها شاید به اندازه کرنش و میدان مغناطیسی دارای اهمیت نبوده اما جهت رسیدن به یک مدل بسیار جامع و دقیق نیاز است در نظر گرفته شود.



شکل ۱-۲۵- مدل پیشنهادی کرنش-سخت شوندگی توسط یو^۲ و همکاران [۱۲۱].

یو^۳ و همکاران [۱۲۱ و ۱۲۲] جهت پیش‌بینی رفتار هیستریزیس شکل ایزولاتورهای شامل الاستومرهای مگنتورئولوژیکال از یک جزء فنری کرنش-سخت شوندگی^۴ استفاده کرده‌اند. پارامترهای این مدل در یک فرکانس ثابت با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی به دست آمده است. شماتیک

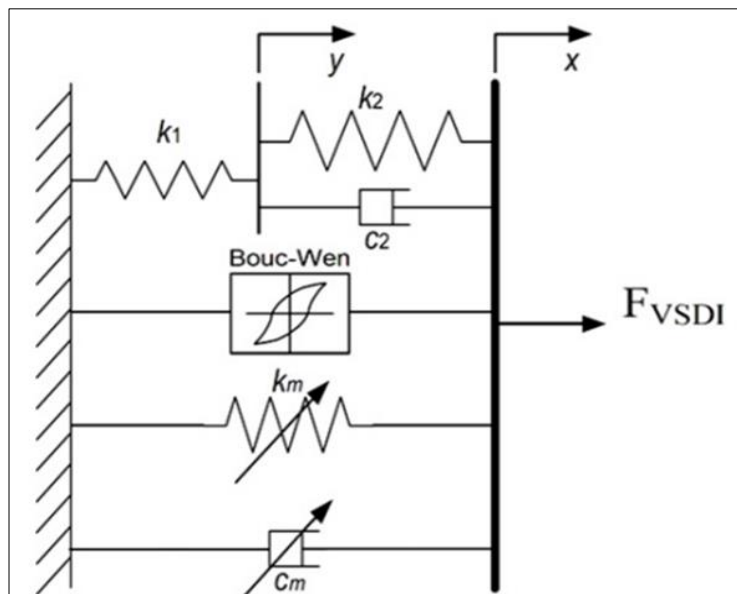
^۱ Bouc-Wen

^۲ Yu

^۳ Yu

^۴ Strain-stiffening

این مدل در شکل ۱-۲۵ ارائه شده است. بهروز و همکاران [۱۲۳] برای پیش‌بینی رابطه بین نیرو و جابه‌جایی در ایزولاتورهای شامل الاستومرهای مگنتورئولوژیکی، مطابق شکل ۱-۲۶ از یک مدل شامل جزء هیستریزیس بوک-ون استفاده کرده‌اند. پارامترهای این مدل نیز در یک فرکانس ثابت طی یک الگوریتم بهینه‌سازی به دست آمده‌اند. بنابراین با تغییر فرکانس ورودی این ایزولاتور هوشمند، پارامترهای این مدل مجدداً با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی می‌باست محاسبه گردند. یانگ^۱ و همکاران [۱۲۴] مدل دیگری شامل جزء هیستریزیس بوک-ون برای ایزولاتورهای شامل الاستومرهای مگنتورئولوژیکی ارائه داده‌اند.

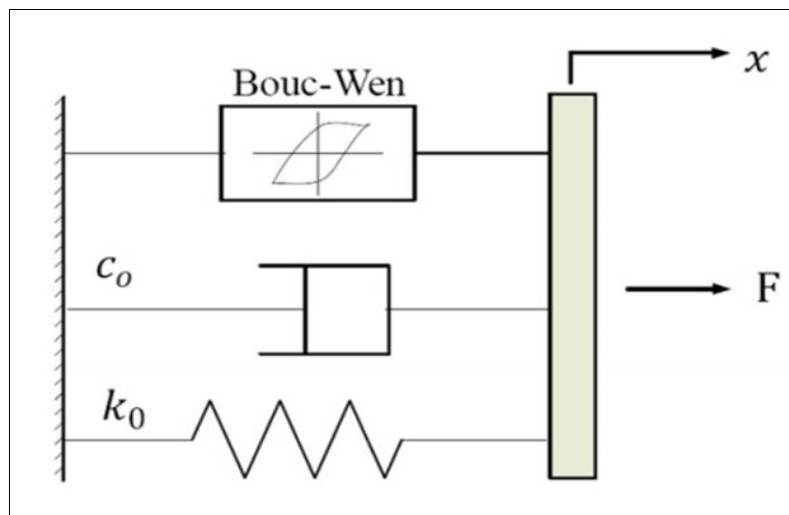


شکل ۱-۲۶- مدل پدیده‌ای-شناختی^۲ پیشنهادی برای ایزولاتورهای شامل الاستومرهای مگنتورئولوژیکی توسط

بهروز و همکاران [۱۲۳].

^۱ Yang

^۲ Phenomenological model



شکل ۱-۲۷- شماتیک مدل پیشنهادی برای ایزولاتورهای شامل الاستومرهای مگنتورئولوژیکال توسط یانگ و همکاران [۱۲۴].

این مدل به خوبی رفتار غیر خطی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال را که با افزایش کرنش ایجاد می‌شود، پیش‌بینی می‌کند. در این مدل، تأثیر هر یک از پارامترهای تابع میدان بر روی حلقه‌های هیستریزیس بررسی شده است. با این حال، پارامترهای این مدل در یک کرنش و فرکانس ثابت به دست آمده‌اند و لذا، نیاز به انجام بهینه‌سازی جهت به دست آوردن پارامترهای مدل در بارگذاری‌های مختلف دینامیکی می‌باشد. لی و لی^۱ [۱۲۵] یک مدل پدیده‌ای-شناختی دیگری بر پایه مدل که-کلی^۲ ارائه داده‌اند. پارامترهای این مدل نیز علاوه بر میدان مغناطیسی وابسته به کرنش و یا نرخ کرنش می‌باشد. بر اساس مطالعات گذشته ذکر شده در بالا، جهت مدل سازی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال آزمایشات مختلفی (عمدتاً در مدهای برشی-نوسانی) توسط دستگاه‌های رئومتر یا ام-تی-اس ماشین^۳ بر روی این مواد صورت گرفته است. براساس این مطالعات رفتار دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال، علاوه بر میدان مغناطیسی تابع شرایط بارگذاری شامل کرنش و نرخ کرنش (فرکانس) می‌باشند [۹۱-۹۳ و ۱۲۶-۱۳۰]. سپس مدل‌های مختلفی جهت پیش‌بینی این

^۱ Li and Li

^۲ Koh-Kelly model

^۳ MTS-Machine

رفتار پیشنهاد شده است که پارامترهای آن به کمک داده‌های آزمایشگاهی از طریق روش‌های بهینه سازی مختلفی تخمین زده شده‌است.

۹-۱ اثر ضخامت، پیش بارگذاری و دما بر روی رفتار الاستومرهای

مگنتورئولوژیکال

براساس مطالعات پیشین که در بخش قبل بررسی شد، رفتار دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال، علاوه بر میدان مغناطیسی تابع شرایط بارگذاری شامل کرنش و نرخ کرنش (فرکانس) می‌باشند. علاوه بر این، ضخامت الاستومرهای مگنتورئولوژیکال، پیش بارگذاری و دما نیز بر روی رفتار دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال تاثیر گذار هستند. در ادامه به مطالعه تاثیر هر یک از این عوامل می‌پردازیم.

۹-۱-۱ تاثیر دما بر روی رفتار الاستومرهای مگنتورئولوژیکال

ژانگ^۱ و همکاران [۱۳۷] اثرات تغییر دما را بر روی خواص ویسکوالاستیک الاستومرهای مگنتورئولوژیکال بررسی کرده‌اند. آن‌ها دو نمونه از الاستومرهای مگنتورئولوژیکال را که ماتریس آن‌ها شامل لاستیک پولی-بوتادین^۲ و لاستیک طبیعی^۳ می‌باشند، مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان می‌دهد که مدول ذخیره برشی و تلفات نمونه‌ای که شامل ماتریس پولی-بوتادین بوده همواره با افزایش دما به صورت خطی کاهش می‌یابد. در مقابل، این مدول‌ها در نمونه‌ای که ماتریس آن از لاستیک طبیعی ساخته شده، با افزایش دما ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد.

^۱ Zhang

^۲ Poly-Butadiene Rubber (BR)

^۳ Natural Rubber

۱-۹-۲ تأثیر پیش‌بارگذاری^۱ بر روی رفتار الاستومرهای مگنتورئولوژیکال

لجون و کاری^۲ [۱۳۸] اثر پیش‌بارگذاری را بر روی خواص الاستومرهای مگنتورئولوژیکال بر حسب تغییرات فرکانس، کرنش و میدان مغناطیسی مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج این مطالعات بیانگر این است که با افزایش پیش‌بارگذاری، اثر میدان مغناطیسی بر روی خواص الاستومرهای مگنتورئولوژیکال کاهش یافته و متقابلاً با افزایش میدان مغناطیسی، تأثیر پیش‌بارگذاری را کاهش می‌دهد. همچنین طبق نتایج این مطالعه، اندازه مدول ذخیره برشی، تابعی از پیش‌بارگذاری می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد که جهت بررسی خواص ویسکوالاستیک الاستومرهای مگنتورئولوژیکال، اثر پیش‌بارگذاری یک عامل مهم بوده و می‌بایست در نظر گرفته شود.

۱-۹-۳ تأثیر ضخامت بر روی رفتار الاستومرهای مگنتورئولوژیکال

گردانی‌نژاد و همکاران [۱۳۹] تأثیر افزایش ضخامت الاستومرهای مگنتورئولوژیکال را بر روی رفتار این مواد بررسی کردند. در این مطالعه از دو نوع نمونه الاستومر مگنتورئولوژیکال با سطح مقطع دایره‌ای و مستطیلی شکل استفاده شده است که ضخامت آن‌ها بین ۶/۳۵ تا ۲۵/۴ میلی‌متر تغییر می‌کند. این دو نمونه، تحت بار فشاری و برشی قرار گرفته‌اند. مدول برشی و مدول یانگ در این دو نمونه در میدان‌های مغناطیسی مختلف اندازه‌گیری شده‌اند. طبق نتایج این مطالعه، اثر افزایش میدان مغناطیسی بر روی این مدول‌ها مستقل از افزایش ضخامت بوده و فقط تابع درصد وزنی ذرات آهنی و میدان مغناطیسی می‌باشد. همچنین آن‌ها نشان دادند که با افزایش میدان مغناطیسی، تغییرات در این دو مدول در میدان‌های کم به صورت خطی و در میدان‌های زیاد به صورت غیرخطی می‌باشد.

۱-۱۰ معرفی تحقیق حاضر

در این پژوهش، ابتدا یک تحقیق و مرور کلی در مورد انواع مواد هوشمند از جمله الاستومرهای

^۱ Pre-Load

^۲ Lejon & Kari

مگنتورئولوژیکال صورت گرفته است. در مورد این مواد انواع کاربردهای مهندسی، صنعتی و پزشکی معرفی گردید. سپس یک مطالعه جامع بر روی انواع مدل‌های موجود برای تعیین رفتار الاستومرهای مگنتورئولوژیکال انجام شد. پس از جمع آوری اطلاعات مورد نیاز و مطالعه‌ی پژوهش‌های گذشته یک نمونه الاستومر مگنتورئولوژیکال در آزمایشگاه ساخته شد. سپس داده‌های آزمایشگاهی موجود در تست نوسان برشی برای یک نمونه الاستومر مگنتورئولوژیکال، مورد مطالعه و تفسیر قرار گرفت.

داده‌های آزمایشگاهی به صورت حلقه‌های هیستریزس شکل تنش- کرنش برای انواع حالت‌های آزمایش ترسیم گردید. براساس این نمودارها، رفتار دینامیکی الاستومر مگنتورئولوژیکال در انواع شرایط بارگذاری نوسان برشی از کرنش، نرخ کرنش و میدان مغناطیسی خارجی مورد مطالعه قرار گرفت. در آخر جهت تعیین رفتار دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال از مدل‌های مختلف ویسکوالاستیک استفاده شد. در نهایت یک مدل پیشنهادی ویسکوالاستیک جدید برای پیش بینی رفتار دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال ارائه گردید. پارامترهای مدل‌های مورد مطالعه به روش آزمایشگاهی-تحلیلی محاسبه شده است.

۱-۱۱ ضرورت تحقیق و کاربرد آن

با توجه به قابلیت‌های ذکر شده برای الاستومرهای مگنتورئولوژیکال، در اکثر موارد این مواد در بارگذاری‌های دینامیکی مورد مطالعه قرار گرفته و انواع کاربردهای آن ساخته شده‌اند. هوشمندی این مواد در سایه سیستم‌های کنترلی قرار گرفته‌اند که به کمک تغییر جریان الکتریکی در کویل‌های مغناطیسی پاسخ این مواد را نسبت به تحریک ورودی کنترل و با توجه به نوع کاربرد بهینه می‌کنند. سیستم‌های کنترلی هوشمند، نیازمند یک مدل ریاضی می‌باشند که رابطه بین نیرو و جابجایی یا تنش و کرنش را در این مواد به خوبی ارائه دهد. بنابراین مدل سازی رفتار دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال برپایه‌ی رابطه بین تنش-کرنش بسیار ضروری می‌باشد.

۱-۱۲ تعریف مساله و نوآوری تحقیق

در اکثر مطالعات قبلی برای پیش بینی رفتار دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکی، عملیات بهینه‌سازی جهت به دست آوردن پارامترهای این مدل‌ها، در یک کرنش ثابت یا نرخ کرنش ثابت انجام گرفته است. بنابراین در این مدل‌ها، پارامترها علاوه بر میدان مغناطیسی، تابع کرنش و یا نرخ کرنش می‌باشند. در نتیجه این پارامترها نمی‌توانند اثر تغییرات کرنش، نرخ کرنش و یا تواما هر دو را در نظر بگیرند. این در حالی است که جهت شبیه‌سازی کنترلی کارآمد دستگاه‌های شامل الاستومرهای مگنتورئولوژیکی، زمان زیادی برای بهینه‌سازی پارامترها در بارگذاری جدید از کرنش و نرخ کرنش در دسترس نیست. در این راستا، به یک مدل جامع که اثر تغییرات میدان مغناطیسی، کرنش و نرخ کرنش را به طور همزمان در نظر می‌گیرد، نیاز می‌باشد. در این مطالعه جهت پیش بینی رفتار دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکی، یک مدل ویسکوالاستیک نوین که بر پایه مدل کلونین-ویت تعمیم یافته است، پیشنهاد می‌گردد. مدل پیشنهادی می‌تواند رفتار دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکی را با در نظر گرفتن همزمان اثر میدان مغناطیسی، کرنش و نرخ کرنش پیش‌بینی کند. ضرایب این مدل که فقط تابع میدان بوده به کمک دو روش کمترین مربعات^۱ و الگوریتم ژنتیک^۲ محاسبه شده است. با در نظر گرفتن این مدل ابتکاری، ضرایب مدل در بارگذاری‌های مختلف ثابت و همیشه در دسترس بوده و نیازی به حل معادلات دیفرانسیل و یا انجام الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی جهت به دست آوردن پارامترها در بارگذاری‌های مختلف نمی‌باشد.

علاوه بر این، مدل پیشنهادی به خوبی رفتار مدول ذخیره برشی را بر حسب فرکانس در بازه وسیعی از ۰/۱ تا ۸ هرتز که در این بازه کاملاً به صورت غیرخطی می‌باشد، پیش‌بینی می‌کند. در این راستا، اکثر مدل‌های قبلی رفتار خطی مدول ذخیره برشی الاستومرهای مگنتورئولوژیکی را در ناحیه خطی عمدتاً بین ۱ تا ۱۰ هرتز محاسبه می‌کنند.

^۱ Least square method^۲ Genetic Algorithm

فصل دوم

ساخت الاستومر مگنتورئولوژیکال

در این پژوهش، یک نمونه الاستومر مگنتورئولوژیکال ایزوتروپ ساخته شده است. اجزاء این نمونه شامل سیلیکون، روغن سیلیکون و ذرات آهنی می‌باشد. درصد وزنی این اجزاء در جدول ۱ نشان داده شده است. ذرات آهنی و روغن سیلیکون به کار رفته در ساخت این الاستومر مگنتورئولوژیکال از شرکت مرک^۱ آلمان خریداری شده است. روغن سیلیکون استفاده شده دارای ویسکوزیته‌ای برابر ۰/۲ پاسکال-ثانیه می‌باشد.

۱-۲ تولید یک نمونه الاستومر مگنتورئولوژیکال

۱-۱-۲ مقدمه

در این بخش، مراحل ساخت یک نمونه الاستومر مگنتورئولوژیکال ایزوتروپ توضیح داده می‌شود. همان طور که می‌دانیم الاستومرهای مگنتورئولوژیکال از سه قسمت اصلی ماتریس، ذرات مغناطیس شونده و افزودنی^۲ تشکیل می‌شوند. قبل از ساخت الاستومر مگنتورئولوژیکال باید توجه کنیم که برای چه کاربردی این ماده را نیاز داریم. پس از مشخص شدن نوع کاربرد الاستومر مگنتورئولوژیکال، ماتریس، درصد وزنی و اندازه ذرات آهنی و در نهایت افزودنی مورد نیاز تهیه می‌گردد. سپس در یک ظرف ماتریس مثلاً سیلیکون را با ذرات آهنی مخلوط می‌کنیم. پس از آن افزودنی مثل روغن سیلیکون را اضافه می‌کنیم. معمولاً از روغن سیلیکون به عنوان یک افزودنی در ساخت الاستومرهای مگنتورئولوژیکال استفاده می‌گردد. با افزودن روغن سیلیکون به ماتریس الاستومرهای مگنتورئولوژیکال، فاصله بین مولکول‌های ماتریس افزایش یافته و چسبیدگی مولکول‌های ماتریس کاهش می‌یابد.

روغن سیلیکون علاوه بر افزایش سیالیت و پلاستیسیته ماتریس، که باعث افزایش توزیع یکنواخت تنش داخلی در ماتریس می‌گردد، باعث می‌شود تا ذرات مغناطیس شونده به راحتی در حضور میدان

^۱ Merck

^۲ Additive

مغناطیسی جهت گیری کنند. در نهایت این ترکیب به مدت ۵ دقیقه کاملاً هم زده می‌شود تا کاملاً مخلوط شوند. سپس این مخلوط را در یک قالب مشخص می‌ریزیم که با توجه به نوع کاربرد می‌تواند مکعب مستطیلی، مخروطی، دوزنقه ای یا به صورت یک استوانه باشد. در مرحله آخر این مخلوط باید به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط ۲۵ درجه سانتی گراد در داخل قالب نگه داری شود. پس از ۲۴ ساعت الاستومر مگنتورئولوژیکال ایزوتروپ آماده می‌شود.

اگر در آخرین مرحله ساخت، مخلوط ذکر شده در حضور میدان مغناطیسی به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق نگه داشته شود، زنجیره‌هایی از ذرات آهنی در راستای خطوط میدان مغناطیسی جهت گیری کرده و ستون‌هایی از ذرات آهنی به صورت ثابت تشکیل می‌گردند. در نتیجه الاستومر مگنتورئولوژیکال ساخته شده از نوع غیر ایزوتروپ خواهد بود.

۲-۱-۲ ساخت یک نمونه الاستومر مگنتورئولوژیکال

جهت ساخت یک نمونه الاستومر مگنتورئولوژیکال از ترکیب سه جز سیلیکون، ذرات آهنی و روغن سیلیکون با توجه به جدول ۱-۲ تهیه شده است. مطابق جدول ۱-۲ مقدار درصد وزنی ذرات آهنی با توجه به مطالعات قبلی در این زمینه ۳۰ درصد وزنی جهت رسیدن بهترین عملکرد از لحاظ افزایش سختی در برابر میدان در نظر گرفته شده است. درصد وزنی و حجمی سایر اجزا در این جدول دیده می‌شود.

جدول ۱-۲- اجزای تشکیل دهنده نمونه الاستومر مگنتورئولوژیکال ایزوتروپ.

مواد تشکیل دهنده	جرم (گرم)	در صد وزنی	درصد حجمی
ذرات آهنی	۵۰	٪۷۰	٪۲۳,۵
سیلیکون	۱۴,۳	٪۲۰	٪۵۰,۹
روغن سیلیکون	۷,۱	٪۱۰	٪۲۵,۶

جهت آماده سازی این نمونه برای آزمایشات رئومتری توسط دستگاه رئومتر، این نمونه به صورت یک قالب استوانه ای به ضخامت ۲ میلی متر و قطر ۱۰ سانتی متری ساخته شده است. بدین منظور از یک ظرف جهت مخلوط کردن اجزای لازم (مطابق شکل ۱-۲)، یک ترازو دیجیتالی با دقت ۰,۱ گرم جهت تعیین کردن دقیق درصد وزنی اجزا، چهار عدد فاصله انداز^۱ (مطابق شکل ۲-۲)، دو عدد شیشه پیرکس^۲ و دو نایلون جهت جلوگیری از ورود آلاینده‌های محیطی به مخلوط قبل از مرحله پخت استفاده شده است (مراجعه شود به شکل ۳-۲). مطابق شکل ۲-۲، برای این که بتوان الاستومر مگنتورئولوژیکال را به صورت ورقه‌ای به ضخامت ۲ میلی‌متر ساخت، از ۴ فاصله‌انداز یکسان به ضخامت ۲ میلی‌متر استفاده شده است.



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

^۱ Spacer

^۲ Pyrex



شکل ۲-۲- چهار عدد فاصله انداز.



شکل ۲-۳- دو عدد شیشه پیرکس و دو نایلون.

مراحل ساخت یک نمونه الاستومر مگنتورئولوژیکال در این پژوهش به ترتیب در شکل‌های زیر

نشان داده شده است. در اولین مرحله، ذرات آهنی در یک ظرف ریخته می‌شوند (مطابق شکل ۲-۴).

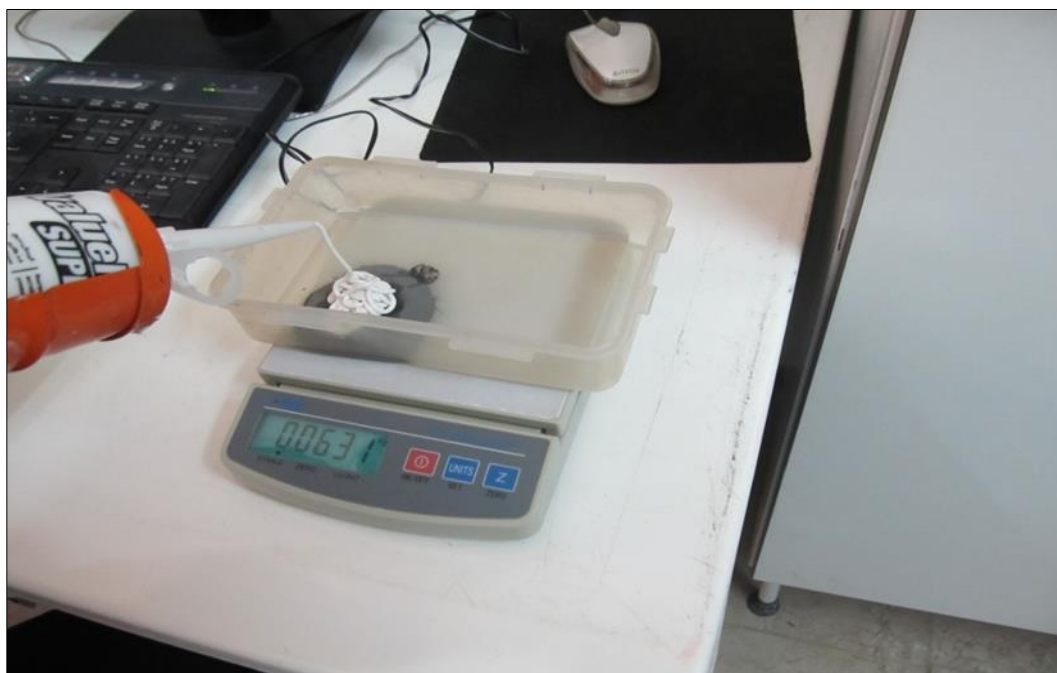


شکل ۲-۴- ذرات آهنی به میزان ۵۰ گرم.

طبق شکل ۲-۵ سپس روغن سیلیکون به ظرف اضافه شده و ذرات آهنی را در روغن سیلیکون اضافه شده به مدت زمان ۵ دقیقه مخلوط می‌کنیم.



شکل ۲-۵- افزودن روغن سیلیکون به ذرات آهنی.



شکل ۲-۶- افزودن سیلیکون به مخلوط ذرات آهنی و روغن سیلیکون.

پس از آن، لاستیک سیلیکون نیز به این مخلوط اضافه شده و کل این اجزاء به طور کامل مخلوط شده و به کمک یک همزن دستی، در دمای اتاق به مدت ۱۰ دقیقه هم زده می شود (مراجعه شود به شکل ۲-۶، شکل ۲-۷ و شکل ۲-۸).



شکل ۲-۷- مجموع وزنی ۷۱,۴ گرم شامل اجزای تشکیل دهنده نمونه الاستومر مگنتورئولوژیکال.

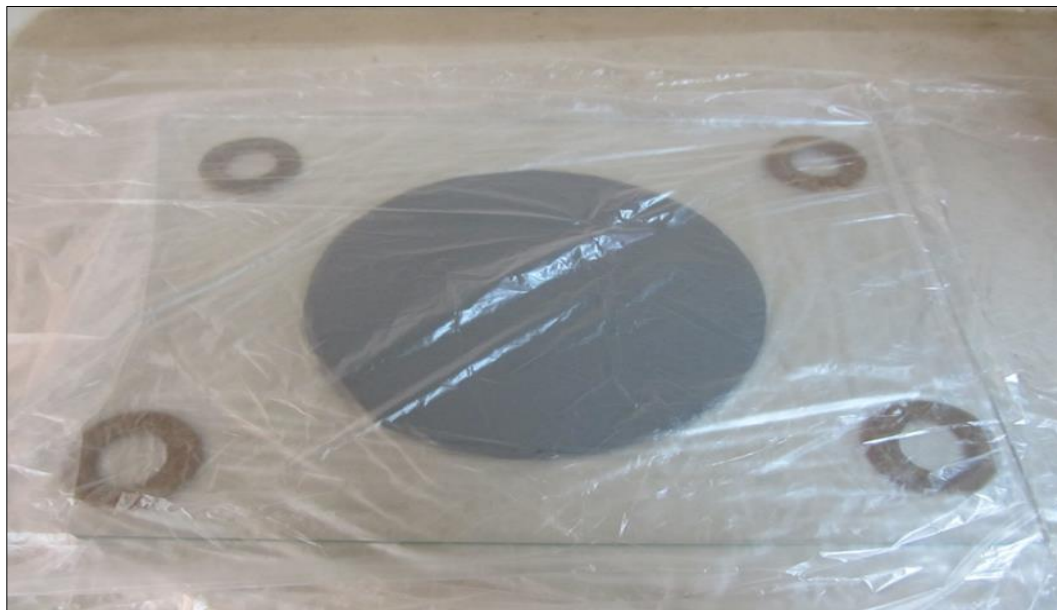


شکل ۲-۸- مخلوط هم زده شده شامل تمام اجزای تشکیل دهنده الاستومر مگنتورئولوژیکال.

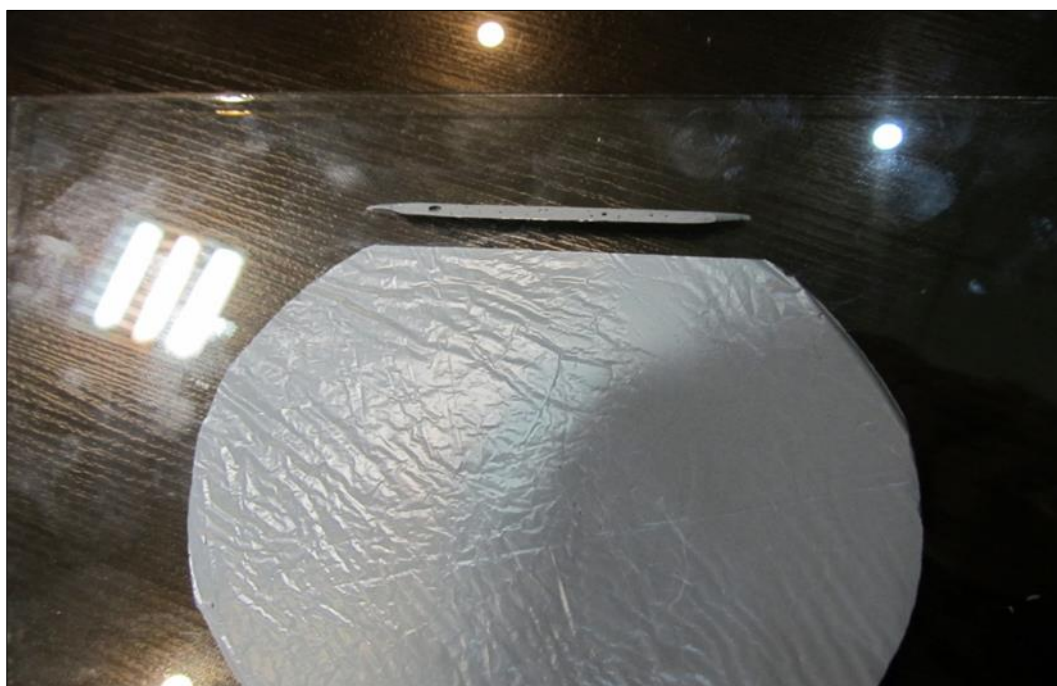
مخلوط هم زده شده را بر روی یکی از شیشه‌ها می‌ریزیم (مطابق شکل ۲-۹). در نهایت، مخلوط هم‌زده شده به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق بین دو ورق شیشه‌ای، جهت تهیه یک لایه الاستومر مگنتورئولوژیکال به ضخامت ۲ میلی‌متر نگه داشته می‌شود (مراجعه شود به شکل ۲-۱۰).



شکل ۲-۹- اجزای مخلوط شده آماده برای مرحله پخت.



شکل ۲-۱۰- نمونه همزده شده بین دو صفحه شیشه‌ای فشرده می‌شود.



شکل ۲-۱۱- نمونه الاستومر مگنتورئولوژیکال ساخته شده به همراه یک برش عرضی از این نمونه.

مطابق شکل ۲-۱۱ نمونه الاستومر مگنتورئولوژیکال ایزوتروپ تهیه شده و یک برش عرضی از این نمونه نیز مشاهده می‌شود. با توجه به این شکل، چند حفره بسیار ریز در نمونه برش عرضی دیده می‌شود. این حفره ها به دلیل ورود هوا به مخلوط اجزای آزمایش می‌باشد. معمولاً قبل از مرحله پخت،

برای ساخت الاستومر مگنتورئولوژیکال در ضخامت بالا، هوای درون مخلوط آماده شده را به کمک پمپ خلا، کاملاً خالی می‌کنند. در این نمونه به دلیل ضخامت بسیار کم از این مرحله صرف نظر شده است.

۲-۲ آزمایش‌های رایج رئومتری

عموماً جهت دستیابی به خواص رئولوژی و مکانیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال از دستگاه رئومتر استفاده می‌شود. در شکل زیر یک نمونه از دستگاه رئومتر مربوط به شرکت انتون پار^۱ از نوع MCR 300 نشان داده شده است. مطالعات زیادی جهت یافتن رفتار مکانیکی الاستومرهای



شکل ۲-۱۲- دستگاه رئومتر^۲ مدل MCR 300.

مگنتورئولوژیکال به کمک انواع مختلف رئومترها انجام شده است. در اکثر این مطالعات، ضخامت الاستومرهای مگنتورئولوژیکال بین ۱ تا ۲ میلی‌متر می‌باشد. همچنین در این مطالعات، آزمایشات رئومتری انجام شده توسط رئومتر دارای محدودیت‌هایی از جمله فرکانس و کرنش ورودی می‌باشد. به

^۱ Anton Paar

^۲ Rheometer device

دلیل ضخامت بسیار محدود، امکان انجام آزمایشات رئومتر در کرنش‌ها و نرخ‌های کرنش بسیار زیاد مقدور نمی‌باشد. هم‌چنین به کمک دستگاه رئومتر نمی‌توان الاستومرهای مگنتورئولوژیکال دارای ضخامت بیش از ۲ میلی‌متر را مورد آزمایش قرار داد. دلیل این امر، ظرفیت محدود نیروی عمودی بین دو فک رئومتر می‌باشد.

علاوه بر این، در کاربردهای عملی از الاستومرهای مگنتورئولوژیکال جهت استفاده از دو ویژگی منحصر به فرد سختی و میرایی قابل تنظیم، معمولاً به ضخامتی بیش‌تر از ۱ یا ۲ میلی‌متر نیاز می‌باشد. در این پژوهش، به جای استفاده از دستگاه رئومتر جهت دستیابی به خواص رئولوژی و مکانیکی، از داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده از آزمایش نوسان برشی به کمک دستگاه MTS استفاده شده است. یک تفسیر کامل از این داده‌های آزمایشگاهی به همراه اجزاء آزمایش که توسط سجادی آل هاشم و همکاران [۵۹] انجام شده است، در فصل بعد ارائه خواهد شد. در این آزمایش نوسان برشی، علاوه بر اعمال میدان مغناطیسی به کمک چندین آهنربای بسیار قوی، بارگذاری‌های دینامیکی مختلفی در دامنه وسیعی از فرکانس (نرخ کرنش) و کرنش بر روی الاستومر مگنتورئولوژیکال به ضخامت ۹/۵ میلی‌متر اعمال شده است. قابل ذکر است که اکثر مطالعات انجام شده جهت دستیابی به خواص رئولوژی و مکانیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال به ضخامت ۱ تا ۳ میلی‌متر صورت گرفته است [۱۱۵، ۱۳۱ و ۱۳۲].

فصل سوم

رفتار دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال

۱-۳ مقدمه

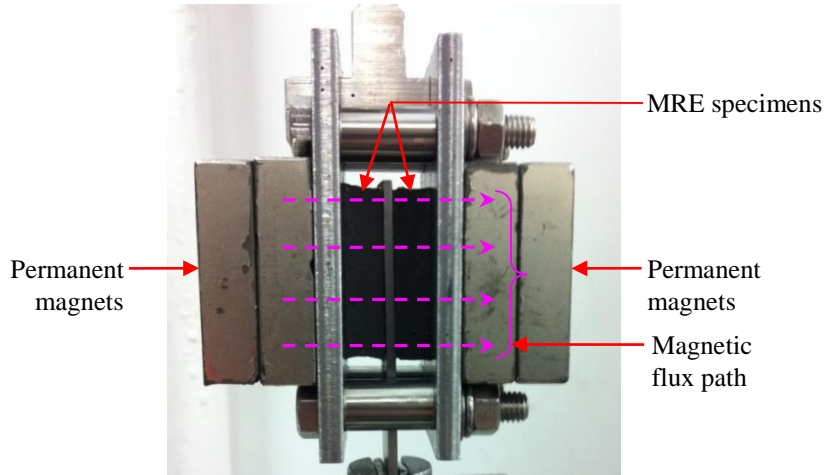
جهت مدل‌سازی رفتار دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال از داده‌های آزمایشگاهی موجود در یک سری آزمایش‌های گوناگونی از نوسان-برشی استفاده شده است. در ابتدا، آزمایش نوسان برشی ذکر شده و اجزاء آن معرفی می‌شود. سپس با استفاده از این داده‌های آزمایشگاهی، نمودارهای تنش بر حسب کرنش یک نمونه الاستومر مگنتورئولوژیکال ایزوتروپ در میدان‌های مختلف مغناطیسی، کرنش‌ها و نرخ کرنش‌های (فرکانس‌های) مختلف به صورت حلقه‌های هیستریزس شکل ترسیم می‌شوند. در ادامه، به تفسیر فیزیکی این نتایج پرداخته می‌شود و در نهایت به کمک این نمودارها و تفسیر آن‌ها یک مدل جدید که تعمیم‌یافته از مدل ویسکو الاستیک کلوین-ویت^۱ می‌باشد، جهت نشان دادن رفتار دینامیکی الاستومر مگنتورئولوژیکال ارائه می‌گردد.

۲-۳ تست نوسان در حالت برشی

الاستومر مگنتورئولوژیکال مورد آزمایش از نوع ایزوتروپ بوده که شامل ذرات کربونیل آهن^۲ از نوع C3518 شرکت سیگما-آلدریچ^۳، سیلیکون و روغن سیلیکون از نوع 378364 شرکت سیگما-آلدریچ می‌باشد. درصد وزنی ذرات کربنی آهن، سیلیکون و روغن سیلیکون به ترتیب ۷۰، ۲۰ و ۱۰ درصد می‌باشد. محدوده قطر ذرات آهنی بین ۳ تا ۵ میکرومتر می‌باشد. در این آزمایش از دو نمونه مشابه الاستومر مگنتورئولوژیکال ایزوتروپ به شکل مکعب مستطیل دارای ابعاد 50mm*12mm*9.5mm (ارتفاع*عرض*طول) استفاده شده است. جهت انجام آزمایش نوسان برشی، اجزاء آزمایش به صورت مشخصی مطابق شکل ۱-۳ طراحی شده‌اند. در این آزمایش از دو صفحه فولادی و چهار پیچ و مهره از جنس فولاد ضد زنگ استفاده شده است. بین این دو صفحه فولادی، دو نمونه الاستومر مگنتورئولوژیکال و یک صفحه بین آن‌ها قرار می‌گیرد. در این آزمایش از تعدادی آهن‌ربا جهت اعمال

^۱ Kelvin-Voigt^۲ Carbonyl iron particles^۳ Sigma-Aldrich

میدان مغناطیسی بر روی الاستومر مگنتورئولوژیکال استفاده شده است. با تغییر تعداد این آهن‌رباها، می‌توان چگالی میدان مغناطیسی اعمال شده بر روی الاستومر مگنتورئولوژیکال را تغییر داد.

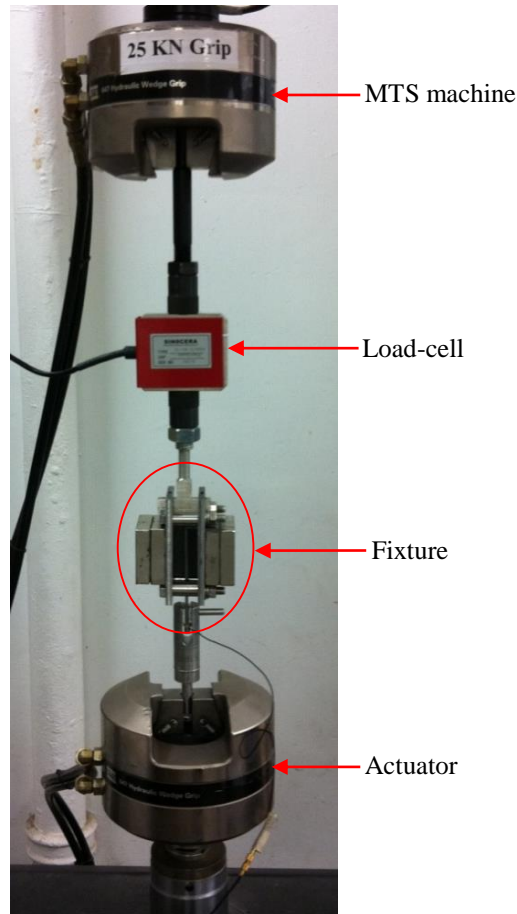


شکل ۳-۱- طراحی اجزای آزمایش نوسان برشی به همراه دو آهن‌ربا در طرفین و دو نمونه الاستومر مگنتورئولوژیکال.

جهت اعمال نیروی نوسانی برشی در کرنش‌ها و فرکانس‌های مختلف از دستگاه MTS مطابق شکل ۳-۱ استفاده شده است. میدان‌های مغناطیسی با چگالی شارهای مختلف توسط افزایش تعداد آهن‌رباها از صفر تا چهار عدد در طرفین منجر به تولید چگالی شار مغناطیسی با اندازه‌های صفر، ۱۰۰، ۱۸۰، ۲۳۰ و ۲۷۲ میلی‌تسلا بر روی الاستومر مگنتورئولوژیکال اعمال می‌شوند. در این آزمایش، فرکانس‌های اعمال شده شامل مقادیر ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۱، ۳، ۵ و ۸ هرتز می‌باشند. دامنه جابه‌جایی‌های برشی^۱ در این آزمایش شامل مقادیر ۰/۱۹، ۰/۳۸، ۰/۷۶ و ۱/۵۲ میلی‌متر می‌باشد که دامنه کرنش^۲ برشی معادل آن برای این نمونه به ضخامت ۹/۵ میلی‌متر شامل ۲، ۴، ۸ و ۱۶ درصد می‌باشد.

^۱ Displacement Amplitude

^۲ Strain Amplitude

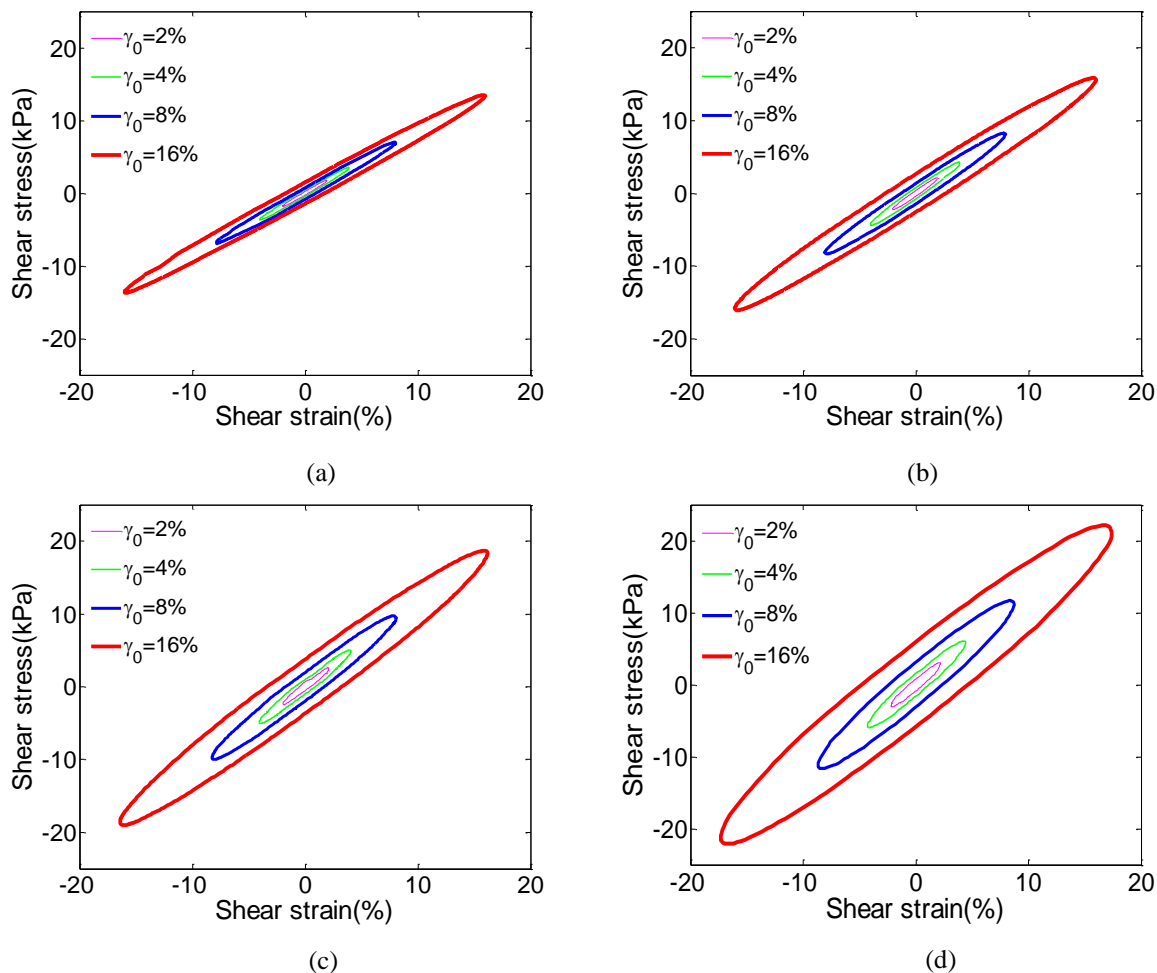


شکل ۳-۲- نصب اجزای آزمایش نوسان برشی در دستگاه MTS.

۳-۳ تفسیر فیزیکی داده‌های تست برشی

بر اساس نمودارهای تنش- کرنش الاستومرهای مگنتورئولوژیکال که به صورت حلقه‌های هیستریز بیضی شکل می‌باشند، می‌توان گفت الاستومرهای مگنتورئولوژیکال جزء مواد ویسکوالاستیک می‌باشند. پس از اعمال تنش بر روی این مواد، مقداری انرژی به سبب خاصیت الاستیک برگردانده می‌شود و مقداری انرژی به دلیل خاصیت ویسکوز به صورت گرما در داخل الاستومر هدر می‌رود. مقدار انرژی تلف‌شده در هر سیکل کرنش اعمالی، به عنوان تلفات هیستریز تلقی می‌شوند. هم‌چنین تنش غیر صفر در کرنش صفر و حلقه‌های بیضی‌شکل، اثر هیستریز را بیان می‌کنند. به طور کلی، مساحت زیر منحنی بارگذاری معادل انرژی ورودی و مساحت زیر منحنی باربرداری معادل انرژی برگردانده‌شده می‌باشد. بنابراین به اختلاف این دو مساحت محدود به دو مسیر بارگذاری و

باربرداری، تلفات هیستریزیس یا میرایی معادل^۱ گفته می‌شود. به علاوه، شیب حلقه‌های هیستریزیس بیانگر سختی معادل^۲ می‌باشند.



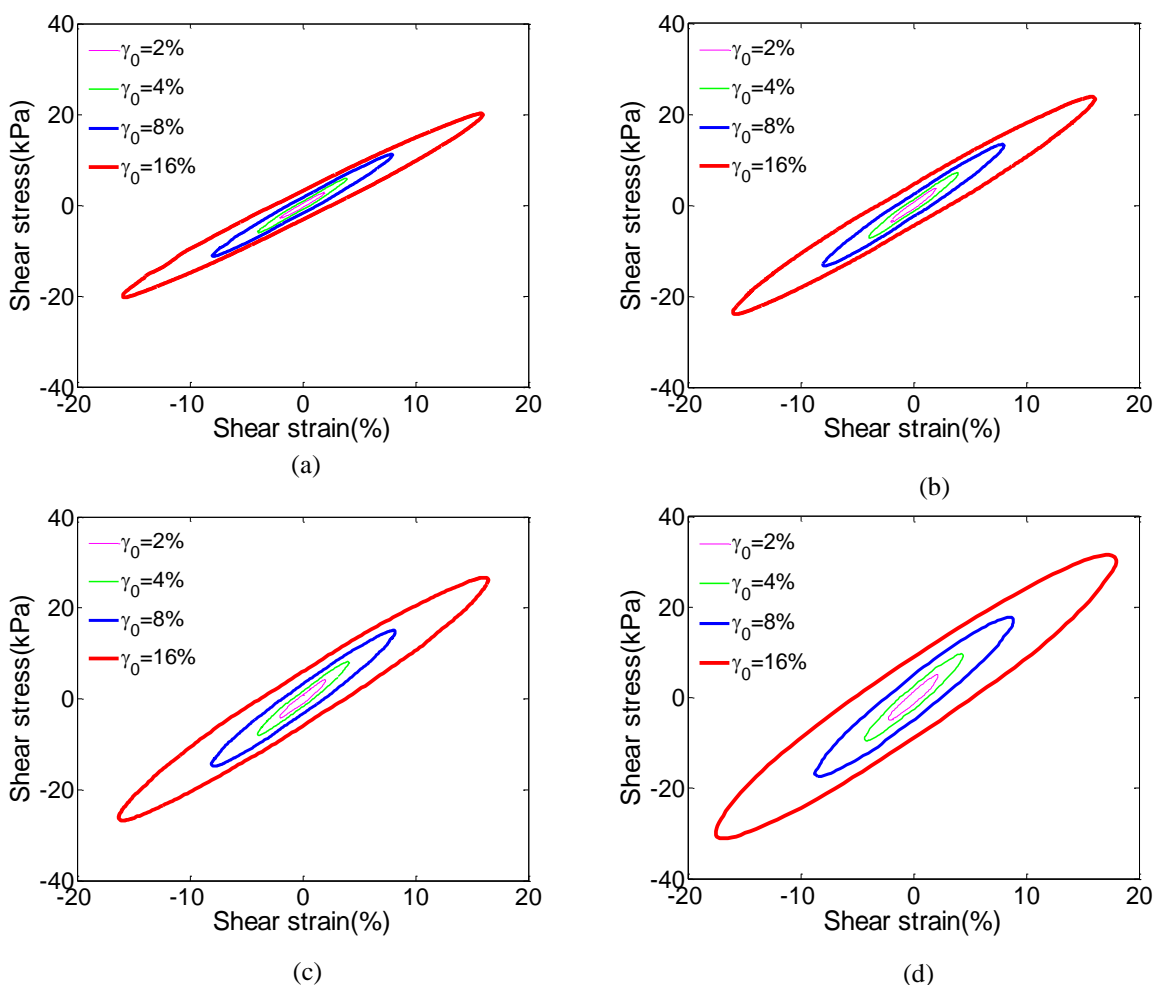
شکل ۳-۳- حلقه‌های هیستریزیس در غیاب میدان مغناطیسی ($B = 0 \text{ mT}$). (a) : $f = 0.1 \text{ Hz}$ ، (b) :

$f = 8 \text{ Hz}$ ، (d) ، $f = 3 \text{ Hz}$: (c) ، $f = 1 \text{ Hz}$

حلقه‌های هیستریزیس بیضی شکل مربوط به الاستومرهای مگنتورئولوژیکال در کرنش‌ها و فرکانس‌های مختلف در شکل ۳-۳ و شکل ۴-۳ به ترتیب در چگالی میدان مغناطیسی صفر میلی‌تسلا (بدون آهنربا) و ۲۷۲ میلی‌تسلا (چهار آهنربا در طرفین) رسم شده‌اند. این شکل‌ها اثر کرنش برشی را بر روی شکل‌های هیستریزیس بیضی شکل در فرکانس‌های مختلف نشان می‌دهند.

^۱ Equivalent Damping

^۲ Equivalent Stiffness

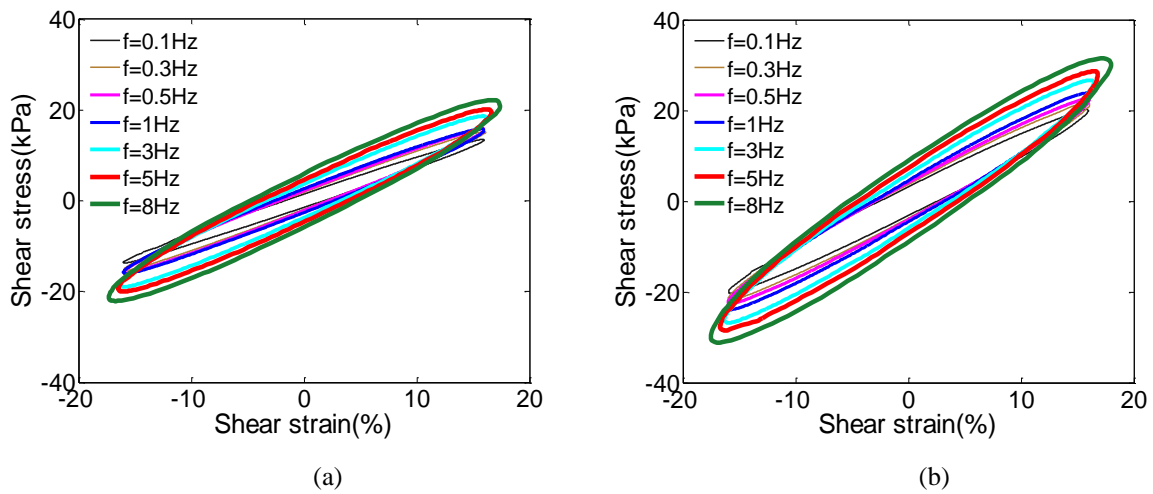


شکل ۳-۴- حلقه‌های هیستریزیس در میدان مغناطیسی ($B = 272 \text{ mT}$) . (a) : $f = 0.1 \text{ Hz}$ ، (b) :

$f = 1 \text{ Hz}$ ، (c) : $f = 3 \text{ Hz}$ ، (d) : $f = 8 \text{ Hz}$

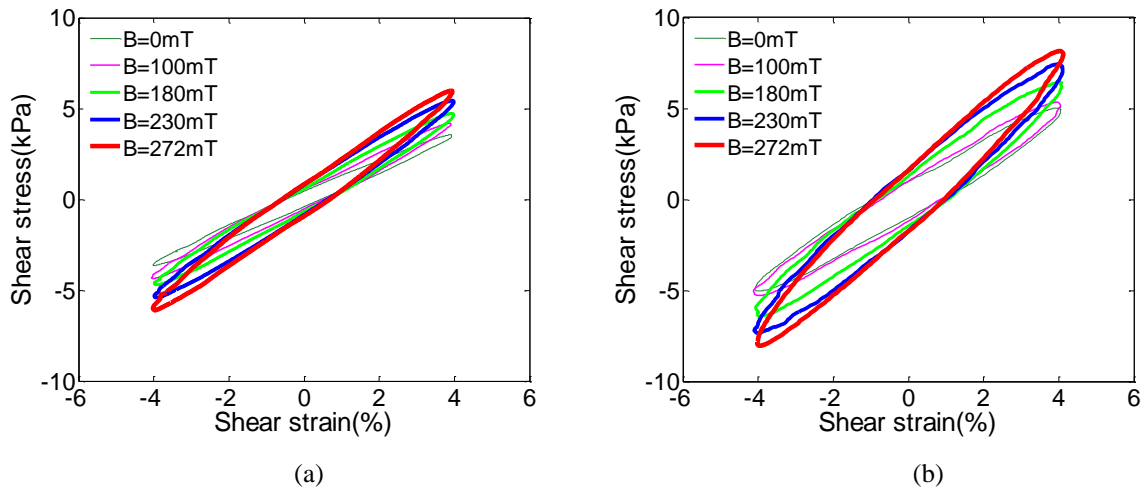
بر اساس این شکل‌ها، الاستومر مگنتورئولوژیکال یک رفتار متقارن به صورت هیستریزیس بیضی‌شکل در رژیم برشی در حضور و غیاب میدان مغناطیسی نشان می‌دهد. برای یک کرنش و فرکانس مشخص، مساحت حلقه‌های هیستریزیس (که نشان‌دهنده انرژی تلف شده در هر سیکل و یا میرایی معادل می‌باشد) در حضور میدان مغناطیسی بزرگ‌تر از زمانی است که میدان مغناطیسی بر روی سیستم اعمال نمی‌شود. هم‌چنین پاسخ تنش الاستومر مگنتورئولوژیکال برای یک کرنش و فرکانس مشخص، در حضور میدان مغناطیسی بزرگ‌تر از زمانی است که میدان مغناطیسی بر روی سیستم اعمال نمی‌شود. به عبارتی دیگر، با افزایش چگالی میدان مغناطیسی، شیب حلقه‌های هیستریزیس شکل (که نشان‌دهنده سختی معادل می‌باشند) افزایش می‌یابد. این حلقه‌های

هیستریزیس با تغییر فرکانس نیز تغییر می‌کند.



شکل ۳-۵- حلقه‌های هیستریزیس در فرکانس‌های مختلف و کرنش ۱۶ درصد. (a) : $B = 0mT$ ، (b) : z

$$.B = 272mT$$



شکل ۳-۶- حلقه‌های هیستریزیس در میدان‌های مغناطیسی مختلف در کرنش ۴ درصد. (a) : $f = 0.1 Hz$ ،

$$.f = 3Hz$$
 (b)

شکل ۳-۵ اثر فرکانس را بر روی حلقه‌های هیستریزیس در یک کرنش مشخص در میدان‌های صفر و ۲۷۲ میلی‌تسلا نشان می‌دهد. مطابق این شکل، شیب حلقه‌های هیستریزیس همانند مساحت آن‌ها با افزایش فرکانس، در حضور و غیاب میدان مغناطیسی افزایش می‌یابد. این افزایش در حضور میدان مغناطیسی با شدت بیشتری صورت می‌پذیرد (مطابق قسمت ب از شکل ۳-۵). برای نشان دادن

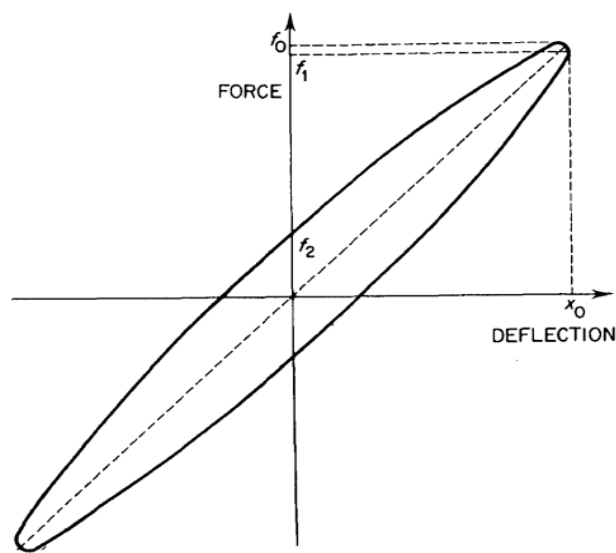
اثر مغناطیسی بر رفتار الاستومر مگنتورئولوژیکال، نمودارهای پاسخ تنش- کرنش در رژیم نوسان برشی در کرنش و فرکانس مشخص برای چگالی‌های مختلف میدان مغناطیسی از صفر تا ۲۷۲ میلی‌تسلا، در شکل ۳-۶ رسم شده است. مطابق این شکل، برای تمامی حالت‌ها، با افزایش چگالی میدان مغناطیسی، شیب و مساحت حلقه‌های هیستریزس افزایش می‌یابد.

۳-۴ رفتار ویسکوالاستیک و نمودارهای هیستریزس

۳-۴-۱ تاثیر میدان مغناطیسی بر روی رفتار الاستومر مگنتورئولوژیکال

برای آنالیز اثر میدان مغناطیسی بر روی خواص الاستومر مگنتورئولوژیکال شامل مدول ذخیره برشی و مدول تلفات، نمودارهای شکل ۳-۸ و شکل ۳-۹ ترسیم شده‌اند. مدول ذخیره برشی (G')، مدول تلفات (G'') و ضریب تلفات ($\eta = \frac{G''}{G'}$) از روی حلقه‌های هیستریزس به صورت زیر محاسبه می‌شوند

[۱۴۲].



Hysteresis loop

شکل ۳-۷- نمودار هیستریزس نیرو-جابه‌جایی در بارگذاری نوسانی مواد لاستیک مانند [۱۴۲].

اگر یک ماده لاستیک مانند تحت بارگذاری نیروی دینامیکی نوسانی قرار بگیرد، نمودار نیرو بر حسب جابه‌جایی به صورت یک هیستریزس مانند شکل ۳-۷ می‌باشد. مطابق شکل ۳-۷، پارامترهای

f_2 و f_1 ، f_0 ، x_0 به ترتیب بیشترین جابه‌جایی، بیشترین نیروی وارد شده به ماده، نیروی متناظر با بیشترین جابه‌جایی و نیروی متناظر با جابه‌جایی صفر می‌باشند. سختی دینامیکی به صورت نسبت بیشترین نیروی وارد شده به ماده به بیشترین جابه‌جایی مطابق معادله (۱-۳) تعریف می‌شود:

$$S = \frac{f_0}{x_0} \quad (1-3)$$

برای حالت نوسان برشی روابط نیرو-جابه‌جایی را به تنش-کرنش تبدیل می‌کنیم و مدول مختط

به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$G^* = \frac{f_0 h}{Ax_0} = S^* \frac{h}{a} \quad (2-3)$$

که A و h به ترتیب ضخامت نمونه آزمایش و مساحت تحت برش می‌باشند. مدول ذخیره برشی

G' و مدول میرایی G'' به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$G' = \frac{f_1 h}{Ax_0} \quad (3-3)$$

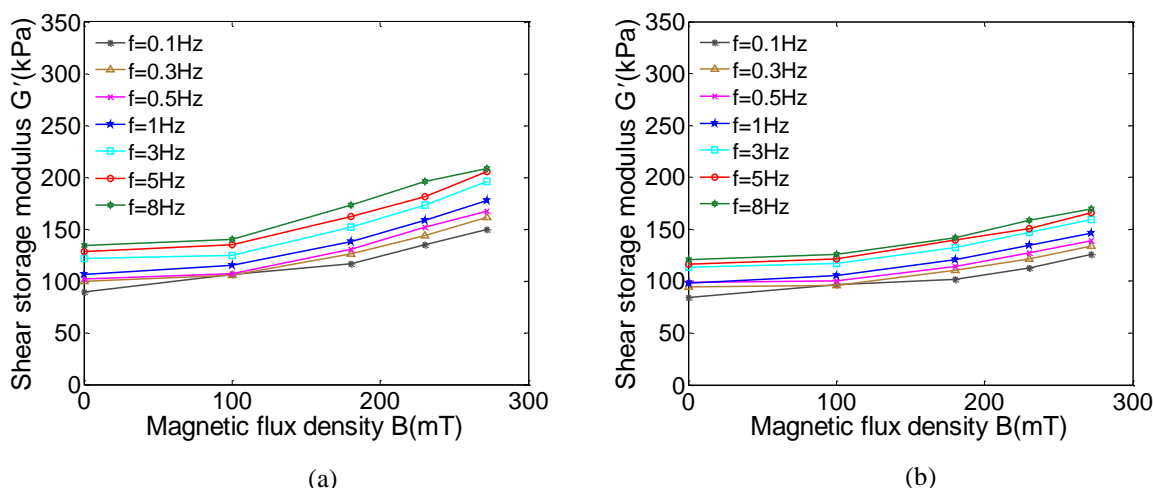
$$G'' = \frac{f_2 h}{Ax_0} \quad (4-3)$$

و در نهایت ضریب تلفات نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\zeta = \tan \delta = \frac{f_2}{f_1} \quad (5-3)$$

بنابراین طبق معادلات (۱-۳) تا (۵-۳) مدول ذخیره برشی G' ، مدول میرایی G'' و ضریب تلفات

الاستومر مگنتورئولوژیکال برای آزمایش نوسان برشی محاسبه می‌شوند.

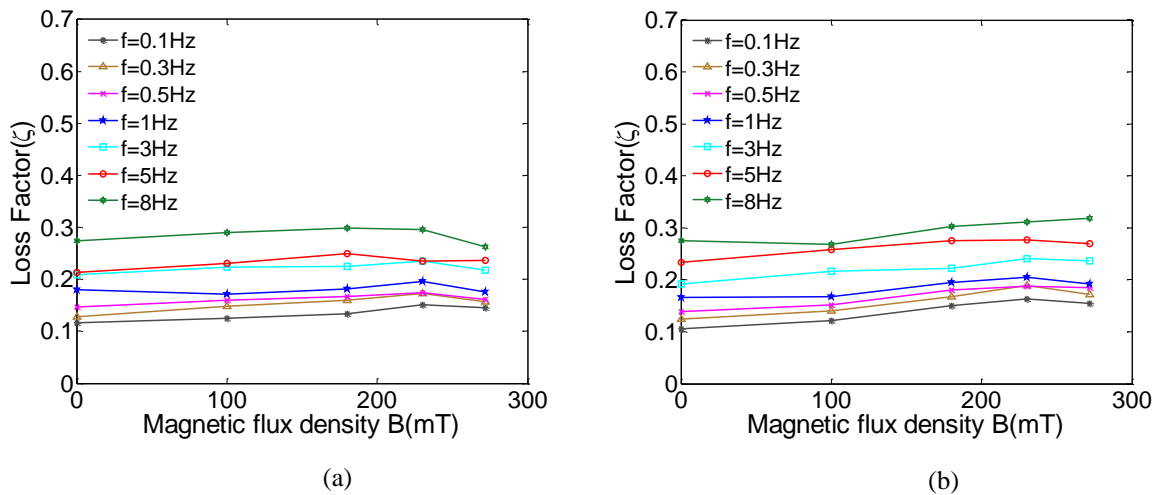


شکل ۳-۸- مدول ذخیره برشی بر حسب میدان مغناطیسی در فرکانس‌های مختلف. (a) :

$$\gamma_0 = 16\% \text{ (b)}, \gamma_0 = 4\%$$

با افزایش میدان مغناطیسی، ذرات آهنی در راستای میدان جهت گیری می‌کنند و در نتیجه در مقابل کرنش برشی تحریک ورودی، ممانعت به عمل می‌آورند. این تقویت ساختار شبکه ذرات آهنی باعث افزایش مدول ذخیره برشی و ظرفیت میرایی الاستومر مگنتورئولوژیکال می‌گردد. این افزایش برای تمام فرکانس‌های اعمالی تقریباً یکسان بوده و مقدار مدول ذخیره برشی برای بیشترین فرکانس، بزرگتر است.

مطابق شکل ۳-۸، مدول ذخیره برشی در تمام فرکانس‌ها و کرنش‌ها، با افزایش میدان مغناطیسی افزایش می‌یابد. شکل ۳-۹ اثر میدان مغناطیسی را بر روی ضریب تلفات در فرکانس‌ها و کرنش‌های مختلف نشان می‌دهد. مطابق این شکل، ضریب تلفات با افزایش میدان مغناطیسی تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابد. این افزایش در کرنش‌های بیشتر مشخص‌تر می‌باشد. زیرا با افزایش کرنش، ذرات مغناطیسی کمی از راستای میدان خارج می‌شوند و باعث تضعیف شبکه ذرات مغناطیسی و در نتیجه کاهش مدول ذخیره برشی می‌گردد ($\eta \uparrow = \frac{G''}{G' \downarrow}$). هم چنین با افزایش کرنش تحریک، زمان بیشتری در یک رفت و برگشت نوسان برشی برای تلف شدن انرژی ورودی به گرما (میرایی) فراهم می‌شود ($G'' \uparrow$).



شکل ۳-۹- ضریب تلفات بر حسب میدان مغناطیسی در فرکانس‌های مختلف. (a) : $\gamma_0 = 4\%$ ، (b) :

$\gamma_0 = 16\%$

۳-۴-۲ تاثیر کرنش برشی بر روی رفتار الاستومر مگنتورئولوژیکال

یکی از خواص ویسکوالاستیک الاستومرهای دارای فیلر^۱، معروف به اثر فلچر-جنت^۲ [۱۳۳] می‌باشد که اثر پین^۳ [۱۳۴] نیز نامیده می‌شود. این اثر به صورت کاهش اندازه مدول ذخیره با افزایش کرنش تعریف می‌شود. یک تعبیر فیزیکی پشت این اثر، مربوط به شکست و تشکیل^۴ ساختارهای شبکه فیلر^۵ می‌باشد (که فیلر در الاستومرهای مگنتورئولوژیکال شبکه ذرات مغناطیسی می‌باشد). با افزایش کرنش در یک میدان مغناطیسی مشخص، شبکه زنجیره‌های ذرات آهنی در راستای میدان در معرض شکست بیشتری نسبت به حالت بدون میدان، هستند. با افزایش کرنش، نیروی مغناطیسی بین ذرات آهنی که در داخل ماتریس جای گرفته‌اند، کاهش می‌یابد. بنابراین، با افزایش کرنش، مدول ذخیره برشی الاستومر مگنتورئولوژیکال کاهش می‌یابد که در نتایج آزمایشگاهی نیز مشاهده می‌گردد. به عبارت دیگر الاستومر مگنتورئولوژیکال رفتار کرنش-نرم‌شوندگی^۶ از خود نشان می‌دهد.

^۱ Filled-Rubber

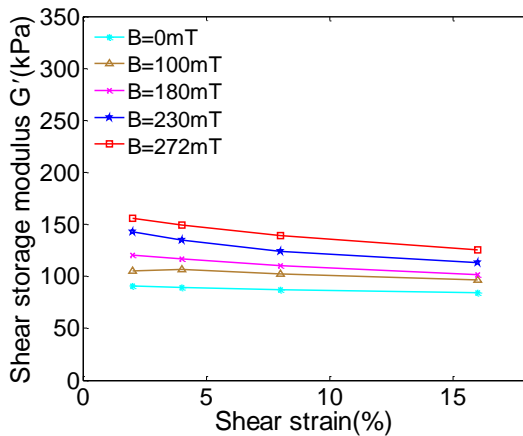
^۲ Fletcher-Gentt

^۳ Payne

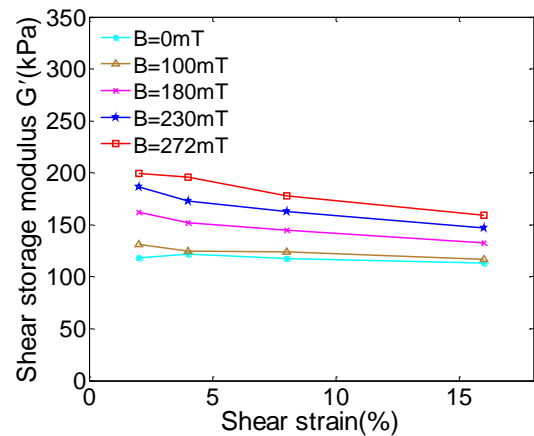
^۴ Destruction-reformation

^۵ Filler network

^۶ Strain-Softening Effect



(a)



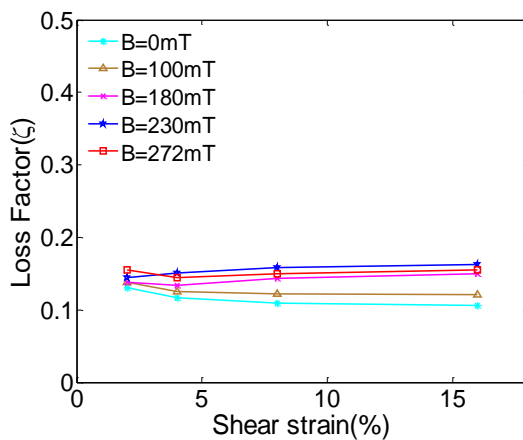
(b)

شکل ۳-۱۰- مدول ذخیره برشی بر حسب کرنش در میدان‌های مغناطیسی مختلف. (a) : $f = 0.1 \text{ Hz}$ ، (b) :

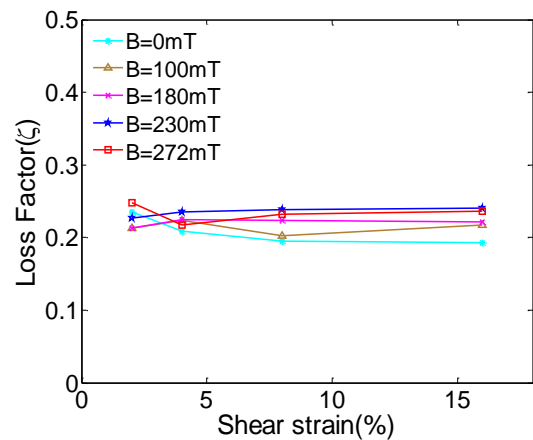
$$f = 3 \text{ Hz}$$

رفتار کرنش-نرم‌شوندگی در نمودارهای هیستریزس نی دیده می‌شود. بر اساس شکل ۳-۳ و شکل

۳-۴، با افزایش کرنش، شیب حلقه‌های هیستریزس کاهش می‌یابد.



(a)



(b)

شکل ۳-۱۱- ضریب تلفات بر حسب کرنش در میدان‌های مغناطیسی مختلف. (a) : $f = 0.1 \text{ Hz}$ ، (b) :

$$f = 3 \text{ Hz}$$

شکل ۳-۱۰ اثر کرنش را بر روی مدول ذخیره برشی الاستومر مگنتورئولوژیکال در میدان‌های

مغناطیسی مختلف بیان می‌کند. با افزایش کرنش، مدول ذخیره برشی تقریباً به صورت خطی در

تمامی فرکانس‌ها کاهش می‌یابد. این کاهش در میدان‌های مغناطیسی بزرگ‌تر، مشخص‌تر است.

مطابق شکل ۳-۱۰ در غیاب میدان مغناطیسی، مدول ذخیره برشی با افزایش کرنش تقریباً ثابت باقی مانده است. کاهش مدول ذخیره برشی با افزایش کرنش را می‌توان ناشی از کاهش نیروی مغناطیسی بین ذرات آهنی و نهایتاً افزایش فاصله این ذرات دانست. شکل ۳-۱۱ اثر کرنش را بر روی ضریب تلفات الاستومر مگنتورئولوژیکال برای میدان‌های مغناطیسی مختلف نشان می‌دهد. مطابق این شکل، ضریب تلفات مستقل از کرنش بوده و به طور مؤثر با افزایش کرنش تغییر نمی‌کند.

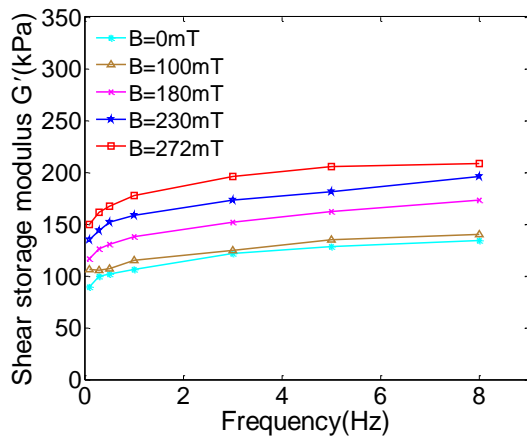
۳-۴-۳ تاثیر نرخ کرنش بر روی رفتار الاستومر مگنتورئولوژیکال

خواص رئولوژیک و مکانیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال علاوه بر کرنش، تابع نرخ کرنش (فرکانس) می‌باشد. بنابراین رفتار الاستومرهای مگنتورئولوژیکال وابسته به نرخ کرنش^۱ است. از نظر فیزیکی با افزایش نرخ کرنش، به طور کلی مواد ویسکوالاستیک فرصتی برای اتمام تغییر شکل ناشی از تحریک ورودی ندارند. در واقع قبل از اتمام زمان رهایی از تنش^۲، ماده تحت کرنش بعدی قرار می‌گیرد که این باعث افزایش مدول ذخیره برشی و ضریب تلفات می‌گردد. تغییر شکل تغییرات مدول ذخیره برشی بر حسب فرکانس در میدان‌های مغناطیسی مختلف در شکل ۳-۱۲ نشان داده شده است. مطابق این شکل، مدول ذخیره برشی با افزایش فرکانس افزایش می‌یابد. به عبارتی دیگر، الاستومرهای مگنتورئولوژیکال از خود رفتار نرخ کرنش-سخت‌شوندگی^۳ نشان می‌دهند.

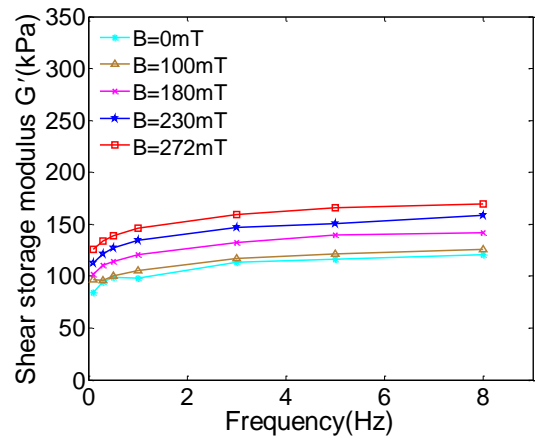
^۱ *Stain-Rate Dependent*

^۲ *Relaxation time*

^۳ *Strain-Rate Stiffening*



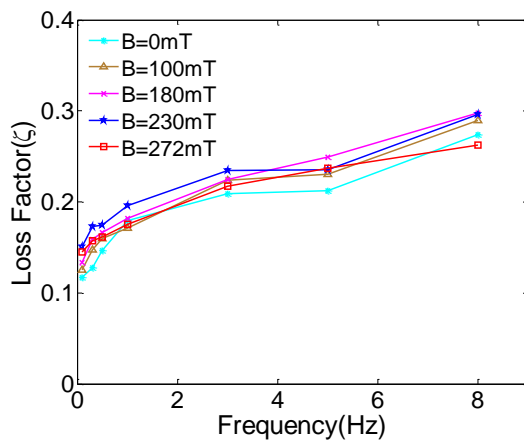
(a)



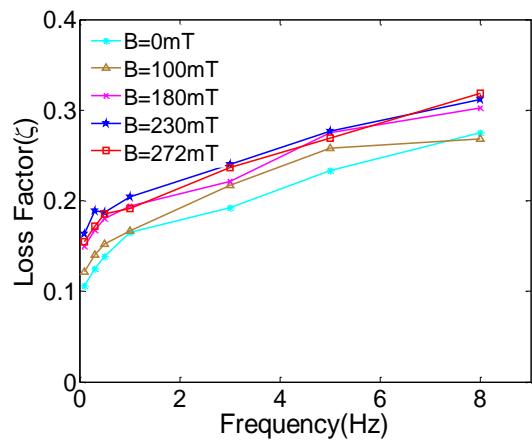
(b)

شکل ۳-۱۲- مدول ذخیره برشی بر حسب فرکانس در میدان‌های مغناطیسی مختلف. $\gamma_0 = 4\%$ ، (b) :

$\gamma_0 = 16\%$



(a)



(b)

شکل ۳-۱۳- ضریب تلفات بر حسب فرکانس در میدان‌های مغناطیسی مختلف. $\gamma_0 = 4\%$ ، (b) : $\gamma_0 = 16\%$.

تغییرات مدول ذخیره برشی بر حسب فرکانس را به دو ناحیه تقسیم می‌کنیم: ناحیه فرکانس‌های

کمتر از ۱ و ناحیه فرکانس‌های بیشتر از ۱. در ناحیه بین ۱/۱ هرتز تا ۱ هرتز، مدول ذخیره برشی به

صورت نمایی افزایش می‌یابد. در ناحیه بین ۱ هرتز تا ۸ هرتز مدول ذخیره برشی تقریباً به صورت

خطی با افزایش فرکانس افزایش می‌یابد. بنابراین، نتیجه می‌گیریم که مدول ذخیره برشی

الاستومرهای مگنتورئولوژیکال به صورت یک تابع توانی با نمای کمتر از ۱ وابسته به فرکانس است. با

این وجود، در اکثر مطالعات انجام شده بر روی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال، تغییرات مدول ذخیره برشی را در ناحیه خطی عموماً بین ۱ هرتز تا ۱۰ هرتز در نظر می‌گیرند. [۱۵، ۷۹ و ۱۳۵].

شکل ۳-۱۳ تغییرات ضریب تلفات بر حسب فرکانس را در میدان‌های مغناطیسی مختلف نمایش می‌دهد. همانند مدول ذخیره برشی، ضریب تلفات نیز رفتار مشابهی در فرکانس‌های کمتر و بیشتر از ۱ هرتز نشان می‌دهد. ضریب تلفات تقریباً به صورت خطی با افزایش فرکانس، برای فرکانس‌های بیشتر از ۱ افزایش می‌یابد در حالی که در فرکانس‌های کمتر از ۱ هرتز، این روند افزایش سریع‌تر بوده و تقریباً به صورت نمایی افزایش می‌یابد.

فصل چهارم

مدل سازی الاستومر مگنتورئولوژیکال

۴-۱ مقدمه

پیش بینی رفتار مکانیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال در سال های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. رفتار ویسکوالاستیک مواد لاستیک مانند از جمله الاستومرهای مگنتورئولوژیکال عموماً به صورت خطی نمی باشد (مخصوصاً در کرنش های بسیار بالا)؛ به ویژه در این مواد تنش فقط تابع کرنش نیست. در کرنش های کمتر این رفتار غیرخطی بیشتر در فشار و کشش مشاهده می شود تا در رژیم برشی. طبق مطالعات پیشین، رفتار دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال در فشار و کشش نیز مشابه رژیم برشی بوده و علاوه بر میدان مغناطیسی تابع کرنش و نرخ کرنش می باشد. اخیراً مدل های بسیاری، این ویژگی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال را پیش بینی کرده اند [۱۱۵، ۱۱۷ و ۱۴۰].

۴-۲ مدل سازی الاستومر مگنتورئولوژیکال در حالت نوسان برشی

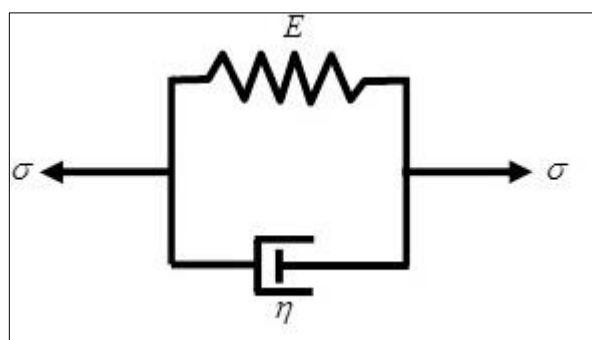
۴-۲-۱ مدل تعمیم یافته ماکسول

نتایج آزمایشگاهی نشان دادند که رفتار الاستومرهای مگنتورئولوژیکال در بارگذاری نوسانی- برشی تحت میدان مغناطیسی علاوه بر اندازه میدان مغناطیسی، به کرنش و فرکانس بارگذاری نیز وابسته می باشند. با افزایش فرکانس ورودی، ضریب تلفات و مدول ذخیره افزایش می یابند. به علاوه، الاستومرهای مگنتورئولوژیکال رفتار کرنش-نرم شوندگی^۱ از خود نشان می دهد. به عبارتی دیگر، با افزایش کرنش، ضریب تلفات و مدول ذخیره برشی کاهش می یابد. در کرنش های بسیار زیاد رفتار کرنش-سخت شوندگی^۲ نیز نمود پیدا می کند [۱۲۱].

جهت مدل سازی رفتار دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال، مدل ماکسول تعمیم یافته گزینه مناسبی در ناحیه خطی می باشد. مدل های رایج دیگر شامل مدل مشتق کسری، مدل کلوین-ویت و مدل سه پارامتره استاندارد می باشند. به طور کلی مدل های مشتق کسری، در فضای وابسته به زمان

^۱ Strain-softening^۲ Strain-stiffening

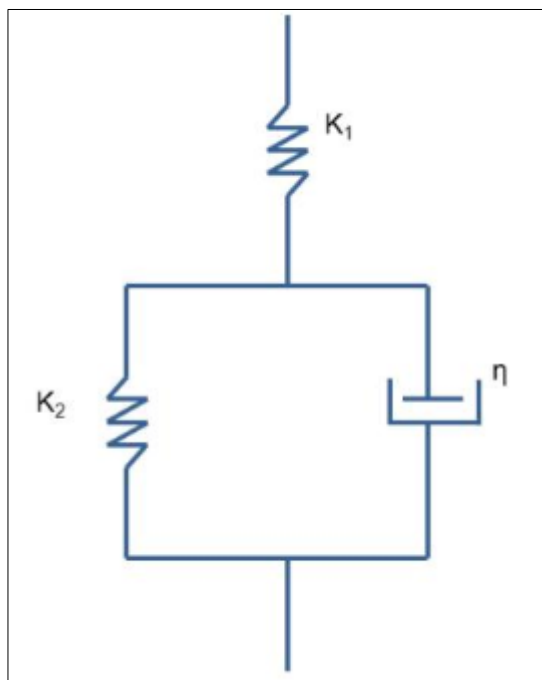
رفتار ماده را پیش‌بینی می‌کنند که به دلیل پیچیدگی محاسبات ریاضی در این حالت، از به کار بردن این مدل صرف‌نظر می‌کنیم. مدل کلوین-ویت یکی از مدل‌های بسیار پرکاربرد در زمینه رفتار لاستیک مانند می‌باشد که وابستگی رفتار ماده به فرکانس را تا حدودی در نظر می‌گیرد. مدل کلوین-ویت شامل یک فنر الاستیک مستقل از فرکانس می‌باشد که با یک جزء میرایی ویسکوز موازی می‌شود (مراجعه شود به شکل ۴-۱). به دلیل حضور جزء میرایی ویسکوز در این مدل، هم مقدار سختی و هم مقدار میرایی را در فرکانس‌های بالا بسیار بیش‌تر از حد مورد انتظار پیش‌بینی می‌کند. مدل سه پارامتره استاندارد^۱ عموماً برای مدل سازی رفتار ویسکوالاستیک مواد لاستیک مانند استفاده می‌شود. مطابق شکل ۴-۲ مدل سه پارامتره استاندارد از مجموع یک جز فنری و مدل کلاسیک کلوین-ویت تشکیل می‌گردد. جز فنری جهت بهبود عملکرد مدل کلاسیک کلوین-ویت تحت بارهای ناگهانی می‌باشد.



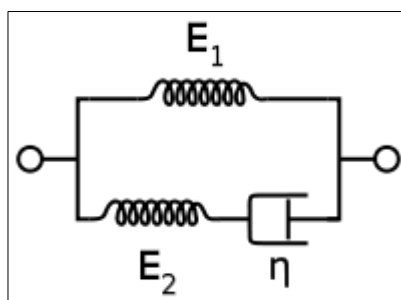
شکل ۴-۱- مدل کلوین-ویت.

با اضافه شدن یک جز فنری به صورت سری به جزء میرایی مدل کلوین-ویت، به مدل سه پارامتری تعمیم‌یافته ماکسول می‌رسیم (شکل ۴-۳). این مدل، اثر افزایش فرکانس را برای سختی به خوبی پیش‌بینی می‌کند، اما برای میرایی اثر فرکانس را در نظر نمی‌گیرد.

^۱ Three parameters standard model



شکل ۲-۴- مدل سه پارامتره استاندارد.

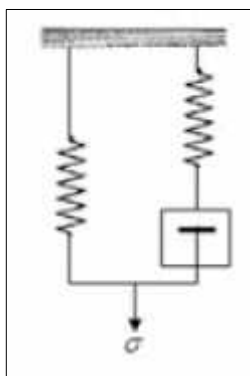


شکل ۳-۴- مدل سه پارامتری تعمیم یافته ماکسول.

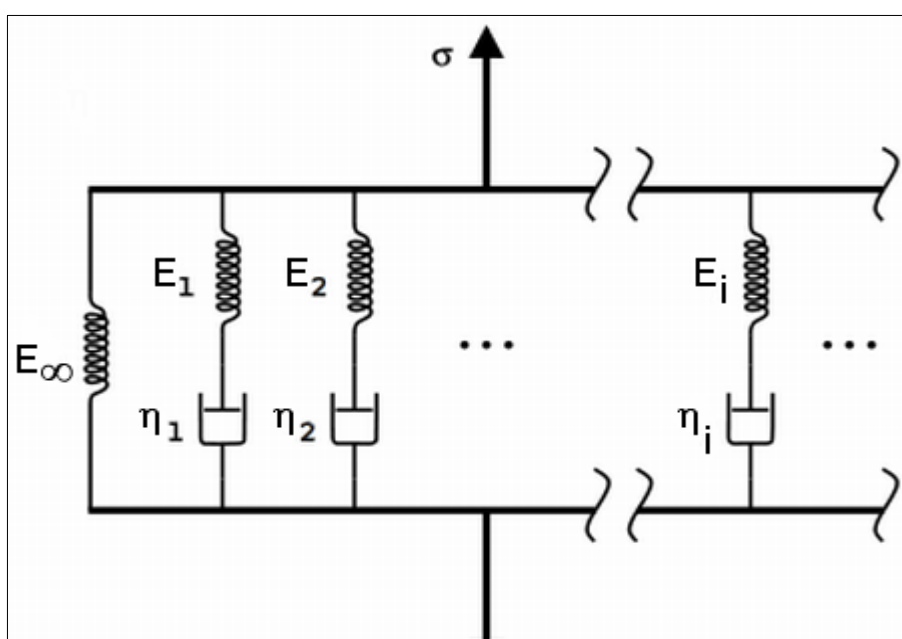
در این پژوهش، مطابق شکل ۴-۵ ابتدا رفتار دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال را به کمک مدل تعمیم یافته ماکسول^۱ (مجموع چند شاخه از مدل سه پارامتری تعمیم یافته ماکسول) بررسی می کنیم و در ادامه به بررسی سایر مدل های دیگر می پردازیم. مدل تعمیم یافته ماکسول در مد اول، همانند مدل زنر^۲ می باشد که در شکل ۴-۴ نمایش داده شده است. با افزایش مد در این مدل، وابستگی سختی و میرایی به فرکانس بهتر پیش بینی می شود.

^۱ Generalized Maxwell model

^۲ Zener Model



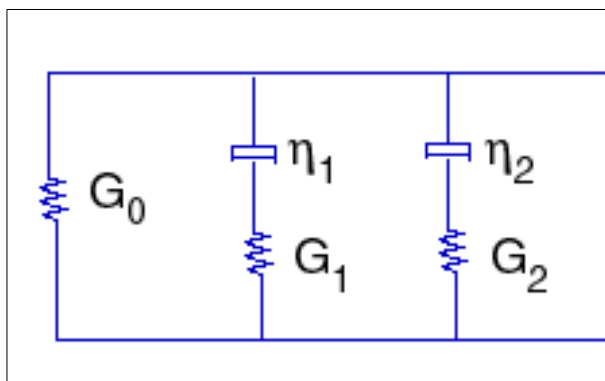
شکل ۴-۴- مدل زنر.



شکل ۴-۵- مدل عمومی تعمیم یافته ماکسول.

۴-۲-۲ مدل تعمیم یافته ماکسول با دو شاخه

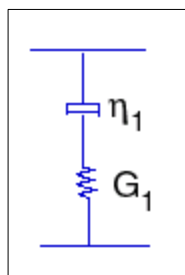
جهت پیش بینی رفتار ویسکوالاستیک الاستومرهای مگنتورئولوژیکال در مد نوسانی-برشی، از مدل تعمیم یافته ماکسول در مدهای دوم، سوم و چهارم استفاده کرده ایم. برای مثال شماتیک مدل تعمیم یافته ماکسول در مد دوم، در شکل ۴-۵ نمایش داده شده است.



شکل ۴-۶ - شماتیک مدل تعمیم یافته ماکسول در مد دوم.

جهت به دست آوردن معادله تعمیم یافته ماکسول در مدهای مختلف، در ابتدا معادله مدل

ماکسول ساده را به صورت زیر به دست می آوریم:



شکل ۴-۷- مدل ساده ماکسول.

$$\tau + \lambda_i \dot{\tau} = \eta_i \dot{\gamma}$$

(۱-۴)

(λ) زمان رهایی از تنش می باشد که از رابطه زیر بدست می آید:

$$\lambda = \frac{\eta}{G}$$

(۲-۴)

η میرایی ویسکوز و G مدول ذخیره می باشد. کرنش ورودی را کرنش ورودی مختلط γ^* ، تنش

خروجی را تنش خروجی مختلط τ^* و مدول برشی مختلط را G^* فرض می کنیم.

بنابراین خواهیم داشت:

$$\tau^* = G^* \gamma^* \quad (3-4)$$

$$G^* = G' + iG'' \quad (4-4)$$

G' مدول ذخیره برشی و G'' مدول تلفات برشی تعریف می‌شوند. کرنش ورودی مختلط γ^* را به صورت زیر فرض نمایید:

$$\gamma^* = \gamma_0 e^{i\omega t} \quad (5-4)$$

γ_0 دامنه کرنش ورودی و ω فرکانس زاویه ای تحریک می‌باشد. با قرار دادن معادلات (4-4) و (5-4) در داخل معادله (3-4)، G' مدول ذخیره برشی و G'' مدول تلفات به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$G' = \frac{\lambda \eta \omega^2}{1 + \lambda^2 \omega^2} \quad (6-4)$$

$$G'' = \frac{\eta \omega}{1 + \lambda^2 \omega^2} \quad (7-4)$$

به طور مشابه برای معادله عمومی تعمیم یافته ماکسول برای n شاخه (مراجعه شود به شکل 5-4) G' مدول ذخیره برشی و G'' مدول تلفات به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$G' = G_0 + \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i \eta_i \omega^2}{1 + \lambda_i^2 \omega^2} \quad (8-4)$$

$$G'' = \sum_{i=1}^n \frac{\eta_i \omega}{1 + \lambda_i^2 \omega^2} \quad (9-4)$$

جهت بدست آوردن پاسخ پایا تنش¹ الاستومر مگنتورئولوژیکال در مد برشی، فرض کنید کرنش برشی ورودی به صورت یک ورودی سینوسی مانند زیر باشد:

¹ Steady state response

$$\gamma(t) = \gamma_0 \sin(\omega t) \quad (10-4)$$

بنابراین پاسخ پایا تنش ناشی از کرنش برشی ورودی سینوسی (که از اکچویتور^۱ به الاستومر مگنتورئولوژیکال وارد می شود) به صورت زیر می باشد:

$$\tau_{Model} = \gamma_0 \sqrt{G'^2 + G''^2} \sin(\omega t + \varphi) \quad (11-4)$$

φ اختلاف فاز بین تنش و کرنش می باشد که نشان دهنده ویسکوالاستیک بودن الاستومر مگنتورئولوژیکال می باشد به صورت زیر بدست می آید:

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{G''}{G'}\right) \quad (12-4)$$

۴-۲-۲-۱ تعیین پارامترهای مدل تعمیم یافته ماکسول در مد دوم

تست های نوسان برشی بر روی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال در هفت فرکانس شامل مقادیر ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۱، ۳، ۵ و ۸ هرتز، در چهار کرنش برشی شامل مقادیر ۲، ۴، ۸ و ۱۶ درصد و در پنج میدان مغناطیسی شامل مقادیر ۰، ۱۰۰، ۱۸۰، ۲۲۰ و ۲۷۲ میلی تسلا انجام شده است. با توجه به شکل ۴-۶ و معادله (۴-۱۱)، مدل پیشنهادی جهت پیش بینی پاسخ تنش الاستومر مگنتورئولوژیکال نیاز به محاسبه مدول ذخیره برشی (G') و مدول میرایی (G'') و نیز نیاز به محاسبه پنج پارامتر $G_0, \lambda_1, \eta_1, \lambda_2, \eta_2$ دارد. جهت به حداقل رساندن اختلاف بین مقادیر تنش آزمایشگاهی و مقادیر تنش به دست آمده از مدل، از روش های بهینه سازی از جمله روش کمترین مربعات و الگوریتم ژنتیک در جعبه بهینه سازی نرم افزار متلب^۲ استفاده شده است. بدین ترتیب، پنج پارامتر ذکر شده در مدل پیشنهادی از طریق بهینه سازی تابع خطا که در زیر تعریف شده است، به دست می آیند:

^۱ Actuator

^۲ Matlab optimization toolbox (R2013a)

$$f_{\min} = \sum_{freq=0.1Hz}^{8Hz} \sum_{\gamma_0=2\%}^{16\%} (\tau_{Model} - \tau_{Exp})^2 \quad (13-4)$$

با توجه به معادله (۱۳-۴) انجام عملیات بهینه سازی در هر میدان مغناطیسی شامل مقادیر ۰، ۱۰۰، ۱۸۰، ۲۲۰ و ۲۷۲ میلی تسلا، در تمام فرکانس ها و کرنش ها انجام می شود. بنابراین پارامترهای (منظور ضرایب مدل می باشد مانند $G_0, \lambda_1, \eta_1, \lambda_2, \eta_2$) به دست آمده بر خلاف مدل های رایج، فقط تابع میدان مغناطیسی می باشند. پس از آن، با استفاده از آنالیز رگرسیون^۱، رابطه ای بین این پنج پارامتر با میدان مغناطیسی به دست می آید. در جدول ۴-۱ پارامترهای مدل تعمیم یافته ماکسول در مد دوم ارائه شده است. میزان خطا (مربع اختلاف)^۲ از فرمول زیر محاسبه گردیده است:

$$RMS\ error = \sum_{freq=0.1Hz}^{8Hz} \sum_{\gamma_0=2\%}^{16\%} (\tau_{Model} - \tau_{Exp})^2 \quad (14-4)$$

جدول ۴-۱- پارامترهای تابع میدان در مدل تعمیم یافته ماکسول در مد دوم.

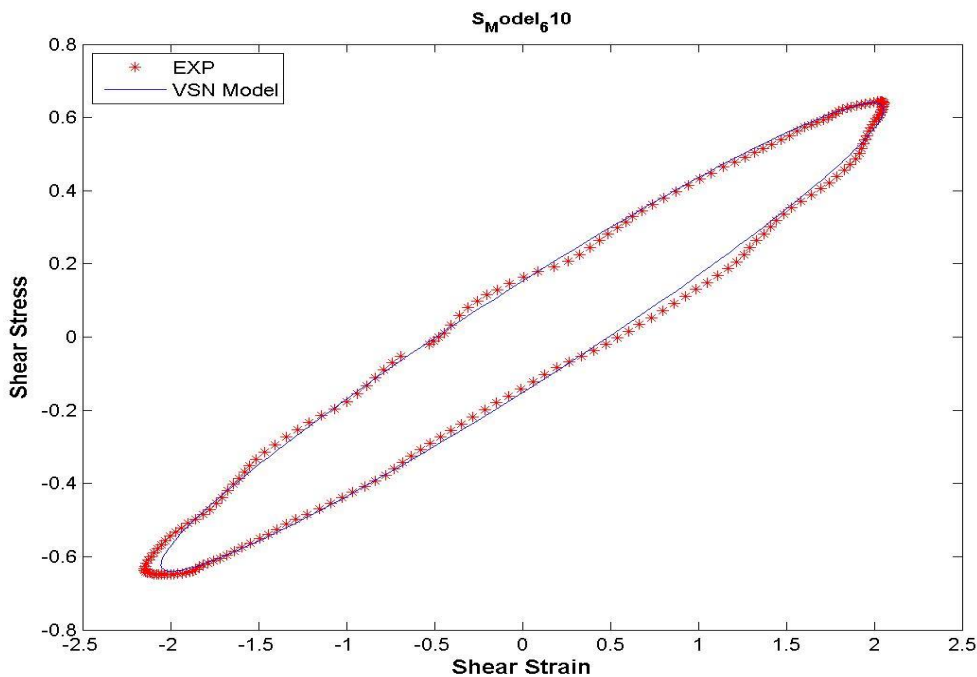
مد دوم	۰ mT	۱۰۰ mT	۱۸۰ mT	۲۳۰ mT	۲۷۲ mT
میزان خطا	۹۵/۵۰	۸۰/۳۲	۲۸/۹۲	۲۹/۳۶	۴۰/۵۱
G_0 (kPa)	۰/۱۹۴	۰/۱۹۶	۰/۱۹۹	۰/۲۰۱۲	۰/۲۴
η_1 (kPa.s)	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۴۹	۰/۰۰۵۲	۰/۰۰۵۴
λ_1 (s)	۰/۰۱۹۷	۰/۰۲۷۴	۰/۰۲۸۹	۰/۰۲۹۹	۰/۰۳۰۰
η_2 (kPa.s)	۰/۰۸۴۶	۰/۱۰۴۳	۰/۱۹۸۰	۰/۲۵۱۰	۰/۲۶۱۰
λ_2 (s)	۱/۳۳۰۵	۱/۳۹۳۳	۲/۳۳۰۱	۲/۳۸	۲/۴۲۰

با جایگذاری پارامترهای تابع میدان در معادله مدل تعمیم یافته ماکسول در مد دوم، پاسخ مدل بر روی پاسخ آزمایشگاهی در نمودارهای ترسیم شده اند. با توجه به شکل ۴-۹ و شکل ۴-۱۱ در

^۱ Regression Analysis (Curve Fitting Methods)

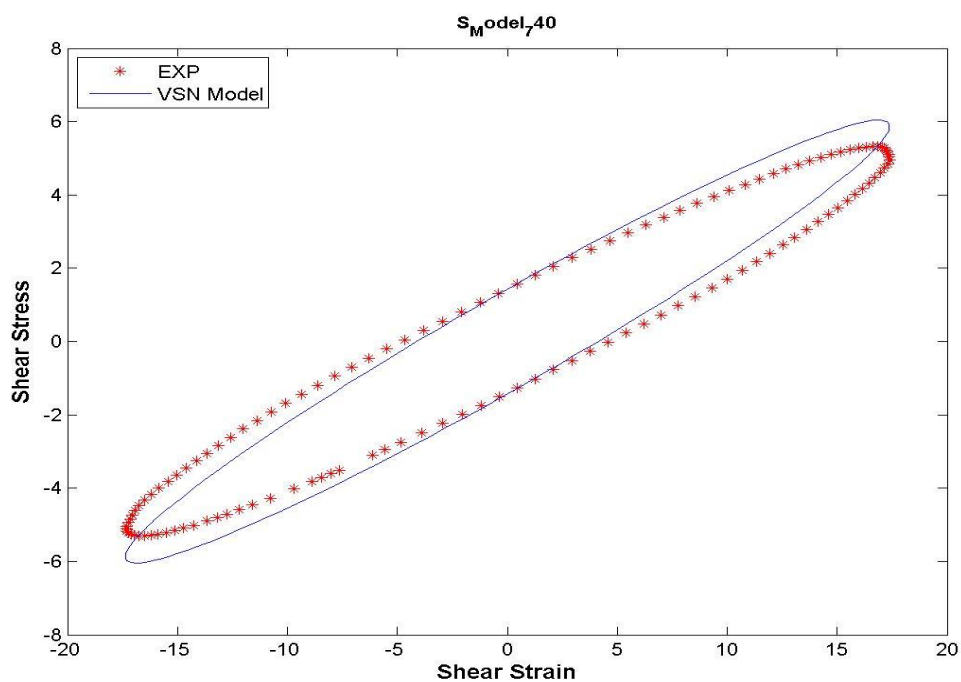
^۲ RMS Error

فرکانس های بالا انطباق مناسبی بین نتایج آزمایشگاهی و پاسخ مدل تعمیم یافته ماکسول در مد دوم صورت نگرفته است. دلیل این امر رفتار غیرخطی الاستومرهای مگنتورئولوژیکی که ناشی از تابعیت غیرخطی خواص ویسکوالاستیک این ماده به نرخ کرنش و کرنش می باشد. به طور مثال مدول ذخیره برشی الاستومر مگنتورئولوژیکی مورد آزمایش در بازه فرکانسی بین ۰,۱ هرتز تا ۸ هرتز کاملاً خطی بوده و مدل تعمیم یافته ماکسول در مد دوم به خوبی رفتار الاستومر مگنتورئولوژیکی مورد آزمایش را پیش بینی نمی کند. با توجه به شکل ۴-۸ و شکل ۴-۱۰ اگرچه انطباق مناسبی بین نتایج آزمایشگاهی و پاسخ مدل تعمیم یافته ماکسول در مد دوم صورت گرفته است، اما این مدل نمی تواند رفتار دینامیکی الاستومر مگنتورئولوژیکی را در یک بازه پیوسته نسبتاً وسیع، به خوبی پیش بینی کند.



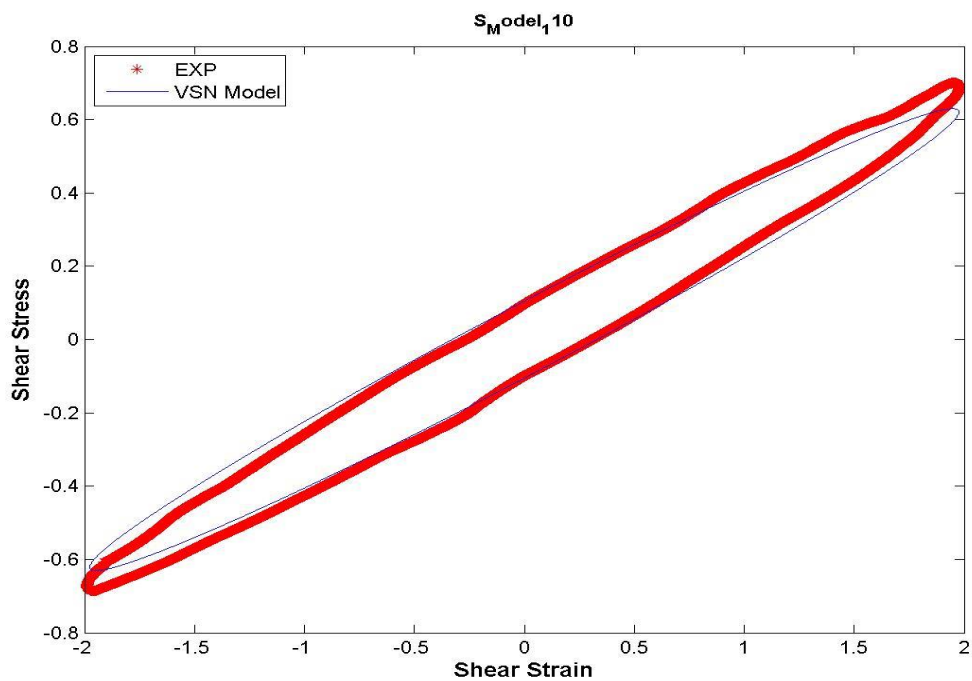
شکل ۴-۸- پاسخ مدل تعمیم یافته ماکسول با دو شاخه (مد دوم) در میدان $(B = 0 \text{ mT})$ ، کرنش ۲ درصد و

فرکانس ۵ هرتز.



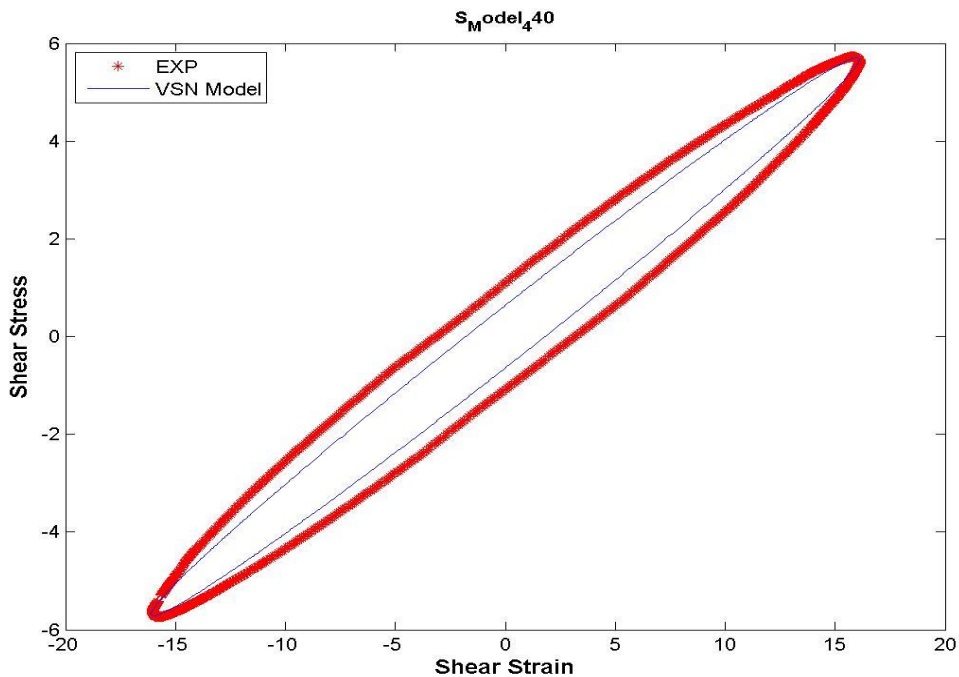
شکل ۴-۹- پاسخ مدل تعمیم یافته ماکسول با دو شاخه در میدان $(B = 0 \text{ mT})$ ، کرنش ۱۶ درصد و فرکانس ۸

هرتز.



شکل ۴-۱۰- پاسخ مدل تعمیم یافته ماکسول با دو شاخه در میدان $(B = 272 \text{ mT})$ ، کرنش ۲ درصد و فرکانس

۱/، هرتز.



شکل ۴-۱۱- پاسخ مدل تعمیم یافته ماکسول با دو شاخه در میدان ($B = 272 \text{ mT}$)، کرنش ۲ درصد و فرکانس

۸ هرتز.

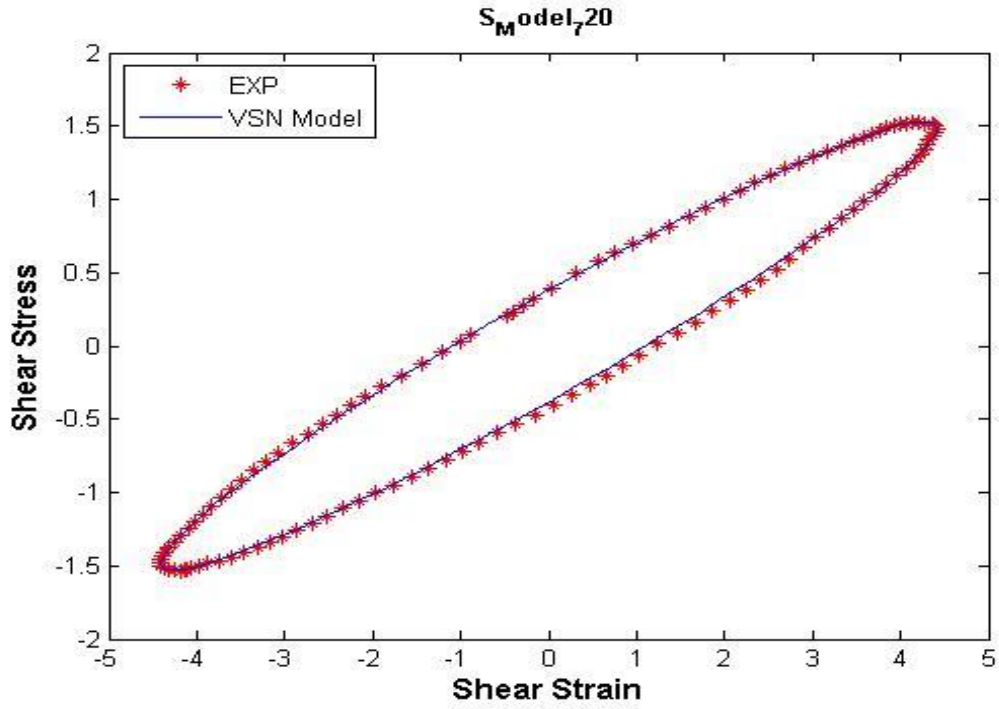
۴-۲-۳ مدل گسترش یافته ماکسول با سه شاخه

به طور مشابه، با جایگذاری پارامترهای تابع میدان در معادله مدل تعمیم یافته ماکسول در مد سوم، نتایج پاسخ تنش مدل، پارامترهای مدل تعمیم یافته ماکسول با سه شاخه (جدول ۴-۲)، در شکل ۴-۱۲، شکل ۴-۱۳، شکل ۴-۱۴ و شکل ۴-۱۵ نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۴-۱۳ و شکل ۴-۱۴ در فرکانس های بالا انطباق مناسبی بین نتایج آزمایشگاهی و پاسخ مدل تعمیم یافته ماکسول در مد سوم صورت نگرفته است. دلیل این امر رفتار غیرخطی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال که ناشی از تابعیت غیرخطی خواص ویسکوالاستیک این ماده به نرخ کرنش و کرنش می باشد.

جدول ۴-۲- پارامترهای تابع میدان مدل تعمیم یافته ماکسول با سه شاخه (مد سوم).

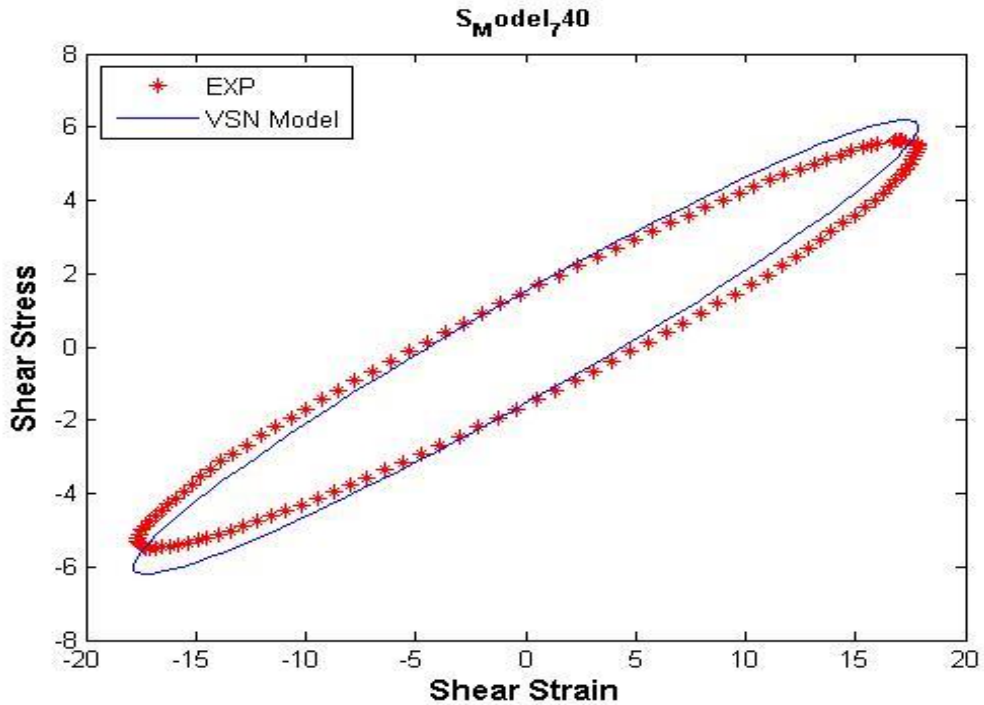
مد سوم	۰ mT	۱۰۰ mT	۱۸۰ mT	۲۳۰ mT	۲۷۲ mT
میزان خطا	۲۳۵/۱۳	۹۶/۹۴	۵۸/۰۵۱	۱۷/۶۳	۷۸/۵۳
G_0 (kPa)	۰/۲۰۳۶	۰/۲۱۵	۰/۲۴۴	۰/۲۶	۰/۲۹۴
η_1 (kPa.s)	۰/۰۰۷۱	۰/۰۶۹۳	۰/۰۰۲۹	۰/۰۰۲۶	۰/۰۵۱۱
λ_1 (s)	۱/۰۰۱۵	۲/۰۸۸	۰/۰۶۳۸	۰/۰۰۳۹	۰/۹۴۳۸
η_2 (kPa.s)	۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۳۹	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۹۵	۰/۰۰۷۵
λ_2 (s)	۰/۰۱۲۴	۰/۱۷۶۳	۰/۰۰۱۵	۰/۲۰۰۳	۰/۱۸۱۶
η_3 (kPa.s)	۰/۰۱۷۶	۰/۰۰۲۷	۰/۰۲۵۰	۰/۰۳۷۲	۰/۰۰۳۰
λ_3 (s)	۰/۴۰۳۰	۰/۰۱۵۸	۰/۴۴۶۳	۰/۶۵۴۹	۰/۰۱۴۸

با توجه به شکل ۴-۱۲ و شکل ۴-۱۵ اگرچه انطباق مناسبی بین نتایج آزمایشگاهی و پاسخ مدل تعمیم یافته ماکسول در مد سوم صورت گرفته است، اما این مدل نیز نمی تواند رفتار دینامیکی الاستومر مگنتورئولوژیکال را در یک بازه پیوسته نسبتا وسیع از نرخ کرنش ۰/۱ هرتز تا ۸ هرتز، به خوبی پیش بینی کند.



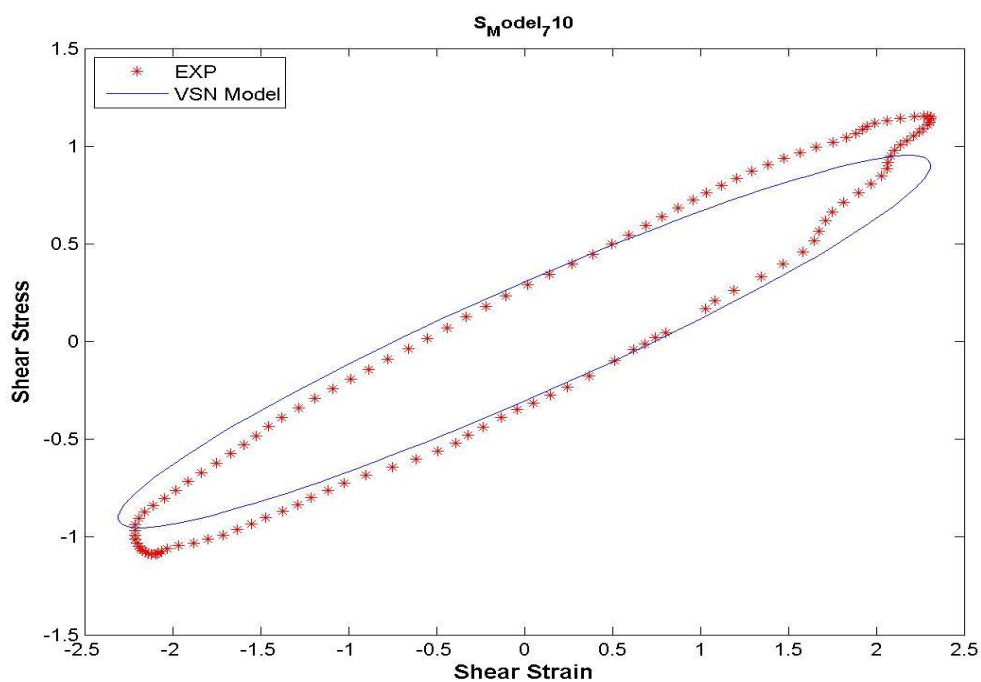
شکل ۴-۱۲- پاسخ مدل تعمیم یافته ماکسول با سه شاخه در میدان ($B = 100 \text{ mT}$)، کرنش ۴ درصد و

فرکانس ۸ هرتز.



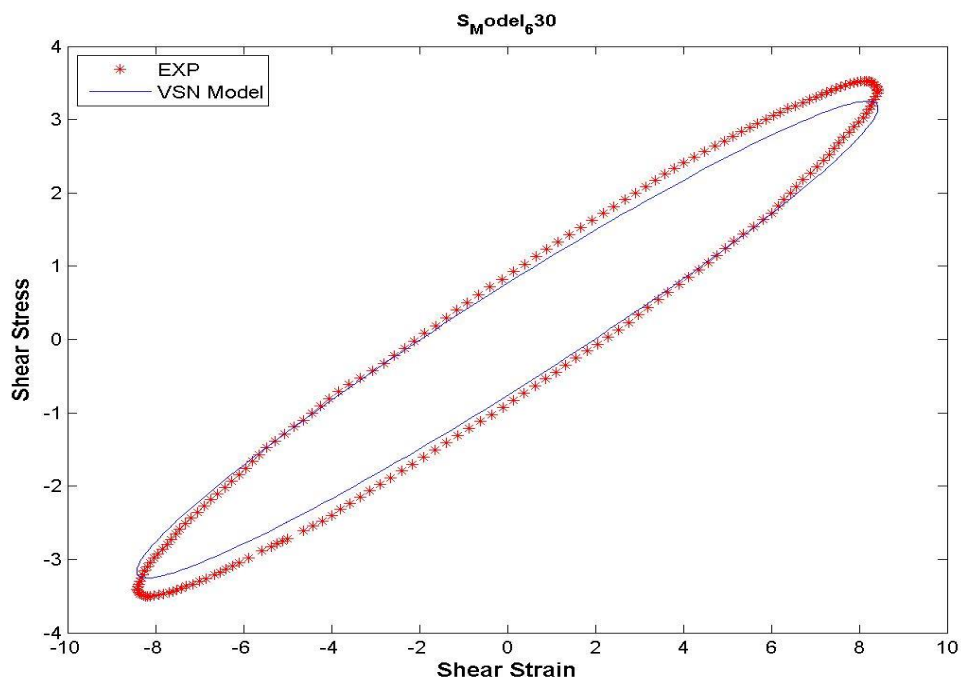
شکل ۴-۱۳- پاسخ مدل تعمیم یافته ماکسول با سه شاخه در میدان ($B = 100 \text{ mT}$)، کرنش ۱۶ درصد و

فرکانس ۸ هرتز.



شکل ۴-۱۴- پاسخ مدل تعمیم یافته ماکسول با سه شاخه در میدان ($B = 230 \text{ mT}$)، کرنش ۲ درصد و

فرکانس ۸ هرتز.



شکل ۴-۱۵- پاسخ مدل تعمیم یافته ماکسول با سه شاخه در میدان ($B = 230 \text{ mT}$)، کرنش ۸ درصد و

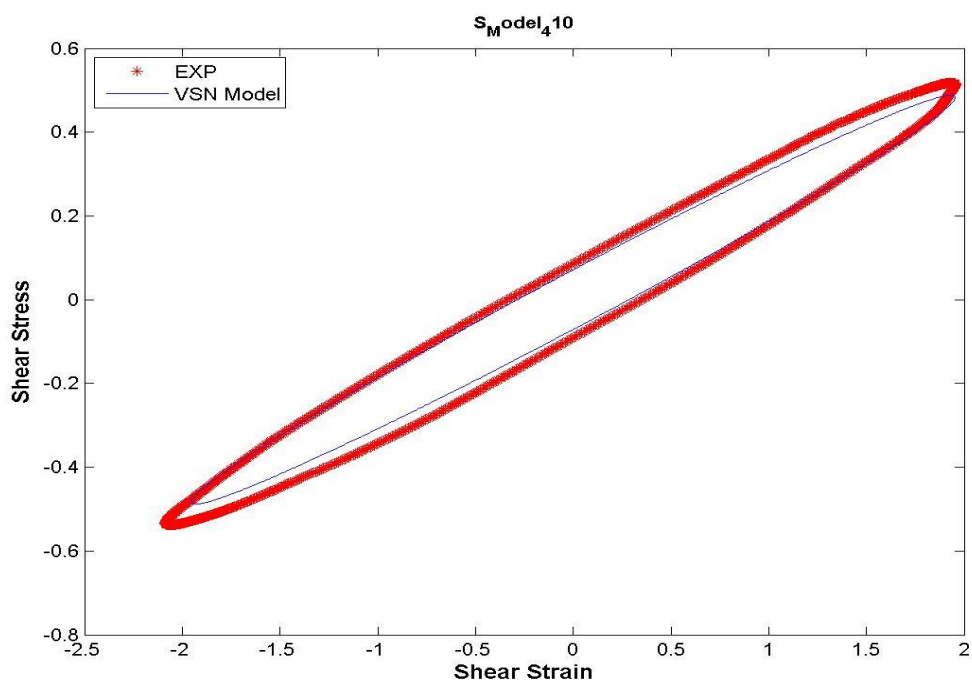
فرکانس ۵ هرتز.

۴-۲-۴ مدل گسترش یافته ماکسول با چهار شاخه

به طور مشابه، با جایگذاری پارامترهای تابع میدان در معادله مدل تعمیم یافته ماکسول در مد چهارم، نتایج پاسخ تنش مدل، پارامترهای مدل تعمیم یافته ماکسول با چهار شاخه (جدول ۴-۳)، در شکل ۴-۱۶، شکل ۴-۱۷، شکل ۴-۱۸ و شکل ۴-۱۹ نمایش داده شده است.

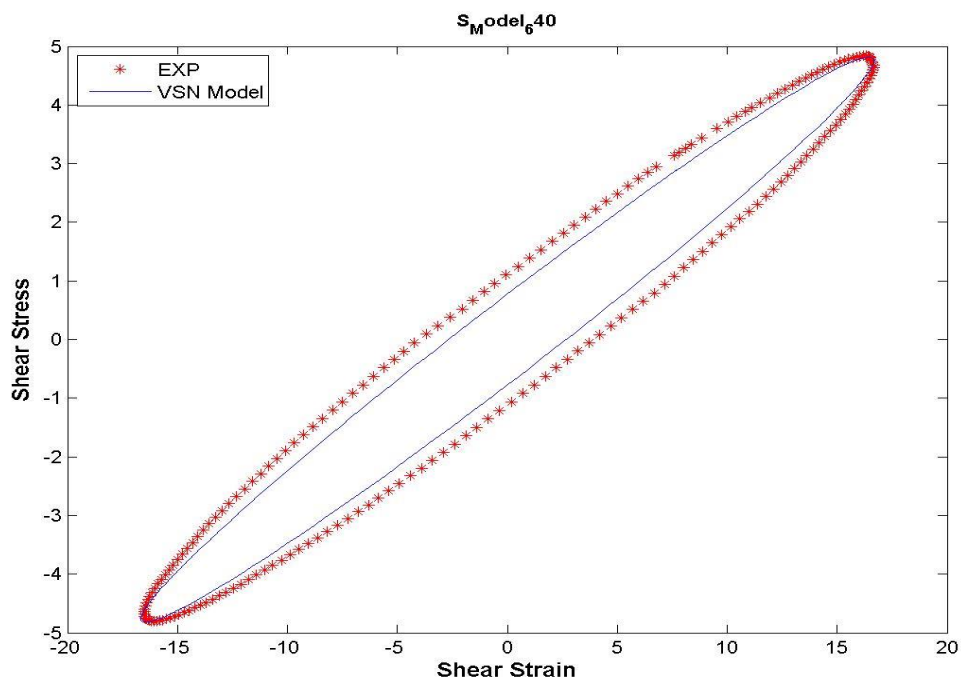
جدول ۴-۳- پارامترهای تابع میدان مدل تعمیم یافته ماکسول با چهار شاخه.

مد چهارم	۰ mT	۱۰۰ mT	۱۸۰ mT	۲۳۰ mT	۲۷۲ mT
میزان خطا	۲۸۸/۲۷۲	۱۸/۷۸	۲۹/۸۲	۱۴/۷۳۵	۲۵/۰۷۴
G_0 (kPa)	۰/۲۰۹۴	۰/۲۱۳۳	۰/۲۱۱۵	۰/۲۴۴۸	۰/۲۲۱۶
η_1 (kPa.s)	۰/۰۱۵۰	۰/۰۰۴۶	۰/۰۰۷۵	۰/۰۰۲۹	۰/۰۱۳۲
λ_1 (s)	۰/۷۰۰۱	۰/۰۷۸۵	۱/۰۹۴۹	۰/۰۶۲۵	۰/۲۱۵۷
η_2 (kPa.s)	۰/۰۰۵۹	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۰۹۷	۰/۳۲۵۱
λ_2 (s)	۰/۱۰۶۶	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۲۰۸	۰/۰۰۰۰۱۷	۳/۰۹۳۵
η_3 (kPa.s)	۰/۰۰۰۹۸	۰/۰۷۵۹	۰/۰۰۶۴	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۰۴
λ_3 (s)	۰/۰۰۴۰	۲/۳۸۲۴	۰/۲۳۵۴	۰/۰۰۴	۰/۰۱۶۸
η_4 (kPa.s)	۰/۰۰۰۲۴	۰/۰۰۱۳	۰/۱۱۹۱	۰/۰۸۱۶	۰/۰۰۲۳
λ_4 (s)	۰/۹۴۵۴	۰/۱۵۹۹	۲/۳۴۳۱	۰/۸۷۶۰	۰/۰۰۵۴



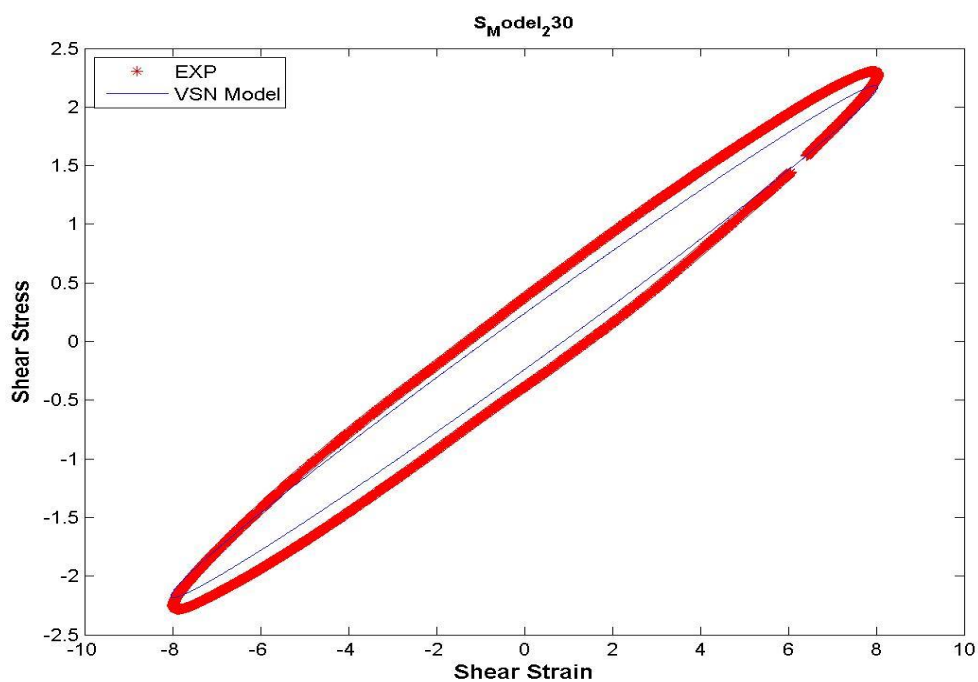
شکل ۴-۱۶- پاسخ مدل تعمیم یافته ماکسول با چهار شاخه در میدان ($B = 0 \text{ mT}$)، کرنش ۲ درصد و فرکانس

۱ هرتز.

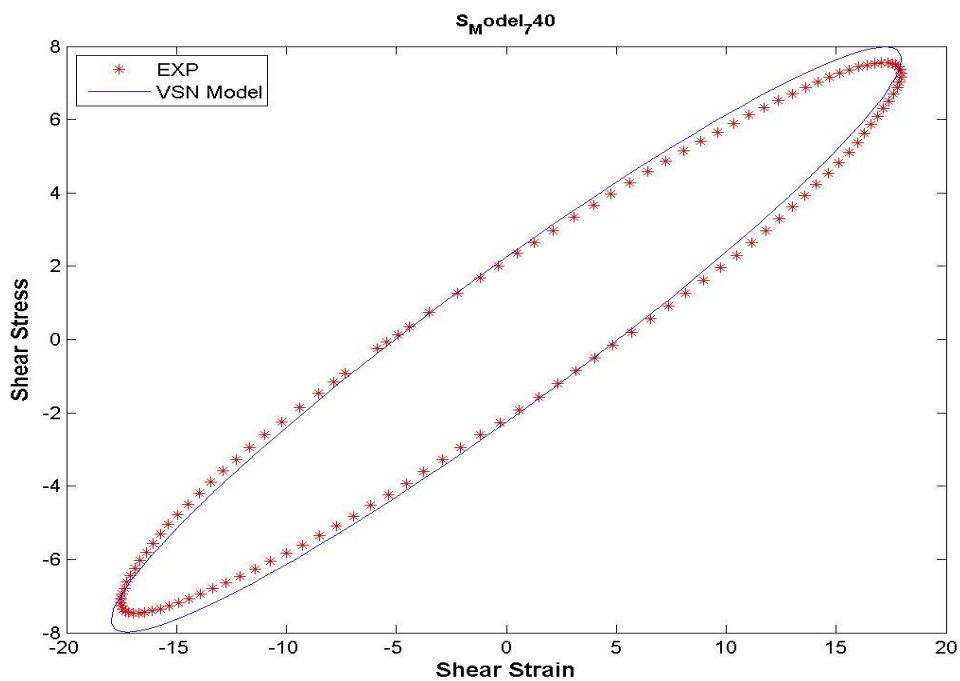


شکل ۴-۱۷- پاسخ مدل تعمیم یافته ماکسول با چهار شاخه در میدان ($B = 0 \text{ mT}$)، کرنش ۱۶ درصد و

فرکانس ۵ هرتز.



شکل ۴-۱۸- پاسخ مدل تعمیم یافته ماکسول با چهار شاخه در میدان ($B = 272 \text{ mT}$)، کرنش ۸ درصد و فرکانس ۰/۵ هرتز.

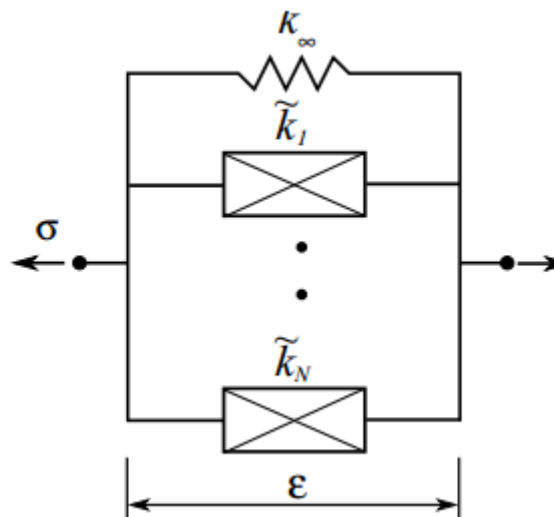


شکل ۴-۱۹- پاسخ مدل تعمیم یافته ماکسول با چهار شاخه در میدان ($B = 0 \text{ mT}$)، کرنش ۱۶ درصد و فرکانس ۸ هرتز.

با توجه به شکل ۴-۱۷ و شکل ۴-۱۸ در فرکانس های نسبتا بالا انطباق مناسبی بین نتایج آزمایشگاهی و پاسخ مدل تعمیم یافته ماکسول در مد چهارم صورت نگرفته است. دلیل این امر رفتار غیرخطی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال که ناشی از تابعیت غیرخطی خواص ویسکوالاستیک این ماده به نرخ کرنش و کرنش می باشد. با توجه به شکل ۴-۱۹ اگرچه انطباق مناسبی بین نتایج آزمایشگاهی و پاسخ مدل تعمیم یافته ماکسول در مد چهارم در فرکانس و کرنش بالا صورت گرفته است، اما این مدل نیز نمی تواند رفتار دینامیکی الاستومر مگنتورئولوژیکال را به خوبی پیش بینی کند.

۴-۳ مدل جدیدی از مدل گسترش یافته ماکسول

جاکوب سیامبلا^۱ [۱۴۱] جهت پیش بینی رفتار ویسکوالاستیک غیرخطی مواد لاستیک مانند، مدل جدیدی از مدل تعمیم یافته ماکسول مطابق شکل ۴-۲۰ ارائه داده است. در مطالعه پیش رو، علاوه بر مدل تعمیم یافته ماکسول از مدل جدید تعمیم یافته ماکسول نیز استفاده شده است.



شکل ۴-۲۰- مدل بهبود یافته ای از تعمیم یافته ماکسول.

به طور مشابه با مدل تعمیم یافته ماکسول، دو مدول ذخیره برشی و مدول میرایی در مدل جدید

^۱ Jacob Ciambella

تعمیم یافته ماکسول به صورت زیر بیان می شوند:

$$G'(\omega) = k_0 \left[1 - \sum_{i=1}^N k_i + \sum_{i=1}^N (\omega \tau_i + \eta_i) \frac{\omega \tau_i k_i}{1 + \omega^2 \tau_i^2} \right] \quad (15-4)$$

$$G''(\omega) = k_0 \sum_{i=1}^n \left[(1 + \omega \eta_i \tau_i) \frac{k_i \tau_i \omega}{1 + \omega^2 \tau_i^2} \right] \quad (16-4)$$

در ادامه، جهت پیش بینی تنش آزمایشگاهی الاستومر مگنتورئولوژیکال از مدل جدید تعمیم یافته ماکسول با دو شاخه و سه شاخه استفاده می شود.

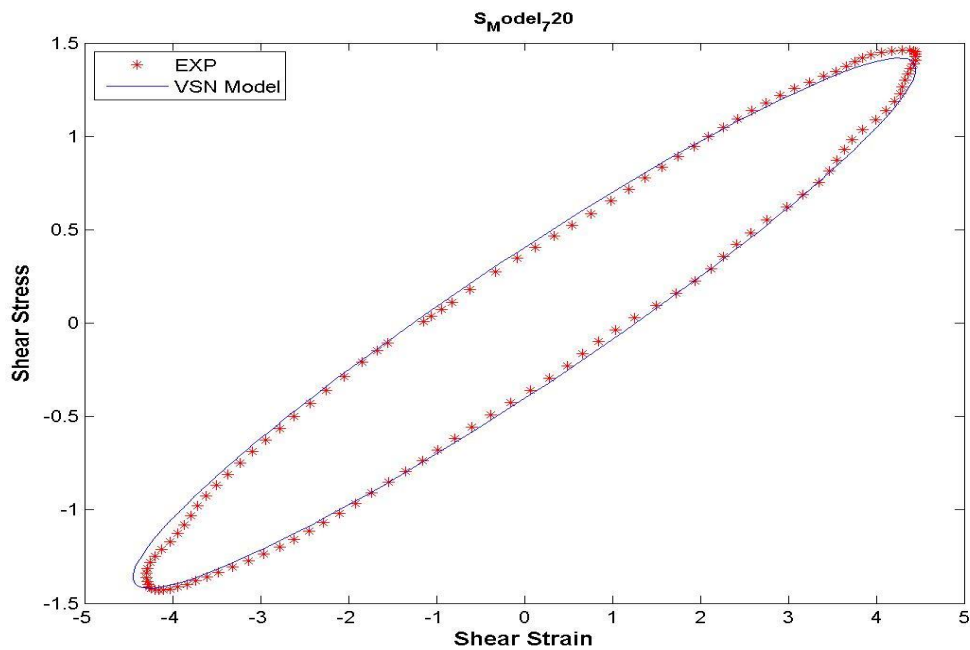
۴-۳-۱ مدل جدید گسترش یافته ماکسول با دو شاخه

همانند مدل تعمیم یافته ماکسول، با جاگذاری و اعمال عملیات بهینه سازی طبق معادله های (۴-۱۳)، (۴-۱۵) و (۴-۱۶) پارامترهای دو مدول ذخیره برشی و مدول میرایی در مدل جدید تعمیم یافته ماکسول در مد دوم محاسبه و در جدول ۴-۴ نشان داده شده است.

با جایگذاری پارامترهای تابع میدان در معادله مدل جدید تعمیم یافته ماکسول در مد دوم، پاسخ مدل بر روی پاسخ آزمایشگاهی در نمودارهای شکل ۴-۲۱، شکل ۴-۲۲، شکل ۴-۲۳ و شکل ۴-۲۴ ترسیم شده اند. با توجه به شکل ۴-۲۱، شکل ۴-۲۲ و شکل ۴-۲۴ در بازه ی نسبتا وسیعی از میدان مغناطیسی، فرکانس و کرنش انطباق مناسبی بین نتایج آزمایشگاهی و پاسخ مدل تعمیم یافته ماکسول در مد دوم صورت گرفته است. با توجه به شکل ۴-۲۳، انطباق مناسبی بین نتایج آزمایشگاهی و پاسخ مدل جدید تعمیم یافته ماکسول در مد دوم برای بعضی فرکانس ها و کرنش ها از جمله فرکانس ۸ هرتز و کرنش ۸ درصد صورت نگرفته است، بنابراین این مدل نمی تواند رفتار دینامیکی الاستومر مگنتورئولوژیکال را در یک بازه پیوسته نسبتا وسیع برای تمامی میدان ها، کرنش ها و فرکانس های آزمایش به خوبی پیش بینی کند.

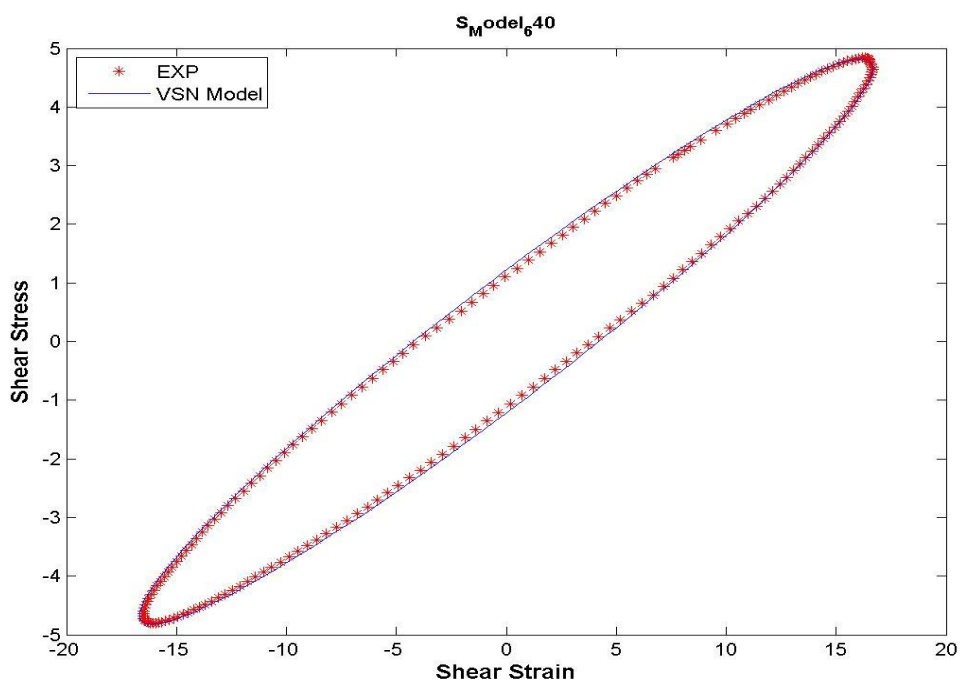
جدول ۴-۴- پارامترهای تابع میدان مدل جدید تعمیم یافته ماکسول با دو شاخه.

۲۷۲ mT	۲۳۰ mT	۱۸۰ mT	۱۰۰ mT	۰ mT	مد دوم
۲۴/۰۹	۱/۷۲	۱۵/۱۵	۱۹۲/۵۷	۱۲/۲۵۰	میزان خطا
۰/۳۵۹۵	۰/۳۹۷۷	۰/۴۳۲۹	۰/۳۲۳۰	۰/۳۳۱۵	Sum (k_i)
۰/۴۱۱۸	۰/۴۰۴۱	۰/۳۷۶۲	۰/۲۹۴۳	۰/۲۹۴۹	k_0 (kPa)
۰/۱۶۳۰	۰/۱۵۱۱	۰/۱۳۸۳	۰/۱۲۱۱	۰/۰۸۱۸	k_1 (kPa)
۰/۲۸۲۸	۰/۳۸۱۳	۰/۱۹۷۲	۰/۴۸۵۲	۰/۵۳۳۶	η_1 (kPa.s)
۰/۰۲۷۷	۰/۰۲۸۳	۰/۰۳۶۶	۰/۰۲۸۶	۰/۰۳۸۳	τ_1 (s)
۰/۱۹۶۵	۰/۲۴۶۵	۰/۲۹۴۶	۰/۲۰۱۹	۰/۲۴۹۷	k_2 (kPa)
۱/۱۵۳۴	۰/۶۴۲۰	۰/۳۹۶۵	۱/۱۱۳۵	۰/۵۳۹	η_2 (kPa.s)
۱/۵۵۴۱	۱/۰۶۷۳	۱/۸۹۵۷	۲/۷۷۴۵	۰/۸۶۲۷	τ_2 (s)



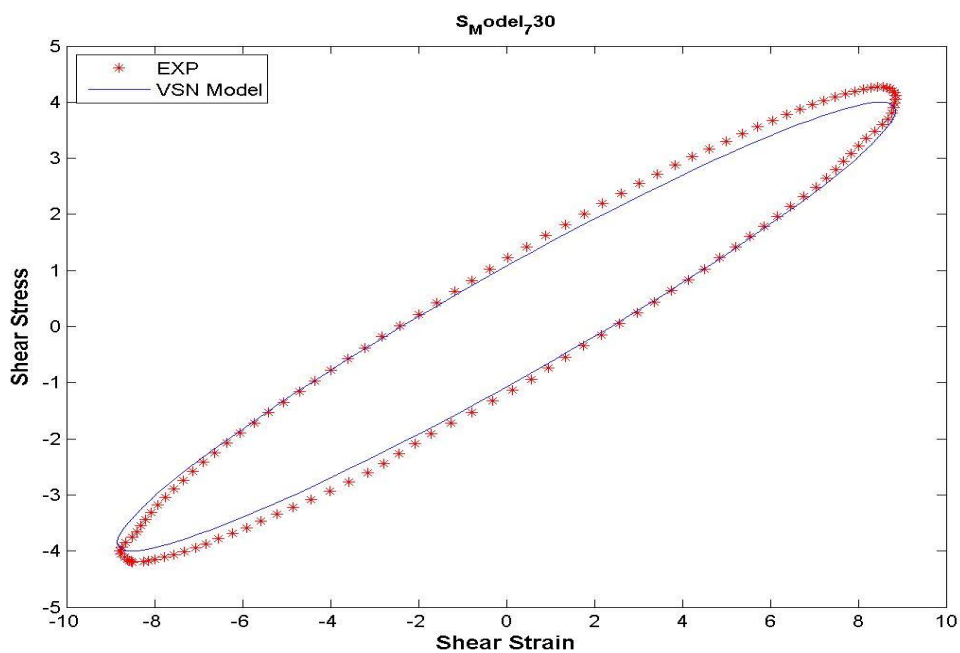
شکل ۴-۲۱- پاسخ مدل جدید تعمیم یافته ماکسول با دو شاخه در میدان ($B = 0 \text{ mT}$), کرنش ۴ درصد و

فرکانس ۸ هرتز.



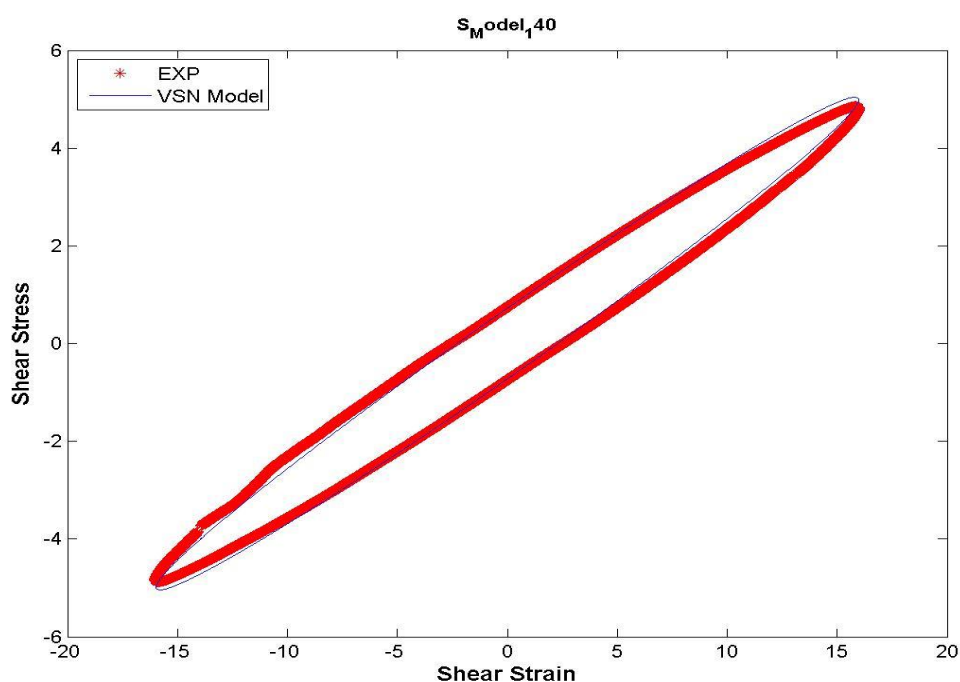
شکل ۴-۲۲- پاسخ مدل جدید تعمیم یافته ماکسول با دو شاخه در میدان ($B = 0 \text{ mT}$)، کرنش ۱۶ درصد و

فرکانس ۵ هرتز.



شکل ۴-۲۳- پاسخ مدل جدید تعمیم یافته ماکسول با دو شاخه در میدان ($B = 272 \text{ mT}$)، کرنش ۸ درصد و

فرکانس ۸ هرتز.



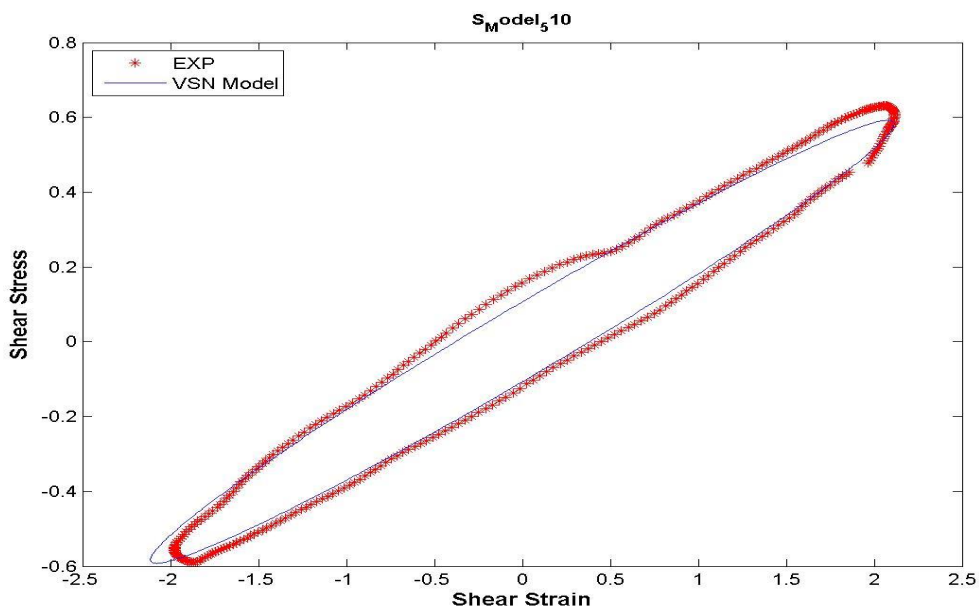
شکل ۴-۲۴- پاسخ مدل جدید تعمیم یافته ماکسول با دو شاخه در میدان ($B = 272 \text{ mT}$)، کرنش ۱۶ درصد و فرکانس ۰/۱ هرتز.

۴-۳-۲ مدل جدید تعمیم یافته ماکسول با سه شاخه

به طور مشابه برای مدل جدید تعمیم یافته ماکسول در مد سه، با جاگذاری و اعمال عملیات بهینه سازی طبق معادله های (۴-۱۳)، (۴-۱۵) و (۴-۱۶)، پارامترهای دو مدول ذخیره برشی و مدول میرایی در مدل جدید تعمیم یافته ماکسول در مد سوم محاسبه و در جدول ۴-۵ نشان داده شده است. با جایگذاری پارامترهای تابع میدان در معادله مدل جدید تعمیم یافته ماکسول در مد سوم، پاسخ مدل بر روی پاسخ آزمایشگاهی در شکل های شکل ۴-۲۵، شکل ۴-۲۶، شکل ۴-۲۷ و شکل ۴-۲۸ ترسیم شده اند.

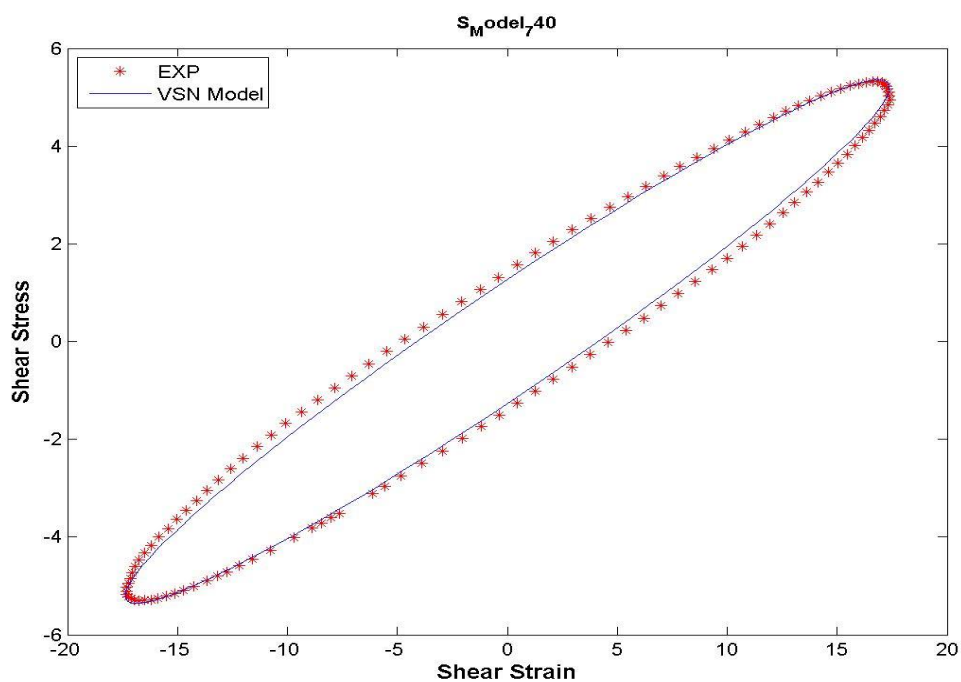
جدول ۴-۵- پارامترهای تابع میدان مدل جدید تعمیم یافته ماکسول با سه شاخه.

مد سوم	۰ mT	۱۰۰ mT	۱۸۰ mT	۲۳۰ mT	۲۷۲ mT
میزان خطا	۲۳۷/۴۷	۹۸/۶۴	۳۰/۳۳۰.۱	۶/۴۶۱۳	۴/۰.۳۴۲
Sum (k_i)	۰/۳۳۰.۱	۰/۷۳۱۲	۰/۵۴۸۰	۰/۲۹۳۰	۰/۳۰۳۹
k_0 (kPa)	۰/۲۸۸	۰/۷۸۸۹	۰/۴۹۹۳	۰/۳۳۰.۳	۰/۳۸۱۱
k_1 (kPa)	۰/۱۲۵۱	۰/۴۵۳۳	۰/۰۶۶۰	۰/۱۱۵۹	۰/۱۴۲۳
η_1 (kPa.s)	۰/۰۶۲۵	۱/۱۳۸۹	۰/۴۲۶۳	۱/۵۹۹۸	۱/۳۷۹۹
τ_1 (s)	۱/۰۰۱	۰/۰۰۴۲	۱/۷۹۲۹	۰/۰۹۸۴	۰/۰۴۶۰
k_2 (kPa)	۰/۲۰۴۴	۰/۲۵۴۶	۰/۴۰۹۹	۰/۰۱۶۹	۰/۱۱۵۹
η_2 (kPa.s)	۱/۰۰۱۲	۱/۰۳۴۸	۰/۱۲۵۶	۱/۶۰۰۶	۰/۴۴۷۳
τ_2 (s)	۱/۰۳۶۵	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۶۹	۰/۰۵۰۶	۱/۵۳۶۳
k_3 (kPa)	۰/۰۰۰۷۲	۰/۰۲۳۴	۰/۰۷۲۱	۰/۱۶۰۲	۰/۰۴۵۷
η_3 (kPa.s)	۰/۰۹۱۶	۱/۳۵۲۱	۰/۵۹۸۳	۰/۳۵۷۱۰.	۰/۳۱۶۷
τ_3 (s)	۱/۷۱۸۹	۱/۸۲۸۸	۰/۱۲۵۳	۱/۸۱۳۷	۱/۴۹۸۴



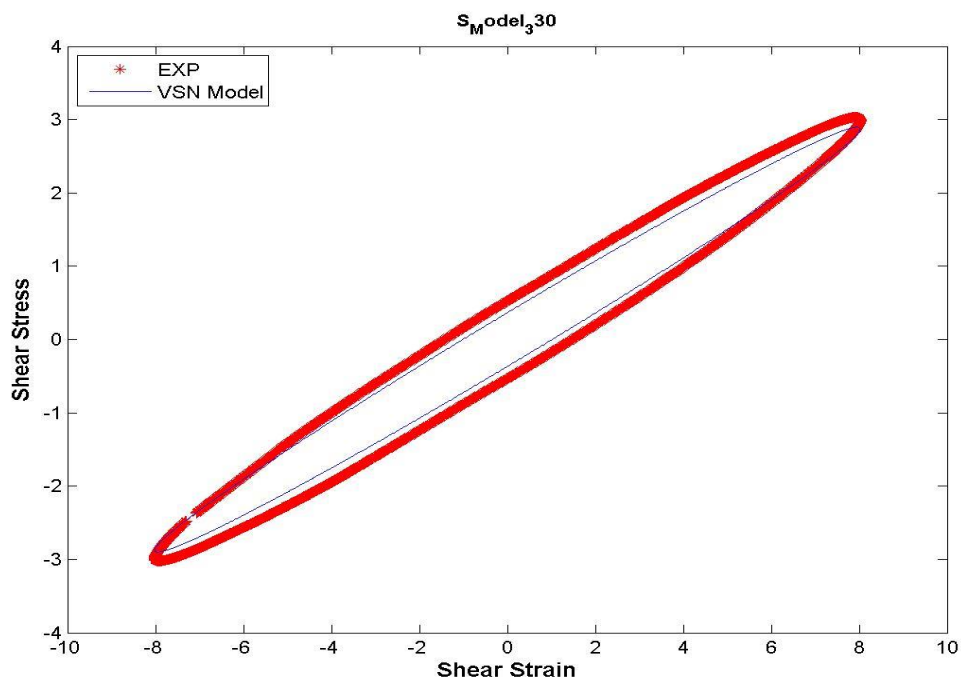
شکل ۴-۲۵- پاسخ مدل جدید تعمیم یافته ماکسول با سه شاخه در میدان ($B = 0 mT$)، کرنش ۱۶ درصد و فرکانس ۳

هرتز.



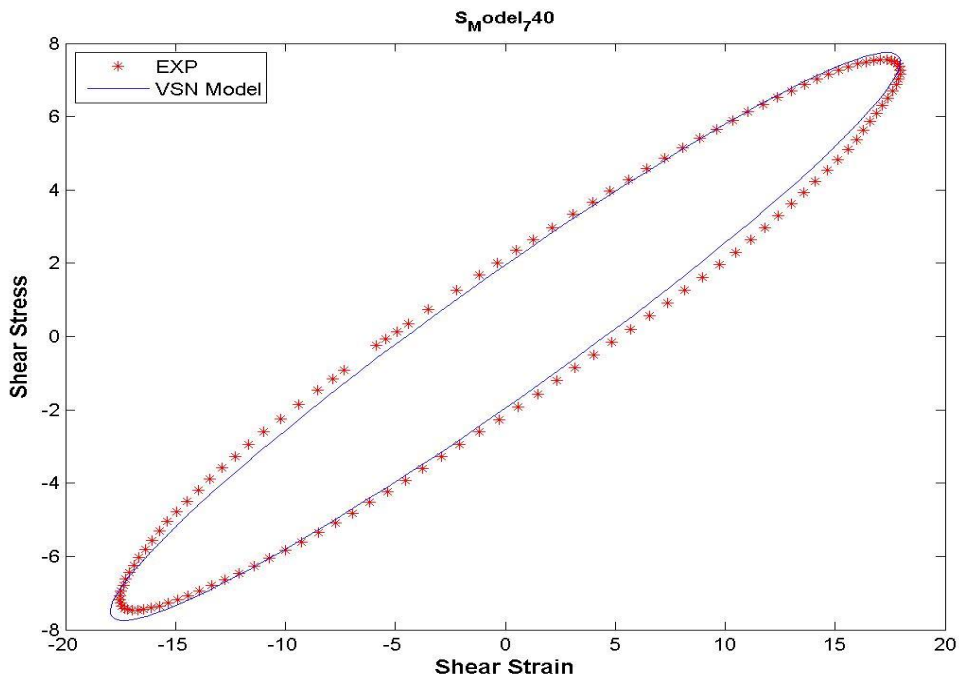
شکل ۴-۲۶- پاسخ مدل جدید تعمیم یافته ماکسول با سه شاخه در میدان $(B = 0 \text{ mT})$ ، کرنش ۱۶ درصد و

فرکانس ۸ هرتز.



شکل ۴-۲۷- پاسخ مدل جدید تعمیم یافته ماکسول با سه شاخه در میدان $(B = 272 \text{ mT})$ ، کرنش ۸ درصد و

فرکانس ۰/۵ هرتز.



شکل ۴-۲۸- پاسخ مدل جدید تعمیم یافته ماکسول با سه شاخه در میدان ($B = 272 \text{ mT}$)، کرنش ۱۶ درصد

و فرکانس ۸ هرتز.

با توجه به شکل ۴-۲۵، شکل ۴-۲۶، شکل ۴-۲۷ و شکل ۴-۲۸ اگرچه در بازه ی نسبتاً وسیعی از میدان مغناطیسی، فرکانس و کرنش انطباق مناسبی بین نتایج آزمایشگاهی و پاسخ مدل تعمیم یافته ماکسول در مد دوم صورت گرفته است، هنوز به اندازه کافی به پاسخ آزمایشگاهی نزدیک نشده ایم. مقادیر خطا مطابق جدول ۴-۵ با افزایش میدان مغناطیسی از $237/5$ به کاهش یافته است، اما نمودارها پیش بینی مناسب و دقیقی نشان نمی دهند.

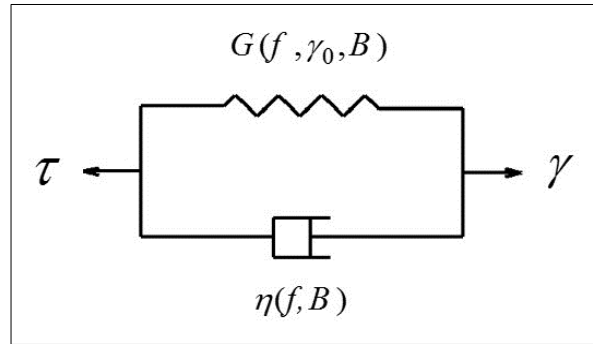
در این بخش، از دو مدل تعمیم یافته ماکسول در مدهای یک (سه پارامتر)، دو (پنج پارامتر)، سه (هفت پارامتر) و مد چهار (۹ پارامتر) و مدل جدید تعمیم یافته ماکسول در مدهای یک (چهار پارامتر)، دو (هفت پارامتر) و سه (ده پارامتر) استفاده شده است. در مدهای اول هر دو مدل، تطابق مناسبی بین مقادیر آزمایشگاهی تنش و مقادیر پیش بینی شده حاصل نشد. با افزایش تعداد مدها، نسبتاً پاسخ بهتری برای تنش های آزمایشگاهی به دست آمد. برای بهبودی پیش بینی پاسخ تنش الاستومر مگنتورئولوژیکال به کرنش نوسانی ورودی، از معادلات مدل چند شاخه ماکسول و چند شاخه ماکسول

جدید به جای مدل ساده ماکسول در مدل سازی استفاده شد تا رفتار غیر خطی مدول ذخیره برشی و تلفات الاستومر مگنتورئولوژیکال در گستره‌ی وسیع تری از نرخ کرنش در نظر گرفته شود. با توجه به نمودارهای هیستریزیس تنش-کرنش مدل و آزمایشگاهی، اگرچه با افزایش تعداد شاخه‌های مدل تعمیم یافته ماکسول و تعمیم یافته ماکسول جدید، پیش بینی بهتری صورت گرفته است اما این مدل‌ها نتوانسته اند رفتار الاستومر مگنتورئولوژیکال را برای بازه وسیعی از تمام کرنش‌های بین ۲ درصد تا ۱۶ درصد و نرخ کنش‌های بین ۰/۱ هرتز تا ۸ هرتز برای یک میدان مشخص را پیش بینی کنند.

۴-۴ مدل پیشنهادی گسترش یافته کلوین-ویت

۴-۴-۱ معرفی مدل

بر اساس نتایج آزمایشگاهی، رفتار ویسکوالاستیک الاستومرهای مگنتورئولوژیکال علاوه بر میدان مغناطیسی، تابع شرایط بارگذاری از جمله فرکانس و کرنش می‌باشد. بر اساس این نتایج، نمودارهای تنش-کرنش در تمام میدان‌های مغناطیسی، فرکانس و کرنش‌های مختلف به شکل هیستریزیس بیضی شکل متقارن نمود پیدا کردند. در این مطالعه، جهت پیش بینی رفتار الاستومرهای مگنتورئولوژیکال در تمام میدان‌ها، فرکانس‌ها و کرنش‌ها از یک مدل تعمیم یافته بر پایه مدل کلوین-ویت استفاده شده است. شماتیک این مدل پیشنهادی در شکل ۴-۲۹ نمایش داده شده است. از آنجایی که سختی و میرایی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال تابع میدان مغناطیسی، فرکانس و کرنش می‌باشد، این وابستگی باید به خوبی در مدل لحاظ شود.



شکل ۴-۲۹- شماتیک مدل پیشنهادی در این پژوهش.

بر اساس شماتیک مدل پیشنهادی، وابستگی سختی و میرایی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال به فرکانس بارگذاری توسط یک تابع توانی در نظر گرفته شده است. به علاوه وابستگی سختی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال به کرنش توسط یک تابع توانی دیگر نیز در نظر گرفته شده است. این در حالی است که با توجه به نمودارهای هیستریزس آزمایشگاهی (مراجعه شود به شکل ۳-۱۱) میرایی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال با افزایش کرنش تغییر چشم‌گیری نمی‌کند. نهایتاً، در این مدل وابستگی سختی و میرایی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال به میدان مغناطیسی توسط توابع چندجمله‌ای بیان می‌شوند.

مطابق شکل ۴-۲۹، در مدل پیشنهادی در این پژوهش، $G(f, \gamma_0, B)$ و $\eta(f, B)$ به ترتیب مدول ذخیره برشی (سختی) و ویسکوزیته (میرایی) الاستومر مگنتورئولوژیکال تعریف می‌شوند. پارامترهای f , f_0 و B دامنه کرنش ورودی، فرکانس مرجع ۱ هرتز (به جهت سازگاری واحد فرکانس برای تابع توانی)، فرکانس بارگذاری (نرخ کرنش) و چگالی شار میدان مغناطیسی می‌باشند. براساس شکل ۴-۲۹ پاسخ تنش کلی برای مدل پیشنهادی به صورت زیر رابطه بین تنش و کرنش را تعیین می‌کند:

$$\tau(t) = G(f, \gamma_0, B)\gamma(t) + \eta(f, B)\dot{\gamma}(t) \quad (17-4)$$

$\tau(t)$ و $\gamma(t)$ به ترتیب تنش خروجی مدل و کرنش ورودی می‌باشند. فرض کنید کرنش ورودی

$\gamma(t)$ به صورت یک ورودی نوسانی به صورت زیر باشد:

$$\gamma(t) = \gamma_0 \sin(2\pi f t) \quad (18-4)$$

در مدل استاندارد کلوین-ویت مدول ذخیره برشی (G) و ویسکوزیته (η) پارامترهایی ثابت در نظر گرفته می‌شوند. در حالیکه در مدل پیشنهادی، مدول ذخیره برشی (G) و ویسکوزیته (η) را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$G(f, \gamma_0, B) = a_B \left(\frac{f}{f_0}\right)^b (\gamma_0)^{c_B} \quad (19-4)$$

$$\eta(f, B) = d_B \left(\frac{f}{f_0}\right)^e \quad (20-4)$$

کرنش ورودی را کرنش ورودی مختلط γ^* ، تنش خروجی را تنش خروجی مختلط τ^* و مدول برشی مختلط را G^* فرض می‌کنیم. بنابراین خواهیم داشت:

$$\tau^* = G^* \gamma^* = (G' + iG'')\gamma^* \quad (21-4)$$

در (21-4) G' مدول ذخیره برشی و G'' مدول تلفات برشی تعریف می‌شوند. کرنش ورودی مختلط γ^* را به صورت زیر فرض نمایید:

$$\gamma^* = \gamma_0 e^{i\omega t} \quad (22-4)$$

γ_0 دامنه کرنش ورودی و ω فرکانس زاویه ای تحریک می‌باشد. با قرار دادن معادلات (21-4) و (22-4) در داخل معادله (17-4)، G' مدول ذخیره برشی و G'' مدول تلفات برای مدل پیشنهادی به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$G' = a_B \left(\frac{f}{f_0}\right)^b (\gamma_0)^{c_B} \quad (23-4)$$

$$G'' = 2\pi d_B \left(\frac{f}{f_0}\right)^{1+e} \quad (۲۴-۴)$$

هم چنین تلفات میرایی را به صورت زیر تعریف می کنیم:

$$\zeta = \frac{G''}{G'} = \frac{2\pi d_B \left(\frac{f}{f_0}\right)^{(e-b+1)}}{a_B (\gamma_0)^{c_B}} \quad (۲۵-۴)$$

در مدل پیشنهادی دو پارامتر a_B و d_B بیانگر اثر میدان مغناطیسی بر روی مدول ذخیره برشی و مدول میرایی برشی الاستومر مگنتورئولوژیکال می باشد. دو پارامتر b و e اثر نرخ کرنش (رفتار نرخ کرنش-سخت شوندگی) بر روی مدول ذخیره برشی و مدول میرایی الاستومر مگنتورئولوژیکال را در نظر می گیرند. پارامتر c_B اثر کرنش (رفتار کرنش-نرم شوندگی) بر روی مدول ذخیره برشی الاستومر مگنتورئولوژیکال را نشان می دهد. این پارامتر اثر میدان را نیز بر روی کرنش-نرم شوندگی الاستومر مگنتورئولوژیکال را نشان می دهد. تفسیر فیزیکی ضرایب مدل در جدول نشان داده شده است.

جدول ۴-۶- تفسیر فیزیکی پارامترهای مدل پیشنهادی.

پارامتر	تفسیر فیزیکی
a_B	اثر میدان مغناطیسی بر روی مدول ذخیره برشی
d_B	اثر میدان مغناطیسی بر روی مدول تلفات برشی
b	اثر نرخ کرنش بر روی مدول ذخیره برشی
e	رفتار نرخ کرنش بر روی مدول تلفات برشی
c_B	اثر میدان مغناطیسی بر روی نرخ کرنش-سخت شوندگی

۴-۴-۲ تعیین ضرایب و پارامترهای مدل

مدل ویسکوالاستیک پیشنهادی با دریافت کرنش ورودی، به محاسبه دو پارامتر $G(f, \gamma_0, B)$ و $\eta(f, B)$ می پردازد و سپس طبق معادله (۴-۱۷) تنش خروجی مدل را محاسبه می کند. بدین منظور، مدل

ویسکوالاستیک تعمیم یافته در این پژوهش طبق معادلات (۴-۲۳) و (۴-۲۴)، شامل پنج پارامتر a_B ، b ، c_B ، d_B و e می باشد. این پنج پارامتر از طریق مینیم کردن اختلاف بین تنش آزمایشگاهی و تنش مدل طبق معادله بدست می آیند. جهت به حداقل رساندن اختلاف بین مقادیر تنش آزمایشگاهی و مقادیر تنش به دست آمده از مدل، از روش های بهینه سازی از جمله روش کمترین مربعات و الگوریتم ژنتیک در جعبه بهینه سازی نرم افزار متلب^۱ استفاده شده است. بدین ترتیب، پنج پارامتر ذکر شده در مدل پیشنهادی از طریق بهینه سازی تابع خطا که در زیر تعریف شده است، به دست می آیند:

$$ff = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (\tau_{Model}(i, j) - \tau_{Exp}(i, j))^2 \quad (۴-۲۶)$$

با توجه به معادله (۴-۲۶)، N و M به ترتیب تعداد بارگذاری های مختلفی از کرنش و نرخ کرنش در آزمایش نوسان برشی می باشد. در هر میدان مغناطیسی شامل مقادیر ۰، ۱۰۰، ۱۸۰، ۲۲۰ و ۲۷۲ میلی تسلا، طبق معادله (۴-۲۶)، انجام عملیات بهینه سازی (مینیم کردن اختلاف بین تنش مدل و تنش آزمایشگاهی) به طور همزمان برای تمام فرکانس ها و کرنش های بارگذاری انجام می شود. بنابراین پارامترهای (منظور ضرایب مدل می باشد مانند a_B ، b ، c_B ، d_B و e) به دست آمده بر خلاف مدل های رایج، تابع کرنش و نرخ کرنش نبوده و فقط تابع میدان مغناطیسی می باشند.

پس از آن، با استفاده از آنالیز رگرسیون^۲، رابطه ای بین این پنج پارامتر با میدان مغناطیسی به دست می آید. با توجه به محاسبات انجام شده و ضرایب بدست آمده در جدول جدول ۴-۷ سه پارامتر a_B ، c_B و d_B تابع میدان می باشند درحالی که دو پارامتر e و b در برابر تغییرات میدان ثابت می باشند. با توجه به جدول ۴-۷ با افزایش میدان مغناطیسی، دو پارامتر a_B و d_B به صورت یک تابع درجه دوم افزایش می یابند در حالی که پارامتر c_B به صورت خطی افزایش می یابد.

^۱ Matlab optimization toolbox (R2013a)

^۲ Regression Analysis (Curve Fitting Methods)

جدول ۴-۷- پارامترهای مدل پیشنهادی.

e	d_B (kPa.s)	c_B	b	a_B (kPa)	میدان مغناطیسی (mT)
-۰/۶۴۱۰	۲/۷۹۱۷	-۰/۰۱۴۳	۰/۰۹۵۰۴	۹۴/۹۹۵۶	۰
-۰/۶۴۱۰	۲/۹۱۷۰	-۰/۰۴۳۰	۰/۰۹۵۰۴	۹۶/۰۴۹۵	۱۰۰
-۰/۶۴۱۰	۳/۵۴۱۷	-۰/۰۷۰۰	۰/۰۹۵۰۴	۱۰۴/۶۱۶۷	۱۸۰
-۰/۶۴۱۰	۴/۲۰۸۳	-۰/۰۹۹۵	۰/۰۹۵۰۴	۱۱۲/۰۳۷۰	۲۳۰
-۰/۶۴۱۰	۴/۳۷۵۰	-۰/۱۰۱۰	۰/۰۹۵۰۴	۱۲۰/۳۵۱۷	۲۷۲

جهت تحلیل روند تغییرات این ضرایب نسبت به میدان، از روش برازش منحنی^۱ توابع تغییرات میدان متناظر آن ها، شامل دو تابع درجه سوم و یک تابع درجه دوم، به صورت معادلات زیر (۴-۲۷)، (۴-۲۸) و (۴-۲۹) به دست می آیند. لازم به ذکر است که این پنج ضریب، پاسخ رفتار دینامیکی الاستومر مگنتورئولوژیکال را در هر بارگذاری مختلف شامل بازه پیوسته ای از میدان مغناطیسی (۰ تا ۲۷۲ میلی تسلا)، کرنش (۲ درصد تا ۱۶ درصد) و نرخ کرنش (۰٫۱ هرتز تا ۸ هرتز) را به خوبی پیش بینی می کند. ضرایب ثابت در معادلات (۴-۲۷)، (۴-۲۸) و (۴-۲۹) در

جدول ۴-۸ آمده است.

$$a_B = a_{B_2} B^2 + a_{B_1} B + a_{B_0} \quad (۴-۲۷)$$

$$c_B = c_{B_1} B + c_{B_0} \quad (۴-۲۸)$$

$$d_B = d_{B_2} B^2 + d_{B_1} B + d_{B_0} \quad (۴-۲۹)$$

^۱ Curve fitting

جدول ۴-۸- ضرایب ثابت پارامترهای تابع میدان در مدل ویسکوالاستیک پیشنهادی.

مقدار	ضرایب ثابت
۰/۰۰۰۴۵۸۲	a_{B_2} (kPa / (mT) ²)
-۰/۰۳۰۶۷	a_{B_1} (kPa / mT)
۹۴/۸۶۹	a_{B_0} (kPa)
۰/۰۰۰۲۱۷۹	d_{B_2} (kPa.s / (mT) ²)
۰/۰۰۰۴۷۶۶	d_{B_1} (kPa.s / mT)
۲/۷۵۴۴	d_{B_0} (kPa.s)
-۰/۰۰۰۳۴۰۴	c_{B_1} (1 / mT)
-۰/۰۱۲۳۳	c_{B_0}

۴-۴-۳ مقایسه مدل پیشنهادی و نتایج آزمایشگاهی (آنالیز کیفی^۱)

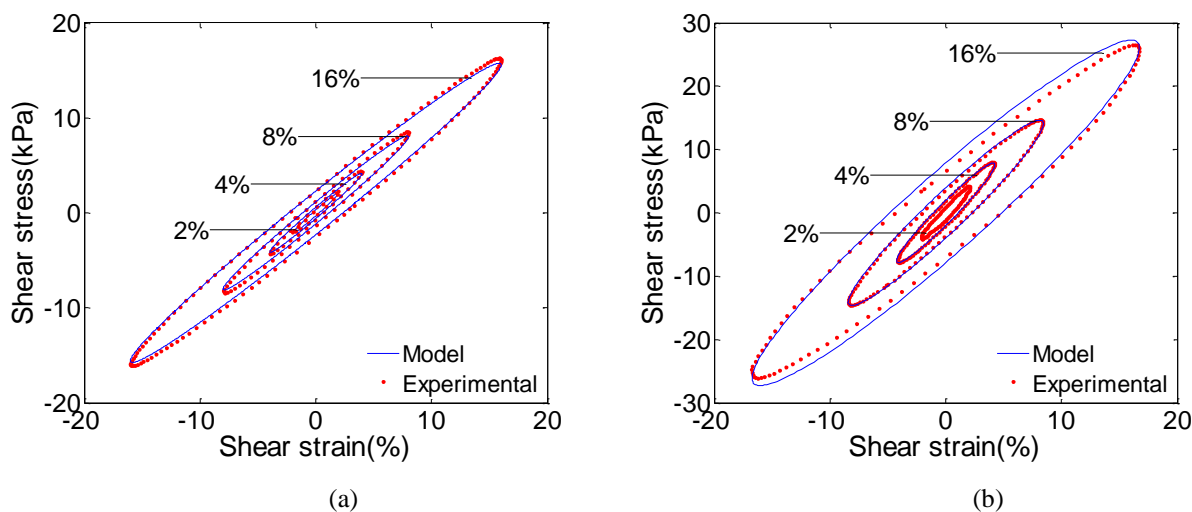
در انجام آزمایش نوسان برشی، از بارگذاری‌های مختلفی شامل چهار مقدار مختلف کرنش (۲، ۴، ۸ و ۱۶ درصد)، هفت مقدار مختلف فرکانس (۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۱، ۳، ۵ و ۸ هرتز) و پنج مقدار مختلف میدان مغناطیسی (۰، ۱۰۰، ۱۸۰، ۲۳۰ و ۲۷۲ میلی تسلا) استفاده شده است. بنابراین در مجموع، ۱۴۰ سری داده‌های آزمایشگاهی، به صورت حلقه‌های هیستریزس شکل که رابطه بین تنش و کرنش الاستومرهای مگنتورئولوژیکال را بیان می‌کنند، پدید می‌آیند. مدل پیشنهادی با ده ضریب نهایی ثابت که هشت ضریب ثابت در

^۱ Qualitative analysis

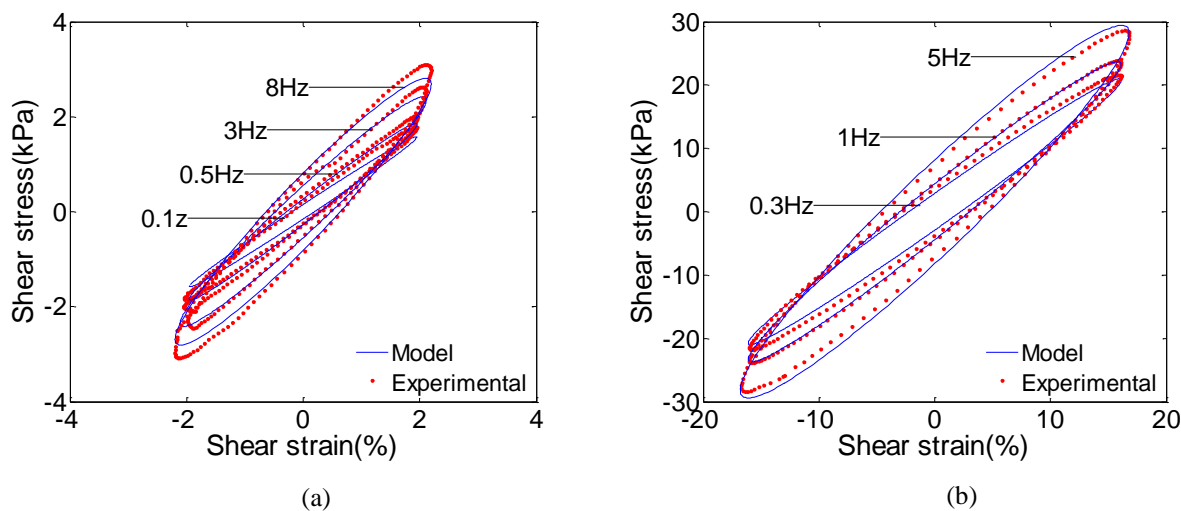
جدول ۴-۸) و دو ضریب ثابت در جدول ۴-۷) نوشته شده اند، به خوبی تمام این ۱۴۰ سری حلقه‌های هیستریزیس شکل را با حداقل خطا پیش‌بینی می‌کند. در این مدل، پارامترها از طریق الگوریتم‌های بهینه‌سازی شامل الگوریتم ژنتیک و روش کمترین مربعات به دست آمده اند.

نتایج مدل پیشنهادی از شکل ۴-۳۰ تا شکل ۴-۳۵ نشان داده شده است. شکل ۴-۳۰ رابطه بین تنش و کرنش الاستومرهای مگنتورئولوژیکال در کرنش‌های مختلف را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، اثر کرنش-نرم‌شوندگی به خوبی توسط مدل ارائه‌شده پیش‌بینی شده است. با افزایش کرنش از ۲ درصد به ۱۶ درصد، شیب نمودار هیستریزیس (که نشان دهنده میزان سختی معادل الاستومر مگنتورئولوژیکال) مقداری کاهش می‌یابد. به علاوه، مساحت حلقه‌های هیستریزیس (که نشان دهنده میزان انرژی میرا شده در یک سیکل نوسانی می‌باشد) با افزایش کرنش، بیش‌تر شده که توسط مدل پیشنهادی به خوبی پیش‌بینی شده است. بر اساس شکل ۴-۳۱، رفتار نرخ کرنش-سخت‌شوندگی^۱ نیز به طور مناسب توسط مدل پیشنهادی بیان می‌شود. با افزایش فرکانس (نرخ کرنش) شیب نمودار هیستریزیس (که نشان دهنده میزان سختی معادل الاستومر مگنتورئولوژیکال) افزایش می‌یابد. شکل ۴-۳۲، اثر میدان مغناطیسی بر روی خواص ویسکوالاستیک الاستومرهای مگنتورئولوژیکال را نشان می‌دهد که به طور مناسب توسط مدل پیشنهادی پیش‌بینی می‌شود.

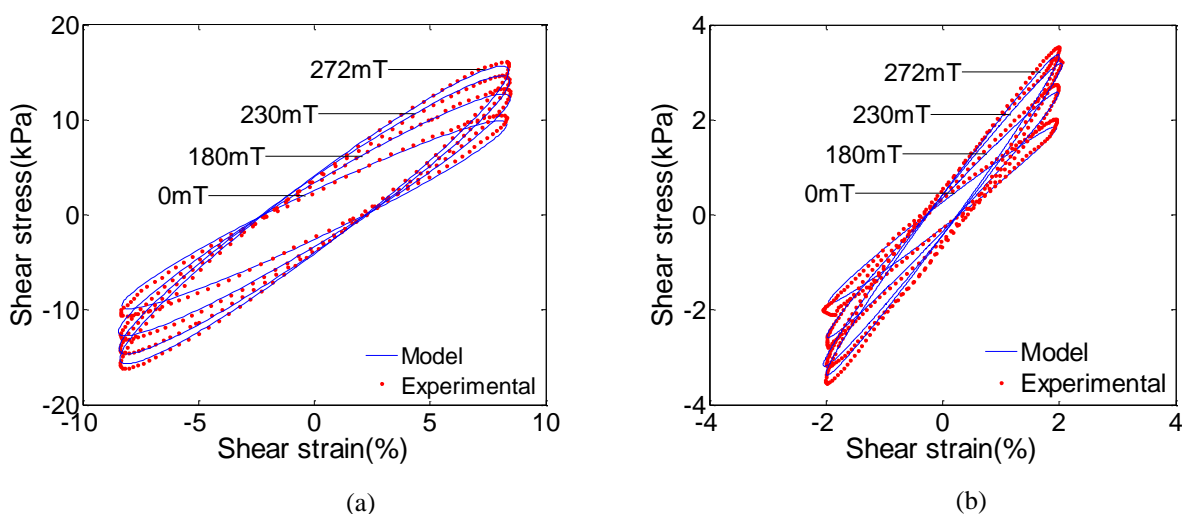
^۱ Strain-rate stiffening



شکل ۴-۳۰- حلقه‌های هیستریزس شکل تنش- کرنش برای داده‌های آزمایشگاهی و پاسخ مدل ویسکوالاستیک پیشنهادی. (a) : میدان ۱۰۰ میلی تسلا و فرکانس ۵/۰ هرتز ، (b) : میدان ۲۳۰ میلی تسلا و فرکانس ۵ هرتز [۱۴۳].
 با افزایش میدان مغناطیسی خارجی، هم شیب نمودارهای هیستریزس (که نشان دهنده میزان سختی معادل الاستومر مگنتورئولوژیکال می باشد) و هم مساحت حلقه‌های هیستریزس (که نشان دهنده میزان انرژی میرا شده در یک سیکل نوسانی می باشد) افزایش می یابند.



شکل ۴-۳۱- حلقه‌های هیستریزس شکل تنش- کرنش برای داده‌های آزمایشگاهی و پاسخ مدل ویسکوالاستیک پیشنهادی. (a) : میدان صفر میلی تسلا و کرنش ۲ درصد ، (b) : میدان ۲۷۲ میلی تسلا و کرنش ۱۶ درصد [۱۴۳].



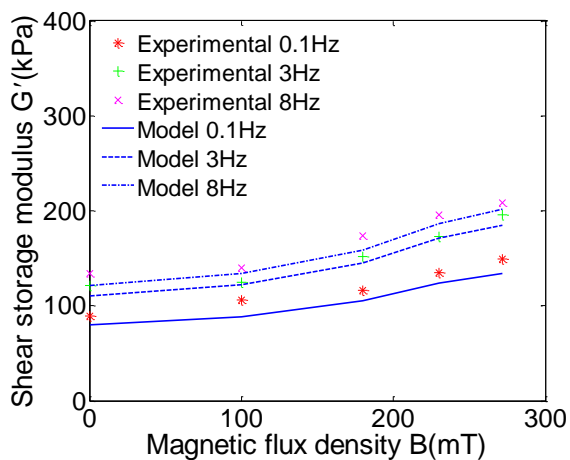
شکل ۴-۳۲- حلقه‌های هیستریزس شکل تنش- کرنش برای داده‌های آزمایشگاهی و پاسخ مدل ویسکوالاستیک پیشنهادی. (a): فرکانس ۵ هرتز و کرنش ۸ درصد، (b): فرکانس ۰/۵ هرتز و کرنش ۲ درصد [۱۴۳].

مدل ویسکوالاستیک پیشنهادی به کمک معادلات (۴-۲۳) و (۴-۲۵)، مدول ذخیره برشی (G') و ضریب تلفات میرایی^۱ (η) الاستومر مگنتورئولوژیکال را محاسبه می‌کند. شکل روند تغییرات مدول ذخیره برشی (G') و ضریب تلفات میرایی (η) بر حسب میدان مغناطیسی خارجی را نشان می‌دهد. مطابق این شکل با افزایش میدان مغناطیسی خارجی، هم مدول ذخیره برشی (G') و ضریب تلفات میرایی (η) الاستومر مگنتورئولوژیکال افزایش می‌یابند. این رفتار در تمامی کرنش‌ها و فرکانس‌های بارگذاری دیده می‌شوند. برای مثال، در کرنش ۴ درصد و فرکانس ۸ هرتز مدول ذخیره برشی (G') الاستومر مگنتورئولوژیکال از مقدار ۱۳۱/۴ کیلو پاسکال به ۲۰۸/۲ کیلو پاسکال افزایش می‌یابد. این افزایش ۵۰ درصدی در مدول ذخیره برشی (G') الاستومر مگنتورئولوژیکال، نشان دهنده قابلیت تنظیم شوندگی سختی^۲ الاستومر مگنتورئولوژیکال با میدان مغناطیسی می‌باشد. به علاوه، شکل روند تغییرات مدول ذخیره برشی (G') و ضریب تلفات میرایی (η) بر حسب فرکانس تحریک نشان می‌دهد. با توجه به این شکل با افزایش فرکانس تحریک، مدول ذخیره برشی (G') الاستومر مگنتورئولوژیکال افزایش می‌یابند و این تغییرات به خوبی توسط مدل ویسکوالاستیک پیشنهادی پیش

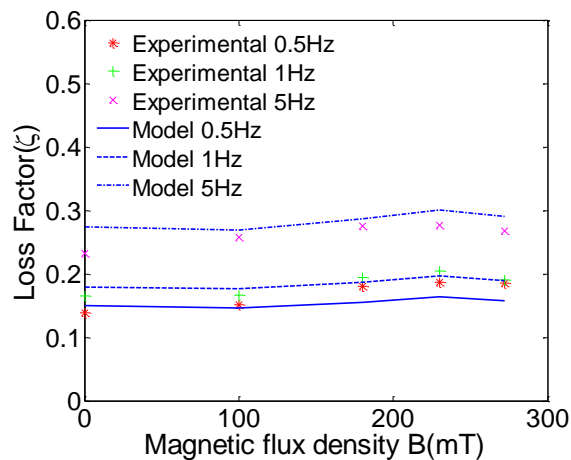
^۱ Loss Factor

^۲ Variable stiffness or magnetic field dependent stiffness

بینی می شود.



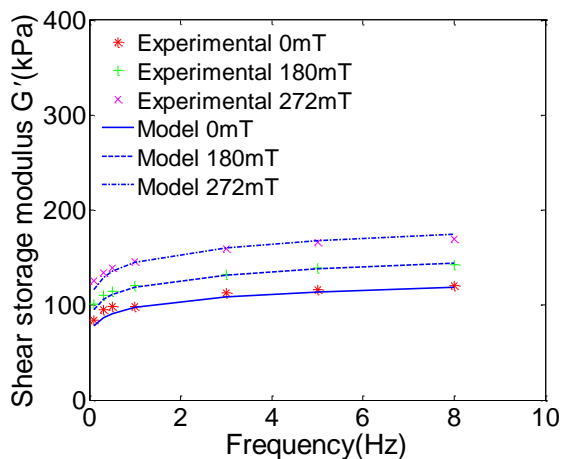
(a)



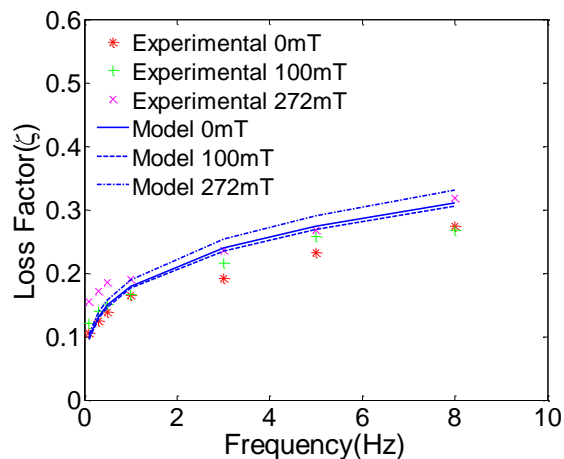
(b)

شکل ۴-۳۳- روند تغییرات مدول ذخیره برشی و ضریب تلفات میرایی بر حسب میدان برای داده‌های آزمایشگاهی و

پاسخ مدل پیشنهادی. (a) : مدول ذخیره برشی در کرنش ۴ درصد ، (b) : ضریب تلفات میرایی در کرنش ۱۶ درصد [۱۴۳].



(a)



(b)

شکل ۴-۳۴- روند تغییرات مدول ذخیره برشی و ضریب تلفات میرایی بر حسب فرکانس برای داده‌های آزمایشگاهی و

پاسخ مدل پیشنهادی. (a) : مدول ذخیره برشی در کرنش ۱۶ درصد ، (b) : ضریب تلفات میرایی در کرنش ۱۶ درصد [۱۴۳].

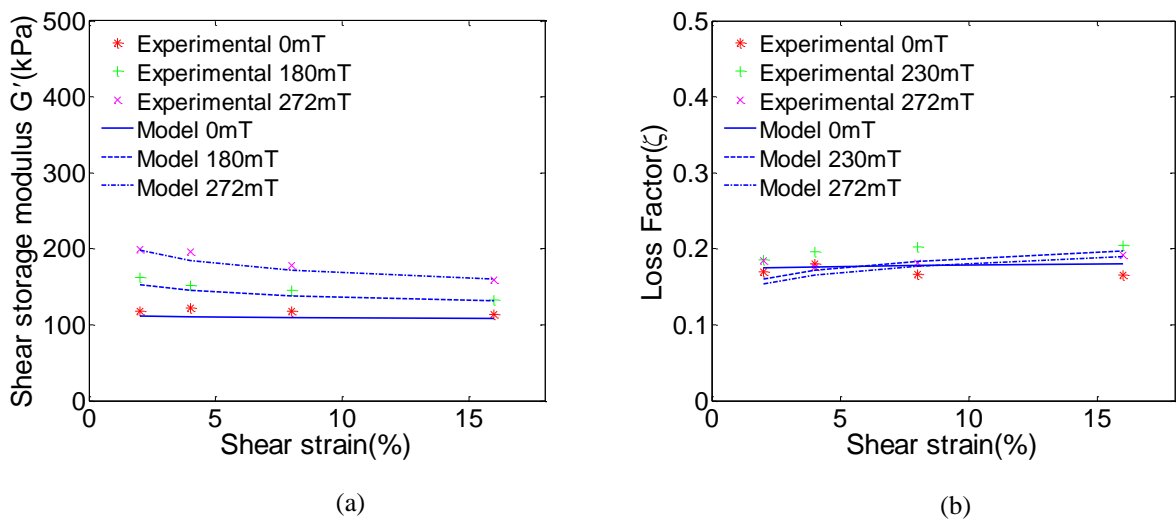
با این وجود، مدل پیشنهادی رفتار ضریب تلفات میرایی (η) بر حسب فرکانس را به خوبی تخمین

نمی‌زند. اولاً، رفتار ضریب تلفات میرایی (η) در فرکانس‌های بیشتر و کمتر از یک هرتز کاملاً متفاوت

می‌باشند. ثانیاً، ضریب تلفات میرایی (η) مدل پیشنهادی از تقسیم دو مقدار پیش بینی شده مدول

میرایی برشی (G'') بر مدول ذخیره برشی (G') به دست آمده است که این تقسیم به نوبه خود باعث

افزایش خطا می گردد.



شکل ۴-۳۵- روند تغییرات مدول ذخیره برشی و ضریب تلفات میرایی برحسب کرنش برای داده‌های آزمایشگاهی و پاسخ مدل پیشنهادی. (a): مدول ذخیره برشی در فرکانس ۳ هرتز، (b): ضریب تلفات میرایی در فرکانس ۰/۱ هرتز [۱۴۳].

ثالثاً، این خطای تقسیم در محاسبه ضریب تلفات میرایی آزمایشگاهی، نیز نمود پیدا می کند از این جهت که برای محاسبه مدول میرایی برشی (G'') و مدول ذخیره برشی (G') آزمایشگاهی، از روابط هندسی استفاده می گردد که محاسبه مساحت محصور حلقه‌های هیستریزس از ملزومات آن می باشد. بنابراین برای محاسبه مساحت محصور حلقه‌های هیستریزس نیز به دلیل نویز موجود در داده‌های آزمایش و هم چنین منحنی غیر خطی حلقه‌های هیستریزس، میزان خطا را در محاسبه ضریب تلفات میرایی (η) به صورت اجتناب ناپذیری افزایش می دهند.

شکل ۴-۳۵ روند تغییرات مدول ذخیره برشی (G') و ضریب تلفات میرایی (η) بر حسب کرنش تحریک نشان می دهد. با توجه به این شکل با افزایش کرنش تحریک، مدول ذخیره برشی (G') (الاستومر مگنتورئولوژیکال کاهش می یابد درحالی که ضریب تلفات میرایی (η) تغییر زیادی با افزایش کرنش نمی کند. این تغییرات به خصوص برای مدول ذخیره برشی (G') به خوبی توسط مدل ویسکوالاستیک پیشنهادی، پیش بینی شده اند.

۴-۴-۴ محاسبه میزان عملکرد مدل پیشنهادی (آنالیز کمی^۱)

مقایسه بین نتایج مدل پیشنهادی و داده‌های آزمایشگاهی، از شکل ۴-۳۰ تا شکل ۴-۳۵ نشان داده شد. علاوه بر این مقایسه کیفی، عملکرد مدل پیشنهادی، توسط یک مطالعه عددی برای تمام داده‌های آزمایشگاهی شامل میدان مغناطیسی‌های مختلف، کرنش‌ها و نرخ کرنش‌های گوناگون بررسی گردید. در این مطالعه از تابع میانگین نرمال^۲ جهت محاسبه میزان تطابق^۳ مدل با داده‌های آزمایشگاهی، مطابق معادله زیر استفاده شده است:

$$fitness\ value\ (\%) = 100 \times \left[1 - \frac{norm(\tau_{Model} - \tau_{Exp})}{norm(\tau_{Exp} - mean(\tau_{Exp}))} \right] \quad (۳۰-۴)$$

میزان تطابق برای مدل پیشنهادی محاسبه و مقادیر آن در جدول ۴-۹ تهیه شده است. بر اساس این جدول، در اکثر حالات مختلف بارگذاری، میزان تطابق بیشتر از ۹۰ درصد بوده و برای چند حالت نیز این مقدار بالاتر از ۹۵ درصد (میزان تطابق ایده‌آل^۴) می‌باشد. بازه میزان تطابق از ۸۵/۱۳ درصد تا ۹۸/۵۴ درصد می‌باشد. با توجه به جدول ۴-۹ میزان تطابق مدل پیشنهادی در فرکانس‌ها و کرنش‌های پایین‌تر، مقدار کمتری را نشان می‌دهد. بنابراین در پیشنهادی در فرکانس‌ها و کرنش‌های پایین‌تر، میزان عملکرد مدل کاهش می‌یابد.

^۱ Quantitative analysis

^۲ Normalized Root-Mean Squared

^۳ Fitness Value

^۴ Perfect Fitness Value

جدول ۴-۹. میزان تطابق برای مدل پیشنهادی.

میدان مغناطیسی صفر میلی تسلا				فرکانس (هرتز)
$\gamma_0 =$	$\gamma_0 = 4\%$	$\gamma_0 = 8\%$	$\gamma_0 = 16\%$	
۱۳/۸۵	۸۷/۶۵	۹۰/۶۹	۹۲/۴۹	۰/۱
۹۱/۴۶	۸۸/۰۳	۸۶/۲۶	۹۰/۹۳	۰/۳
۸۷/۲۶	۸۸/۸۵	۹۲/۴۴	۹۲/۳۴	۰/۵
۹۰/۰۳	۹۰/۲۲	۹۱/۴۱	۹۳/۱۴	۱
۹۲/۰۳	۹۰/۸۱	۸۷/۹۱	۹۰/۰۴	۳
۸۸/۴۴	۹۰/۴۱	۹۲/۸۳	۹۳/۵۶	۵
۸۸/۳۵	۸۹/۱۴	۹۱/۸۴	۹۳/۹۹	۸
میدان مغناطیسی ۱۰۰ میلی تسلا				
۸۵/۲۶	۸۹/۳۵	۸۷/۵۹	۹۶/۳۶	۰/۱
۸۸/۱۸	۹۲/۲۵	۸۹/۶۶	۹۴/۹۸	۰/۳
۹۳/۶۹	۹۱/۸۶	۹۲/۵۲	۹۵/۱۸	۰/۵
۹۳/۹۷	۹۶/۴۵	۹۴/۴۳	۹۳/۸۳	۱
۹۰/۳۲	۹۲/۶۵	۹۵/۰۳	۹۶/۳۴	۳
۸۹/۹۸	۹۴/۷۵	۹۴/۰۳	۹۳/۷۷	۵
۹۲/۹۹	۹۳/۳۷	۹۳/۱۶	۹۳/۲۳	۸
میدان مغناطیسی ۱۸۰ میلی تسلا				
۸۶/۳۵	۸۸/۲۳	۹۰/۰۹	۹۷/۳۷	۰/۱
۸۷/۹۳	۸۷/۴۵	۹۴/۶۶	۹۱/۳۷	۰/۳
۹۱/۹۲	۹۲/۷۳	۹۴/۷۵	۹۷/۴۲	۰/۵

۹۱/۰۴	۹۴/۴۸	۹۴/۷۱	۹۵/۵۵	۱
۹۱/۸۵	۹۳/۳۶	۹۵/۳۱	۹۵/۰۱	۳
۹۳/۷۲	۹۳/۳۱	۹۴/۰۹	۹۵/۸۷	۵
۹۲/۶۵	۹۴/۶۳	۹۵/۱۸	۹۴/۶۲	۸
میدان مغناطیسی ۲۳۰ میلی تسلا				
۸۷/۹۷	۹۰/۸۲	۹۲/۴۹	۹۵/۰۶	۰/۱
۹۳/۷۲	۹۳/۴۲	۹۵/۷۹	۹۳/۵۳	۰/۳
۹۵/۹۳	۹۵/۳۹	۹۶/۲۹	۹۷/۸۲	۰/۵
۹۷/۰۹	۹۴/۳۲	۹۴/۵۸	۹۵/۲۳	۱
۹۲/۲۵	۹۶/۸۲	۹۶/۳۹	۹۴/۷۸	۳
۹۶/۲۶	۹۷/۳۷	۹۸/۵۴	۹۲/۹۸	۵
۹۴/۲۱	۹۷/۰۵	۹۳/۹۱	۹۰/۴۹	۸
میدان مغناطیسی ۲۷۲ میلی تسلا				
۸۸/۲۱	۸۷/۲۸	۸۸/۱۹	۹۱/۵۲	۰/۱
۹۶/۶۳	۹۳/۱۲	۹۱/۳۳	۹۶/۷۸	۰/۳
۹۵/۹۳	۹۳/۰۳	۹۳/۴۳	۹۶/۷۹	۰/۵
۹۵/۸۱	۹۳/۷۸	۹۴/۶۲	۹۴/۹۴	۱
۹۲/۶۵	۹۴/۱۲	۹۶/۰۶	۴۴/۹۳	۳
۹۲/۲۸	۹۲/۳۱	۸۷/۹۱	۹۴/۸۳	۵
۹۳/۸۸	۹۲/۰۳	۸۷/۰۹	۹۰/۹۷	۸

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۱ جمع بندی نتایج

در این پژوهش، الاستومرهای مگنتورئولوژیکال به عنوان دسته‌ای از مواد هوشمند معرفی گردیدند. سپس یک تاریخچه جامع و کامل از روش‌های ساخت، کاربرد و مدل‌سازی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال ارائه شد. در ادامه، تفسیر کاملی از داده‌های آزمایشگاهی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال تحت آزمایش نوسان برشی بیان شد. رفتار ویسکوالاستیک الاستومرهای مگنتورئولوژیکال به طور کامل مورد تحلیل قرار گرفت. بر اساس داده‌های آزمایشگاهی، سختی و میرایی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال توسط مغناطیسی قابل کنترل می‌باشد.

به علاوه، رفتار دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال تحت تأثیر شرایط بارگذاری شامل فرکانس و کرنش می‌باشد. یک مدل ویسکوالاستیک تعمیم‌یافته بر پایه مدل کلونین-ویت جهت پیش‌بینی رفتار الاستومرهای مگنتورئولوژیکال در بارگذاری‌های نوسانی ارائه شد. نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی با تعداد ۱۰ ضریب ثابت، رفتار دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال را در بازه گسترده‌ای از میدان مغناطیسی، فرکانس و کرنش به خوبی پیش‌بینی می‌کند. همچنین مدل پیشنهادی، رفتار غیرخطی مدول ذخیره برشی را در بازه فرکانسی بین ۰/۱ هرتز تا ۸ هرتز را به صورت دقیق بیان می‌کند.

روند تغییرات مدول ذخیره برشی (G') و ضریب تلفات میرایی (η) الاستومرهای مگنتورئولوژیکال بر حسب کرنش، نرخ کرنش و میدان مغناطیسی از لحاظ فیزیکی تحلیل و ارزیابی شد. مدل پیشنهادی روند تغییرات این دو مدول به خصوص مدول ذخیره برشی (G') را به خوبی پیش‌بینی می‌کند. هم‌چنین داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که الاستومرهای مگنتورئولوژیکال دارای خواص سختی و میرایی قابل تنظیم با میدان مغناطیسی می‌باشند. این قابلیت پتانسیل این مواد را در سیستم‌های کنترل ارتعاشات افزایش داده است.

براساس داده‌های آزمایشگاهی، مدول ذخیره برشی (G') الاستومرهای مگنتورئولوژیکال تابعی از میدان مغناطیسی خارجی، کرنش و نرخ کرنش بارگذاری می‌باشد. مدول ذخیره برشی (G') با افزایش

میدان مغناطیسی خارجی و فرکانس افزایش می‌یابد در حالی که با افزایش کرنش کاهش می‌یابد. روند تغییرات مدول ذخیره برشی (G') الاستومرهای مگنتورئولوژیکال بر حسب میدان مغناطیسی خارجی، توسط یک تابع چند جمله‌ای درجه سوم تخمین زده شد. مطابق مدل پیشنهادی، مدول ذخیره برشی (G') به صورت یک تابع توانی با نمای مثبت کمتر از یک، تغییرات فرکانس بارگذاری را در نظر می‌گیرد. هم‌چنین طبق این مدل مدول ذخیره برشی (G') به صورت یک تابع توانی دیگر با نمای منفی کمتر از یک، تغییرات کرنش بارگذاری را در نظر می‌گیرد.

ضریب تلفات میرایی (η) الاستومرهای مگنتورئولوژیکال تابع میدان مغناطیسی خارجی و فرکانس بارگذاری بوده و تقریباً مستقل از کرنش می‌باشد. ضریب تلفات میرایی (η) با افزایش میدان مغناطیسی خارجی به صورت خطی افزایش می‌یابد. روند تغییرات ضریب تلفات میرایی (η) الاستومرهای مگنتورئولوژیکال بر حسب فرکانس در فرکانس‌های بیشتر و کمتر از یک متفاوت می‌باشد. از فرکانس ۰/۱ هرتز تا فرکانس ۱ هرتز به صورت نمایی افزایش و از فرکانس ۱ هرتز تا فرکانس ۸ هرتز به صورت تقریباً خطی افزایش می‌یابد. تغییرات کرنش تحریک اثر چشمگیری در ضریب تلفات میرایی (η) الاستومرهای مگنتورئولوژیکال ایجاد نمی‌کند.

به طور کلی با توجه به نمودارهای مدل پیشنهادی و داده‌های آزمایشگاهی به این نتیجه می‌رسیم که مدل ویسکوالاستیک پیشنهادی در این پژوهش به خوبی رفتار دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال را تحت میدان مغناطیسی و در بارگذاری‌های نوسانی پیش‌بینی می‌کند.

۲-۵ پژوهش‌های پیشنهادی

در این قسمت به برخی از پژوهش‌هایی که می‌تواند در این زمینه در آینده مورد تحلیل و بررسی بیشتر قرار گیرد اشاره می‌شود. برخی از این پیشنهادات در زیر عنوان شده‌اند:

- ✓ بررسی رفتار دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال در میدان‌های بسیار قوی‌تر.
- ✓ بررسی رفتار دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال در بارگذاری نوسانی برشی در کرنش‌های

بسیار بالا^۱.

- ✓ بررسی رفتار دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال در فرکانس‌های بسیار بالا.
- ✓ بررسی رفتار دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال غیر ایزوتروپ و مقایسه آن با الاستومرهای مگنتورئولوژیکال ایزوتروپ
- ✓ بررسی رفتار دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال در بارگذاری فشاری-کششی
- ✓ بررسی رفتار دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال تحت دماهای مختلف محیط
- ✓ بررسی رفتار دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال با ضخامت‌های مختلف
- ✓ بررسی اثر پیش بارگذاری بر رفتار دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال
- ✓ بررسی رفتار راه-اندازی^۲ الاستومرهای مگنتورئولوژیکال برای کاربردهای پزشکی و صنعتی
- ✓ مدل سازی به کمک روش‌های عددی از جمله روش اجزای محدود^۳ توسط نرم افزار کامسول^۴
- ✓ مدل سازی رفتار دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال در بارگذاری‌های غیر نوسانی و تصادفی
- ✓ ساخت ایزلاتور هوشمند شامل الاستومرهای مگنتورئولوژیکال

^۱ Large amplitude oscillatory shear (LAOS)

^۲ Magneto-actuation effect or magneto-striction phenomenon

^۳ FEM method

^۴ COMSOL Multiphysics® Modeling Software

مراجع

- [1] Carlson JD, Jolly MR (2000) MR fluid, foam and elastomer devices *Mechatronics* **10**, (4-5), 555-69
- [2] Li Y, Li J, Li W, Du H (2014) A state-of-the-art review on magnetorheological elastomer devices *Smart Mater. Struct.* **23**, (12), 123001
- [3] Xuan S, Xu Y, Liu T, Gong X (2015) Recent progress on the magnetorheological elastomers *Int. J. Smart. Nano. Mater.* **6**, (2), 135-48
- [4] Wang X, Cai JY 2012 Magnetorheological Elastomer: State and Application ed: Chen R, Sung W-P *Advanced Materials Research* (Switzerland: Trans Tech Publications) **393** 161-5
- [5] Ginder JM, Nichols ME, Elie LD, Tardiff JL (1999) Magnetorheological elastomers: properties and applications *Proc. SPIE* **3675**, 131-8
- [6] Rabinow J (1948) The magnetic fluid clutch *Electr. Eng.* **2**, (67), 1308-15
- [7] Shiga T, Okada A, Kurauchi T (1995) Magnetoviscoelastic behavior of composite gels *J. Appl. Polym. Sci.* **58**, (4), 787-92
- [8] Jolly MR, Carlson JD, Muñoz BC, Bullions TA (1996) The magnetoviscoelastic response of elastomer composites consisting of ferrous particles embedded in a polymer matrix *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **7**, (6), 613-22
- [9] Davis LC (1999) Model of magnetorheological elastomers *J. Appl. Phys.* **85**, (6), 3348
- [10] Liu YD, Choi HJ (2013) Recent progress in smart polymer composite particles in electric and magnetic fields *Polym. Int.* **62**, (2), 147-51
- [11] Bossis G, Laci S, Meunier A, Volkova O (2002) Magnetorheological fluids *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **252**, 224-8
- [12] Goncalves FD, Koo J-H, Ahmadian M (2006) A review of the state of the art in magnetorheological fluid technologies-Part I: MR fluid and MR fluid models *The Shock and Vibration Digest* **38**, (3), 203-19
- [13] Ashtiani M, Hashemabadi S, Ghaffari A (2015) A review on the magnetorheological fluid preparation and stabilization *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **374**, 716-30
- [14] De Vicente J, Klingenberg DJ, Hidalgo-Alvarez R (2011) Magnetorheological fluids: a review *Soft Matter* **7**, (8), 3701-10
- [15] Claracq J, Sarrazin J, Montfort J-P (2004) Viscoelastic properties of magnetorheological fluids *Rheol. Acta* **43**, (1), 38-49

- [16] Zhu X, Jing X, Cheng L (2012) Magnetorheological fluid dampers: A review on structure design and analysis *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **23**, (8), 839-73
- [17] Yang G, Spencer Jr BF, Carlson JD, Sain MK (2002) Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations *Eng. Struct.* **24**, (3), 309-23
- [18] Raja P, Wang X, Gordaninejad F (2010) Performance of a high-force controllable MR fluid damper-liquid spring suspension systems *Proc. SPIE* **7643**, 764311-8
- [19] Guo HT, Liao WH (2012) A novel multifunctional rotary actuator with magnetorheological fluid *Smart Mater. Struct.* **21**, (6), 065012
- [20] Spelta C, Previdi F, Savaresi SM, Fraternali G, Gaudiano N (2009) Control of magnetorheological dampers for vibration reduction in a washing machine *Mechatronics* **19**, (3), 410-21
- [21] Jolly MR, Bender JW, Carlson JD (1999) Properties and applications of commercial magnetorheological fluids *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **10**, (1), 5-13
- [22] Chen Z, Wang X, Ko J, Ni Y, Spencer B, Yang G, Hu J (2004) MR damping system for mitigating wind-rain induced vibration on Dongting Lake Cable-Stayed Bridge *Wind and Structures* **7**, (5), 293-304
- [23] Ruddy C, Ahearne E, Byrne G (2012) A review of magnetorheological elastomers: properties and applications *Adv. Manuf. Sci* **20**, 1-7
- [24] Chen L, Gong X-l, Li W-h (2008) Damping of magnetorheological elastomers *Chin. J. Chem. Phys.* **21**, (6), 581-5
- [25] Chen L, Gong XL, Li WH (2007) Microstructures and viscoelastic properties of anisotropic magnetorheological elastomers *Smart Mater. Struct.* **16**, (6), 2645-50
- [26] Yu M, Qi S, Fu J, Yang PA, Zhu M (2015) Preparation and characterization of a novel magnetorheological elastomer based on polyurethane/epoxy resin IPNs matrix *Smart Mater. Struct.* **24**, (4), 045009
- [27] Kallio M. 2005 *The elastic and damping properties of magnetorheological elastomers* (Finland: VTT publications) p 7
- [28] Boczkowska A, Awietjan S. 2012 Microstructure and properties of magnetorheological elastomers. ed: Boczkowska A *Advanced Elastomers-Technology, Properties and Applications* (Warsaw, Poland: InTech) pp 147-80
- [29] Zhou GY (2003) Shear properties of a magnetorheological elastomer *Smart Mater. Struct.* **12**, (1), 139
- [30] Farshad M, Le Roux M (2005) Compression properties of magnetostrictive polymer composite gels *Polym. Test.* **24**, (2), 163-8
- [31] Bednarek S (1999) The coupling of magnetostriction and magnetoresistance in elastic ferromagnetic composites with conducting matrix *Materials Science and Engineering: B* **63**, (3), 228-33
- [32] Leblanc JL (2002) Rubber–filler interactions and rheological properties in filled compounds *Prog. Polym. Sci.* **27**, (4), 627-87

- [33] Bogdanov V, Borin D, Stepanov G, Andruszkiewicz A (2009) Usage of magneto-active elastomers in a bumper of a vehicle for front impact protection *J. Phys.* **149**, (1), **1-4**
- [34] Lynch JP, Ghafoorianfar N, Gordaninejad F (2015) A magnetorheological elastomer compressive and shear sensor *Proc. SPIE* **9435**, **94351E**
- [35] Deng H-x, Gong X-l, Wang L-h (2006) Development of an adaptive tuned vibration absorber with magnetorheological elastomer *Smart Mater. Struct.* **15**, (5), **N111-N6**
- [36] Du H, Li W, Zhang N (2011) Semi-active variable stiffness vibration control of vehicle seat suspension using an MR elastomer isolator *Smart Mater. Struct.* **20**, (10), **105003**
- [37] Farshad M, Le Roux M (2004) A new active noise abatement barrier system *Polym. Test.* **23**, (7), **855-60**
- [38] Jonsdottir F, Gudmundsson FB, Gudmundsson KH, Lecomte C (2015) Preparation and Characterization of a Prototype Magnetorheological Elastomer for Application in Prosthetic Devices *7th ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials*,
- [39] Sun SS, Chen Y, Yang J, Tian TF, Deng HX, Li WH, Du H, Alici G (2014) The development of an adaptive tuned magnetorheological elastomer absorber working in squeeze mode *Smart Mater. Struct.* **23**, (7), **075009**
- [40] Deng YC, Bian YS, Gao ZH (2013) Study and Manufacture of Magneto-Rheological Vibration Absorber Based on Internal Resonance *Appl. Mech Mater.* **389**, **642-8**
- [41] Xu Z, Gong X, Liao G, Chen X (2010) An Active-damping-compensated Magnetorheological Elastomer Adaptive Tuned Vibration Absorber *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **21**, (10), **1039-47**
- [42] Miedzińska D, Gieleta R, Osiński J (2015) Experimental and Analytical Research on Resonance Phenomena of Vibrating Head with MRE Regulating Element *Int. J. Appl Mech. Eng.* **20**, (1), **201-8**
- [43] Sun S, Yang J, Deng H, Du H, Li W, Alici G, Nakano M (2015) Horizontal vibration reduction of a seat suspension using negative changing stiffness magnetorheological elastomer isolators *Int. J. Veh. Des.* **68**, (1-3), **104-18**
- [44] Aridon G, Lindroos T, Keinänen J (2011) Evaluation of magneto-rheological elastomers for spacecrafts *Constitutive Models for Rubber VII*, **279**
- [45] Ginder JM, Schlotter WF, Nichols ME 2001 Magnetorheological elastomers in tunable vibration absorbers ed: Proc. SPEI) **4331** 103-10
- [46] Kallio M, Lindroos T, Aalto S, Järvinen E, Kärnä T, Meinander T (2007) Dynamic compression testing of a tunable spring element consisting of a magnetorheological elastomer *Smart Mater. Struct.* **16**, (2), **506-14**
- [47] Behrooz M, Wang X, Gordaninejad F (2014) Performance of a new magnetorheological elastomer isolation system *Smart Mater. Struct.* **23**, (4), **045014**
- [48] Ubaidillah, Sutrisno J, Purwanto A, Mazlan SA (2015) Recent Progress on

Magnetorheological Solids: Materials, Fabrication, Testing, and Applications *Adv. Eng. Mater.* **17**, (5), **563-97**

[49] Liu T, Gong X, Xu Y, Pang H, Xuan S (2014) Magneto-induced large deformation and high-damping performance of a magnetorheological plastomer *Smart Mater. Struct.* **23**, (10), **105028**

[50] Xuan S, Zhang Y, Zhou Y, Jiang W, Gong X (2012) Magnetic Plasticine™: a versatile magnetorheological material *JMCh* **22**, (26), **13395-400**

[51] Fuhrer R, Athanassiou EK, Luechinger NA, Stark WJ (2009) Crosslinking Metal Nanoparticles into the Polymer Backbone of Hydrogels Enables Preparation of Soft, Magnetic Field-Driven Actuators with Muscle-Like Flexibility *Small* **5**, (3), **383-8**

[52] Wei B, Gong X, Jiang W, Qin L, Fan Y (2010) Study on the properties of magnetorheological gel based on polyurethane *J. Appl. Polym. Sci.* **118**, (5), **2765-71**

[53] Yang P, Yu M, Fu J, Liu S, Qi S, Zhu M (2015) The damping behavior of magnetorheological gel based on polyurethane matrix *Polymer Composites* **12**, (2), **033245**

[54] Xu Y, Gong X, Xuan S (2013) Soft magnetorheological polymer gels with controllable rheological properties *Smart Mater. Struct.* **22**, (7), **075029**

[55] Li Y, Li J, Tian T, Li W (2013) A highly adjustable magnetorheological elastomer base isolator for applications of real-time adaptive control *Smart Mater. Struct.* **22**, (9), **095020**

[56] Li Y, Li J, Samali B (2012) A novel adaptive base isolator utilising magnetorheological elastomer *22nd Australasian Conf. on the Mechanics of Structures and Materials (Sydney, Dec. 2012)* **763-7**

[57] Lynch JP, Li J, Li Y, Li W, Samali B, Yun C-B, Wang K-W (2013) Development of adaptive seismic isolators for ultimate seismic protection of civil structures *Proc. SPIE* **8692**, **86920H**

[58] Ni YQ, Ying ZG, Chen ZH (2010) Magneto-rheological elastomer (MRE) based composite structures for micro-vibration control *Earthq. Eng. Eng. Vib.* **9**, (3), **345-56**

[59] Ying Z, Ni Y, Sajjadi M (2013) Nonlinear dynamic characteristics of magneto-rheological visco-elastomers *Sci. China Technol. Sci.* **56**, (4), **878-83**

[60] Wang X, Gordaninejad F, Calgar M, Liu Y, Sutrisno J, Fuchs A (2009) Sensing Behavior of Magnetorheological Elastomers *J. Mech. Des.* **131**, (9), **091004**

[61] Ngatu GT, Hu W, Wereley NM, Kothera CS (2010) Adaptive Snubber-Type Magnetorheological Fluid-Elastomeric Helicopter Lag Damper *AIAA Journal* **48**, (3), **598-610**

[62] Yang C, Fu J, Yu M, Zheng X, Ju B (2015) A new magnetorheological elastomer isolator in shear-compression mixed mode *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **26**, (10), **1290-300**

[63] Yang J, Du H, Li W, Li Y, Li J, Sun S, Deng H (2013) Experimental study and modeling of a novel magnetorheological elastomer isolator *Smart Mater. Struct.* **22**, (11),

117001

- [64] Ying ZG, Ni YQ, Ye SQ (2014) Stochastic micro-vibration suppression of a sandwich plate using a magneto-rheological visco-elastomer core *Smart Mater. Struct.* **23**, (2), **025019**
- [65] Yu M, Wang S (2010) The composite MRE embedded with a copper coil *Smart Mater. Struct.* **19**, (6), **065023**
- [66] Zhang WHLXZ (2009) Adaptive tuned dynamic vibration absorbers working with MR elastomers *Smart Struct. Syst.* **5**, **517-29**
- [67] Zhou GY, Wang Q (2005) Design of a smart piezoelectric actuator based on a magnetorheological elastomer *Smart Mater. Struct.* **14**, (4), **504-10**
- [68] Xing ZW, Yu M, Fu J, Wang Y, Zhao LJ (2015) A laminated magnetorheological elastomer bearing prototype for seismic mitigation of bridge superstructures *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*,
- [69] Li W, Zhang X (2008) Research and applications of MR elastomers *Recent Patents on Mechanical Engineering* **1**, (3), **161-6**
- [70] Li W, Kostidis K, Zhang X, Zhou Y 2009 Development of a force sensor working with MR elastomers ed: *Advanced Intelligent Mechatronics, 2009. AIM 2009. IEEE/ASME International Conference on: IEEE*) 233-8
- [71] Sun S, Yang J, Li W, Deng H, Du H, Alici G (2015) Development of an MRE adaptive tuned vibration absorber with self-sensing capability *Smart Mater. Struct.* **24**, (9), **095012**
- [72] Deng H-x, Gong X-l (2008) Application of magnetorheological elastomer to vibration absorber *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.* **13**, (9), **1938-47**
- [73] Sun L, Li W, Guo S, Chen W (2013) A magnetorheological-elastomer-based energy absorption device for car crash protection *Int. J. Veh. Des.* **63**, (2-3), **223-40**
- [74] Leng D, Sun L, Gordaninejad F, Bayat A, Lin Y (2015) The dynamic performance of magnetic-sensitive elastomers under impact loading *Smart Mater. Struct.* **24**, (4), **045023**
- [75] Li Y, Li J, Li W, Samali B (2013) Development and characterization of a magnetorheological elastomer based adaptive seismic isolator *Smart Mater. Struct.* **22**, (3), **035005**
- [76] Zhu G, Xiong Y, Daley S, Shenoi R (2015) Magnetorheological elastomer materials and structures with vibration energy control for marine application *Anal. Des. Mar. Struct.*, **197**
- [77] Liao W-H, Behrooz M, Gordaninejad F (2015) Behavior of a flexible controllable micropump *Smart Structures and Materials* **9431**, **943109**
- [78] Lee D, Lee M, Jung N, Yun M, Lee J, Thundat T, Jeon S (2014) Modulus-tunable magnetorheological elastomer microcantilevers *Smart Mater. Struct.* **23**, (5), **055017**
- [79] Kallio M, Lindroos T, Aalto S, Järvinen E, Kärnä T, Meinander T (2007) Dynamic compression testing of a tunable spring element consisting of a magnetorheological

elastomer *Smart Mater. Struct.* **16**, (2), **506-14**

[80] Ismail R, Ibrahim A, Hamid HA. 2014 A Review of Magnetorheological Elastomers: Characterization Properties for Seismic Protection. ed: Hassan R, Yusoff M, Ismail Z, Amin NM, Fadzil MA *InCIEC 2013* (Singapore: Springer) pp 237-48

[81] Watson JR. Method and apparatus for varying the stiffness of a suspension bushing. 1997: Google Patents.

[82] Li W, Zhang X, Du H. 2013 Magnetorheological elastomers and their applications. ed: Visakh PM, Thomas S, Chandra AK, Mathew AP *Advances in Elastomers I: Blends and Interpenetrating Networks* (Berlin, Germany: Springer) pp 357-74

[83] Liu T-Y, Hu S-H, Liu T-Y, Liu D-M, Chen S-Y (2006) Magnetic-sensitive behavior of intelligent ferrogels for controlled release of drug *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids* **22**, (14), **5974-8**

[84] Zhang X, Peng S, Wen W, Li W (2008) Analysis and fabrication of patterned magnetorheological elastomers *Smart Mater. Struct.* **17**, (4), **045001**

[85] Nguyen VQ, Ahmed AS, Ramanujan RV (2012) Morphing soft magnetic composites *Adv. Mater.* **24**, (30), **4041-54**

[86] Shen Y, Golnaraghi MF, Heppler GR (2004) Experimental Research and Modeling of Magnetorheological Elastomers *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **15**, (1), **27-35**

[87] Yang P, Yu M, Fu J, Liu S, Qi S, Zhu M (2015) The damping behavior of magnetorheological gel based on polyurethane matrix *PoCom*,n/a-n/a

[88] Bazinenkov AM, Mikhailov VP (2015) Active and Semi Active Vibration Isolation Systems Based on Magnetorheological Materials *Proc. Eng.* **106**, **170-4**

[89] Danas K, Kankanala SV, Triantafyllidis N (2012) Experiments and modeling of iron-particle-filled magnetorheological elastomers *J. Mech. Phys. Solids* **60**, (1), **120-38**

[90] Galipeau E, Ponte Castañeda P (2013) A finite-strain constitutive model for magnetorheological elastomers: Magnetic torques and fiber rotations *J. Mech. Phys. Solids* **61**, (4), **1065-90**

[91] Kankanala S (2004) On finitely strained magnetorheological elastomers *J. Mech. Phys. Solids* **52**, (12), **2869-908**

[92] Borcea L, Bruno O (2001) On the magneto-elastic properties of elastomer-ferromagnet composites *J. Mech. Phys. Solids* **49**, (12), **2877-919**

[93] Dorfmann A, Ogden RW (2003) Magnetoelastic modelling of elastomers *Eur. J. Mech. A. Solid* **22**, (4), **497-507**

[94] Zhou GY, Li JR (2003) Dynamic behavior of a magnetorheological elastomer under uniaxial deformation: I. Experiment *Smart Mater. Struct.* **12**, (6), **859**

[95] Demchuk S, Kuz'min V (2002) Viscoelastic properties of magnetorheological elastomers in the regime of dynamic deformation *J. Eng. Phys. Thermophys.* **75**, (2), **396-400**

[96] Guo F, Du Cb, Li Rp (2015) Viscoelastic Parameter Model of Magnetorheological

- Elastomers Based on Abel Dashpot *J. Adv. Mech. Eng* **6**, (0), **629386**
- [97] Mark RJ, Carlson JD, Beth CM (1996) A model of the behaviour of magnetorheological materials *Smart Mater. Struct.* **5**, (5), **607**
- [98] Albanese A-M, Cunefare KA (2003) Properties of a magnetorheological semi-active vibration absorber *Proc. SPIE* **5052**, **36-43**
- [99] Ginder JM, Schlotter WF, Nichols ME (2001) Magnetorheological elastomers in tunable vibration absorbers *Proc. SPIE* **4331**, **103-10**
- [100] Ginder JM, Nichols ME, Elie LD, Clark SM (2000) Controllable-stiffness components based on magnetorheological elastomers *Proc. SPIE* **3985**, **418-25**
- [101] Yao Z, Fang J, Chen JC, Wang W (2003) Investigation of hard magnetic silicone elastomer thin films *Proc. SPIE* **4982**, **120-9**
- [102] Wang K-W, Wang X, Gordaninejad F, Hitchcock GH (2004) Dynamic behaviors of magnetorheological fluid-elastomer composites under oscillatory compression *Proc. SPIE* **5386**, **250-8**
- [103] Zhou GY, Wang Q (2005) Magnetorheological elastomer-based smart sandwich beams with nonconductive skins *Smart Mater. Struct.* **14**, (5), **1001-9**
- [104] Zhou GY, Wang Q (2005) A linear time-variant system for signal modulation by use of magnetorheological elastomer-suspended beams *Smart Mater. Struct.* **14**, (6), **1154-62**
- [105] Wang K-W, Wang X, Gordaninejad F, Hitchcock G (2005) A magneto-rheological fluid-elastomer vibration isolator *Proc. SPIE* **5760**, **217-25**
- [106] Zhou GY, Wang Q (2005) Field-dependent dynamic properties of magnetorheological elastomer-based sandwich beams *Proc. SPIE* **5760**, **226-37**
- [107] Flatau AB, Zhou GY, Wang Q (2005) Use of magnetorheological elastomer for smart piezoelectric power actuator design and signal processing *Proc. SPIE* **5764**, **411-20**
- [108] Zhou GY, Wang Q (2006) Use of magnetorheological elastomer in an adaptive sandwich beam with conductive skins. Part I: Magnetoelastic loads in conductive skins *Int. J. Solid. Struct.* **43**, (17), **5386-402**
- [109] Zhou GY, Wang Q (2006) Use of magnetorheological elastomer in an adaptive sandwich beam with conductive skins. Part II: Dynamic properties *Int. J. Solid. Struct.* **43**, (17), **5403-20**
- [110] Zhou GY, Wang Q (2006) Study on the adjustable rigidity of magnetorheological-elastomer-based sandwich beams *Smart Mater. Struct.* **15**, (1), **59-74**
- [111] Zhou GY, Lin KC, Wang Q (2006) Finite element studies on field-dependent rigidities of sandwich beams with magnetorheological elastomer cores *Smart Mater. Struct.* **15**, (3), **787-91**
- [112] Zhou GY (2004) Complex shear modulus of a magnetorheological elastomer *Smart Mater. Struct.* **13**, (5), **1203-10**

- [113] Blom P, Kari L (2005) Amplitude and frequency dependence of magneto-sensitive rubber in a wide frequency range *Polym. Test.* **24**, (5), 656-62
- [114] Stepanov GV, Abramchuk SS, Grishin DA, Nikitin LV, Kramarenko EY, Khokhlov AR (2007) Effect of a homogeneous magnetic field on the viscoelastic behavior of magnetic elastomers *Polymer* **48**, (2), 488-95
- [115] Li WH, Zhou Y, Tian TF (2010) Viscoelastic properties of MR elastomers under harmonic loading *Rheol. Acta* **49**, (7), 733-40
- [116] Zhu J-T, Xu Z-D, Guo Y-Q (2012) Magnetoviscoelasticity parametric model of an MR elastomer vibration mitigation device *Smart Mater. Struct.* **21**, (7), 075034
- [117] Eem S-H, Jung H-J, Koo J-H (2012) Modeling of magneto-rheological elastomers for harmonic shear deformation *IEEE Trans. Magn.* **48**, (11), 3080-3
- [118] Blom P, Kari L (2011) A nonlinear constitutive audio frequency magneto-sensitive rubber model including amplitude, frequency and magnetic field dependence *J. Sound Vib.* **330**, (5), 947-54
- [119] Chen L, Jerrams S (2011) A rheological model of the dynamic behavior of magnetorheological elastomers *J. Appl. Phys.* **110**, (1), 013513
- [120] Wen Y-K (1976) Method for random vibration of hysteretic systems *J. Eng. Mech. Div.* **102**, (2), 249-63
- [121] Yu Y, Li Y, Li J 2014 A Novel Strain Stiffening Model for Magnetorheological Elastomer Base Isolator and Parameter Estimation Using Improved Particle Swarm Optimization ed: Rodellar J, Guemes A, Pozo F *6th World Conference on Structural Control and Monitoring* (Barcelona, Spain: IASCM) **1**, 318
- [122] Yu Y, Li Y, Li J 2014 A New Hysteretic Model for Magnetorheological Elastomer Base Isolator and Parameter Identification Based on Modified Artificial Fish Swarm Algorithm ed: *The International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining (ISARC 2014): IAARC*) Paper ID: 196
- [123] Behrooz M, Wang X, Gordaninejad F (2014) Modeling of a new semi-active/passive magnetorheological elastomer isolator *Smart Mater. Struct.* **23**, (4), 045013
- [124] Yang J, Du H, Li W, Li Y, Li J, Sun S, Deng HX (2013) Experimental study and modeling of a novel magnetorheological elastomer isolator *Smart Mater. Struct.* **22**, (11), 117001
- [125] Li Y, Li J (2013) Development and Modeling of a Highly-Adjustable Base Isolator Utilizing Magnetorheological Elastomer *ASME 2013 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*, V001T03A10
- [126] Bellan C, Bossis G (2002) Field dependence of viscoelastic properties of MR elastomers *Int. J. Mod Phys B* **16**, 2447-53
- [127] Liao G, Gong X, Xuan S, Guo C, Zong L (2012) Magnetic-Field-Induced Normal Force of Magnetorheological Elastomer under Compression Status *Ind. Eng. Chem. Res.*

51, (8), 3322-8

[128] Liao G, Gong X, Xuan S (2013) Magnetic Field-Induced Compressive Property of Magnetorheological Elastomer under High Strain Rate *Ind. Eng. Chem. Res.* **52**, (25), 8445-53

[129] Koo JH, Khan F, Jang DD, Jung HJ (2009) Dynamic characterization and modeling of magneto-rheological elastomers under compressive loadings *J. Phys: Conf. Ser* **149**, 012093

[130] Jeong-Hoi K, Fazeel K, Dong-Doo J, Hyung-Jo J (2010) Dynamic characterization and modeling of magneto-rheological elastomers under compressive loadings *Smart Mater. Struct.* **19**, (11), 117002

[131] Stoll A, Mayer M, Monkman GJ, Shamonin M (2014) Evaluation of highly compliant magneto-active elastomers with colossal magnetorheological response *J. Appl. Polym. Sci.* **131**, (2)

[132] Chen L, Gong X-l, Jiang W-q, Yao J-j, Deng H-x, Li W-h (2007) Investigation on magnetorheological elastomers based on natural rubber *Journal of Materials Science* **42**, (14), 5483-9

[133] W.P. Fletcher ANG (1953) Non-linearity in the dynamic properties of vulcanised rubber compounds *Transactions of the Institution of the Rubber* **29**, 266-80

[134] Payne AR, Whittaker RE (1971) Low Strain Dynamic Properties of Filled Rubbers *Rubber Chem. Technol.* **44**, (2), 440-78

[135] Lokander M, Stenberg B (2003) Improving the magnetorheological effect in isotropic magnetorheological rubber materials *Polym. Test.* **22**, (6), 677-80

[136] Diani J, Fayolle B, Gilormini P (2009) A review on the Mullins effect *Eur. Polym. J.* **45**, (3), 601-12

[137] Zhang W, Gong X, Xuan S, Jiang W (2011) Temperature-Dependent Mechanical Properties and Model of Magnetorheological Elastomers *Ind. Eng. Chem. Res.* **50**, (11), 704-12

[138] Lejon J, Kari L (2009) Preload, frequency, vibrational amplitude and magnetic field strength dependence of magnetosensitive rubber *Plastics, rubber and composites* **38**, (8), 321-6

[139] Gordaninejad F, Wang X, Mysore P (2012) Behavior of thick magnetorheological elastomers *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **23**, (9), 1033-9

[140] Koo J-H, Khan F, Jang D-D, Jung H-J (2010) Dynamic characterization and modeling of magneto-rheological elastomers under compressive loadings *Smart Mater. Struct.* **19**, (11), 117002

[141] Ciambella J (2010) Experimental testing and nonlinear viscoelastic modeling of filled rubber. Italy: Sapienza University of Rome.

[142] Brown R. (2006) *Physical testing of rubber* (Springer US: Springer Science & Business Media)

[143] Norouzi M, Alehashem SMS, Vatandoost H, Ni YQ, Shahmardan MM (2015) A

new approach for modeling of magnetorheological elastomers *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, DOI: 1045389X15615966

Abstract

Magnetorheological elastomers (MREs) are a kind of smart materials its mechanical properties especially rheological features can be adjusted by applying an external magnetic field. MREs are fabricated by embedding micron sized iron particles into a rubber like material matrix such as elastomer. These magnetizable particles can be distributed homogeneously (Isotropic MRE) or to be formed such a chain-like columnar structures (Anisotropic MRE) in a matrix. MREs have two unique characteristics such as variable stiffness and variable damping that can be used mostly in vibration control in different mechanical devices and also changing its natural frequencies. Therefore, in order to fabricate and utilize MRE in various applications, suitable advanced model capturing dynamic characteristics of MRE, is completely essential and important. The first step in modeling of dynamic behavior of MRE is identifying and interpreting the viscoelastic and mechanical properties of this materials in presence of various magnetic field as well as different loading conditions. In this study viscoelastic behavior of a MRE specimen by using of available experimental data from an oscillatory shear test is investigated and interpreted; then this behavior are represented by strain-stress hysteresis loops. In order to study dynamic behavior of MRE, a lot of strain-stress curves are plotted. These strain-stress hysteresis loops illustrating the viscoelastic nature of MRE, equivalent stiffness (the slope of main axis of strain-stress loops) and equivalent damping (area inside the hysteresis loops) that their shapes based on the experimental data, indicating its dependency on the external magnetic field as well as loading conditions.

In the dynamic oscillatory shear regime the shape of strain-stress loops are usually symmetric hysteresis. Additionally, the trend of shear storage modulus of MRE based on the frequency from 0.1 Hz to 8 Hz is completely nonlinear indicating the strong dependency of shear storage modulus to the strain-rate. In order to predict the dynamic behavior of MRE a modified Kelvin-Voigt viscoelastic model is proposed. The proposed viscoelastic model describes relationships between shear stress and shear strain of MREs based on input frequency, shear strain and magnetic flux density very accurately. Unlike the previous models of MREs, the coefficients of this model, calculated by nonlinear regression method in parallel with Genetic algorithm, are constant at various harmonic shear loads such as strain and strain-rate and only depend on the magnetic field. With these constant coefficients there is no need to implementing tough optimization algorithms at each new different loading condition of strain and strain-rate. Consequently, the stiffness and damping properties of MREs can be controlled just by adjusting the external magnetic field at each arbitrary loading conditions. Then, the proposed model in a control algorithms will work faster.

Keywords: magnetorheological elastomer, modeling, hysteresis behavior, magnetic field dependent, strain dependent, strain-rate dependent, magnetic field dependent parameters.



Shahrood University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering

Fabrication and modeling of magnetorheological elastomer (MRE)

Hossein Vatandoost

Supervisors:

Dr. Mahmood Norouzi
Prof. Mohammad Mohsen Shahmardan

Advisor

Dr. Masoud Sajjadi Alehashem

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

Feb 2016