



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی و مدلسازی رفتار الاستومر مگنتورئولوژیکال تحت بارگذاری فشاری-کششی

مهدی گیلانی

استاد راهنما:

دکتر محمود نوروزی

استاد مشاور:

دکتر سید مسعود سجادی آل هاشم

بهمن ۱۳۹۴

الْحَمْدُ لِلَّهِ





دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده ی مهندسی مکانیک

گروه تبدیل انرژی

بررسی و مدل سازی رفتار الاستومر مگنتورئولوژیکال تحت بارگذاری

فشاری-کششی

دانشجو: مهدی گیلانی

استاد راهنما:

دکتر محمود نوروزی

استاد مشاور:

دکتر سید مسعود سجادی آل هاشم

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه ی کارشناسی ارشد

بهمن ۱۳۹۴





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 آقای مهدی گیلانی به شماره دانشجویی ۹۲۱۲۳۱۴ رشته مکانیک گرایش تبدیل انرژی تحت عنوان بررسی و مدل سازی رفتار الاستومر مگنتورئولوژیکال تحت بارگذاری فشاری-کششی که در تاریخ ۱۳۹۴/۱۱/۲۷ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

<input type="checkbox"/> مردود	<input type="checkbox"/> دفاع مجدد	<input checked="" type="checkbox"/> قبول (با درجه: عالی - امتیاز: ۱۹)
--------------------------------	------------------------------------	---

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۸/۹۹)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۴- قابل قبول (۱۴ - ۱۵/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	استادیار	دکتر محمود نوروزی	۱- استادراهنمای اول
—	—	—	۲- استادراهنمای دوم
	استادیار	دکتر مسعود سجادی آل هاشم	۳- استاد مشاور
	استادیار	دکتر علی عباس نژاد	۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
	استادیار	دکتر علی خالقی	۵- استاد ممتحن اول
	استادیار	دکتر پوریا اکبرزاده	۶- استاد ممتحن دوم

رئیس دانشکده:

تقدیم به پدر و مادر عزیز و همسر مهربانم که دلسوزانه و صبورانه مسیر تحصیل و تحقیق

را برایم هموار ساختند...





## تشکر و قدردانی

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

لازم می‌دانم از یکایک اعضای خانواده‌ام که در تمام مراحل زندگی، یار و یاورم بوده‌اند قدردانی کنم. همچنین از استاد بزرگواریم جناب آقای دکتر محمود نوروزی که با تلاش و نبوغ خود، در مسیر تحصیل و پژوهش راهنمایم بوده‌اند، و جناب آقای دکتر مسعود سجادی که بدون یاری ایشان انجام این پژوهش ممکن نبود، بسیار متشکرم. در پایان از تمامی دوستانی که با راهنمایی‌های خود کمک شایانی در مسیر این تحقیق به بنده داشته‌اند سپاسگزارم.



## تعهد نامه

اینجانب مهدی گیلانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک-گرایش تبدیل انرژی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی و مدلسازی رفتار الاستومر مگنتورئولوژیکال تحت بارگذاری فشاری-کششی تحت راهنمایی دکتر محمود نوروزی متعهد می شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای 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 اخلاق انسانی رعایت شده است .

### تاریخ

### امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق نشر

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

## چکیده

هدف این تحقیق، شناخت، بررسی و مدل‌سازی رفتار الاستومر مگنتورئولوژیکال یا MRE که نوعی ماده‌ی ویسکوالاستیک هوشمند با خواص رئولوژیکی متغیر است، می‌باشد. با استفاده از داده‌های حاصل از تست آزمایشگاهی فشاری-کششی MRE که در چهار فرکانس ۱، ۳، ۵ و ۸ هرتز و در پنج چگالی شار مغناطیسی ۰، ۱۰۰، ۱۷۰، ۲۲۰ و ۲۶۰ میلی‌تسلا و در چهار دامنه‌ی کرنش ۱، ۲، ۴ و ۸ درصد انجام شد و پس از نویزگیری از داده‌ها به کمک تبدیل wavelet و تبدیل داده‌های نیرو - جابجایی به تنش - کرنش در محیط نرم‌افزار MATLAB، واکنش این ماده به بار دینامیکی اعمالی در حالت‌های مختلف بارگذاری بررسی شده است. به این ترتیب که وابستگی خواص و مدول‌های مادی MRE به فرکانس ورودی، شدت میدان مغناطیسی خارجی و دامنه‌ی کرنش سنجیده و تشریح می‌شود. در بخش بعدی پس از بیان مقدماتی از علم رئولوژی و مدل‌های پایه‌ی ویسکوالاستیک به انتخاب و بهبود مدلی مناسب برای شبیه‌سازی و توجیه رفتار MRE در بارگذاری کششی-فشاری پرداخته شده است. در نهایت با توجه به ماهیت رفتارهای ماده در حالت‌های مختلف تست، مدلی متشکل از دو المان ماکسول و یک المان فنری که به صورت موازی به یکدیگر بسته شده‌اند با پارامترهای منحصر به فرد انتخاب گردید. المان‌های مختلف مدل به نحوی تعریف شده‌اند که مدل بیش‌ترین میزان انطباق ممکن را بر نتایج تست‌های دینامیکی داشته باشد. به منظور دستیابی به بهترین مقدار ممکن برای پارامترهای مجهول مدل، تابعی به نام تابع خطا که به صورت مجموع مربعات اختلاف بین نتایج تست و نتایج مدل در هر کدام از ۸۰ حالت بارگذاری تعریف شده است را به کار گرفتیم. در این مرحله با انتخاب الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک (GA) به عنوان ابزاری برای یافتن کم‌ترین مقدار ممکن برای تابع خطا در محیط نرم‌افزار MATLAB، مقادیر بهینه‌ی پارامترهای مجهول مدل بدست آمدند. در پایان این پژوهش، به راستی‌آزمایی مدل ارائه شده و بررسی میزان تطابق آن با نتایج آزمایشگاهی پرداخته شده است.

**واژگان کلیدی:** الاستومر مگنتورئولوژیکال، مدل تعمیم‌یافته‌ی ماکسول، الگوریتم ژنتیک

## فهرست مطالب

---

فصل ۱ (مقدمه).....	۱
۱-۱ پیشگفتار.....	۲
۲-۱ مواد هوشمند.....	۲
۳-۱ سیالات مگنتورئولوژیکال.....	۳
۴-۱ الاستومرهای مگنتورئولوژیکال یا MRE ها.....	۳
۵-۱ ساختار MRE.....	۴
۶-۱ انواع MRE و خواص آن.....	۵
۷-۱ نحوه‌ی عملکرد و بکارگیری MRE ها.....	۷
۸-۱ خواص MRE و رفتار این ماده تحت میدان مغناطیسی.....	۹
۹-۱ کاربردهای MRE.....	۱۱
۱۰-۱ چالش‌های فناوری MR.....	۱۳
۱۱-۱ پیشینه‌ی پژوهش.....	۱۴
۱۲-۱ معرفی تحقیق حاضر.....	۲۱
۱۳-۱ ضرورت تحقیق.....	۲۲
۱۴-۱ نوآوری‌های تحقیق.....	۲۲
فصل ۲ (طراحی، اجرا و تحلیل تست کشش-فشار).....	۲۵
۱-۲ پیشگفتار.....	۲۶
۲-۲ معرفی تست کشش-فشار MRE.....	۲۶
۳-۲ پیکربندی آزمایش.....	۲۷
۴-۲ آماده‌سازی نمونه‌ی MRE برای تست.....	۳۰

۳۱	.....۵-۲ اندازه‌گیری چگالی شار مغناطیسی
۳۲	.....۶-۲ نتایج تست کشش-فشار
۳۵	.....۷-۲ حذف نویز و تبدیل داده‌ها به منحنی‌های تنش- کرنش
۳۹	.....۸-۲ تحلیل نتایج تست کشش-فشار
۳۹	.....۱-۸-۲ بررسی تقارن و عدم تقارن منحنی‌های هیستریزس تنش بر حسب کرنش
۴۰	.....۲-۸-۲ بررسی رابطه‌ی انرژی اتلافی در هر سیکل با مقدار چگالی شار مغناطیسی
۴۱	.....۳-۸-۲ بررسی رابطه‌ی شیب منحنی‌های تنش-کرنش با چگالی شار مغناطیسی
۴۲	.....۴-۸-۲ بررسی تاثیر تغییر فرکانس ورودی بر رفتار MRE
۴۴	.....۵-۸-۲ بررسی تاثیر تغییر دامنه‌ی کرنش بر رفتار MRE
۴۶	.....۶-۸-۲ بررسی تغییرات مدول ذخیره‌ای در برابر چگالی شار مغناطیسی
۴۸	.....۷-۸-۲ بررسی تغییرات مدول ذخیره‌ای در برابر فرکانس ورودی
۴۹	.....۸-۸-۲ بررسی تغییرات مدول ذخیره‌ای در برابر دامنه‌ی کرنش
۵۰	.....۹-۸-۲ بررسی تغییرات مدول اتلافی در برابر چگالی شار مغناطیسی
۵۱	.....۱۰-۸-۲ بررسی تغییرات مدول اتلافی در برابر فرکانس ورودی
۵۲	.....۱۱-۸-۲ بررسی تغییرات مدول اتلافی در برابر دامنه‌ی کرنش
۵۳	.....۹-۲ ترکیب‌های منحنی‌های تنش-کرنش حاصل از تست کشش-فشار
۶۱	.....فصل ۳ (مدلسازی رفتار MRE تحت بارگذاری کششی-فشاری)
۶۲	.....۱-۳ پیشگفتار
۶۲	.....۲-۳ مقدمات
۶۶	.....۳-۳ نحوه‌ی انتخاب مدل اولیه و رسیدن به مدل نهایی
۶۷	.....۱-۳-۳ روابط و ضوابط شاخه‌های ماکسول
۷۰	.....۲-۳-۳ مدل پیشنهادی اولیه

۷۱	.....	۳-۳-۳ ساده‌سازی مدل اولیه و رسیدن به مدل نهایی
۷۲	.....	۳-۴ معرفی مدل پیشنهادی نهایی
۷۴	.....	۳-۵ نحوه‌ی بدست آوردن ثابت‌های مجهول مدل پیشنهادی
۷۵	.....	۳-۶ معرفی الگوریتم ژنتیک
۷۸	.....	۳-۷ شرح ثابت‌های بدست آمده برای مدل پیشنهادی
۸۱	.....	۳-۸ برازش منحنی روی ثابت اول مدل
۷۵	.....	۳-۹ مقایسه‌ی نتایج مدل پیشنهادی با نتایج تست و اعتبارسنجی مدل
۹۵	.....	فصل ۴ (نتیجه‌گیری و پیشنهادات)
۹۶	.....	۴-۱ پیشگفتار
۹۶	.....	۴-۲ جمع‌بندی نتایج
۹۸	.....	۴-۳ پیشنهادها و چالش‌های آینده
۱۰۱	.....	پیوست‌ها
۱۱۲	.....	منابع

## شکل‌ها

- شکل ۱-۱ فرآیند تولید الاستومرهای مگنتورئولوژیکال ایزوتروپیک و انیزوتروپیک..... ۶
- شکل ۱-۲ میکروگراف الکترونی از سطح مقطع دو نمونه MRE a- ایزوتروپ b- انیزوتروپ..... ۶
- شکل ۱-۳ سه مد اصلی عملکرد MRE..... ۸
- شکل ۱-۴ حالت‌های مختلف قرارگیری MRE تحت بار مکانیکی..... ۹
- شکل ۱-۵ حالت‌های مختلف جهات متقابل بار خارجی و میدان مغناطیسی..... ۱۱
- شکل ۱-۲ نمونه MRE..... ۲۶
- شکل ۲-۲ نقشه‌ی قسمت بالایی فیکسچر..... ۲۸
- شکل ۲-۳ نقشه‌ی قسمت پایینی فیکسچر..... ۲۸
- شکل ۲-۴ پیکربندی کامل آزمایش..... ۲۹
- شکل ۲-۵ برش نهایی نمونه..... ۳۰
- شکل ۲-۶ کاتر برش‌دهنده..... ۳۰
- شکل ۲-۷ اندازه‌گیری چگالی شار مغناطیسی بین دو فیکسچر به وسیله‌ی تسلامتر..... ۳۱
- شکل ۲-۸ تست ستاپ بسته شده..... ۳۲
- شکل ۲-۹ نتایج اولیه‌ی تست در حالت  $B=0 \text{ mTesla}$  ,  $F=1 \text{ Hz}$  ,  $a=1\%$ ..... ۳۳
- شکل ۲-۱۰ نتایج اولیه‌ی تست در حالت  $B=100 \text{ mTesla}$  ,  $F=3 \text{ Hz}$  ,  $a=2\%$ ..... ۳۳
- شکل ۲-۱۱ نتایج اولیه‌ی تست در حالت  $B=170 \text{ mTesla}$  ,  $F=8 \text{ Hz}$  ,  $a=4\%$ ..... ۳۴
- شکل ۲-۱۲ نتایج اولیه‌ی تست در حالت  $B=200 \text{ mTesla}$  ,  $F=5 \text{ Hz}$  ,  $a=8\%$ ..... ۳۴



- شکل ۲-۱۳ نمودارهای تنش-کرنش در چگالی شار ۰ میلی تسلا و فرکانس ۳ هرتز در دامنه کرنش‌های مختلف.....۳۶
- شکل ۲-۱۴ نمودارهای تنش-کرنش در چگالی شار ۲۲۰ میلی تسلا و فرکانس ۸ هرتز در دامنه کرنش‌های مختلف.....۳۶
- شکل ۲-۱۵ نمودارهای تنش-کرنش در چگالی شار ۰ میلی تسلا و در دامنه کرنش ۸ درصد در فرکانس‌های مختلف.....۳۷
- شکل ۲-۱۶ نمودارهای تنش-کرنش در چگالی شار ۱۷۰ میلی تسلا و در دامنه کرنش ۲ درصد در فرکانس‌های مختلف.....۳۷
- شکل ۲-۱۷ نمودارهای تنش-کرنش در دامنه کرنش ۱ درصد در فرکانس ۱ هرتز و در چگالی شارهای مختلف.....۳۸
- شکل ۲-۱۸ نمودارهای تنش-کرنش در دامنه کرنش حدود ۸ درصد در فرکانس ۳ هرتز و در چگالی شارهای مختلف.....۳۸
- شکل ۲-۱۹ افزایش سطح محصور در نمودار تنش-کرنش با افزایش چگالی شار در کرنش ۸ درصد و فرکانس ۸ هرتز.....۴۰
- شکل ۲-۲۰ تاثیر چگالی شار بر شیب منحنی تنش-کرنش در فرکانس ۳ هرتز و کرنش ۲ درصد.....۴۱
- شکل ۲-۲۱ مقایسه ی افزایش نسبی سختی MRE در اثر افزایش B در درصدهای کرنش بالا و پایین در  $F=1\text{ Hz}$ .....۴۲
- شکل ۲-۲۲ منحنی‌های تنش-کرنش نمونه در  $a=4\%$  و  $B=100\text{ mT}$  در فرکانس‌های مختلف.....۴۳
- شکل ۲-۲۳ افزایش مقدار انرژی اتلافی با افزایش فرکانس در چگالی شار ۰ میلی تسلا و در دامنه ی کرنش ۸ درصد.....۴۴

- شکل ۲-۲۴ کاهش سختی معادل نمونه MRE با افزایش دامنه‌ی کرنش ورودی در  $F=5\text{ Hz}$  و  $B=260\text{ mT}$ ..... ۴۵
- شکل ۲-۲۵ منحنی نیرو بر حسب جابجایی برای استفاده در روش براون..... ۴۶
- شکل ۲-۲۶ تغییرات مدول ذخیره‌ای در مقابل تغییر چگالی شار مغناطیسی..... ۴۷
- شکل ۲-۲۷ تغییرات مدول ذخیره‌ای در برابر تغییر فرکانس ورودی..... ۴۸
- شکل ۲-۲۸ تغییرات مقدار  $E'$  نسبت به دامنه‌ی کرنش در  $F=3\text{ Hz}$  و در چگالی‌های شار مغناطیسی مختلف..... ۴۹
- شکل ۲-۲۹ تغییرات مدول اتلافی در مقابل تغییر چگالی شار مغناطیسی..... ۵۰
- شکل ۲-۳۰ تغییرات مدول اتلافی در مقابل تغییر فرکانس ورودی در دامنه کرنش ۴ درصد..... ۵۱
- شکل ۲-۳۱ تغییر مقادیر مدول اتلافی در برابر دامنه‌ی کرنش در فرکانس ۸ هرتز و در مقادیر مختلف  $B$ ..... ۵۲
- شکل ۲-۳۲ نمودارهای تنش-کرنش در چگالی شار ۰ میلی‌تسلا و فرکانس ۳ هرتز در دامنه کرنش‌های مختلف..... ۵۳
- شکل ۲-۳۳ نمودارهای تنش-کرنش در چگالی شار ۱۰۰ میلی‌تسلا و فرکانس ۱ هرتز در دامنه کرنش-های مختلف..... ۵۳
- شکل ۲-۳۴ نمودارهای تنش-کرنش در چگالی شار ۱۷۰ میلی‌تسلا و فرکانس ۵ هرتز در دامنه کرنش-های مختلف..... ۵۴
- شکل ۲-۳۵ نمودار تنش-کرنش در چگالی شار ۲۲۰ میلی‌تسلا و فرکانس ۸ هرتز..... ۵۴
- شکل ۲-۳۶ نمودارهای تنش-کرنش در چگالی شار ۲۶۰ میلی‌تسلا و فرکانس ۵ هرتز در دامنه کرنش-های مختلف..... ۵۵
- شکل ۲-۳۷ منحنی‌های تنش-کرنش نمونه در  $a=8\%$  و  $B=260\text{ mT}$  در فرکانس‌های مختلف..... ۵۵

- شکل ۲-۳۸ منحنی‌های تنش- کرنش نمونه در  $a=4\%$  و  $B=100\text{ mT}$  در فرکانس‌های مختلف.....۵۶
- شکل ۲-۳۹ منحنی‌های تنش- کرنش نمونه در  $a=2\%$  و  $B=170\text{ mT}$  در فرکانس‌های مختلف.....۵۶
- شکل ۲-۴۰ منحنی‌های تنش- کرنش نمونه در  $a=8\%$  و  $B=0\text{ mT}$  در فرکانس‌های مختلف.....۵۷
- شکل ۲-۴۱ نمودارهای تنش- کرنش در دامنه کرنش ۱ درصد در فرکانس ۱ هرتز و در چگالی شارهای مختلف.....۵۷
- شکل ۲-۴۲ نمودارهای تنش- کرنش در دامنه کرنش ۲ درصد در فرکانس ۸ هرتز و در چگالی شارهای مختلف.....۵۸
- شکل ۲-۴۳ نمودارهای تنش- کرنش در دامنه کرنش ۴ درصد در فرکانس ۵ هرتز و در چگالی شارهای مختلف.....۵۸
- شکل ۲-۴۴ نمودارهای تنش- کرنش در دامنه کرنش ۸ درصد در فرکانس ۳ هرتز و در چگالی شارهای مختلف.....۵۹
- شکل ۳-۱ نماد المان‌های فبری و استهلاکی .....۶۴
- شکل ۳-۲ نماد مدل‌های پایه‌ی ویسکوالاستیک: الف) مدل ماکسول ب) مدل کلوین.....۶۵
- شکل ۳-۳ نمونه‌هایی از مدل‌های تعمیم یافته‌ی ماکسول و کلوین.....۶۶
- شکل ۳-۴ مدل پیشنهادی پنج شاخه‌ای اولیه.....۷۰
- شکل ۳-۵ مدل پیشنهادی نهایی.....۷۲
- شکل ۳-۶ محیط برازش منحنی در مرحله‌ی اول در فرکانس ۵ هرتز و دامنه‌ی کرنش ۲ درصد.....۸۲
- شکل ۳-۷ محیط برازش منحنی در مرحله‌ی دوم در دامنه‌ی کرنش ۱ درصد.....۸۳
- شکل ۳-۸ محیط برازش منحنی در مرحله‌ی سوم.....۸۴
- شکل ۳-۹ مقایسه منحنی‌های تنش- کرنش مدل با منحنی‌های حاصل از تست در  $B=0\text{ mTesla}$  ,  $F=5\text{ Hz}$  در دامنه‌های کرنش مختلف.....۸۶

- شکل ۳-۱۰ مقایسه منحنی‌های تنش- کرنش مدل با منحنی‌های حاصل از تست در  $B=100$  mTesla در  $F=8$  Hz, در دامنه‌های کرنش مختلف..... ۸۷
- شکل ۳-۱۱ مقایسه منحنی‌های تنش- کرنش مدل با منحنی‌های حاصل از تست در  $B=170$  mTesla در  $F=3$  Hz, در دامنه‌های کرنش مختلف..... ۸۷
- شکل ۳-۱۲ مقایسه منحنی‌های تنش- کرنش مدل با منحنی‌های حاصل از تست در  $B=220$  mTesla در  $F=5$  Hz, در دامنه‌های کرنش مختلف..... ۸۸
- شکل ۳-۱۳ مقایسه منحنی‌های تنش- کرنش مدل با منحنی‌های حاصل از تست در  $B=260$  mTesla در  $F=1$  Hz, در دامنه‌های کرنش مختلف..... ۸۸
- شکل ۳-۱۴ مقایسه منحنی‌های تنش- کرنش مدل با منحنی‌های حاصل از تست در  $B=0$  mTesla در  $a=2\%$ , در فرکانس‌های مختلف..... ۹۰
- شکل ۳-۱۲ مقایسه منحنی‌های تنش- کرنش مدل با منحنی‌های حاصل از تست در  $B=260$  mTesla در  $a=4\%$ , در فرکانس‌های مختلف..... ۹۰
- شکل ۳-۱۶ مقایسه منحنی‌های تنش- کرنش مدل با منحنی‌های حاصل از تست در  $B=100$  mTesla در  $a=8\%$ , در فرکانس‌های مختلف..... ۹۱
- شکل ۳-۱۷ مقایسه منحنی‌های تنش- کرنش مدل با منحنی‌های حاصل از تست در  $F=1$  Hz, در چگالی شارهای گوناگون..... ۹۱
- شکل ۳-۱۸ مقایسه منحنی‌های تنش- کرنش مدل با منحنی‌های حاصل از تست در  $F=3$  Hz, در چگالی شارهای گوناگون..... ۹۲
- شکل ۳-۱۹ مقایسه منحنی‌های تنش- کرنش مدل با منحنی‌های حاصل از تست در  $F=5$  Hz, در چگالی شارهای گوناگون..... ۹۲
- شکل ۳-۳۰ مقایسه منحنی‌های تنش- کرنش مدل با منحنی‌های حاصل از تست در  $F=8$  Hz,  $a=8\%$  در چگالی شارهای گوناگون..... ۹۳

## جدول‌ها

---

جدول ۱-۳ مقادیر ثابت اول برحسب پاسکال در فرکانس ۱ هرتز در دامنه‌های کرنش و چگالی‌های  
شار مختلف..... ۷۹

جدول ۲-۳ مقادیر ثابت اول برحسب پاسکال در فرکانس ۳ هرتز در دامنه‌های کرنش و چگالی‌های  
شار مختلف..... ۷۹

جدول ۳-۳ مقادیر ثابت اول برحسب پاسکال در فرکانس ۵ هرتز در دامنه‌های کرنش و چگالی‌های  
شار مختلف..... ۸۰

جدول ۴-۳ مقادیر ثابت اول برحسب پاسکال در فرکانس ۸ هرتز در دامنه‌های کرنش و چگالی‌های  
شار مختلف..... ۸۰

جدول ۵-۳ مقادیر ثابت دوم برحسب پاسکال در دامنه‌ی کرنش ۱ درصد (حالت‌های خاص غیر ۱۰۰  
پاسکال)..... ۸۱

جدول ۶-۳ مقادیر  $n_1$  معادله‌ی برازش منحنی ثابت اول نسبت به چگالی شار مغناطیسی..... ۸۲

جدول ۷-۳ مقادیر  $n_2$  معادله‌ی برازش منحنی ثابت اول نسبت به چگالی شار مغناطیسی..... ۸۳

جدول ۸-۳ مقادیر  $q_1$  و  $q_2$  معادله‌ی (۳-۳۹) مربوط به مرحله‌ی دوم برازش منحنی ثابت اول..... ۸۴

## علائم

نماد	کمیت	واحد
$a$	دامنه‌ی کرنش	%
$F$	فرکانس ورودی	Hz
$B$	چگالی شار میدان مغناطیسی خارجی	Tesla
$E'$	مدول ذخیره‌ای	Pa
$E''$	مدول اتلافی	Pa
$f_1$	نیروی متناظر با بیشینه‌ی جابجایی	N
$f_2$	نقطه‌ی برخورد منحنی با محور نیرو	N
$h$	ضخامت نمونه	M
$x_0$	بیشینه مقدار جابجایی	M
$\eta_E$	ویسکوزیته کشسانی	Pa.s
$\eta$	ویسکوزیته کشسانی	Pa.s
$\mu$	ویسکوزیته برشی	Pa.s
$\sigma$	تنش نرمال	Pa
$E$	مدول یانگ	Pa
$\varepsilon$	کرنش نرمال	%
$\omega$	سرعت زاویه‌ای	rad/s
$t$	زمان	S
$\delta$	اختلاف فاز بین تنش و کرنش	Rad
$\sigma^*$	تنش مختلط	Pa
$\varepsilon^*$	کرنش مختلط	%
$E^*$	مدول مختلط	Pa

## فصل ۱ (مقدمه)

## ۱-۱ پیشگفتار

در این فصل ابتدا شرحی مختصر بر مواد هوشمند و مواد مگنتورئولوژیکال<sup>۱</sup> بیان می‌شود. سیالات مگنتورئولوژیکال و سپس الاستومرهای مگنتورئولوژیکال معرفی خواهند شد. سپس به بررسی ساختار، انواع و خواص MRE خواهیم پرداخت. نحوه‌ی عملکرد و به‌کارگیری این مواد، موضوع دیگری است که مورد بحث قرار خواهد گرفت. پس از آن به بررسی کلی رفتار MRE و تاثیر میدان مغناطیسی بر آن خواهیم پرداخت. مرور اجمالی کاربردهای MRE در مکانیک، عمران و بیومکانیک مورد بعدی در این فصل می‌باشد. در ادامه به بیان چالش‌های پیش روی فناوری MR می‌پردازیم.

بعد از آن پیشینه و اهم تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی MRE در مطالعه‌ی رفتار این مواد و مدل‌سازی رفتارشان مرور و بررسی خواهد شد. سپس به معرفی تحقیق حاضر، ضرورت‌ها و نوآوری‌های این پژوهش خواهیم پرداخت.

## ۱-۲ مواد هوشمند و مواد مگنتورئولوژیکال

مواد هوشمند<sup>۲</sup> موادی هستند که می‌توانند به تغییرات ایجاد شده در محیطشان واکنش نشان دهند. سیالات، فوم‌ها و الاستومرهای مغناطیس‌شونده<sup>۳</sup> دسته‌ای از مواد هوشمند را تشکیل می‌دهند که خواص رئولوژیکی‌شان می‌تواند با به‌کارگیری میدان مغناطیسی خارجی بطور سریع و برگشت‌پذیر کنترل شود. چنین اثری بعنوان اثر مگنتورئولوژیکال<sup>۴</sup> معرفی شده است [۱-۳]. این مواد را می‌توان در وسایل و ابزارهای مختلفی برای کاربردهای گوناگون به‌کار بست. مواد مگنتورئولوژیکال بطور عمده به دو گروه سیالات مگنتورئولوژیکال<sup>۵</sup> (MRF) و الاستومرهای مگنتورئولوژیکال (MRE) تقسیم می‌شوند [۴-۶].

---

1. Magnetorheological  
 2. Smart Material  
 3. Magnetorheological Elastomers  
 4. Magnetorheological Effect  
 1. Magnetorheological Fluids



## ۳-۱ سیالات مگنتورئولوژیکال

سیالات مگنتورئولوژیکال سوسپانسیون‌هایی با ذراتی در مقیاس میکرون هستند. مهمترین مشخصه‌ی این سیالات توانایی آن‌ها در تغییری به طور برگشت‌پذیر از جریان آزاد و سیالات ویسکوز خطی، به حالت نیمه‌جامد است که تنش تسلیم آن‌ها به سرعت و بطور پیوسته با اعمال میدان مغناطیسی قابل کنترل است. کشف این سیالات به دهه ی ۱۹۴۰ برمی‌گردد [۷-۹].

سیالات MR بطور گسترده‌تری نسبت به الاستومرها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در بازار امروز استفاده از پیشرفته‌ترین سیالات MR در کاربردهای مربوط به کنترل فعال ارتعاشات یا انتقال گشتاور اهمیت فراوانی پیدا کرده است. ضربه‌گیرها، دمپرهای ارتعاشی، دمپرهای میراکننده ارتعاش زلزله، کلاچ‌ها و آبندها مهم‌ترین کاربردهای این سیالات هستند. حال آنکه الاستومرها در دهه‌ی اخیر با توجه به نواقص و مشکلات مربوط به استفاده از سیالات MR مورد توجه بیشتری قرار گرفته‌اند. از جمله مشکلات و نقص‌های سیالات MR می‌توان به مشکل ته‌نشینی ذرات و نشت سیال اشاره کرد [۱۰-۱۲].

## ۴-۱ الاستومرهای مگنتورئولوژیکال یا MRE ها

یک الاستومر یا لاستیک مگنتورئولوژیکال ماده‌ای است کامپوزیتی دارای ذرات حساس به میدان مغناطیسی که در یک ماتریس یا بستر غیرمغناطیسی پراکنده شده‌اند. چنین ساختاری موجب می‌شود که ماده در حضور میدان مغناطیسی از خود اثری مگنتورئولوژیکال نشان دهد که شامل تغییر در خواص ماده خواهد بود از جمله‌ی آن تغییر در مدول ذخیره‌سازی<sup>۱</sup>، مدول اتلافی<sup>۲</sup> و خواص میرایی<sup>۳</sup> ماده است. این اثر برگشت‌پذیر خواهد بود یعنی با حذف میدان، الاستومر به حالت اولیه با خواص اولیه‌ی خود

---

1. Storage Modulus  
2. Loss Modulus  
3. Damping

بر خواهد گشت. حالت فیزیکی چنین موادی بسته به میدان مغناطیسی خارجی که به آن اعمال می شود بین دو حالت الاستومر نرم و حالت نیمه جامد قابل تنظیم خواهد بود [۲ و ۱۳]. در مقایسه با سیالات مگنتورئولوژیکال، الاستومرها توانسته اند بخش عمده‌ی مشکلات و موانع به کار بستن MRF ها را حل کنند که این مسئله باعث جلب توجه بیش تری به این مواد شده است [۴].

## ۱-۵ ساختار MRE

MRE ها از سه جزء اصلی تشکیل می شوند: ماتریس الاستومری یا لاستیکی، ذرات مغناطیسی قطبی و افزودنی‌ها (معمولاً روغن سیلیکون) [۱۴ و ۱۵]. این اجزا با هم ترکیب می شوند تا ماده‌ای مرکب از ذرات مغناطیسی با چگالی بالا که به طور تصادفی یا منظم در یک ماتریس یا ماده‌ی پایه با چگالی پایین قرار گرفته اند تشکیل شود. کارایی و قابلیت خاص این مواد بر پایه‌ی اثر متقابل مغناطیسی بین ذرات مغناطیسی پراکنده در داخل الاستومر است [۱۴ و ۱۶]. با توجه به حضور این ذرات، ماده‌ی کامپوزیتی در حضور میدان رفتار و خواصی وابسته به میدان از خود نشان خواهد داد چراکه یک شبکه‌ی سه بعدی از ذرات مغناطیسی مجاور هم تشکیل خواهد شد [۱۷ و ۱۸]. چنین شبکه‌ای در حالتی که باری مکانیکی بر ماده اعمال شود تمایل به باقی ماندن در حالت اصلی خود خواهد داشت و در مقابل تغییر شکل مقاومت خواهد کرد. این اثر با شدت میدان مغناطیسی اعمالی متناسب خواهد بود. ویژگی‌های مناسب و لازم برای ذرات مغناطیسی که داخل الاستومر قرار می گیرند عبارتند از: نفوذپذیری مغناطیسی بالا، پسماند مغناطیسی پایین و ظرفیت اشباع مغناطیسی بالا [۱۹ و ۲۰]. برای ماده‌ی پایه یا ماتریس MRE ها اغلب از لاستیک طبیعی<sup>۱</sup> یا لاستیک سیلیکون<sup>۲</sup> استفاده می شود. روغن سیلیکون اغلب به عنوان یک افزودنی طی فرآیند ساخت الاستومر اضافه می شود و مولکول‌های روغن وارد ماتریس

---

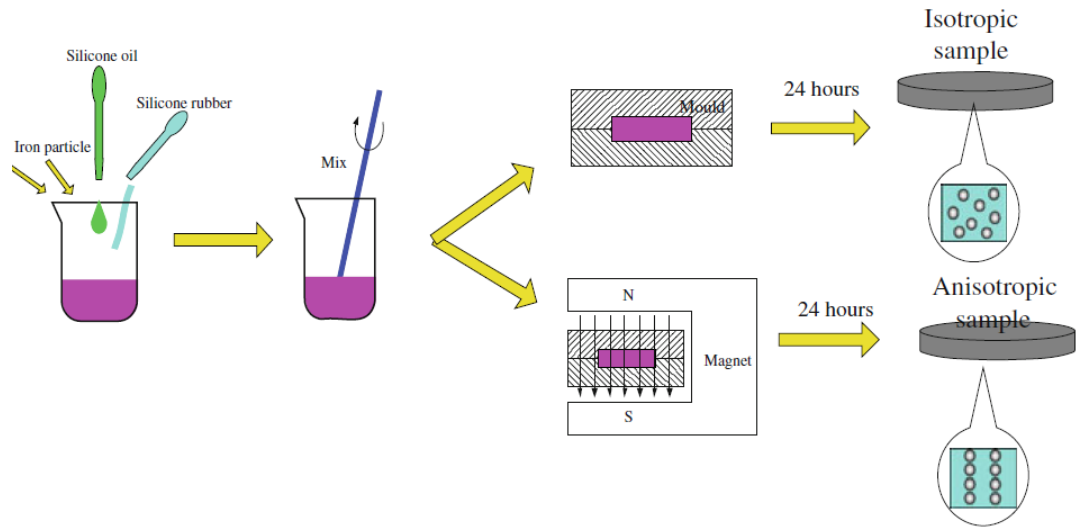
1. Natural Rubber  
2. Silicone Rubber

می‌شوند که موجب افزایش پلاستیسیته و کاهش تنش‌های داخلی ماده و همچنین باعث پایداری خواص ماده خواهد شد [۱۸ و ۲۱].

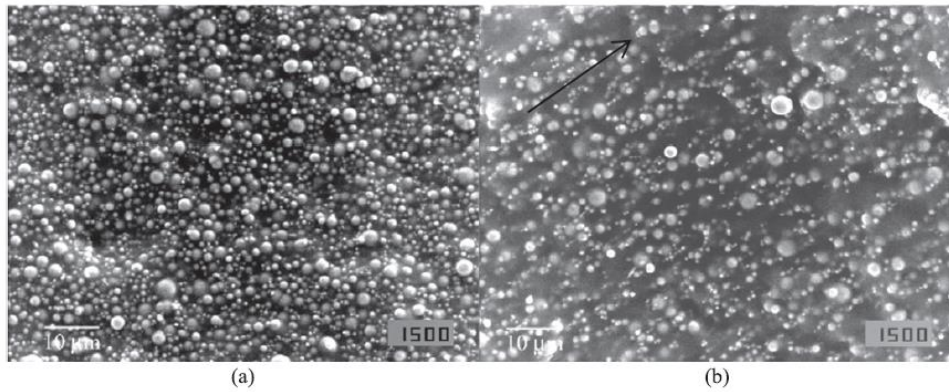
## ۶-۱ انواع MRE و خواص آن‌ها

MREها بطور کلی به دو دسته‌ی ایزوتروپیک<sup>۱</sup> و انیزوتروپیک<sup>۲</sup> تقسیم می‌شوند که این تفاوت به فرآیند تولید MRE برمی‌گردد. در فرایند تولید MRE انیزوتروپیک، میدان مغناطیسی (اغلب با شدت بالای ۰/۸ تسلا) به ماده اعمال می‌شود تا زنجیره‌های ذرات در داخل ماتریس و در جهت میدان شکل بگیرد [۲۲ و ۲۳]. قبل از شروع فرایند تولید<sup>۳</sup> ذرات در داخل ماتریس آزادی نسبی برای حرکت دارند اما پس از پایان در ساختار ماتریس قفل خواهند شد [۲۴] و اعمال کار خارجی می‌تواند ذرات را مجبور کند از موقعیت اصلی خود خارج شوند. در شکل ۱-۱ فرآیند تولید الاستومرهای مگنتورئولوژیکال ایزوتروپیک و انیزوتروپیک دیده می‌شود. در شکل ۱-۲ نیز تصویری از سطح مقطع دو نمونه MRE یکی ایزوتروپیک و دیگری انیزوتروپیک مشخص شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود در نمونه‌ی ایزوتروپ ذرات بدون جهت‌گیری خاص و به صورت رندوم در ماتریس پخش شده‌اند درحالی‌که در نمونه‌ی انیزوتروپ جهت‌گیری و شکل‌گیری زنجیره‌هایی از ذرات مغناطیسی دیده می‌شود [۱۵].

- 
3. Isotropic MRE
  4. Aligned MRE
  5. Curing



شکل ۱-۱ فرآیند تولید الاستومرهای مگنتورئولوژیکال ایزوتروپیک و انیزوتروپیک [۱۵]



شکل ۲-۱ میکروگراف الکترونی از سطح مقطع دو نمونه MRE a- ایزوتروپ b- انیزوتروپ [۲۲]

مهمترین مشخصه از MREها که تحت میدان مغناطیسی خارجی تغییر می‌کند مدول این مواد است [۱۴]. برای ارزیابی اثر MR القا شده در یک الاستومر مگنتورئولوژیکال نسبت تغییرات مدول تحت میدان مغناطیسی به مدول اولیه در غیاب میدان مورد بررسی قرار می‌گیرد. در واقع توجه وسیعی که اخیراً الاستومرهای مگنتورئولوژیکال به خود جلب کرده‌اند بیشتر به خاطر ویژگی‌های منحصر به فرد

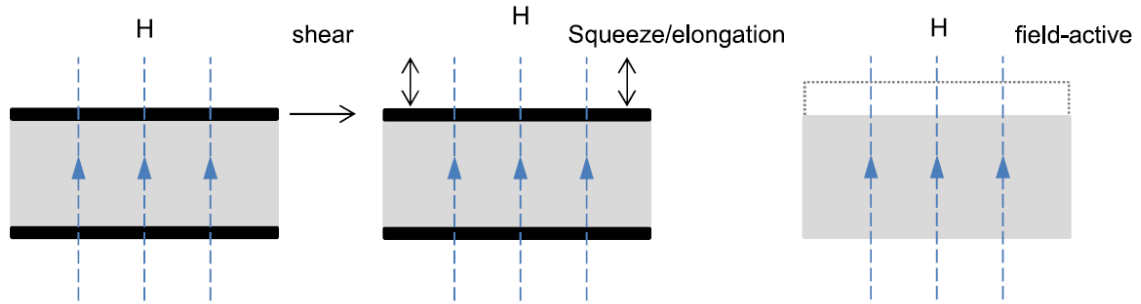
آن‌ها بخصوص تغییرات بزرگ در مدول و توانایی این مواد در کنترل ارتعاشات فعال<sup>۱</sup> و نیمه فعال<sup>۲</sup> از جمله در کاهش ارتعاشات و ایزولیشن سیستم‌های مختلف است [۲۵-۲۷]. از دیگر ویژگی‌های خاص آن می‌توان به پاسخ سریع، پایداری، قابلیت استفاده در کاربردهای مکانیکی و نیاز به توان و انرژی کم برای ایجاد اثر مگنتورئولوژیکال اشاره کرد [۲ و ۷].

## ۷-۱ نحوه‌ی عملکرد و بکارگیری MREها

حال به بررسی نحوه‌ی عملکرد MRE می‌پردازیم. در کارهای پژوهشی پرشماری نحوه‌ی عملکرد MRFها بطور مبسوطی بحث و بررسی شده است [۱، ۲۸، ۲۹]. در سیالات MR ذرات آهن بطور آزادانه می‌توانند در روغن پایه حرکت کنند و در جهت میدان مغناطیسی خارجی زنجیره‌های خود را تشکیل دهند درحالی‌که در الاستومرها ذرات در داخل ماتریس قفل شده‌اند و کار خارجی (اعمال میدان مغناطیسی و تغییرشکل مکانیکی) تنها می‌تواند ذرات را در همسایگی موضع اولیه‌شان جابجا کند که باعث می‌شود زنجیره‌هایی که تشکیل می‌شوند منطبق بر خطوط میدان نباشند. همچنین یک MRE بعنوان یک ماده الاستیک نرم می‌تواند در طول میدان از خود تغییرشکل نشان دهد. ویژگی‌هایی که ذکر شد موجب می‌شود نحوه‌ی عملکرد MRE تا حدودی متفاوت با MRF باشد.

شکل ۱-۳ سه مدل اساسی عملکرد MRE را نشان می‌دهد: مد برشی، مد نوسانی-طولی، مد تغییر شکل در طول میدان. در مد تغییر شکل در طول میدان، MRE تحت اثر میدان مغناطیسی دچار تغییر شکل (مثلا کشیدگی) می‌شود. این خاصیت الاستیسیته‌ی مغناطیسی<sup>۳</sup> نامیده می‌شود [۳۰ و ۳۱].

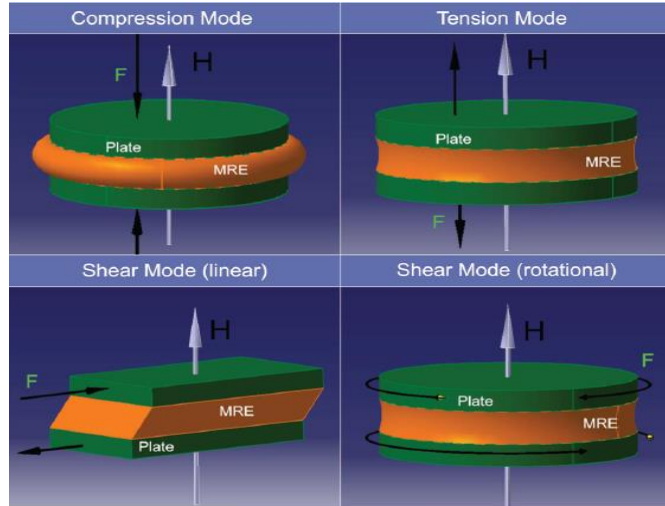
- 
1. Active
  2. Semi-active
  3. Magnetostriction



شکل ۳-۱ سه مد اصلی عملکرد MRE [۱۵]

در مد برشی همانطور که در سمت چپ شکل ۳-۱ دیده می‌شود ماده تحت برش قرار خواهد گرفت و در مد نوسانی-طولی تحت کشش و فشار. هم الاستومرهای ایزوتروپیک و هم انیزوتروپیک قابلیت قرار گرفتن در هر کدام از این سه مد را خواهند داشت اگرچه ممکن است تغییراتی در جهت میدان و جهت زنجیره‌ها در برخی کاربردها لازم باشد.

مد تغییرشکل در طول میدان<sup>۱</sup> را می‌توان برای طراحی محرک‌های مکانیکی مختلف بکار بست [۳۲]. مد برشی را می‌توان در انواع مختلف جاذب‌های ارتعاشات، ایزولاتورها [۲۳] و بیس ایزولاتورها [۲۸] مشاهده کرد. مثال‌هایی از مد نوسانی-طولی هم در انواع قاب‌ها و المان‌های فنری دیده می‌شود [۳۰]. به طور کلی در کاربردهایی که MRE تحت بار مکانیکی قرار می‌گیرد در یکی از چهار حالت نشان داده شده در شکل ۴-۱ دیده می‌شود.



شکل ۴-۱ حالت های مختلف قرارگیری MRE تحت بار مکانیکی [۲۴]

## ۸-۱ خواص MRE و رفتار این ماده تحت میدان مغناطیسی

بسیاری از مواد از جمله پلیمرها و کامپوزیت‌ها را می‌توان موادی ویسکوالاستیک نامید به این معنا که خواص این مواد ترکیبی از خواص سیال ویسکوز و جامد الاستیک خواهد بود. رفتار ویسکوالاستیک‌ها رفتاری بین جامد الاستیک ایده‌آل که طبق قانون هوک تنش با کرنش‌شان متناسب است، و رفتار سیال نیوتونی که تنش با نرخ برش رابطه‌ی مستقیم دارد، می‌باشد. مواد ویسکوالاستیک اغلب در مواردی که تغییرشکل سریع صورت می‌گیرد بیشتر شبیه جامد الاستیک رفتار می‌کنند و در تغییرشکل آرام تشابه بیش‌تری به سیال نیوتونی دارند. علم رئولوژی جریان و تغییر شکل مواد را تحت تاثیر نیروهای خارجی بررسی می‌کند. الاستومرهای مگنتورئولوژیکال را می‌توان قسمی از این مواد به شمار آورد.

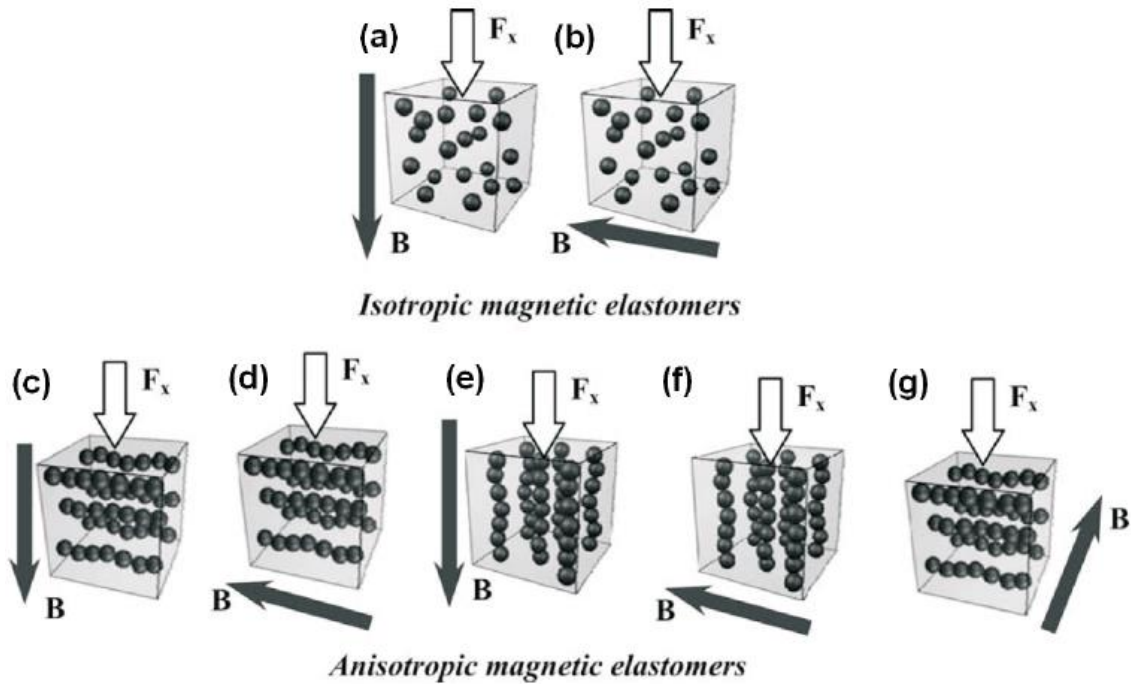
فاکتورهای زیادی وجود دارند که می‌توانند رفتار الاستومرهای مگنتورئولوژیکال را تحت تاثیر قرار دهند. بعنوان مثال ماده‌ای که به عنوان ماتریس انتخاب می‌شود خواص مخصوص به خود را به همراه خواهد داشت از قبیل دانسیته، مدول‌های مادی و... به این ترتیب انتخاب مواد برای ساخت الاستومر مورد نظر بسیار مهم است تا بتوانیم خواص ویسکوالاستیک مورد نظر خود را بدست آوریم. همچنین انتخاب مورد مناسب به عنوان ذرات مغناطیسی هم بصورت مشابهی مهم خواهد بود [۲، ۱۱ و ۳۳].

همانطور که پیش تر گفته شد خواص میرایی و همچنین سختی دینامیکی<sup>۱</sup> MRE ها می تواند با اعمال میدان مغناطیسی خارجی در هر دو نوع ایزوتروپیک و انیزوتروپیک ماده تغییر کند. حال خلاصه‌ای از نتایج بدست آمده در تحقیقات مختلف توسط محققان روی نمونه‌های متفاوت MRE بیان می‌شود:

سختی دینامیکی MRE ایزوتروپیک، در غیاب میدان خارجی بصورت خطی با درصد حجمی ذرات مغناطیس شونده تغییر می‌کند. در نوع ایزوتروپیک در صورتیکه درصد حجمی ذرات بیش از ۱۵ درصد باشد، هم سختی و هم دمپینگ با اعمال میدان مغناطیسی افزایش می‌یابند. در نوع ایزوتروپیک در صورتیکه درصد حجمی ذرات بین ۲۷ تا ۳۰ درصد باشد، سختی و دمپینگ ماده، با شدت میدان مغناطیسی قابل تنظیم خواهند بود.

در نوع انیزوتروپیک، سختی و دمپینگ، وابسته به جهت‌های متقابل بین بار مکانیکی اعمالی، میدان مغناطیسی و جهت زنجیره‌های ذرات خواهد بود. حالت‌های مختلف جهات متقابل بار خارجی و میدان مغناطیسی در شکل ۱-۵ دیده می‌شود. اگر بار دینامیکی به گونه‌ای اعمال شود که تغییر شکل در طول زنجیره‌ها رخ دهد، دمپینگ در ابتدا بالاست و میدان مغناطیسی اثر کوچکی روی دمپینگ خواهد داشت. اگر بارگذاری به نحوی باشد که تغییر شکل بین زنجیره‌ها اتفاق بیفتد، دمپینگ در ابتدا دارای مقداری مشابه با حالت ایزوتروپ خواهد بود و با اعمال میدان مغناطیسی به وضوح افزایش می‌یابد. در جهت زنجیره‌ها، سختی دینامیکی الاستومر انیزوتروپ، برای شدت‌های میدان مغناطیسی بزرگ‌تر از ۱ تسلا، با میدان مغناطیسی قابل تنظیم خواهد بود. بیشینه مقدار افزایش سختی، زمانی که میدان مغناطیسی و بارگذاری فشاری در جهت زنجیره‌ها اعمال شود، در بارگذاری دینامیکی، ۶۰ درصد و در بارگذاری استاتیکی، ۱۰۰ درصد خواهد بود.





شکل ۱-۵ حالت های مختلف جهات متقابل بار خارجی و میدان مغناطیسی [۳۰]

در بارگذاری فشاری دینامیکی، رفتار مکانیکی MRE تحت تاثیر فاکتورهای مختلفی قرار می گیرد. فاکتورهایی از قبیل نیرو و فرکانس بار، کرنش، شدت میدان مغناطیسی، یکنواختی میدان، جهت های متقابل بار و میدان و زنجیره ها [۲، ۴، ۱۷ و ۲۰].

## ۹-۱ کاربردهای MRE

در گستره ی کاربردهای دانش مگنتورئولوژیکال، سیالات MR با توجه به سابقه ی بیشتری که نسبت به الاستومرهای MR دارند، بخش اعظم کاربردها را به خود اختصاص داده اند. اما با توجه به مشکلات و محدودیت های این سیالات نظیر هزینه ی بالا، امکان نشت سیال به بیرون و عدم داشتن عمر غیرفعال طولانی بخاطر ته نشینی ذرات در سیال پایه، از اواخر دهه ی ۱۹۹۰ میلادی توجهات از MRF ها به سمت MRE ها معطوف شده است. طی دو دهه ی اخیر مقالات، اختراعات و عناوین پرشماری در زمینه ی کاربردهای MRE در سطوح مختلف تهیه و منتشر شده است که اکثرشان به نوعی کاهش فعال یا نیمه فعال ارتعاشات را در تجهیزات مختلف دنبال می کنند [۳۵].

یک کاربرد MRE، استفاده به عنوان المانی با سختی متغیر و دارای قابلیت تنظیم و جابجایی رزونانس در جاذب‌های ارتعاشی دینامیکی<sup>۱</sup> است که این بکارگیری MRE نخستین بار توسط فرام<sup>۲</sup> [۲۳] بعنوان راه حلی برای یکی از مسائل و چالش‌های سرکوب ارتعاشات در ساختارها و ماشین‌ها، معرفی شد همچنین سیستم‌های تعلیق و قاب‌ها و ساختارهای دارای قابلیت تنظیم مقدار سختی معادل، از دیگرهای موارد استفاده از MRE می‌باشند.

جیندر<sup>۳</sup> و همکاران [۲۵] نخستین بار با استفاده از MRE، جاذب‌های ارتعاشی انطباقی تنظیم‌پذیر<sup>۴</sup> را معرفی کردند و همچنین با بهبود عملکرد این جاذب‌ها کاربرد موثری برای الاستومرهای مگنتورئولوژیکال یافتند.

در صنایع حمل‌ونقل از MRE در مواردی همچون بوشینگ‌های مختلف، دسته موتورهای فعال و نیمه فعال و ضربه‌گیرهای گوناگون برای کاهش انتقال ارتعاشات به درون کابین یا صندلی سرنشین و همچنین در صنایع هوایی بخصوص در کاربردهایی جهت انطباق میزان دمپینگ با شرایط مختلف پروازی در هلی کوپترها، استفاده می‌شود. تکنیک استفاده از MRE در بوشینگ‌های موجود در سیستم تعلیق خودروها اولین بار در سال ۱۹۹۷ توسط واتسون در کمپانی فورد<sup>۵</sup> طراحی و اجرا شد که نتیجه‌ی آن کاهش ارتعاشات، بخصوص ضربه‌های حاصل از ترمزهای ناگهانی بوده است به این صورت که با توجه به شدت ضربه که توسط حسگرهای تعبیه شده اندازه‌گیری می‌شود، واحد کنترل مقدار جریان اعمالی به سیم‌پیچ را جهت ایجاد شدت میدان مغناطیسی مورد نظر، مشخص و اعمال می‌کند تا با توجه به شدت ضربه خواص و سختی MRE تغییر داده شود. نتیجه‌ی عملکرد کل این سیستم، سواری بهتر و راحتی سرنشینان خواهد بود. این تکنیک در اجزای دیگر اتومبیل نظیر شفت‌های انتقال قدرت و اکسل‌ها و در نقاط دیگری از سیستم تعلیق مورد استفاده قرار گرفته و موفق بوده است [۴، ۲۳ و ۳۶].

- 
1. Dynamic Vibration Absorbers
  2. Frahm
  3. Ginder
  4. Adaptive Tunable Vibration Absorbers
  5. FORD

در مهندسی عمران نیز در کنترل ارتعاشات خارجی مختلفی که به سازه‌ها و ساختمان‌ها وارد می‌شود از MRE به عنوان ماده‌ی موثر و عملگر در دمپرها و بیس‌ایزولاتورها استفاده می‌شود [۳۶-۳۹]. مورد دیگری از کاربردهای MRE، موارد پزشکی و بیومکانیکی است. یک مورد از چنین کاربردهایی، استفاده از این مواد در ساخت پای مصنوعی، با توجه به قابلیت‌های خاص این ماده و توانایی تنظیم سختی و گرفتن ارتعاشات به صورت اتوماتیک و غیراتوماتیک با اعمال شار مغناطیسی می‌باشد [۴۰].

## ۱۰-۱ چالش‌های فناوری MR

همانطور که ذکر شد، در دهه‌های اخیر فناوری مگنتورئولوژیکال رشد و توسعه‌ی سریع و روزافزونی را تجربه کرده و کاربردهای مختلفی را پوشش داده است اما همچنان چالش‌ها و مشکلاتی بر سر راه استفاده از تجهیزات دارای مواد مگنتورئولوژیکال وجود دارد. همچنین با وجود تحقیقات گسترده‌ای که در سال‌های اخیر انجام شده، در مورد مواد MR و بخصوص الاستومرهای MR همچنان موارد و نکاتی مبهم باقی مانده است.

مهم‌ترین مشکل استفاده از سیالات مگنتورئولوژیکال، ته‌نشینی ذرات مغناطیس‌شونده و نشت سیال به بیرون است که حل این دو هزینه‌ی تمام شده را به طور قابل توجهی بالا می‌برد. از طرفی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال که مشکلات مختص سیالات هم‌نوع خود را ندارند نیز دارای محدودیت‌های خاص خود هستند و طراحی بهینه‌ی تجهیزاتی که از MRE استفاده می‌کنند کار آسانی نخواهد بود. ایجاد میدان مغناطیسی با قدرت قابل توجهی که بتواند اثر مگنتورئولوژیکال مورد نیاز را در MRF و MRE بوجود آورد از جمله چالش‌های بزرگ این فناوری بوده است. در بحث مدل‌سازی رفتار MRE، مدل‌هایی که ارائه شده عمدتاً جامع و کامل نیستند از این رو پیش‌بینی رفتار این مواد در شرایط مختلف کار مشکلی خواهد بود [۲۳، ۳۵ و ۴۱].

## ۱۱-۱ پیشینه‌ی پژوهش

در این بخش به مرور و بررسی پژوهش‌های مهم و تاثیرگذار در زمینه‌ی مطالعه‌ی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال و همچنین مدل‌سازی رفتار این مواد پرداخته شده است.

اثر مگنتورئولوژیکال<sup>۱</sup> اولین بار توسط رابینف<sup>۲</sup> [۵] در دهه‌ی ۱۹۴۰ مشاهده شد اگرچه کارها و مطالعات اولیه در سال ۱۹۸۵ توسط ریگی<sup>۳</sup> و ژیلکن<sup>۴</sup> [۸] روی الاستومرهای حساس به میدان مغناطیسی صورت گرفت. یک دهه بعد شیگا<sup>۵</sup> و همکاران [۱۰] اثر الکتروویسکوالاستیک الاستومری بر پایه‌ی سیلیکون و دارای ذرات نیمه هادی را تحت اثر میدان الکتریکی گزارش کردند. اولین تحقیق جامع روی الاستومرهای MR توسط ژولی<sup>۶</sup> و همکاران [۱۱] در ۱۹۹۶ انجام و منجر به ارائه و اصلاح یک مدل دوقطبی شبه‌استاتیک برای توضیح تغییرات مدول در داخل الاستومر شد. ایشان همچنین با انجام تست‌های مختلف خواص الاستومرهای بر پایه‌ی پلیمر که ذرات آهن در داخل آن پراکنده شده است را تحت میدان مغناطیس خارجی مورد بررسی قرار دادند که نتایج ایشان نقطه عطفی در مطالعه و مدل‌سازی و همچنین شروعی برای ورود این مواد هوشمند به صنعت و کاربردهای مختلف به شمار می‌آید.

اکثر تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی MRE، رفتار و ویژگی‌های این مواد را تحت بارهای برشی بررسی و توجیه می‌کنند که البته شباهت‌های زیادی بین رفتارهای MRE در مدهای برشی و نرمال وجود دارد. لازم به ذکر است فقط در تعداد محدودی از مطالعات که در این بخش نیز به آن‌ها اشاره شده، به بررسی رفتار الاستومرهای مگنتورئولوژیکال تحت بارگذاری‌های کششی و فشاری پرداخته شده است. از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به تحقیقات کالیو<sup>۷</sup> و همکاران [۴۲] اشاره کرد که نمونه‌هایی از

- 
1. MR Effect
  2. Robinov
  3. Rigby
  4. Jilken
  5. Shiga
  6. Jolly
  7. Kallio

MRE را تحت بار فشاری قرار داده و به بررسی رفتار و تغییرات خواص آن با تغییر در فرکانس، دامنه‌ی کرنش و چگالی شار مغناطیسی در چند حالت محدود از ترکیب این عوامل، پرداخته‌اند.

لوکاندر<sup>۱</sup> و همکاران [۲۰ و ۴۳] نشان دادند که اثر مگنتورئولوژیکال خالص در MRE ایزوتروپیک که به صورت اختلاف بین مدول در حالت عدم حضور میدان مغناطیسی و مدول اندازه‌گیری شده تحت تاثیر میدان تعریف می‌شود، مستقل از جنس ماتریس الاستومر است. اگرچه مدول در حالت بدون میدان، برای الاستومرهایی که جنس ماتریس سخت‌تری دارند مقداری بالاتر خواهد بود به این معنی که در الاستومرهای با ماتریس نرم‌تر، مقدار اثر نسبی مگنتورئولوژیکال ممکن است اندکی بالاتر باشد. از دیگر یافته‌های لوکاندر این بود که اندازه و شکل ذرات مغناطیس شونده در الاستومرها، خواص آن‌ها را بطور قابل توجهی تحت تاثیر قرار می‌دهد.

ژولی و همکاران [۴۴] با طراحی تست آزمایشگاهی برشی، مدول برشی مختلط را در حالت‌های مختلفی از فرکانس ورودی، دامنه کرنش و شدت میدان مغناطیسی، برای نوعی از الاستومر انیزوتروپیک اندازه‌گیری کردند. ایشان گزارش کردند که اثر مگنتورئولوژیکال بوجود آمده در مدول برشی نمونه، با افزایش درصد حجمی ذرات آهنی الاستومر، افزایش خواهد یافت. اگرچه در آزمایش ایشان، بیش‌ترین مقدار افزایش اندازه‌گیری شده برای مدول برشی نمونه، ۰٫۶ مگاپاسکال و در درصد حجمی حدود ۳۰ درصد برای ذرات آهنی بوده است.

جیندر<sup>۲</sup> و همکاران [۴۵] برای اندازه‌گیری مدول برشی دینامیکی نمونه‌ای از MRE دارای ۲۷ درصد حجمی ذرات آهنی در محدوده‌ی فرکانسی بالاتر از ۱ کیلوهرتز، یک جاذب ارتعاشی تطبیقی با استفاده از نمونه‌ی مذکور طراحی کردند. نتایج تست‌های آن‌ها نشان داد که اثر MR ایجاد شده در نمونه در فرکانس‌های بسیار بالا نیز مقادیری قابل توجه خواهد بود چرا که با اعمال میدان مغناطیسی به نمونه در کل محدوده‌ی فرکانسی تست، سختی دینامیکی نمونه به وضوح افزایش می‌یابد.

---

1. Lokander  
2. Ginder

ژو<sup>۱</sup> و همکاران [۴۶] یک سیستم ارتعاش آزاد را که شامل نمونه‌ای MRE دارای ۲۷ درصد حجمی ذرات آهنی و جرمی که در بالای لایه‌ی MRE قرار می‌گیرد را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایشگاهی ایشان نشان داد که خواص و تغییراتی که در رفتار ماده، تحت اثر میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود، تحت تاثیر فرکانس ارتعاشات ورودی به سیستم خواهد بود.

علاوه بر فرکانس تست، دامنه‌ی کرنش نیز با توجه به وابستگی مقدار نیروی مغناطیسی بین دوقطبی‌های مغناطیسی به فاصله‌ی بین‌شان، بر نتایج و اثر MR بوجود آمده تاثیر خواهد گذاشت. مقدار ماکزیمم اثر MR بوجود آمده در مدول برشی نمونه، در دامنه‌ی کرنش نسبتا پایین در حدود ۱ تا ۲ درصد آشکار خواهد شد. در این سطح از کرنش، فاصله‌ی بین ذرات کم خواهد بود و در نتیجه برهم‌کنش مغناطیسی شدیدتر می‌باشد. شیگا و همکاران [۴۷] دریافتند وقتی که مقدار کرنش فراتر از ۱ درصد رود، مدول برشی ذخیره‌ای شروع به کاهش می‌کند و با افزایش درصد کرنش، مقدار این مدول کم و کم‌تر می‌شود. نتایج مشابهی در تحقیقات دیگری در مورد تاثیر درصد کرنش بر مدول برشی گزارش شده است [۴۳ و ۴۵]. این تاثیر که با شکسته شدن ساختار شبکه‌ای MRE به هنگام افزایش درصد کرنش ارتباط دارد، تحت عنوان اثر پین<sup>۲</sup> نیز شناخته می‌شود. تحقیقات نشان می‌دهد که با افزایش درصد ذرات مغناطیس‌شونده، اثر پین با روندی نمایی افزایش می‌یابد [۴۳].

خواص و رفتارهای الاستومرهای مگنتورئولوژیکال ایزوتروپیک تفاوت‌هایی با رفتار انواع ایزوتروپیک این مواد دارد. دیویس<sup>۳</sup> [۴۸] نشان داد که وجود یا عدم وجود پیش‌ساختار زنجیره‌ای در MRE، تاثیری در مدول نمونه‌ها در غیاب میدان مغناطیسی نخواهد داشت. وی با استناد به آنالیز المان محدودی که انجام داد اظهار داشت که مدول برشی نمونه‌های ایزوتروپیک در غیاب میدان مغناطیسی بزرگ‌تر از مدول برشی نمونه‌های همگن و ایزوتروپیک MRE نخواهد بود.

---

1. Zhou  
2. Payne Effect  
3. Davis

لوکاندر و همکاران [۲۰ و ۴۳] همچنین مدول برشی دینامیکی را برای نمونه‌هایی از MRE ایزوتروپیک با درصدهای متفاوت ذرات آهنی و جنس ماتریس‌های مختلف، مورد مطالعه قرار دادند. مقادیر مدول در فرکانس‌های ۲ و ۱۰ و ۵۰ هرتز با دامنه‌ی کرنش بالاتر از ۱۱ درصد در حضور و همچنین عدم حضور میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شد. آن‌ها متوجه شدند که اثر مگنتورئولوژیکال در نمونه‌ی ایزوتروپیک با افزایش دامنه‌ی کرنش به سرعت کاهش می‌یابد.

بر اساس تحقیقاتی که توسط محققان مختلفی در گذشته انجام شده واضح است که اثر مگنتورئولوژیکال در الاستومرهای MR، می‌تواند بطور قابل توجهی استحکام نمونه را هنگامی که تحت تاثیر میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، افزایش دهد [۴۹]. بنابراین یکی از کاربردهای بالقوه‌ی MRE می‌تواند استفاده به عنوان المانی با سختی متغیر در بارگذاری‌های مختلف از جمله بارگذاری کششی-فشاری باشد اما رفتار دینامیکی MRE ها تحت فشار، تاکنون به صورت جامع مورد بررسی قرار نگرفته است و تنها در عناوین معدودی به آن پرداخته شده است.

در تست فشار الاستومرهای مگنتورئولوژیکال، جهت شار مغناطیسی باید موازی با بار مکانیکی فشاری اعمال گردد. فرشاد<sup>۱</sup> و بنین<sup>۲</sup> [۴۹] نمونه‌هایی از هر دو نوع ایزوتروپیک و انیزوتروپیک MRE بر پایه‌ی لاستیک سیلیکون را تحت بارهای کششی و همینطور فشاری و در حضور و همچنین عدم حضور میدان مغناطیسی، تست کرده‌اند. برای تست فشاری، آن‌ها نمونه‌های استوانه‌ای MRE را بین دو آهنربای دائمی قرار دادند. با فشردن آهنرباها، نمونه را تحت باری در حدود ۴,۵ مگاپاسکال و در چگالی شار مغناطیسی ۰/۳۹ تسلا قرار دادند و گزارش کردند که سختی نمونه‌ها از هر دو نوع ایزوتروپیک و انیزوتروپیک MRE با اعمال میدان مغناطیسی افزایش یافته است [۴۹].

کالیو و همکاران [۴۳] در کارهای خود که تا امروز جزو برترین تحقیقات انجام شده در مطالعه‌ی رفتار MRE تحت بارگذاری فشاری می‌باشد، المان‌های فنری از نمونه‌های مختلف ایزوتروپیک و

---

1. Farshad  
2. Benine

انیزوتروپیک MRE را ساخته و تحت تست فشاری قرار دادند و به بررسی خواص و رفتارهای نمونه‌ها در شرایط مختلف آزمایشگاهی پرداخته‌اند. با توجه به اینکه سختی معادل و همچنین ضریب اتلافی نمونه‌ها با اعمال میدان مغناطیسی بر آن‌ها افزایش می‌یابند و با تغییر در شدت میدان قابل تنظیم‌اند، نتیجه می‌شود که MRE ماده‌ی مناسبی برای استفاده در المان‌های فنری با سختی متغیر در کنترل و کاهش فعال ارتعاشات می‌باشد. ایشان همچنین مقایسه‌ی جامعی از رفتارهای دو نمونه‌ی انیزوتروپیک و انیزوتروپیک MRE انجام داده‌اند از جمله اینکه، مقدار سختی اندازه‌گیری شده برای نمونه‌های انیزوتروپیک بسیار کم‌تر از مقدار اندازه‌گیری شده‌ی سختی معادل در جهت زنجیره‌ها برای نمونه‌های انیزوتروپیک می‌باشد [۴۳].

در تحقیقات دیگری لیائو<sup>۱</sup> و همکاران [۵۰] رفتار MRE را تحت فشار و در فرکانس‌های بالا بررسی کرده و وابستگی خواص نمونه به مقدار فرکانس ورودی و شدت میدان مغناطیسی را نشان داده‌اند. همچنین گزارش کرده‌اند که با افزایش شدت میدان و چگالی شار هم مدول یانگ و هم تنش تسلیم به طور قبل توجهی افزایش خواهد یافت.

فو<sup>۲</sup> و همکاران [۵۱] ایزولاتوری برای کاهش دامنه‌ی ارتعاشات طراحی کردند که از MRE بهره می‌برد. در این سیستم دو قطعه MRE با ابعاد متفاوت به کار گرفته شده که یک قطعه تحت فشار و دیگری تحت برش قرار می‌گیرد. آن‌ها متوجه شدند که با اعمال میدان مغناطیسی به قطعات MRE در داخل ایزولاتور، فرکانس طبیعی کل سیستم بیش از ۱۰۰ درصد نسبت به حالت بدون اعمال میدان، افزایش خواهد یافت و به وضوح از دامنه‌ی ارتعاشات کاسته خواهد شد همچنین طبق نتایج آزمایشگاهی ایشان، محدوده‌ی تغییرات سختی معادل سیستم در چنین ایزولاتورهایی که همزمان در دو مد برشی و فشاری عمل می‌کنند بسیار بیش‌تر از ایزولاتورهای تک-مده خواهد بود.

---

1. Liao  
2. J.Fu



در بحث مدل‌سازی رفتار الاستومرهای مگنتورئولوژیکال، دو دیدگاه وجود دارد. دیدگاه اول مبتنی بر بررسی میکروسکوپی برهم‌کنش ذرات در الاستومرهاست و دیدگاه دوم، بررسی کلی رفتار این مواد تحت شرایط بارگذاری خواهد بود.

اولین تحقیق جامع روی مدل‌سازی رفتار الاستومرهای MR توسط ژولی و همکاران [۱۱] در ۱۹۹۶ انجام شد که با توجه به دیدگاه اول، منجر به ارائه و اصلاح مدل دوقطبی شبه‌استاتیک<sup>۱</sup> برای توضیح تغییرات مدول در داخل الاستومر شد.

دیدگاه دوم یعنی بررسی کلی رفتار MRE تحت شرایط بارگذاری، کاربردی‌تر و موثرتر از دیدگاه اول است. مدل‌های متعددی برای توجیه رفتار MRE ارائه شده است که عمدتاً بر مد برشی تمرکز دارند و از ترکیب و اصلاح مدل‌های اولیه‌ی ویسکوالاستیک برای معرفی مدل‌های جدید و انطباق نتایج حاصل از مدل بر نتایج آزمایشگاهی، استفاده کرده‌اند که به برخی از آن‌ها اشاره خواهیم کرد:

مدل معمولی که برای توضیح رفتار مواد لاستیکی مانند بکار میرود مدل سه جزئی است. مدل سه جزئی ترکیبی از یک المان فنری و مدل کلاسیک کلون است که خود مدل کلون از یک المان فنری و یک المان استهلاکی تشکیل شده است که به صورت موازی با هم بسته شده‌اند. المان فنری به مدل کلون اضافه شده است تا کارایی مدل کلون را تحت بارهای ناگهانی افزایش دهد.

بر اساس مدل سه‌جزئی، لی<sup>۲</sup> و همکاران [۵۲] یک مدل ویسکوالاستیک چهارجزئی را معرفی کردند. در این مدل یک المان فنری به صورت موازی با مدل سه‌جزئی بسته شده است. همین المان اضافی موجب شده است تا تطابق قابل قبولی بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج حاصل از به‌کارگیری این مدل دیده شود.

مدل دیگر مدلی است متشکل از دو بخش که توسط ایم<sup>۳</sup> و همکاران [۵۳] ارائه شده است. این مدل از ترکیب موازی مدل ماکسول و مدل رمبرگ-اسگود بوجود آمده است. بخش رمبرگ-اسگود برای

---

1. Quasi-static Dipolar Model  
2. Li  
3. Eem

توضیح غیرخطی بودن رفتار ماده بکار رفته است درحالیکه بخش ماکسول، رفتار ویسکوالاستیک ماده را توجیه خواهد کرد. این مدل هم تطابق نسبتاً خوبی با نتایج آزمایشگاهی از خود نشان می‌دهد.

چن<sup>۱</sup> و جرامز<sup>۲</sup> [۵۴] یک مدل رئولوژی پیشنهاد کردند که ویسکوالاستیسیته‌ی کامپوزیت، خواص القایی توسط میدان مغناطیسی و همچنین لغزش بین ذرات و ماتریس را در نظر می‌گیرد. در این مدل، ویسکوالاستیسیته توسط بخش جامد استاندارد خطی که شامل دو المان فنری و یک المان استهلاکی-ست مدل می‌شود. سختی وابسته به میدان توسط یک المان فنری با سختی متغیر مدل خواهد شد. لغزش بین ماتریس و ذرات هم توسط یک فنر و کشوی اصطکاکی توضیح داده می‌شود.

مدل بوخ-ون<sup>۳</sup> به عنوان یک مدل هیستریزیس کلاسیک، می‌تواند برای توجیه رفتار بیس ایزولیتورهای MRE بکار گرفته شود. یانگ<sup>۴</sup> و همکاران [۵۵] مدلی با استفاده از مدل بوخ-ون معرفی کردند و اثر پارامترهای مختلف مدل بر شکل منحنی هیستریزیس را توضیح دادند. بهروز<sup>۵</sup> و همکاران [۵۶] نیز مدلی با اضافه کردن یک مدل جامد استاندارد سه جزئی به طور موازی به مدل بوک-ون ارائه کردند. در تحقیقی دیگر، یانچنگ لی<sup>۶</sup> و همکاران [۵۷] یک مدل کرنش-سخت شونده برای بیس-ایزولیتورهای MRE ارائه کردند. در این مدل شاخه‌ی بالایی مدل جامد استاندارد سه جزئی است و شاخه‌ی پایینی یک مدل ماکسول اصلاح شده است که شامل یک المان کرنش-سخت شونده و یک المان میراکننده است که به صورت سری بهم بسته شده‌اند که المان کرنش-سخت شونده در واقع یک تابع توانی خواهد بود. بهینه‌سازی پارامترهای این مدل توسط یو<sup>۷</sup> و همکاران [۵۸] انجام شده است. ایشان همچنین تابعی سینوس‌هایپربولیکی ارائه دادند که رفتار کرنش-سخت‌شونده‌ی بیس ایزولیتورهای MRE را توضیح می‌دهد.

- 
1. Chen
  2. Jerrams
  3. Bouc-Wen Model
  4. Yang
  5. Behrooz
  6. Yancheng Li
  7. Yu

## ۱۲-۱ معرفی تحقیق حاضر

هدف از این پژوهش، مطالعه و مدل‌سازی رفتار الاستومرهای مگنتورئولوژیکال ایزوتروپیک تحت بارگذاری کششی-فشاری می‌باشد. در تحقیق پیش رو با تحلیل نتایج تست فشار-کشش MRE در شرایط بارگذاری مختلف از قبیل مقادیر فرکانس بارگذاری ۱ و ۳ و ۵ و ۸ هرتز، مقادیر دامنه‌ی کرنش ۱ و ۲ و ۴ و ۸ درصد و تحت تاثیر شدت‌های میدان مغناطیسی ۰ و ۱۰۰ و ۱۷۰ و ۲۲۰ و ۲۶۰ میلی‌تسلا، که در مجموع ۸۰ حالت مختلف آزمایشگاهی را تشکیل می‌دهند، رفتار و عکس‌العمل الاستومر مورد نظر شناسایی و تحلیل شده است و با توجه به این داده‌ها و با بکارگیری و تلفیق مدل‌های پایه‌ی ویسکوالاستیک، مدلی برای توضیح رفتار این مواد تحت این شرایط بارگذاری ارائه می‌شود. شرایط بارگذاری به نحوی انتخاب شده تا بتواند کاربردهای مختلف MRE در صنعت از جمله در انواع ضربه‌گیرها و ایزولاتورها را شبیه‌سازی کند. لازم به ذکر است تست‌های مذکور توسط دکتر مسعود سجادی آل‌هاشم، استاد مشاور این پایان‌نامه، در دانشگاه پلی‌تکنیک هنگ‌کنگ انجام شده است. مدل اولیه‌ای با المان‌های مجهول ارائه شد. روابط ساختاری و ریاضی مدل مورد نظر، که ترکیبی‌ست از دو المان ماکسول به همراه یک المان فنری که به صورت موازی بسته شده‌اند، بدست آمد. سپس مجموع مربعات اختلاف بین نتایج حاصل از مدل و نتایج آزمایشگاهی در تمامی ۸۰ حالت، که هر حالت خود شامل تعداد زیادی نقطه در زمان‌های مختلف است که منحنی هیستریزیس آن حالت خاص را تشکیل می‌دهند، به صورت تابعی از پارامترهای مجهول مدل، به عنوان تابع خطا تعریف شد. با استفاده از نرم‌افزار MATLAB و بکارگیری الگوریتم ژنتیک، مینیموم‌سازی تابع خطا برای هرچه کم‌تر کردن مقدار این تابع و به تبع آن، نزدیک‌تر کردن مقادیر حاصل از مدل به مقادیر آزمایشگاهی انجام شد تا حدود مقادیر ضرایب مجهول مدل، معین شود. سپس الگوریتم دیگری در محیط متلب نوشته شد تا در محدوده‌ای که توسط الگوریتم ژنتیک برای هر پارامتر مجهول بدست آمد، جستجو کند و بهترین مقدار را که متناظر با کم‌ترین خطاست، برای مجموعه نقاط هر حالت بدست آورد. پس از آن نتایج حاصل از مدل با نتایج تست مقایسه شده تا مدل

مذکور اعتبارسنجی شود و نکات این مقایسه شرح داده شد تا نقاط قوت و ضعف مدل ارائه شده معین شود.

### ۱-۱۳ ضرورت تحقیق

مواد هوشمند مگنتورئولوژیکال و به طور خاص الاستومرهای مگنتورئولوژیکال، جزو تکنولوژی‌های سطح بالا طبقه‌بندی می‌شوند. در کشور ما به علت کمبود مواد و امکانات لازم جهت ساخت و بکارگیری این مواد، پژوهش‌های بسیار محدودی در این زمینه صورت گرفته است. تمرکز این پژوهش‌ها نیز عمدتاً بر سیالات MR بوده و در موارد اندکی که به الاستومرهای MR پرداخته شده است، این ماده تحت بارگذاری برشی در تجهیزات به کار گرفته و بررسی و تحلیل شده است. نیاز به مدل‌سازی رفتار این مواد در بارگذاری فشاری-کششی برای شناخت، توضیح و پیش‌بینی ویژگی‌های‌شان جهت بکارگیری در کاربردهای مختلف صنعتی از جمله در انواع ضربه‌گیرها و ایزولاتورها، ضروری است درحالی‌که جز مدل‌های معدودی که هر کدام نقص‌های خود را دارند، مدل جامع و دقیقی برای این الاستومرها تحت چنین حالتی از بارگذاری وجود ندارد. بنابراین ارائه‌ی یک مدل صحیح و جامع و اعتبارسنجی آن با داده‌های آزمایشگاهی حاصل از تست فشار-کشش در این شرایط بارگذاری که موضوع این تحقیق خواهد بود، ضروری است تا بتوان نتایج این تحقیق را در صنایعی همچون حمل‌ونقل، هوایی، عمران و ... به کار بست.

### ۱-۱۴ نوآوری‌های تحقیق

در این پژوهش با بررسی و تحلیل نتایج حاصل از تست فشار-کشش MRE مدلی ارائه شده و توسعه یافته و پارامترهای مجهول آن بدست آمده است که برخلاف تمامی مدل‌هایی که قبلاً برای MRE و

فقط در فشار ارائه شده بودند، در کشش و همچنین در بارگذاری ترکیبی هارمونیک کششی-فشاری، نیز قابل استفاده و منطبق بر نتایج آزمایشگاهی است.

از دیگر ویژگی‌های مدل ارائه شده در این پژوهش، پاسخ صحیح مدل در تمامی شرایط و حالت‌های معمول و متداول در صنعت برای بارگذاری MRE در دامنه‌ی کرنش کم‌تر ۸ درصد است. به این معنی که مدل مذکور در تمامی فرکانس‌های بین ۱ تا ۸ هرتز و در تمامی مقادیر چگالی شار مغناطیسی بین ۰ تا ۲۶۰ میلی‌تسلا جواب صحیحی خواهد داد. این درحالی‌ست که هیچ‌کدام از مدل‌های معدودی که تاکنون برای پیش‌بینی و توجیه رفتار MRE در بارهای فشاری ارائه شده، چنین قابلیت‌ی ندارند و عمدتاً در محدوده‌ی فرکانسی کوچک یا در شدت‌های معینی از میدان مغناطیسی پاسخ قابل قبولی خواهند داد.



## فصل ۲ (طراحی، اجرا و تحلیل تست کشش-فشار)

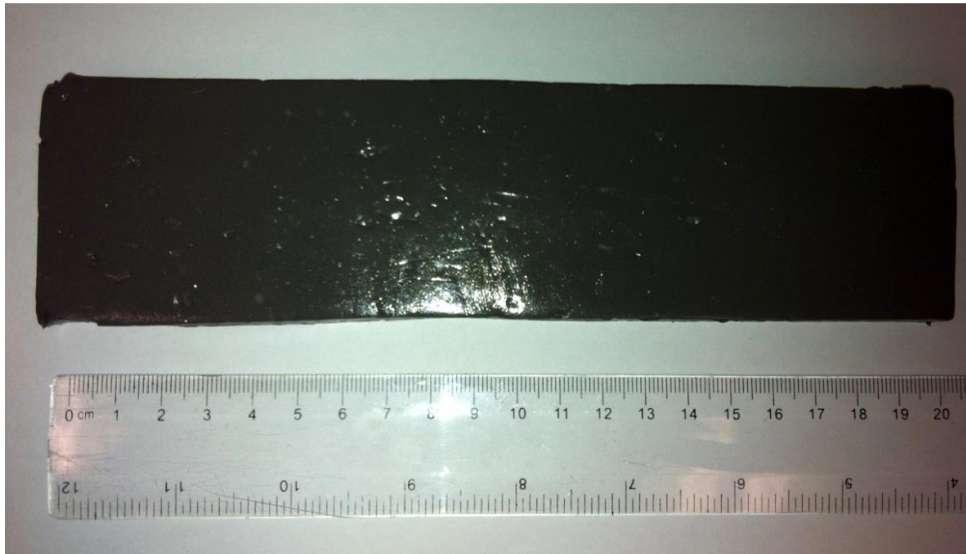
## ۱-۲ پیشگفتار

در این فصل ابتدا به معرفی تست کشش-فشار پرداخته خواهد شد، سپس پیکربندی آزمایش را شرح داده می‌شود و طریقه‌ی آماده‌سازی نمونه‌ی MRE مورد نظر برای قرار گرفتن تحت بارگذاری را بیان خواهد شد. نحوه‌ی اندازه‌گیری صحیح چگالی شار مغناطیسی نیز موضوع بحث بعدی خواهد بود. سپس به گزارش و بررسی نتایج بدست آمده از تست پرداخته خواهد شد و فاکتورهای موثر در آزمایش و تغییرات ایجاد شده تحت تاثیر عوامل مختلف مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در پایان فصل ترکیب‌های گوناگون از منحنی‌های تنش-کرنش حاصل از تست کشش-فشار MRE آورده شده است. لازم به ذکر است تست کشش-فشار MRE که در این پژوهش از نتایج آن (البته پس از اصلاحاتی که در بخش‌های بعدی شرح داده خواهد شد) استفاده گردید، توسط استاد مشاور این پایان‌نامه، دکتر سید مسعود سجادی آل‌هاشم در دانشگاه پلی‌تکنیک هنگ‌کنگ انجام شده است و نتایج خام این تست‌ها در اختیارمان قرار گرفته است.

## ۲-۲ معرفی تست کشش-فشار MRE

به منظور ارائه‌ی مدلی صحیح و کاربردی و همچنین راستی‌آزمایی مدل ارائه شده برای رفتار کششی-فشاری الاستومر مگنتورئولوژیکال ایزوتروپیک، از نتایج تست دینامیکی ذکر شده در بخش قبل استفاده شده است. ابعاد نمونه‌ی MRE ایزوتروپیک  $200 \times 50 \times 15$  میلی‌متر است. نمونه‌ی مذکور شامل ۷۰ درصد جرمی کربنیل آهن، ۲۰ درصد لاستیک سیلیکون و ۱۰ درصد روغن سیلیکون می‌باشد. تصویری از نمونه در شکل ۱-۲ دیده می‌شود.



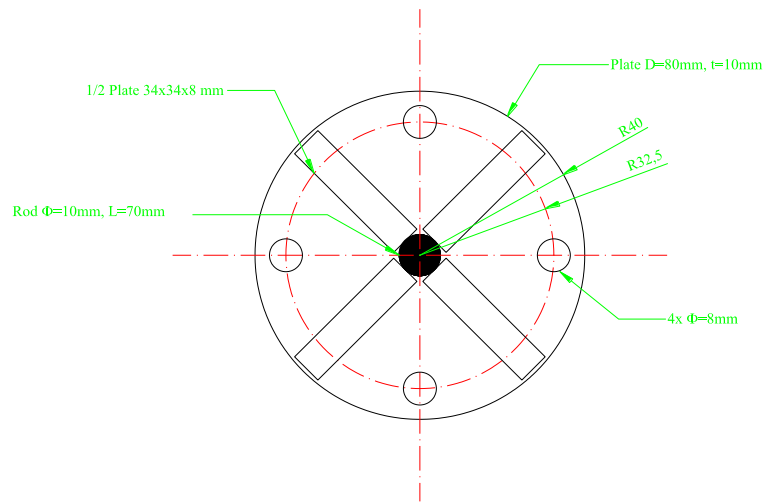


شکل ۱-۲ نمونه MRE

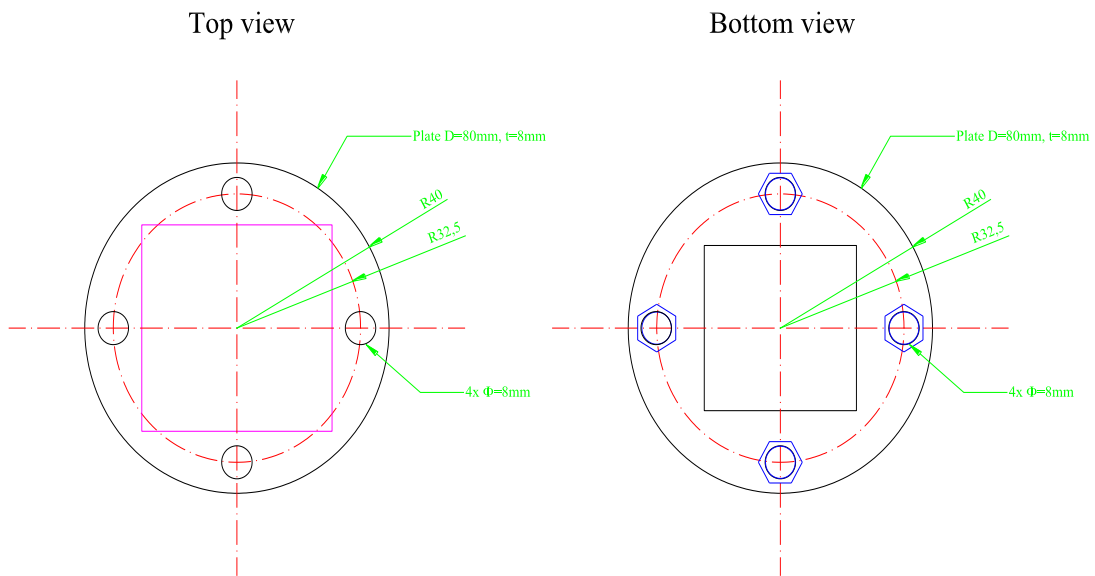
تست به گونه‌ای طراحی شده که با کنترل مقدار تغییر ضخامت نمونه تحت تحریکات هارمونیک یا نوسانی، در حالت‌های مختلفی از مقادیر فرکانس تحریک، دامنه‌ی کرنش و چگالی شار میدان مغناطیسی که توسط آهنرباهای دائمی اعمال می‌شود، عمل کند. فرکانس‌های تحریک انتخاب شده برای این تست مقادیر ۱ و ۳ و ۵ و ۸ هرتز است و مقادیر دامنه‌ی تغییر ضخامت نمونه، ۰/۱۵ و ۰/۳ و ۰/۶ و ۱/۲ میلی‌متر که به ترتیب متناظر با درصدهای کرنش محوری ۰/۱ و ۰/۲ و ۰/۴ و ۰/۸ است، می‌باشد. رفتار MRE با اعمال شار مغناطیسی دچار تغییر می‌شود. برای بررسی اثر چگالی شار مغناطیسی بر نمونه، میدان مغناطیسی مورد نیاز در هر ست از آزمایش با اضافه کردن ۱ تا ۴ جفت آهنربای دائمی، ایجاد می‌شود. با تغییر تعداد آهنرباها، چگالی شار مغناطیسی تغییر می‌کند. ابعاد آهنرباهای استفاده شده در تست، ۵۰ × ۵۰ × ۱۲ میلی‌متر بوده است. در مجموع ۴ مقدار برای چگالی شار مغناطیسی در تست گنجانده شده است.

## ۳-۲ پیکربندی آزمایش

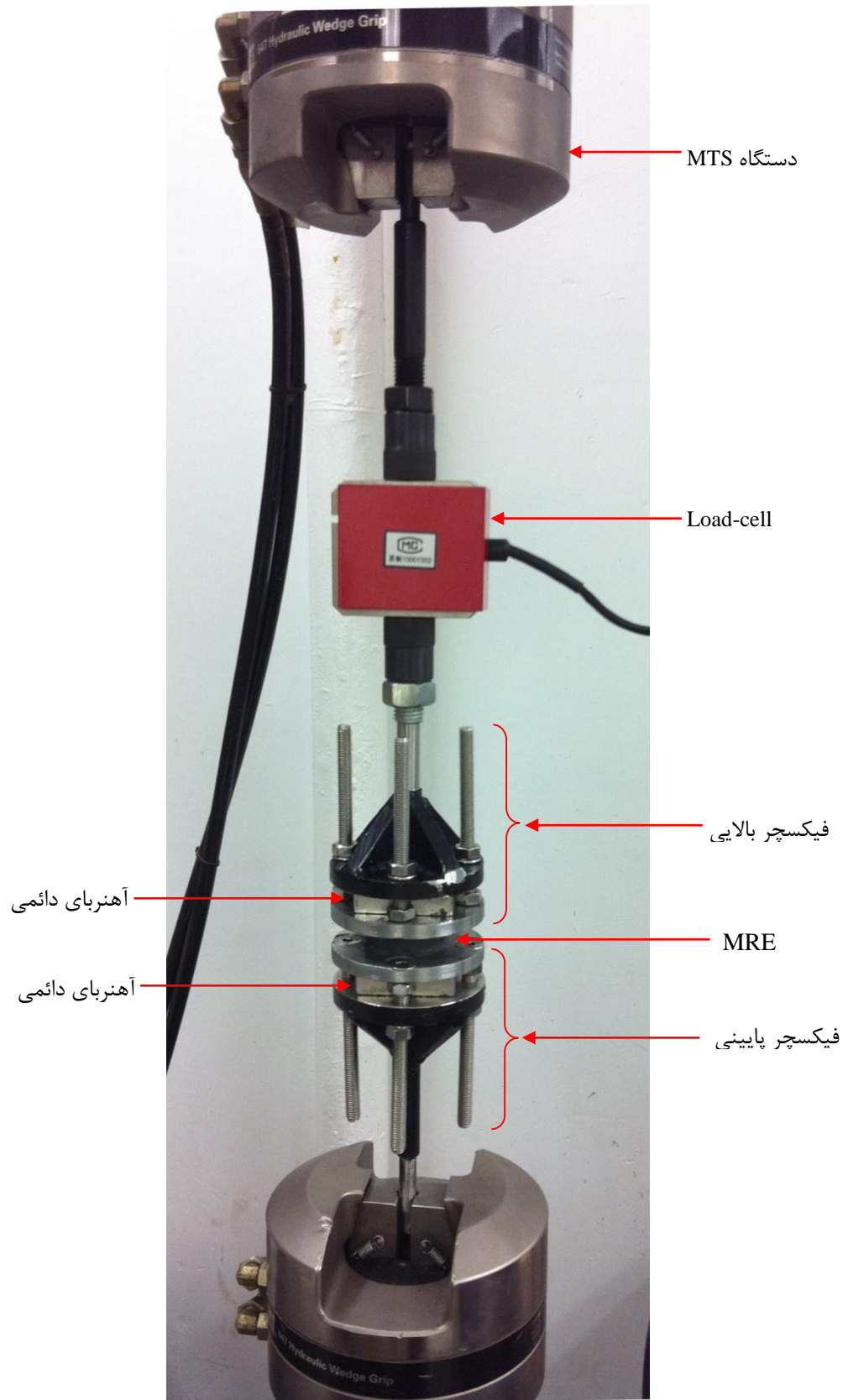
به منظور انجام تست کشش-فشار با بکارگیری آهنرباهای دائمی، تست‌ستاپ ویژه‌ای طراحی شده است به گونه‌ای که به راحتی و با اضافه کردن یا برداشتن آهنرباها، تغییر در چگالی شار مغناطیسی ایجاد می‌شود. تست‌ستاپ مورد نظر، شامل دو فیکسچر یا چفت‌وبست کاملاً مشابه است که هر فیکسچر شامل دو بخش است: قسمت بالایی و قسمت پایینی که با استفاده از چهار پیچ از جنس فولاد ضدزنگ به هم متصل شده‌اند. آهنرباها را می‌توان با باز کردن این پیچ‌ها، بین دو قسمت بالایی و پایینی هر فیکسچر نصب کرد. بخش بالایی به یک دستگاه MTS یا Material Testing System (MTS-810) متصل شده است تا تحریکات سینوسی را به نمونه منتقل کند. لازم به ذکر است که قسمت بالایی از جنس فولاد ضدزنگ انتخاب شده است تا فیکسچر از نظر مغناطیسی ایزوله شود. قسمت پایینی از جنس فولاد خواهد بود تا شار مغناطیسی بتواند از آن عبور کند و نمونه‌ی MRE که بین دو فیکسچر قرار دارد را تحت تاثیر قرار دهد. نقشه‌های بخش بالایی و پایینی فیکسچر و همچنین تصویر کل پیکربندی تست در شکل‌های ۲-۲ و ۳-۲ و ۴-۲ دیده می‌شود.



شکل ۲-۲ نقشه‌ی قسمت بالایی فیکسچر



شکل ۳-۲ نقشه‌ی قسمت پایینی فیکسچر



شکل ۲-۴ پیکربندی کامل آزمایش

## ۴-۲ آماده‌سازی نمونه ی MRE برای تست

نمونه اولیه ی MRE تهیه شده، دارای شکل مکعب مستطیل بوده است. ابتدا برشی به شکل مکعب به ابعاد  $40 \times 40$  میلی‌متر از نمونه جدا شد. به منظور انجام صحیح تست کشش-فشار، نیاز است تا شکلی استوانه‌ای از نمونه ی اولیه بریده شود. برای انجام این برش، یک کاتر استوانه‌ای شکل با لبه ی تیز و یکنواخت به کار گرفته می‌شود. قطر داخلی کاتر،  $40$  میلی‌متر است و برشی استوانه‌ای شکل به قطر  $40$  میلی‌متر و ضخامت  $15$  میلی‌متر، که نمونه ی نهایی برای قرار گرفتن در تست ستاپ است را شکل می‌دهد. برش نهایی نمونه و همچنین کاتر مورد نظر در شکل‌های ۲-۵ و ۲-۶ دیده می‌شوند.



شکل ۲-۵ برش نهایی نمونه



شکل ۲-۶ کاتر برش‌دهنده

## ۲-۵ اندازه‌گیری چگالی شار مغناطیسی

چگالی شار بین دو فیکسچر، در حالت‌های مختلف با تعداد آهنرباهای نصب شده‌ی مختلف در ستاپ، با استفاده از تسلامتر مدل GM-701 (Aerospace Magnetic Technology Cop, made in china) که در شکل ۲-۷ دیده می‌شود و درحالتی که نمونه بین دو فیکسچر نصب نشده و فاصله بین دو صفحه، با استفاده از دو قطعه‌ی غیرمغناطیس‌شونده‌ی پلاستیکی، به اندازه‌ی ۱۵ میلی‌متر که همان ضخامت نمونه‌ی MRE است تنظیم شده، اندازه‌گیری شده است. چگالی شار در وسط فاصله‌ی بین دو صفحه و در مکان‌های مختلف اندازه‌گیری شد و نتیجه آن است که در کل موقعیت مکانی که نمونه در آنجا نصب می‌شود، چگالی شار مغناطیسی تقریباً یکسان و ثابت است. طبق اندازه‌گیری‌های انجام شده، چگالی شار در موقعیت مکانی نصب نمونه، در حالت وجود ۱ و ۲ و ۳ و ۴ جفت آهنربای دائمی، به ترتیب و به طور تقریبی برابر ۱۰۰ و ۱۷۰ و ۲۲۰ و ۲۶۰ میلی‌تسلا خواهد بود. واضح است که در حالتی که آهنربایی در ستاپ نصب نشده باشد مقدار چگالی شار برابر صفر خواهد بود.



شکل ۲-۷ اندازه‌گیری چگالی شار مغناطیسی بین دو فیکسچر به‌وسیله‌ی تسلامتر

پس از اندازه‌گیری چگالی شار، نمونه‌ی MRE به وسیله‌ی چسب سیلیکون، به دو صفحه‌ی پایینی فیکسچر بالا و بالایی فیکسچر پایین، محکم چسبانده می‌شود. پس از چسباندن نمونه دقیقاً در وسط دو صفحه طبق شکل ۲-۸، آن را به مدت ۲۴ ساعت و در دمای ۲۳ درجه‌ی سانتی‌گراد اتاق قرار داده‌اند تا کاملاً خشک و محکم شود. سپس کل تست ستاپ بسته شده و المان‌های مختلف آن سوار می‌شوند. نمونه آماده‌ی تست است.



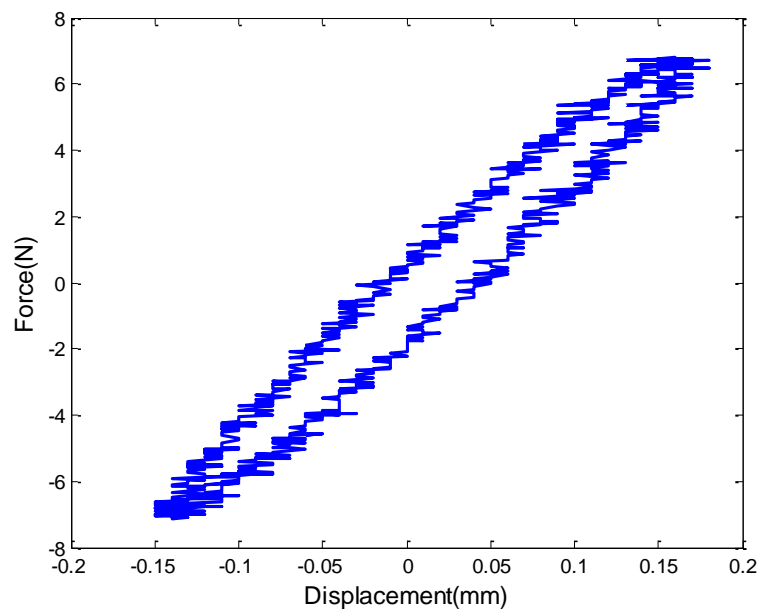
شکل ۲-۸ تست ستاپ بسته شده

## ۲-۶ نتایج اولیه و خام تست کشش-فشار MRE

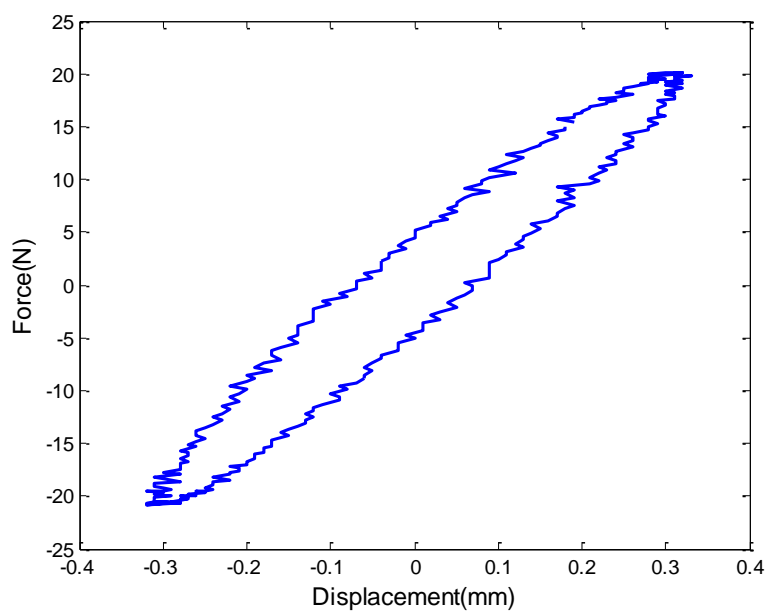
تست مورد نظر یک به یک در هر کدام از ۸۰ حالت بارگذاری از پیش تعیین شده شامل شرایط بارگذاری مختلف از قبیل مقادیر فرکانس بارگذاری ۱ و ۳ و ۵ و ۸ هرتز (با نماد  $F$ )، مقادیر دامنه‌ی کرنش ۱ و ۲ و ۴ و ۸ درصد (با نماد  $a$ ) و تحت تاثیر شدت‌های میدان مغناطیسی ۰ و ۱۰۰ و ۱۷۰ و ۲۲۰ و ۲۶۰ میلی‌تسلا (با نماد  $B$ )، اجرا و نتایج مورد نظر حاصل می‌شود بدین صورت که کرنش معین در فرکانس و چگالی شار معین به نمونه وارد می‌شود و مقدار مقاومت و یا نیروی ایجاد شده در نمونه



اندازه‌گیری خواهد شد. مجری این تست، دکتر سید مسعود سجادی آل‌هاشم، نتایج اولیه و خام بدست آمده از تست‌های خود را در اختیار ما قرار دادند. چند نمونه از داده‌های اولیه که به صورت نمودار نیرو-جابجایی ترسیم شده‌اند در شکل های ۹-۲ الی ۱۲-۲ نشان داده شده است.

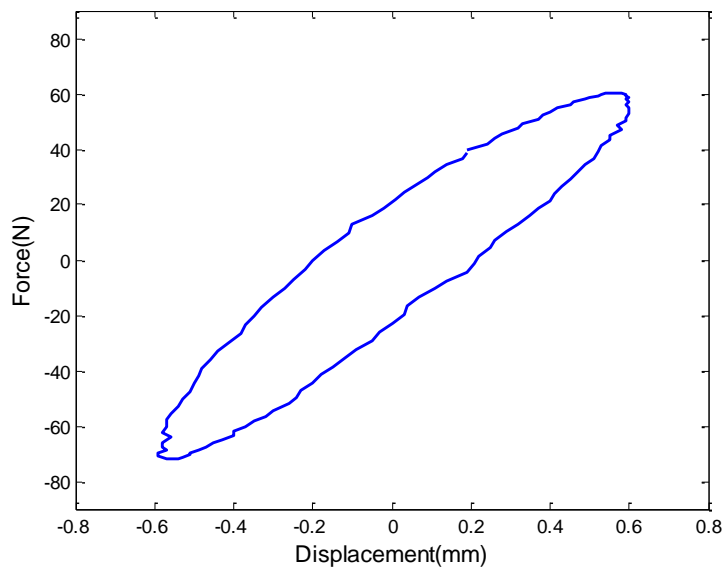


شکل ۹-۲ نتایج اولیه‌ی تست در حالت  $B=0$  mTesla ,  $F=1$  Hz ,  $a=1\%$

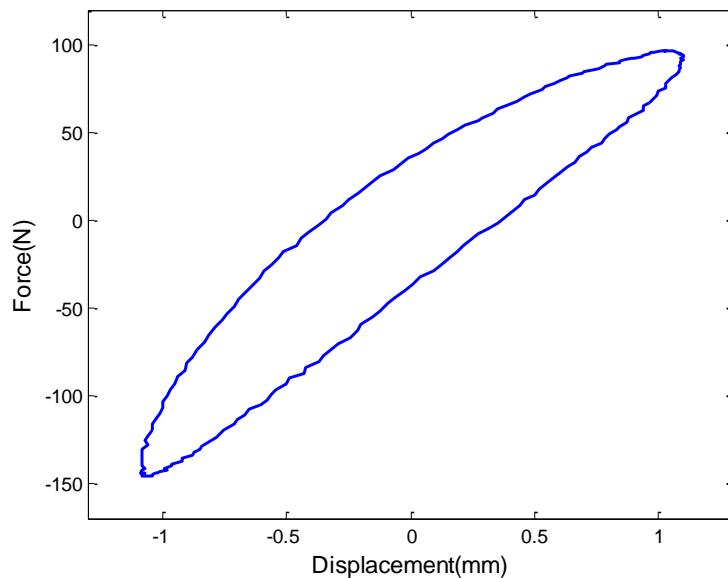


شکل ۱۰-۲ نتایج اولیه‌ی تست در حالت  $B=100$  mTesla ,  $F=3$  Hz ,  $a=2\%$





شکل ۱۱-۲ نتایج اولیه‌ی تست در حالت  $B=170 \text{ mTesla}$  ,  $F=8 \text{ Hz}$  ,  $a=4\%$



شکل ۱۲-۲ نتایج اولیه‌ی تست در حالت  $B=200 \text{ mTesla}$  ,  $F=5 \text{ Hz}$  ,  $a=8\%$

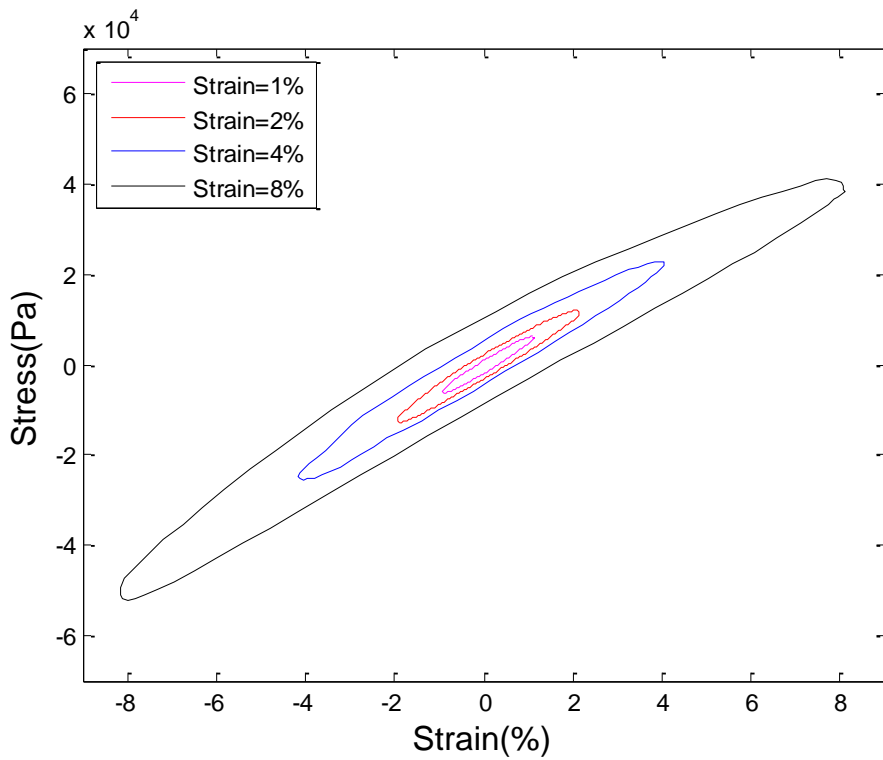
لازم به ذکر است، کلیدی اصلاحات، تحلیل‌ها و مدل‌سازی‌هایی که در ادامه‌ی این پژوهش روی داده‌های آزمایشگاهی خام از پیش تهیه شده انجام شده است، توسط خود دانشجو و منحصرأ به منظور نگارش پایان‌نامه‌ی پیش رو صورت گرفته است.

## ۷-۲ حذف نویز و تبدیل داده‌ها به منحنی‌های تنش- کرنش

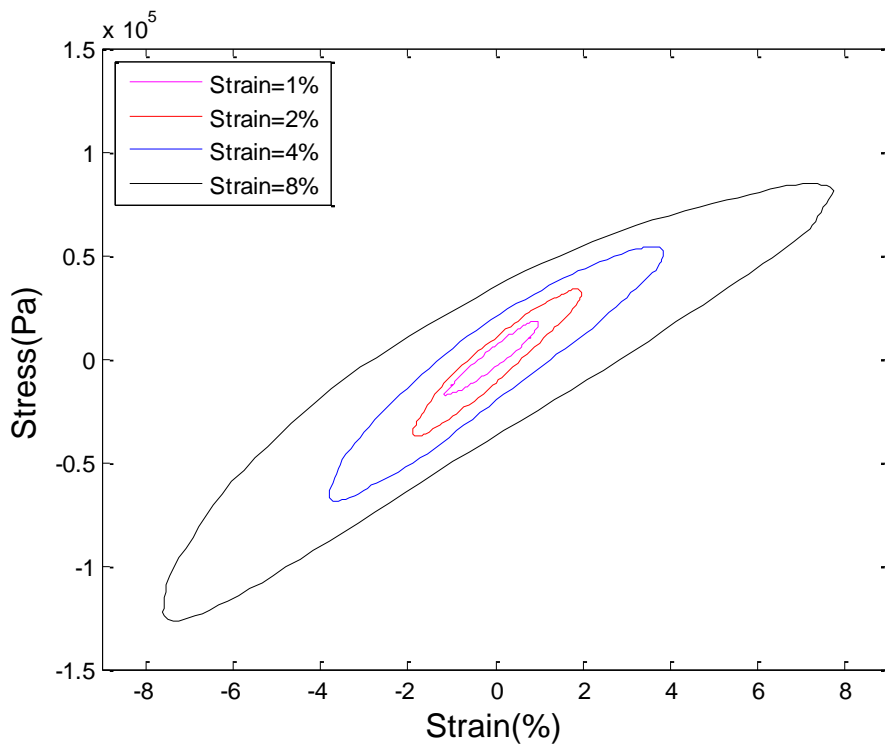
داده‌های خام از فایل‌های excel وارد محیط نرم افزار MATLAB شده‌اند. داده‌های اولیه‌ای که به محیط نرم‌افزار وارد می‌شوند سالم نبوده و درجات مختلفی از نویز را در ستاپ‌های مختلف دارا می‌باشند. در این پژوهش برای حذف نویز از داده‌های نیرو و داده‌های جابجایی، از تبدیل Wavelet یا موجک گسسته‌ی چندمرحله‌ای، توسط دستوره‌های wavedec و wrcoef به دنبال هم در محیط MATLAB، به طور جداگانه در هریک از ۸۰ حالت تست استفاده شده است.

پس از حذف نویز از داده‌ها، با توجه به طول اولیه و قطر نمونه ( $L_1=15\text{ mm}$ ,  $d=40\text{ mm}$ )، مقادیر تغییر طول به کرنش و نیرو به تنش تبدیل می‌شوند تا نمودارهای تنش بر حسب کرنش در هر ست به کمک محیط رسم نمودار در MATLAB بدست آیند.

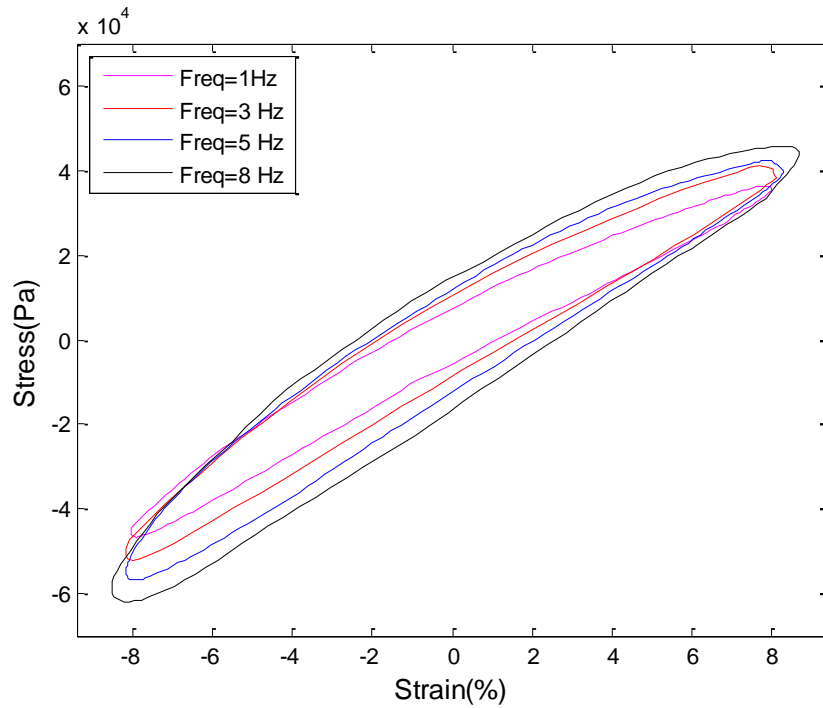
گزیده‌ای از نمودارهای تلفیقی تنش-کرنش حاصل از انجام تست کشش-فشار MRE ایزوتروپیک در حالت‌های مختلف در شکل‌های ۲-۱۳ تا ۲-۱۸ دیده می‌شوند. دو نمونه از نمودارهای تنش-کرنش در چگالی‌های شار مغناطیسی و فرکانس‌های معین، در دامنه کرنش‌های مختلف را در شکل‌های ۲-۱۳ و ۲-۱۴ دیده می‌شود. شکل‌های ۲-۱۵ و ۲-۱۶ دو نمونه از نمودارهای تنش-کرنش در چگالی‌های شار و در دامنه‌های کرنش معین، در فرکانس‌های مختلف می‌باشند. شکل‌های ۲-۱۷ و ۲-۱۸ نیز دو نمونه از نمودارهای تنش-کرنش در دامنه‌های کرنش و فرکانس‌های معین، در چگالی شارهای مختلف هستند. تمامی نمودارهای حاصل از نتایج تست، به طور کامل در انتهای همین فصل آورده شده است. لازم به ذکر است که در تمامی نمودارها، تنش و مدول اتلافی و مدول ذخیره ای برحسب پاسکال (Pa) رسم شده‌اند.



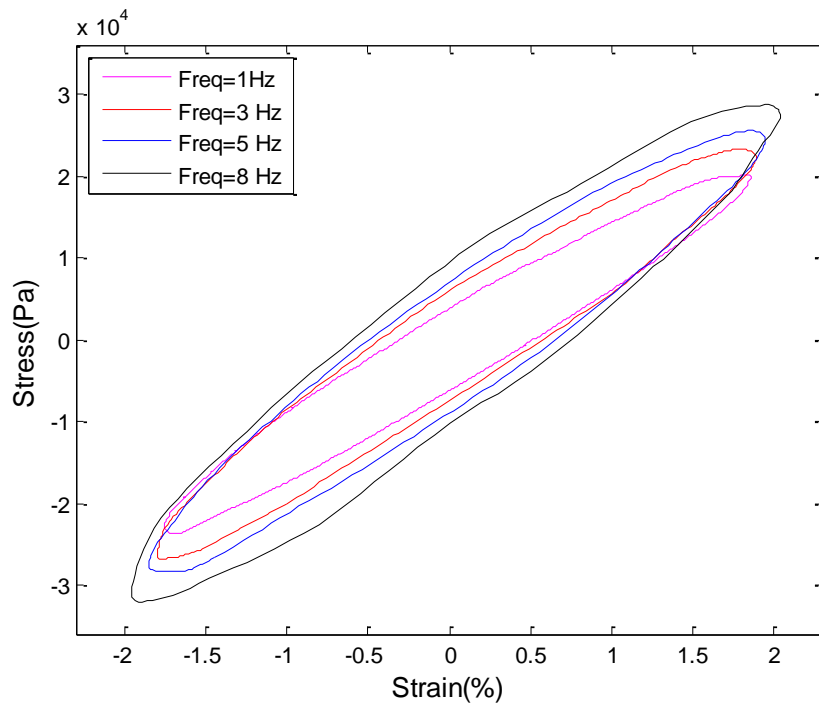
شکل ۲-۱۳ نمودارهای تنش-کرنش در چگالی شار ۰ میلی تسلا و فرکانس ۳ هرتز در دامنه کرنش‌های مختلف



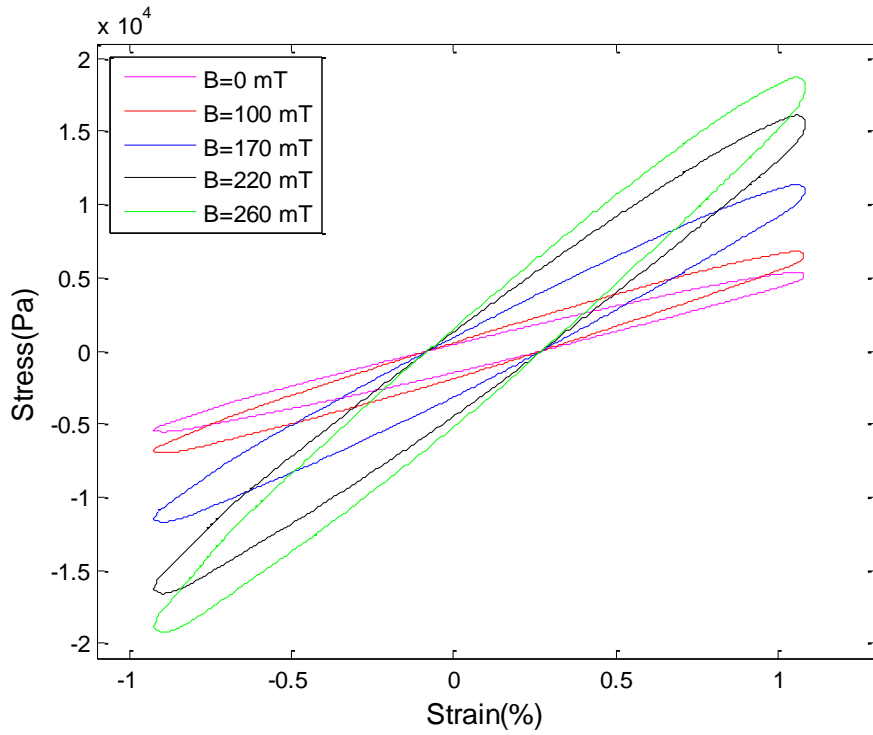
شکل ۲-۱۴ نمودارهای تنش-کرنش در چگالی شار ۲۲۰ میلی تسلا و فرکانس ۸ هرتز در دامنه کرنش‌های مختلف



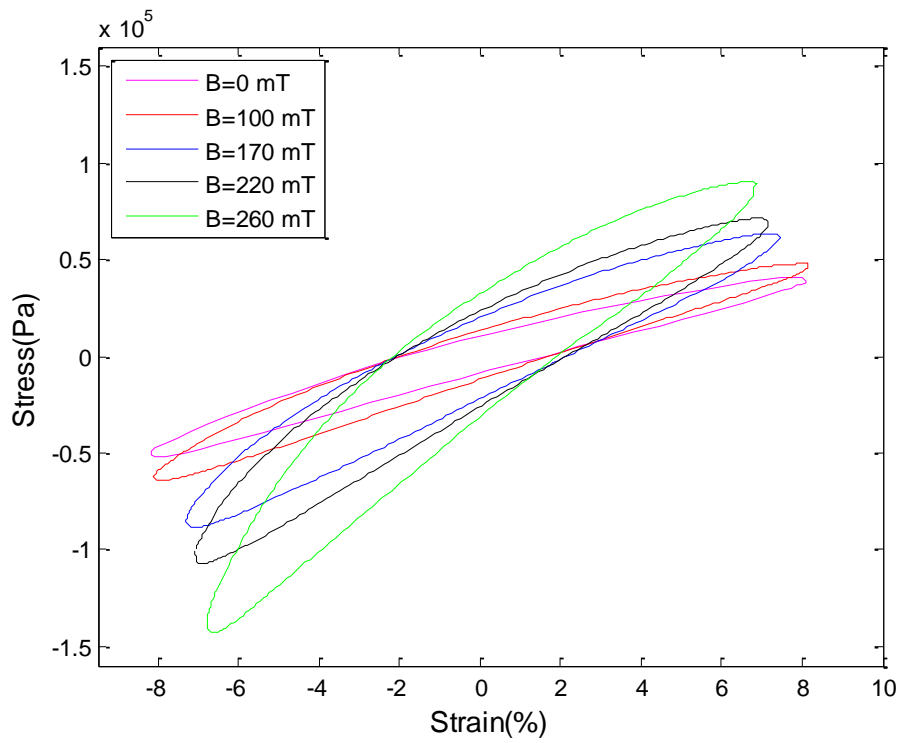
شکل ۲-۱۵ نمودارهای تنش-کرنش در چگالی شار ۰ میلی تسلا و در دامنه کرنش ۸ درصد در فرکانس‌های مختلف



شکل ۲-۱۶ نمودارهای تنش-کرنش در چگالی شار ۱۷۰ میلی تسلا و در دامنه کرنش ۲ درصد در فرکانس‌های مختلف



شکل ۲-۱۷ نمودارهای تنش-کرنش در دامنه کرنش ۱ درصد در فرکانس ۱ هرتز و در چگالی شارهای مختلف



شکل ۲-۱۸ نمودارهای تنش-کرنش در دامنه کرنش حدود ۸ درصد در فرکانس ۳ هرتز و در چگالی شارهای مختلف

## ۲-۸ تحلیل نتایج تست کشش-فشار MRE

### ۲-۸-۱ بررسی تقارن و عدم تقارن منحنی‌های هیستریزیس تنش بر حسب کرنش

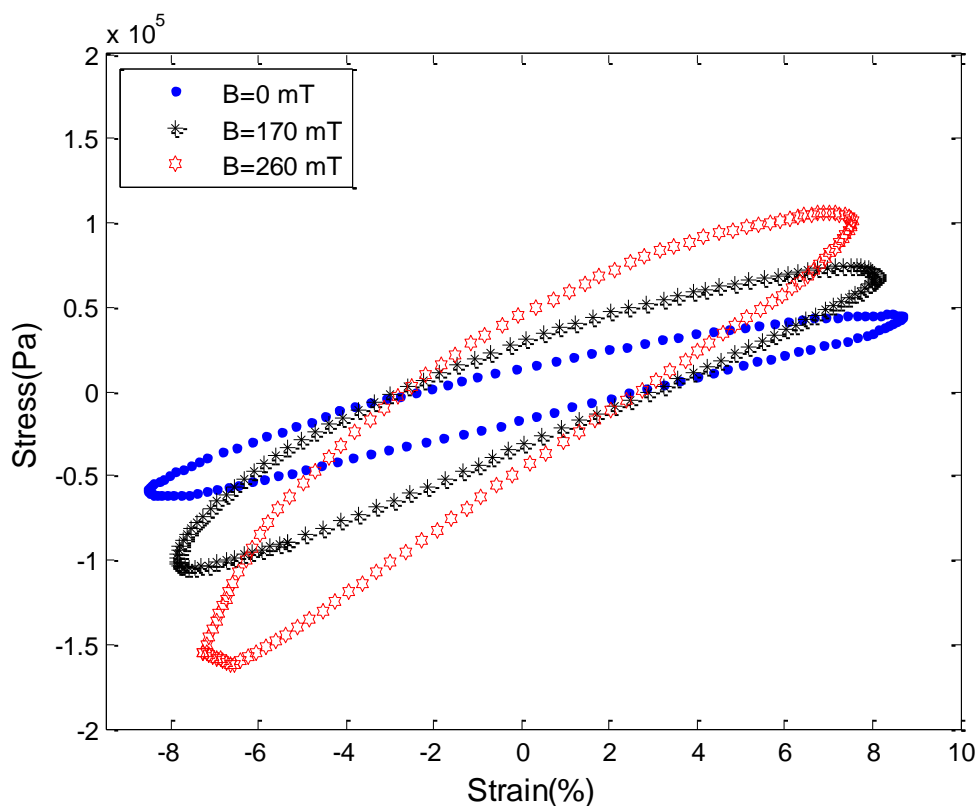
منحنی‌های تنش-کرنش در دامنه‌های کرنش پایین (۱ درصد و ۲ درصد) کاملاً متقارن‌اند. یعنی مقدار حداکثر تنش در حالت فشاری با مقدار حداکثر تنش در حالت کششی، در یک دامنه‌ی کرنش خاص و در فرکانس و مقدار چگالی شار مغناطیسی یکسان تقریباً برابر است. در حالی که در دامنه‌ی کرنش ۴ درصد در تعداد کمی از حالت‌ها و در دامنه‌ی کرنش ۸ درصد در تعداد قابل توجهی از حالات، چنین تطابقی وجود ندارد و در یک دامنه‌ی کرنش خاص و در فرکانس و مقدار چگالی شار مغناطیسی یکسان، مقدار تنش فشاری ایجاد شده بیش‌تر از تنش کششی خواهد بود. بنابراین می‌توان گفت که نمونه‌ی MRE به افزایش کرنش در حالت فشاری مقاومت بیش‌تری نسبت به حالت کششی نشان می‌دهد و یا در فشار مستحکم‌تر از کشش خواهد بود.

با افزایش فرکانس یا F، این عدم تقارن بیش‌تر آشکار می‌شود همچنین با افزایش چگالی شار مغناطیسی یا B نیز این عدم تقارن نمود بیش‌تری خواهد داشت. با افزایش دامنه‌ی کرنش یا a هم اتفاق مشابهی خواهد افتاد. بنابراین با افزایش هرکدام از عوامل خارجی در تست، اختلاف تنش فشاری حداکثر با تنش کششی حداکثر بیش‌تر خواهد شد و منحنی تنش-کرنش، بیش‌تر از حالت خطی فاصله گرفته و فرمی غیرخطی پیدا می‌کند که این غیرخطی بودن نمودارها، بیش‌تر در دامنه‌ی کرنش ۸ درصد است و در مقادیر F و B بالا، آشکارتر خواهد بود.

غیرخطی بودن و عدم تقارن منحنی‌ها، همانطور که انتظار می‌رود، در بالاترین مقادیر B و F و a در میان ۸۰ حالت تست این پژوهش، یعنی در  $B=260 \text{ mT}$  و  $F=8 \text{ Hz}$  و  $a=8\%$  بیش‌ترین نمود را خواهد داشت. در این حالت حداکثر تنش فشاری حدوداً برابر ۱۰۵ کیلوپاسکال است در صورتی که حداکثر تنش فشاری حدوداً ۱۶۰ کیلوپاسکال خواهد بود که تقریباً ۱/۵ برابر حداکثر تنش کششی است.

## ۲-۸-۲ بررسی رابطه‌ی انرژی اتلافی در هر سیکل با مقدار چگالی شار مغناطیسی

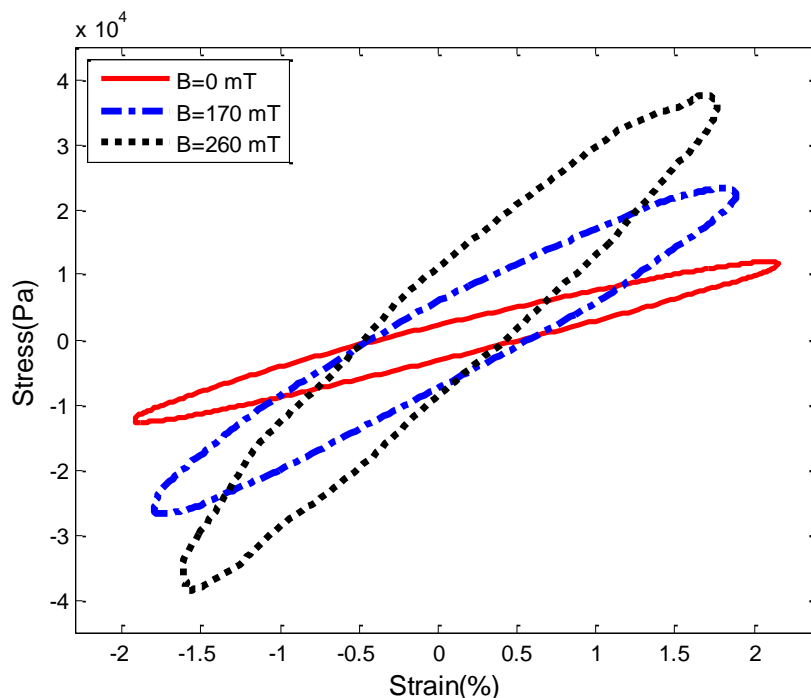
در هر حالتی از شرایط آزمایش سطح محصور در داخل منحنی تنش-کرنش نشان‌دهنده‌ی مقدار انرژی اتلافی یا دمپ شده در هر سیکل خواهد بود. به این صورت که باریک‌تر شدن کلی منحنی در هر فرکانس و دامنه‌ی کرنش خاص، به معنای کاهش انرژی اتلافی در هر سیکل در آن شرایط خواهد بود. همانطور که در شکل ۱۹-۲ دیده می‌شود، در یک فرکانس و دامنه‌ی کرنش ثابت و معین، سطح محصور در منحنی تنش-کرنش در حالت‌هایی که نمونه تحت تاثیر میدان مغناطیسی خارجی قرار می‌گیرد، بیش‌تر از حالتی است که هیچ میدانی به نمونه‌ی MRE اعمال نمی‌شود و همینطور مشخص است که با افزایش چگالی شار مغناطیسی اعمال شده بر نمونه، سطح محصور در منحنی و به تبع آن، انرژی‌ای که در هر سیکل توسط نمونه MRE دمپ می‌شود، افزایش می‌یابد.



شکل ۱۹-۲ افزایش سطح محصور در نمودار تنش-کرنش با افزایش چگالی شار در کرنش ۸ درصد و فرکانس ۸ هرتز

## ۲-۸-۳ بررسی رابطه‌ی شیب منحنی‌های تنش- کرنش با چگالی شار مغناطیسی

با افزایش مقدار چگالی شار مغناطیسی یا  $B$ ، شیب منحنی هیستریزیس در هر حالت از ۸۰ ست تست، افزایش می‌یابد. در شکل ۲-۲۰ که نمودارهای تنش-کرنش را برای سه مقدار مختلف چگالی شار ۰ و ۱۷۰ و ۲۶۰ میلی‌تسلا و در شرایط فرکانس ۳ هرتز و دامنه کرنش ۲ درصد نشان می‌دهد، نمونه‌ای از این تاثیر مشخص است.

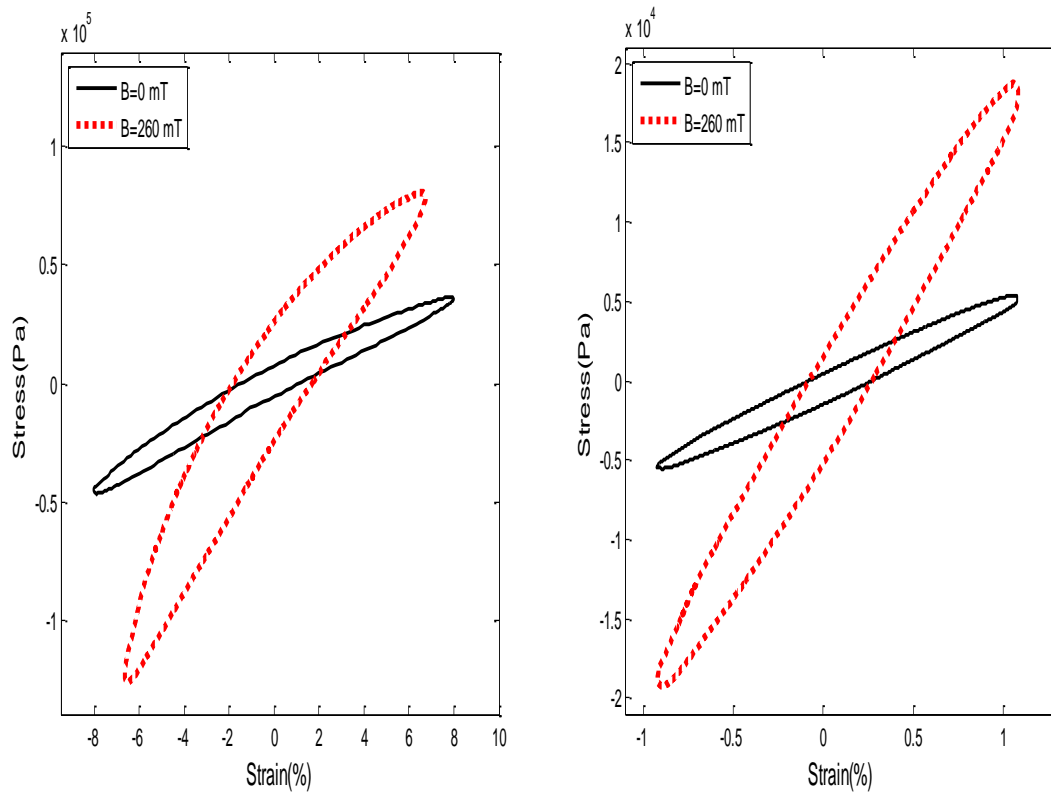


شکل ۲-۲۰ تاثیر چگالی شار بر شیب منحنی‌های تنش-کرنش در فرکانس ۳ هرتز و کرنش ۲ درصد

شیب منحنی تنش-کرنش معیاری است از سختی نمونه‌ی مورد آزمایش، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در هر فرکانس و دامنه‌ی کرنش ثابت و معین، با افزایش چگالی شار مغناطیسی، سختی معادل نمونه‌ی MRE افزایش خواهد یافت.

از طرفی مشاهده می‌شود که افزایش نسبی سختی نمونه‌ی MRE در اثر افزایش  $B$ ، در درصدهای کرنش پایین، مشهودتر از درصدهای کرنش بالاست. از مقایسه‌ی دو نمودار نشان داده شده در شکل ۲-۲۱ این تفاوت به وضوح دیده می‌شود.





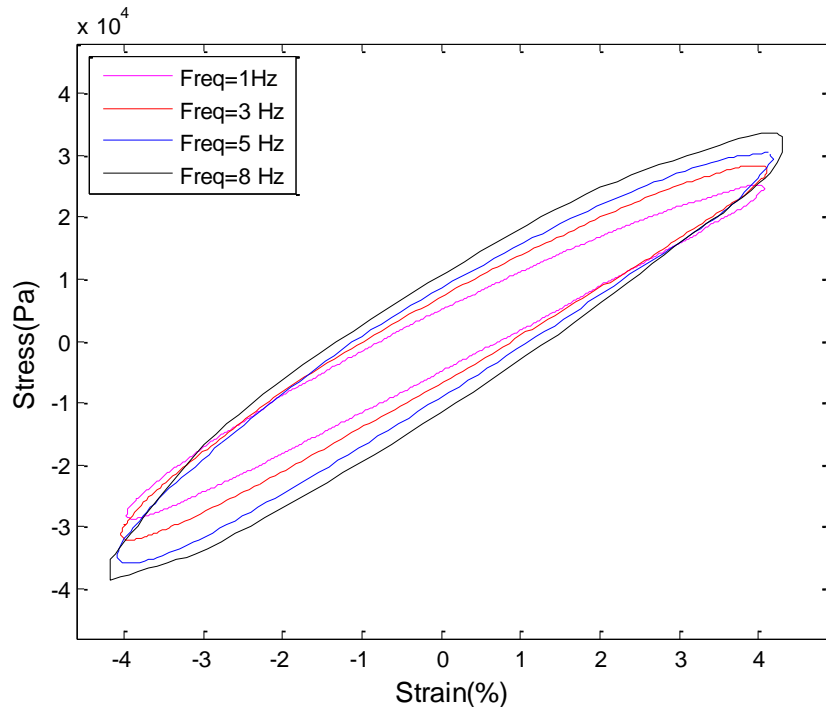
شکل ۲-۲۱ مقایسه ی افزایش نسبی سختی MRE در اثر افزایش B در درصدهای کرنش بالا و پایین در  $F=1$  Hz

نمودار سمت راست در شکل ۲-۲۱، افزایش سختی نمونه را در فرکانس ۱ هرتز و در دامنه ی کرنش ۱ درصد نشان می دهد که با افزایش چگالی شار مغناطیسی از ۰ به ۲۶۰ میلی تسلا، سفتی معادل نمونه یا شیب نمودار ۲/۴ برابر می شود. این درحالی است که در همین فرکانس و در درصد کرنش ۸ درصد که شکل سمت چپ نمودار تنش-کرنش آن را نشان می دهد، با افزایش چگالی شار مغناطیسی از ۰ به ۲۶۰ میلی تسلا، سفتی معادل یا شیب نمودار تنش-کرنش ۱/۶ برابر می شود.

## ۲-۸-۴ بررسی تاثیر تغییر فرکانس ورودی بر رفتار MRE

برای بررسی تاثیر افزایش یا کاهش فرکانس ورودی بر نمونه ی MRE، منحنی های تنش-کرنش در دامنه ی کرنش و چگالی شار مغناطیسی ثابت را در فرکانس های مختلف بررسی می کنیم. به عنوان

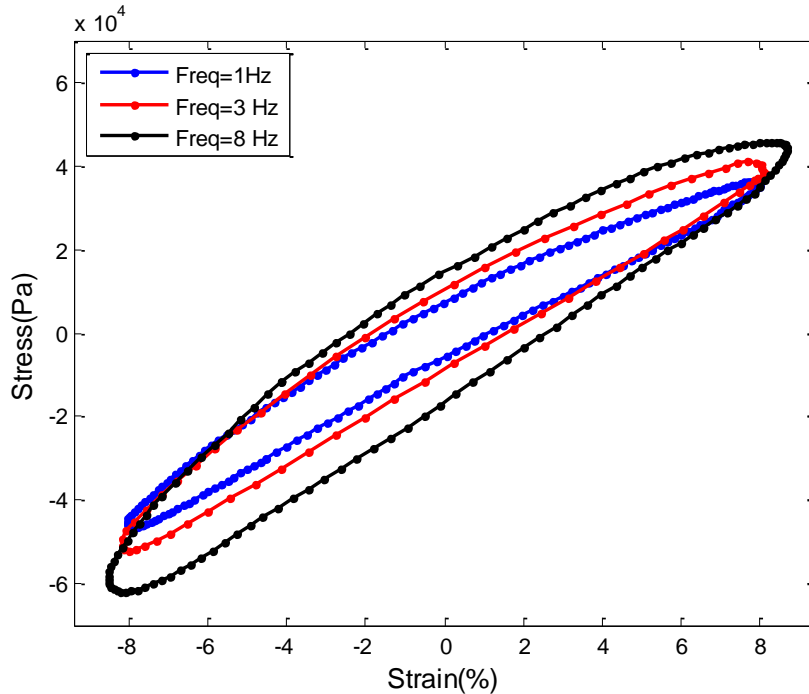
نمونه‌ای از چنین منحنی‌هایی، شکل ۲-۲۲ منحنی‌های تنش-کرنش نمونه را در دامنه‌ی کرنش ۴ درصد و چگالی شار مغناطیسی ۱۰۰ میلی‌تسلا در فرکانس‌های ۱ و ۳ و ۵ و ۸ هرتز نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲۲ منحنی‌های تنش-کرنش نمونه در  $B=100 \text{ mT}$  و  $a=4\%$  در فرکانس‌های مختلف

همانطور که در شکل مشخص است، افزایش فرکانس ورودی در یک دامنه‌ی کرنش و چگالی شار ثابت و معین، باعث مقداری افزایش در شیب منحنی‌ها خواهد شد که به این معناست که افزایش فرکانس باعث افزایش در سختی معادل نمونه‌ی MRE خواهد شد. این افزایش هم در حالت‌های در غیاب میدان و هم در حالت‌های در حضور میدان مغناطیسی دیده می‌شود.

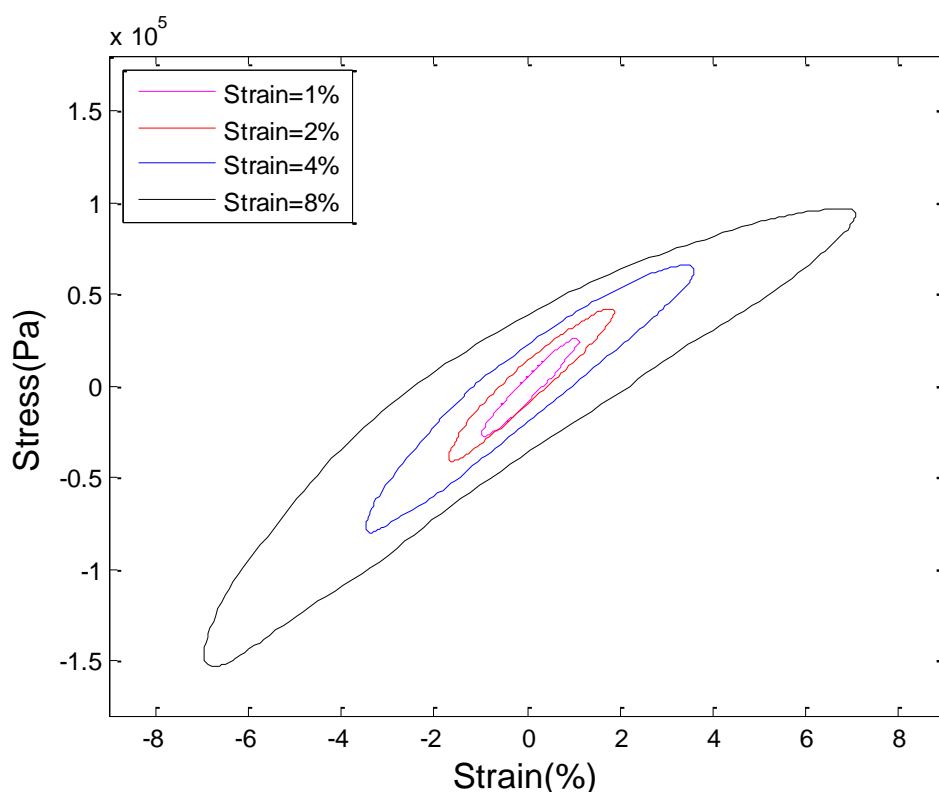
اما در مورد تاثیر تغییر فرکانس بر مقدار انرژی اتلافی در هر سیکل در MRE، می‌توان گفت که در تمامی حالت‌ها، با افزایش فرکانس ورودی در یک دامنه‌ی کرنش و چگالی شار ثابت، سطح محصور در منحنی افزایش می‌یابد که به معنای افزایش انرژی اتلافی یا دمپ شده در هر سیکل، با افزایش فرکانس خواهد بود. به عنوان یک نمونه از این تاثیر، شکل ۲-۲۳ این افزایش در مقدار انرژی اتلافی با افزایش فرکانس را در چگالی شار ۰ میلی‌تسلا و در دامنه‌ی کرنش ۸ درصد نشان می‌دهد.



۲-۲۳ افزایش در مقدار انرژی اتلافی با افزایش فرکانس را در چگالی شار ۰ میلی‌تسلا و در دامنه‌ی کرنش ۸ درصد

### ۵-۸-۲ بررسی تاثیر تغییر دامنه‌ی کرنش بر رفتار MRE

برای بررسی تاثیر افزایش یا کاهش دامنه‌ی کرنش ورودی بر نمونه‌ی MRE، منحنی‌های تنش-کرنش را در فرکانس و چگالی شار ثابت و تحت دامنه‌های کرنش مختلف در نظر می‌گیریم. همانطور که در شکل ۲-۲۴ به عنوان یک نمونه دیده می‌شود، با افزایش مقدار دامنه‌ی کرنش در فرکانس و چگالی شار ثابت، شیب منحنی‌های هیستریزیس اندکی کاهش می‌یابد که این به معنای کاهش سختی معادل نمونه‌ی MRE با افزایش دامنه‌ی کرنش است.



شکل ۲-۲۴ کاهش سختی معادل نمونه MRE با افزایش دامنه‌ی کرنش ورودی در  $B=260 \text{ mT}$  و  $F=5 \text{ Hz}$

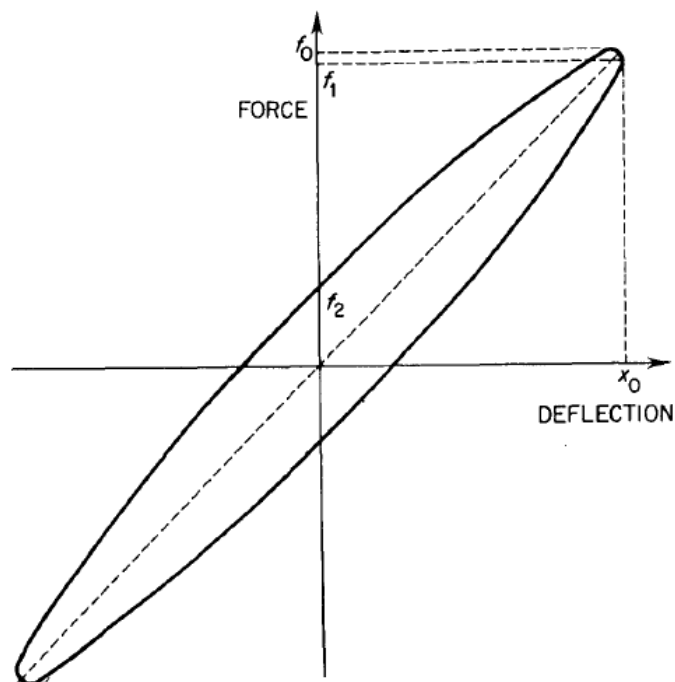
در واقع می‌توان اینطور استنباط کرد که MRE تحت بارگذاری کششی-فشاری در همه‌ی فرکانس-ها و چگالی‌های شار مغناطیسی، رفتار کرنش-نرم شونده یا Strain-Softening از خود نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که این رفتار، در فرکانس‌ها و چگالی‌های شار مغناطیسی بالاتر، چشمگیرتر خواهد بود.

نکته‌ی دیگری که در شکل ۲-۲۴ به وضوح دیده می‌شود، افزایش سطح محصور در منحنی تنش-کرنش با افزایش دامنه‌ی کرنش است که به معنای افزایش مقدار انرژی اتلافی در هر سیکل با افزایش دامنه‌ی کرنش نمونه در فرکانس و چگالی شار ثابت، خواهد بود.

## ۶-۸-۲ بررسی تغییرات مدول ذخیره‌ای یا $E'$ در برابر چگالی شار مغناطیسی

مدول ذخیره‌ای<sup>۱</sup> هر نمونه در هر شرایط، همانطور که از نامش پیداست، معیاریست از توانایی ذخیره-سازی انرژی توسط آن نمونه در آن شرایط و در محاسبات ریاضی قسمت حقیقی مدول مرکب<sup>۲</sup> را تشکیل می‌دهد. مدول اتلافی<sup>۳</sup> هر نمونه در هر شرایط بارگذاری نیز، معیاریست از توانایی اتلاف انرژی یا دمپینگ توسط آن در همان شرایط که با  $E''$  نشان داده می‌شود و قسمت موهومی مدول مرکب را تشکیل می‌دهد.

در این پژوهش برای استخراج مقادیر مدول اتلافی و مدول ذخیره‌ای نمونه‌ی MRE در هر حالت بارگذاری، از روابط و روش معرفی شده توسط راجر براون<sup>۴</sup> [۵۹] استفاده شده است. مبنای روش براون استفاده از منحنی نیرو بر حسب جابجایی تست می‌باشد.



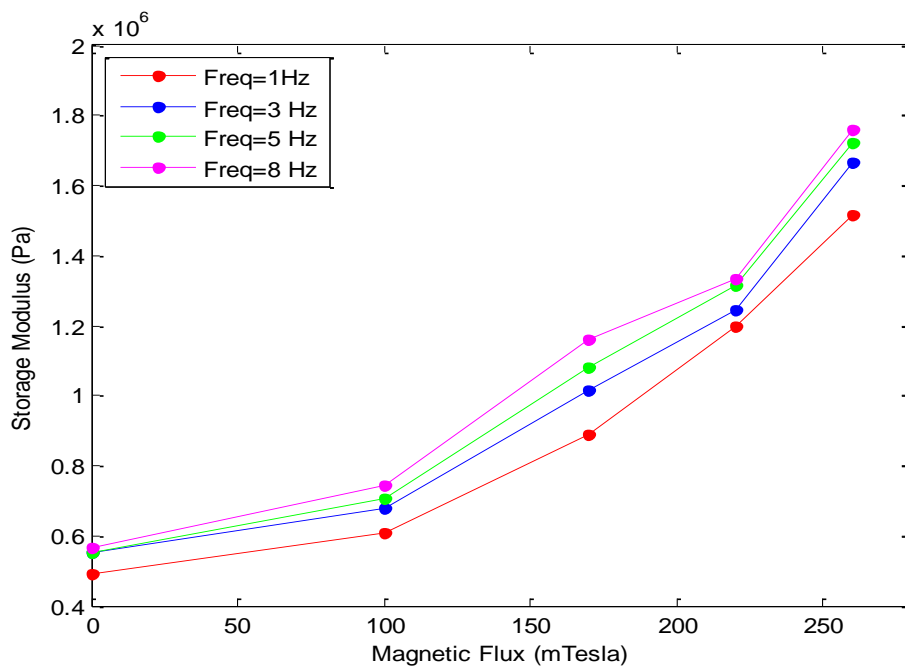
شکل ۲-۲۵ منحنی نیرو بر حسب جابجایی برای استفاده در روش براون [۵۹]

1. Storage Modulus
2. Complex Modulus
3. Loss Modulus
4. Roger Brown

در این روش همان طور که در شکل ۲-۲۵ مشخص است مقدار نیروی متناظر با بیشینه‌ی جابجایی با  $f_1$  و مقدار نیروی متناظر با نقطه‌ی برخورد منحنی با محور عمودی (که همان محور نیرو است) با  $f_2$  در شکل ۲-۲۵ نام گذاری می‌شود و از روابط زیر مقادیر  $E'$  و  $E''$  قابل محاسبه اند. در این روابط  $h$  ضخامت نمونه،  $A$  سطح مقطع موثر و  $x_0$  مقدار بیشینه‌ی جابجایی یا تغییر شکل خواهد بود.

$$E' = \frac{f_1 h}{Ax_0}, \quad E'' = \frac{f_2 h}{Ax_0} \quad (1-2)$$

شکل ۲-۲۶ تغییرات مدول ذخیره‌ای در برابر تغییر چگالی شار مغناطیسی برای نمونه‌ی MRE در دامنه‌ی کرنش ۴ درصد و در فرکانس‌های ورودی متفاوت نشان می‌دهد.

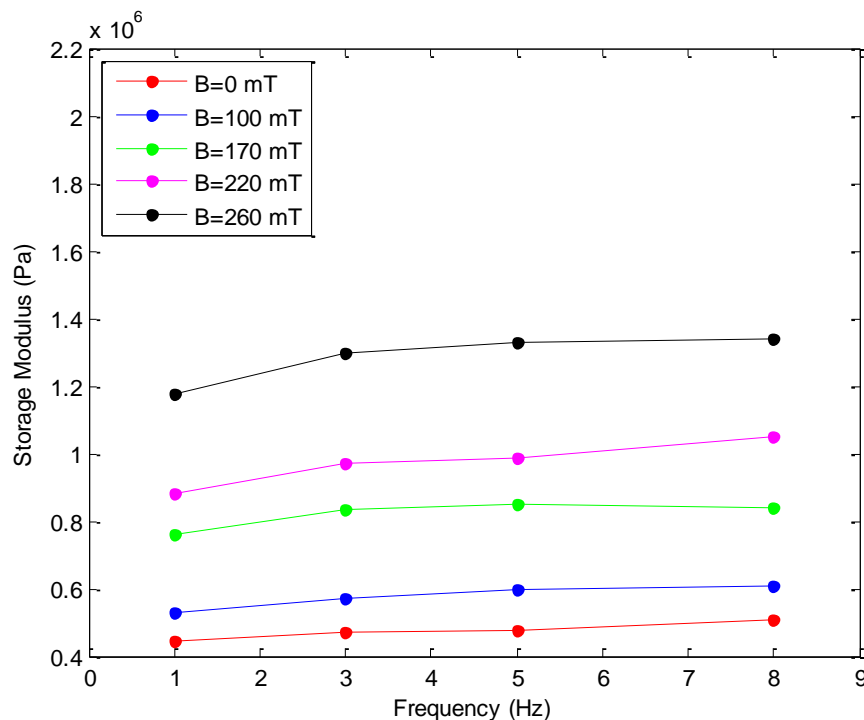


شکل ۲-۲۶ تغییرات مدول ذخیره‌ای در مقابل تغییر چگالی شار مغناطیسی

همانطور که در شکل مذکور دیده می‌شود، با افزایش مقدار چگالی شار از صفر تا ۲۶۰ میلی‌تسلا، مقدار مدول ذخیره‌ای به صورت یک تابع درجه دو افزایش می‌یابد. چنین رفتاری دقیقاً در سایر دامنه‌های کرنش مورد آزمایش هم دیده شده است. بنابراین نتیجه می‌گیریم که مقدار  $E'$  با افزایش چگالی شار مغناطیسی در تمامی فرکانس‌ها و دامنه‌های کرنش به صورت یک تابع درجه دو افزایش می‌یابد.

## ۷-۸-۲ بررسی تغییرات مدول ذخیره‌ای یا $E'$ در برابر فرکانس ورودی

شکل ۲-۲۷ تغییرات مدول ذخیره‌ای بر حسب پاسکال را در برابر تغییر فرکانس ورودی برای نمونه‌ی MRE در دامنه‌ی کرنش ۸ درصد و در مقادیر متفاوت چگالی شار مغناطیسی نشان می‌دهد.

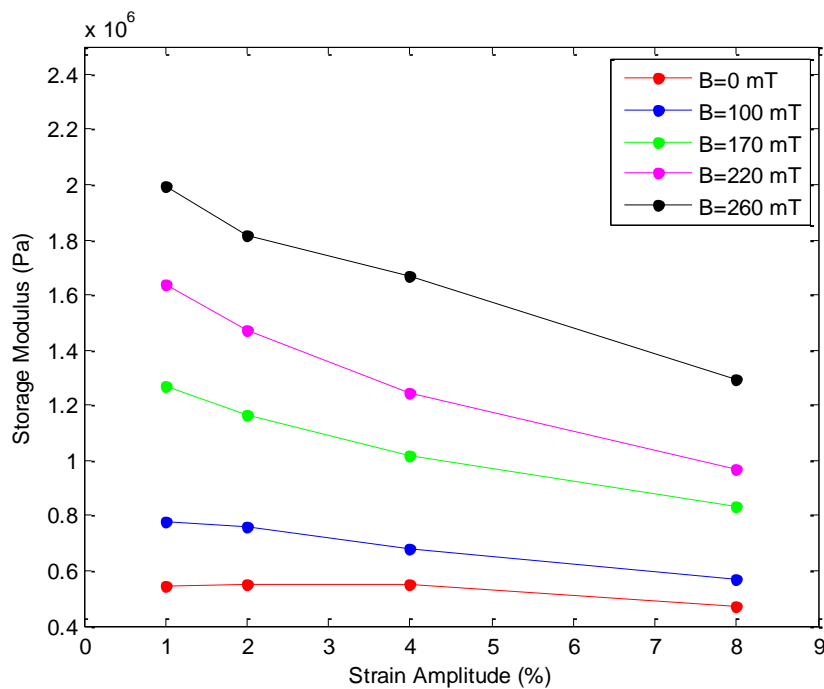


شکل ۲-۲۷ تغییرات مدول ذخیره‌ای در برابر تغییر فرکانس ورودی

از شکل می‌توان این‌گونه استنتاج کرد که با افزایش فرکانس ورودی مقدار  $E'$  افزایش خواهد یافت. البته شیب نمودار در تمام نقاط یکسان نیست و با تغییر فرکانس، تغییر خواهد کرد. موارد ذکر شده برای سایر دامنه‌های کرنش نیز صادق است.

## ۸-۸-۲ بررسی تغییرات مدول ذخیره‌ای یا $E'$ در برابر دامنه‌ی کرنش

برای مطالعه‌ی تغییرات مدول ذخیره‌ای MRE نسبت به دامنه‌ی کرنش، به عنوان یک نمونه از چنین منحنی‌هایی، شکل ۲-۲۸ را که نشان‌دهنده‌ی تغییرات مقدار  $E'$  نسبت به دامنه‌ی کرنش در شرایط فرکانس ورودی ۳ هرتز و در چگالی‌های شار مغناطیسی مختلف است، مورد بررسی قرار می‌دهیم.



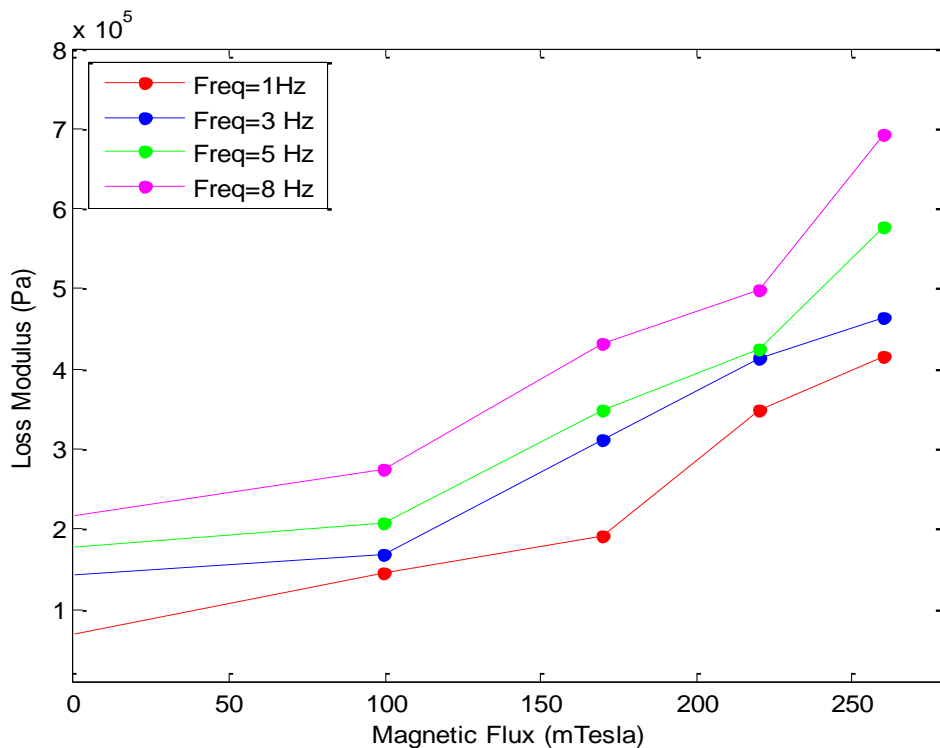
شکل ۲-۲۸ تغییرات مقدار  $E'$  نسبت به دامنه‌ی کرنش در  $F=3$  Hz و در چگالی‌های شار مغناطیسی مختلف

همانطور که در شکل ۲-۲۳ دیده می‌شود، مقدار مدول ذخیره‌ای با افزایش درصد کرنش از ۱ تا ۸ درصد، در تمام مقادیر B دچار کاهش می‌شود. اگرچه روند این کاهش در مقادیر گوناگون B، تا حدی متفاوت است به این صورت که قدر مطلق شیب نمودار با بالا رفتن چگالی شار، بزرگ‌تر خواهد شد. به عبارت دیگر در B بالاتر، منحنی روند نزولی‌تری خواهد داشت.



## ۹-۸-۲ بررسی تغییرات مدول اتلافی یا $E''$ در برابر چگالی شار مغناطیسی

با توجه به شکل ۲-۲۹ که تغییرات مدول اتلافی نسبت به چگالی شار مغناطیسی را، در دامنه‌ی کرنش ۴ درصد و در فرکانس‌های گوناگون نشان می‌دهد، واضح است که روند تغییر  $E''$  با افزایش مقدار B، روندی صعودی است.



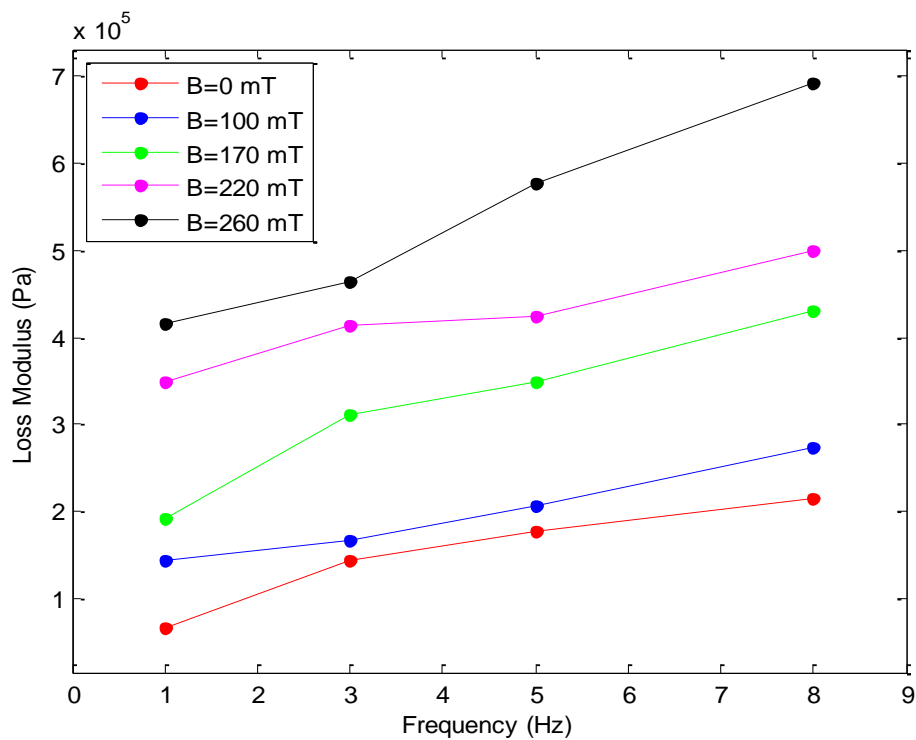
شکل ۲-۲۹ تغییرات مدول اتلافی در مقابل تغییر چگالی شار مغناطیسی

این روند افزایش را می‌توان به طور تقریبی به صورت یک تابع خطی در نظر گرفت. نتایج ذکر شده در سایر دامنه‌های کرنش (۱ و ۲ و ۸ درصد) نیز عیناً صدق می‌کند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش مقدار چگالی شار مغناطیسی اعمال شده به نمونه، MRE توانایی بیش‌تری در دمپینگ انرژی یا ارتعاشات احتمالی خواهد داشت.

## ۲-۸-۱۰ بررسی تغییرات مدول اتلافی یا $E''$ در برابر فرکانس ورودی

روند تغییر مقدار مدول اتلافی در برابر افزایش فرکانس ورودی در دامنه کرنش ۴ درصد در چگالی‌های شار مغناطیسی گوناگون در شکل ۲-۳۰ دیده می‌شود.

مشخص است که مقدار مدول اتلافی یا  $E''$  با افزایش مقدار فرکانس ورودی به نمونه‌ی MRE، در تمامی مقادیر چگالی شار مغناطیسی به طور تقریباً خطی افزایش می‌یابد که این روند در سایر درصدهای کرنش نیز دیده می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش مقدار فرکانس ورودی به نمونه، MRE توانایی بیش‌تری در دمپینگ انرژی یا ارتعاشات احتمالی خواهد داشت.

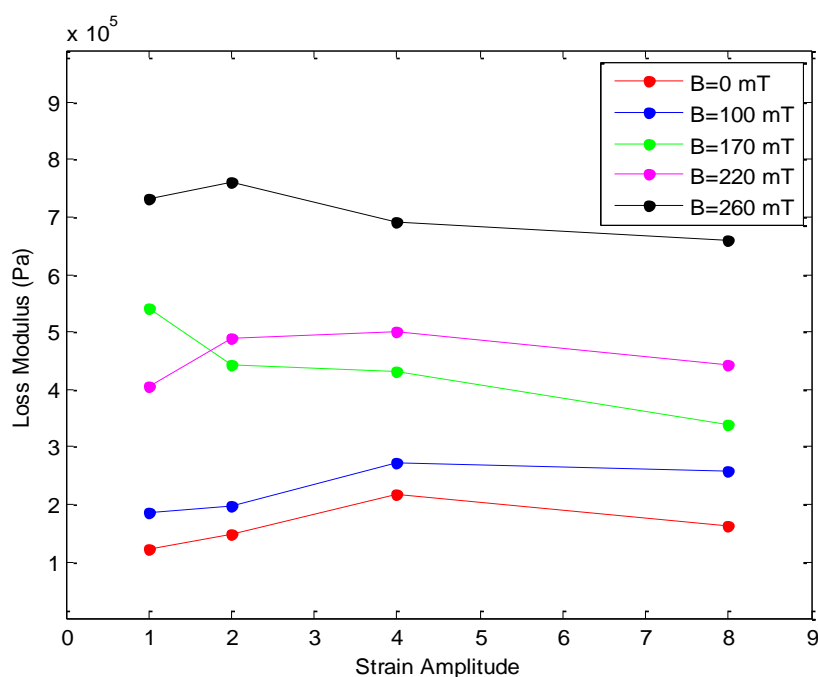


شکل ۲-۳۰ تغییرات مدول اتلافی در مقابل تغییر فرکانس ورودی در دامنه کرنش ۴ درصد

## ۱۱-۸-۲ بررسی تغییرات مدول اتلافی یا $E''$ در برابر دامنه‌ی کرنش

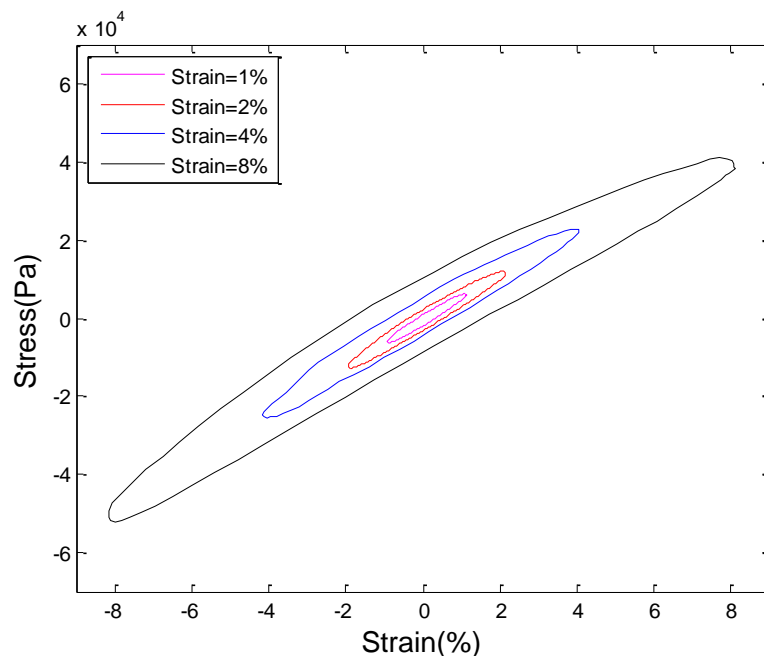
شکل ۲-۳۱ چگونگی تغییر مقادیر مدول اتلافی در برابر افزایش دامنه‌ی کرنش را در فرکانس ۸ هرتز و در مقادیر مختلف B نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل دیده می‌شود، روند ثابت و مشخصی برای افزایش یا کاهش مقدار مدول اتلافی نسبت به افزایش یا کاهش دامنه‌ی کرنش وجود ندارد. از طرفی در اکثر موارد می‌توان گفت که تغییر دامنه‌ی کرنش تاثیر چشم‌گیر و غیرقابل اغمازی بر مقدار مدول اتلافی MRE نخواهد داشت. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مقدار مدول اتلافی برای MRE در تمامی حالات مستقل از دامنه‌ی کرنش خواهد بود.

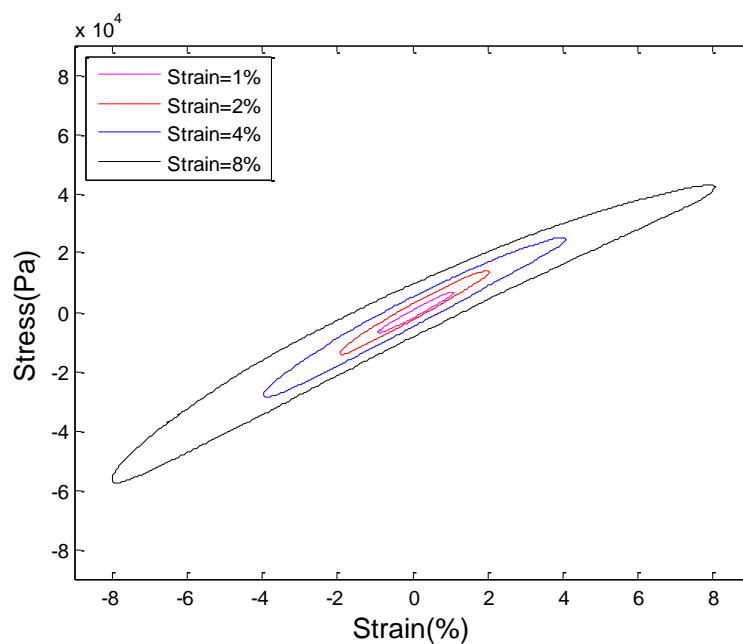


شکل ۲-۳۱ تغییر مقادیر مدول اتلافی در برابر دامنه‌ی کرنش در فرکانس ۸ هرتز و در مقادیر مختلف B

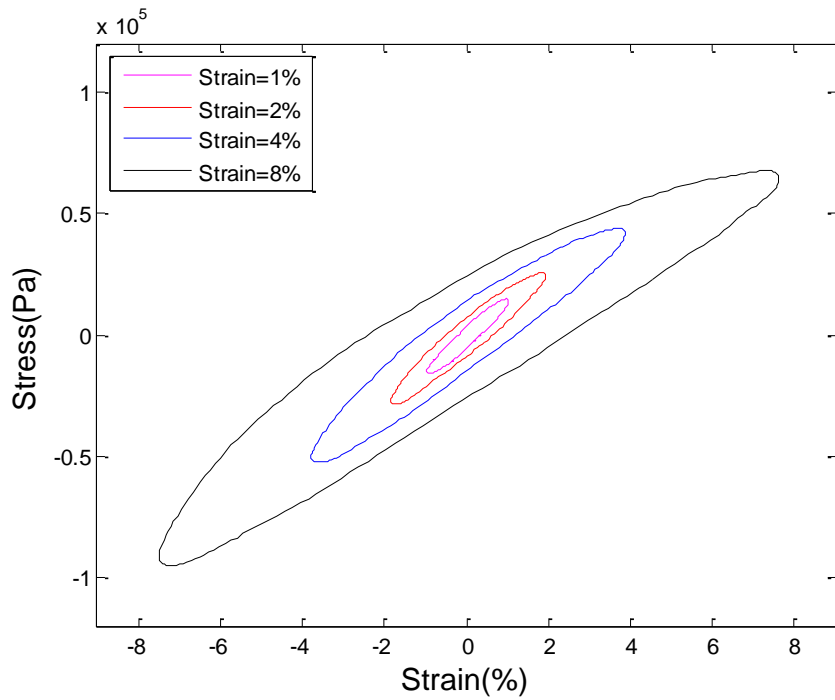
## ۹-۲ ترکیب های منحنی های تنش-کرنش حاصل از تست کشش-فشار MRE



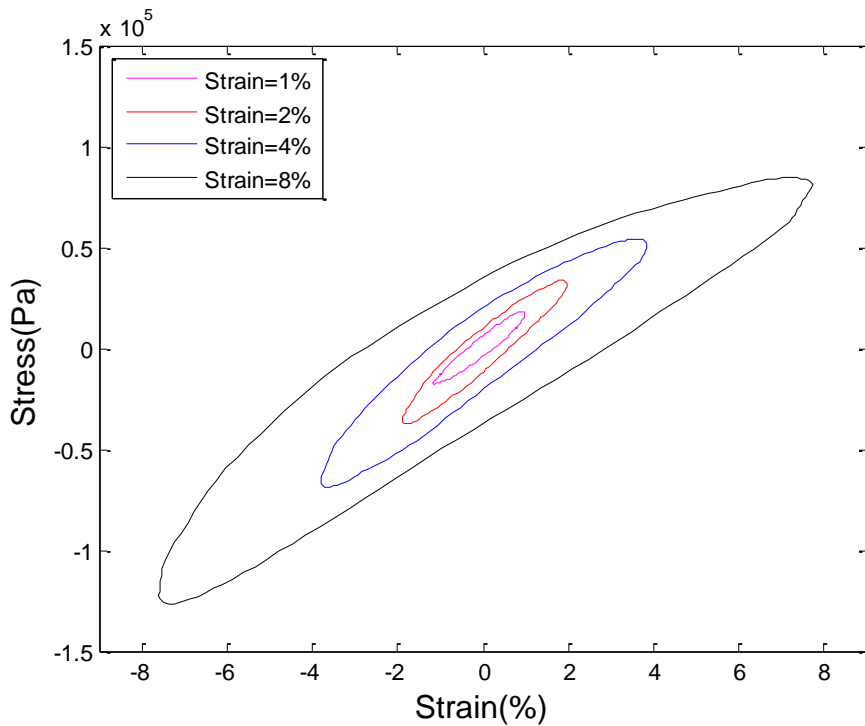
شکل ۳۲-۲ نمودارهای تنش-کرنش در چگالی شار ۰ میلی تسلا و فرکانس ۳ هرتز در دامنه کرنش های مختلف



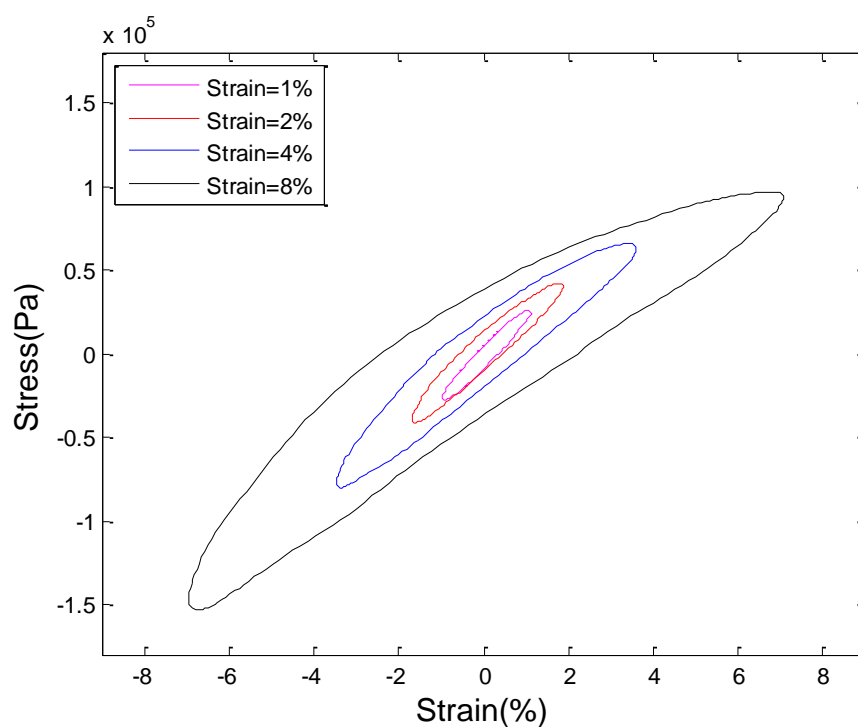
شکل ۳۳-۲ نمودارهای تنش-کرنش در چگالی شار ۱۰۰ میلی تسلا و فرکانس ۱ هرتز در دامنه کرنش های مختلف



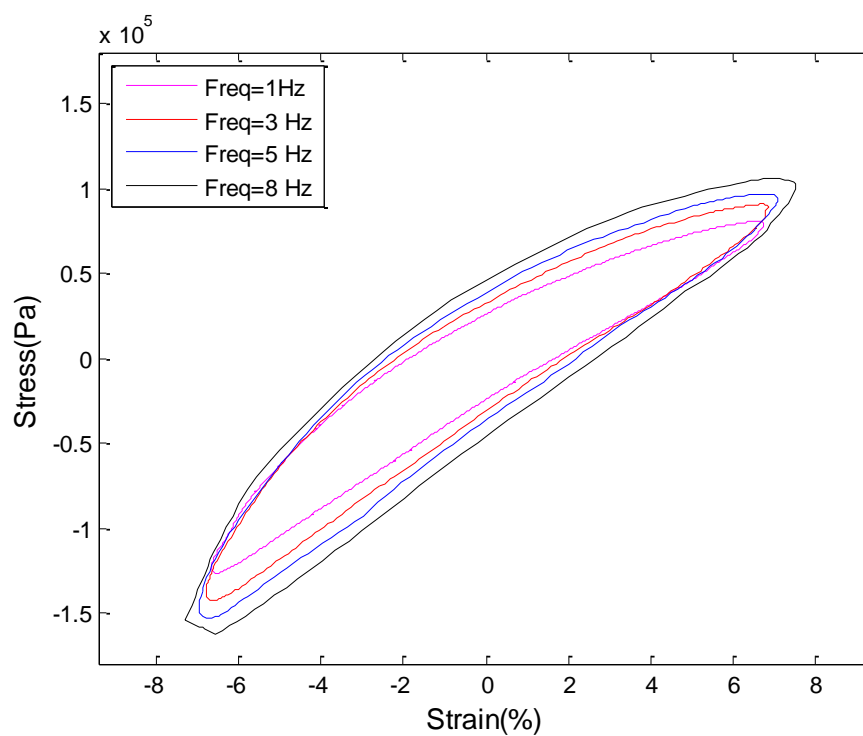
شکل ۲-۳۴ نمودارهای تنش-کرنش در چگالی شار ۱۷۰ میلی تسلا و فرکانس ۵ هرتز در دامنه کرنش‌های مختلف



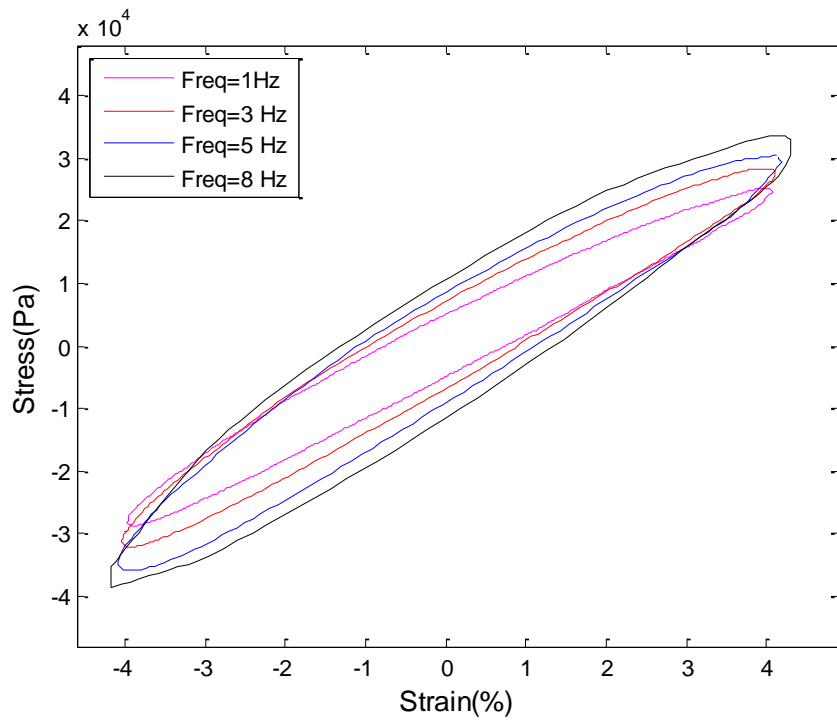
شکل ۲-۳۵ نمودارهای تنش-کرنش در چگالی شار ۲۲۰ میلی تسلا و فرکانس ۸ هرتز در دامنه کرنش‌های مختلف



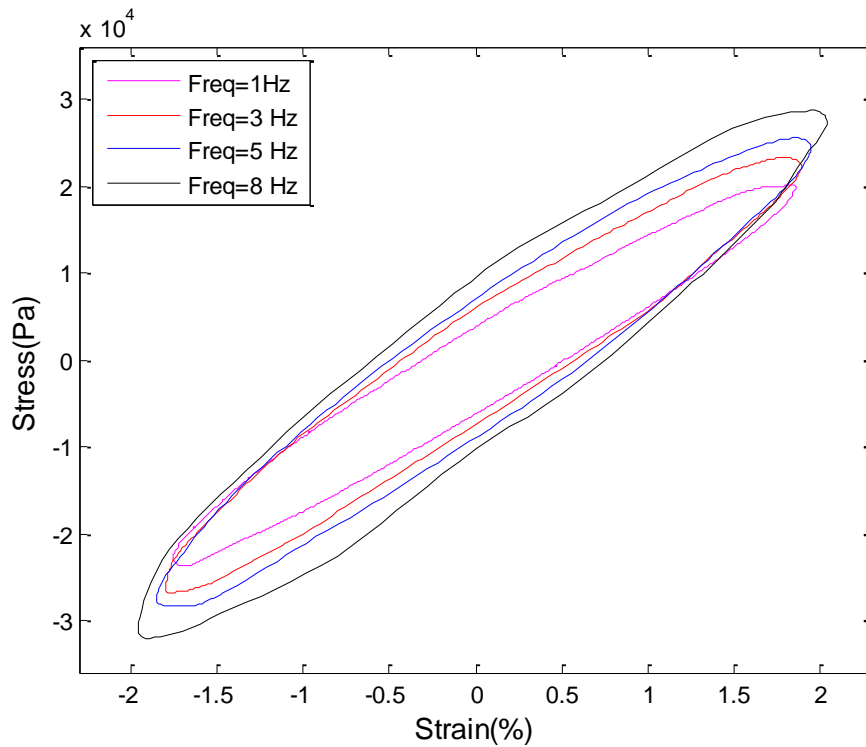
شکل ۲-۳۶ نمودارهای تنش-کرنش در چگالی شار ۲۶۰ میلی‌تسلا و فرکانس ۵ هرتز در دامنه کرنش‌های مختلف



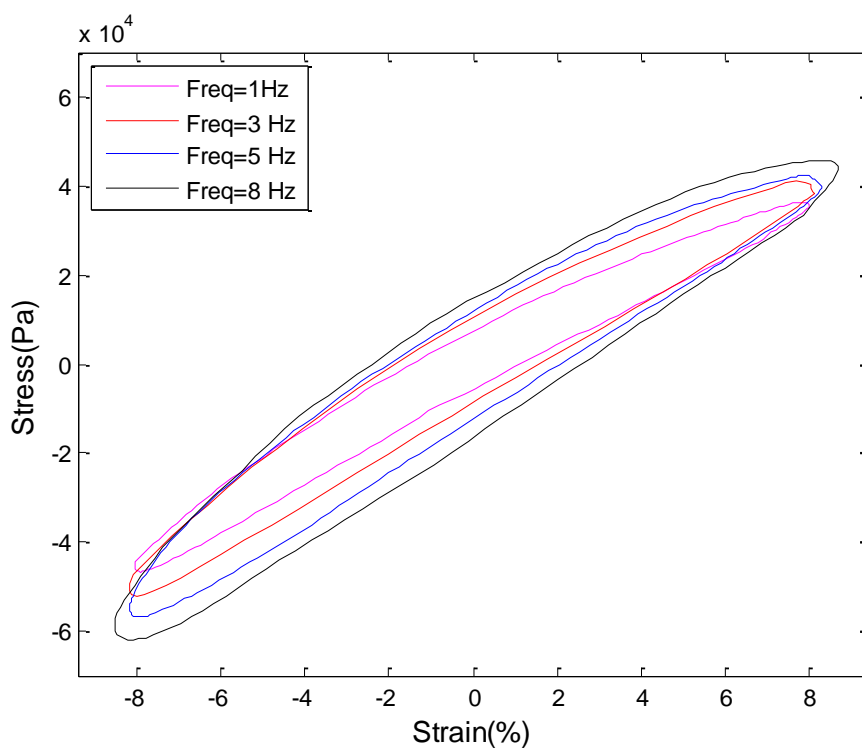
شکل ۲-۳۷ منحنی‌های تنش-کرنش نمونه در  $a=8\%$  و  $B=260\text{ mT}$  در فرکانس‌های مختلف



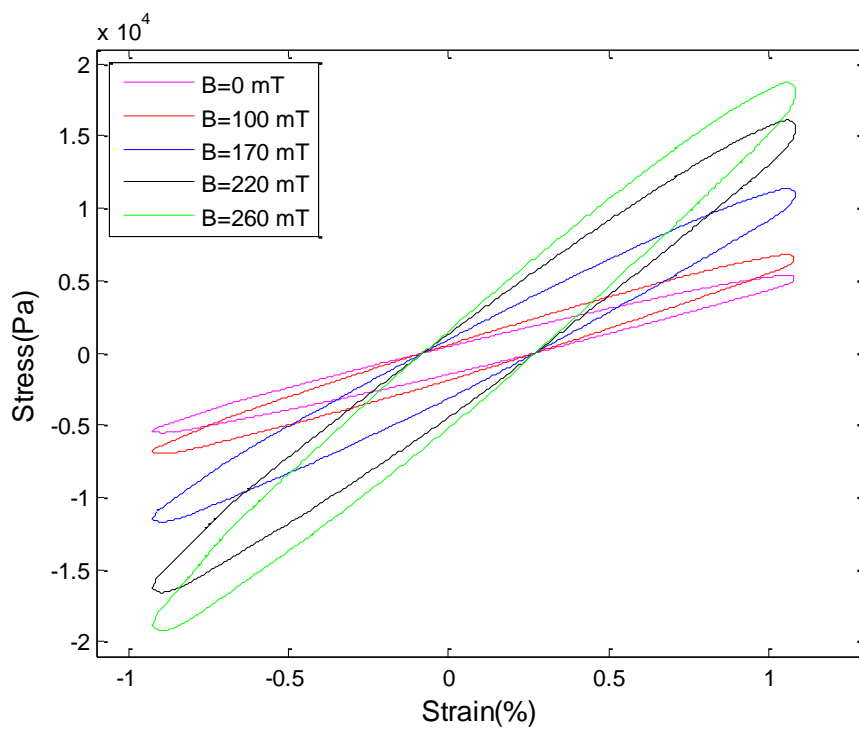
شکل ۲-۳۸ منحنی‌های تنش-کرنش نمونه در  $a=4\%$  و  $B=100\text{ mT}$  در فرکانس‌های مختلف



شکل ۲-۳۹ منحنی‌های تنش-کرنش نمونه در  $a=2\%$  و  $B=170\text{ mT}$  در فرکانس‌های مختلف

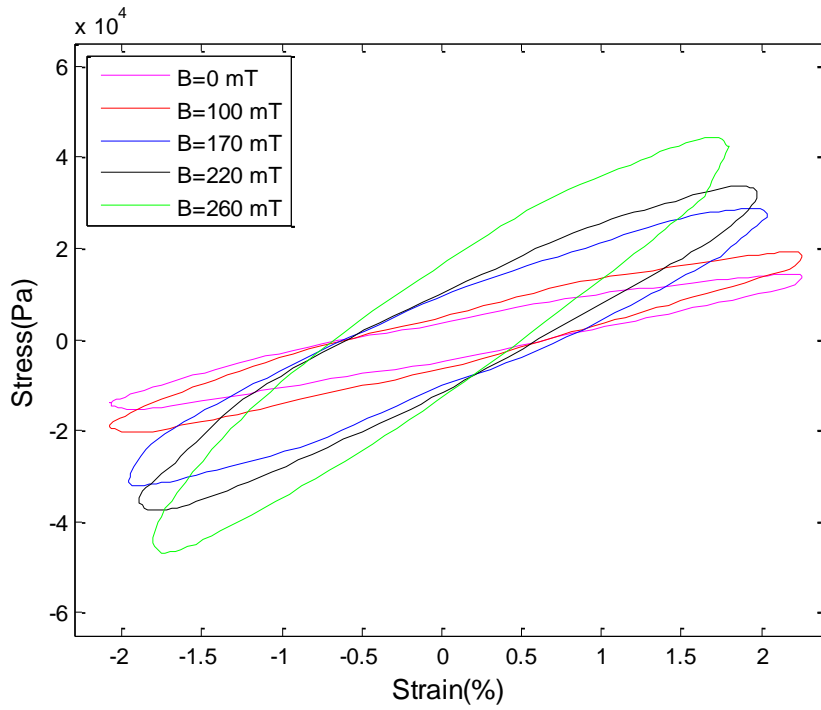


شکل ۴۰-۲ منحنی‌های تنش-کرنش نمونه در  $a=8\%$  و  $B=0\text{ mT}$  در فرکانس‌های مختلف

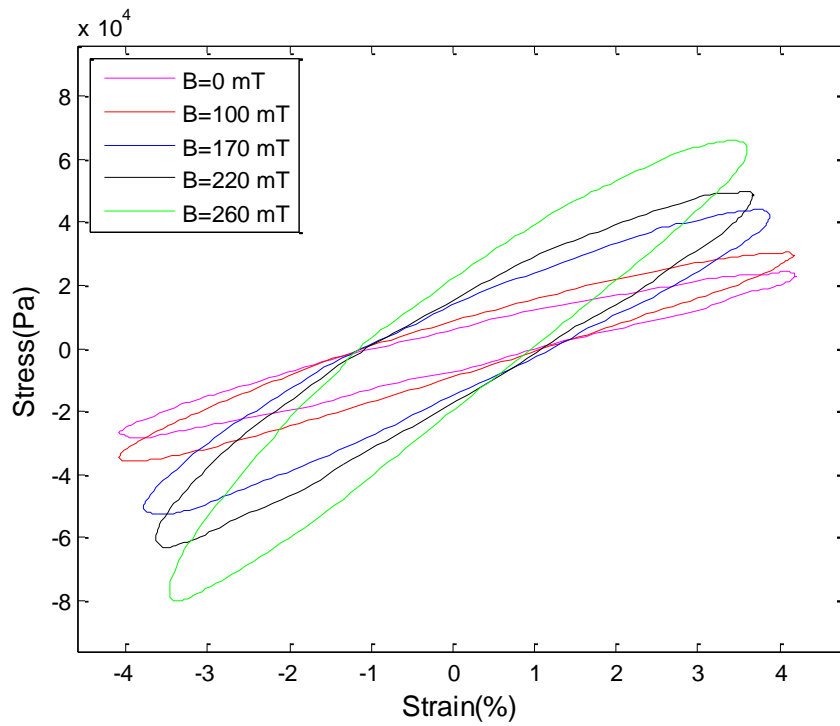


شکل ۴۱-۲ نمودارهای تنش-کرنش در دامنه کرنش ۱ درصد در فرکانس ۱ هرتز و در چگالی شارهای مختلف

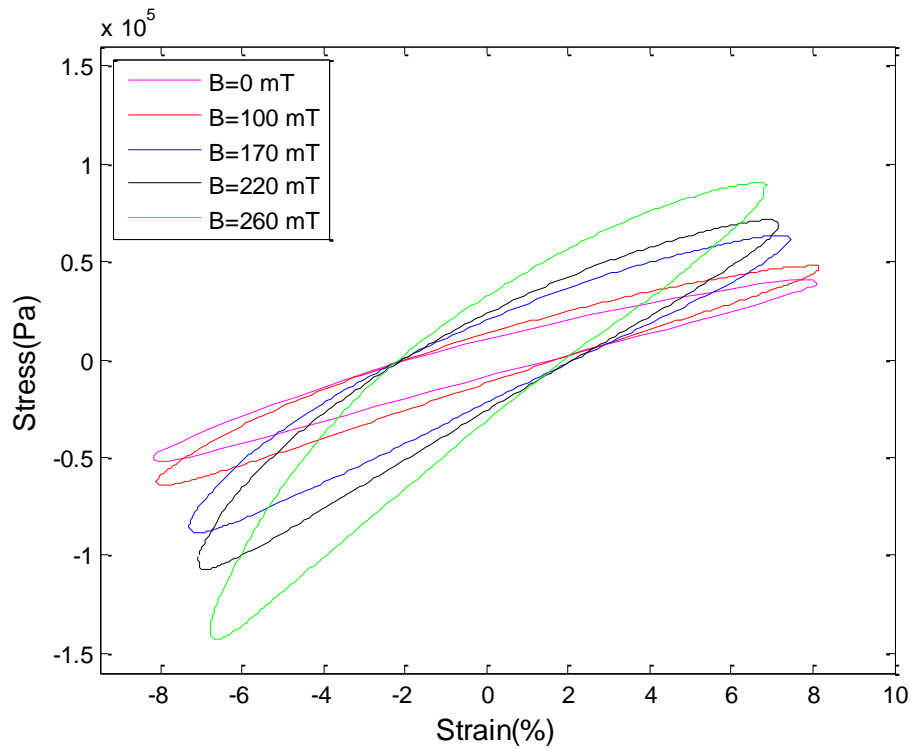




شکل ۲-۴ نمودارهای تنش-کرنش در دامنه کرنش ۲ درصد در فرکانس ۸ هرتز و در چگالی شارهای مختلف



شکل ۲-۴۳ نمودارهای تنش-کرنش در دامنه کرنش ۴ درصد در فرکانس ۵ هرتز و در چگالی شارهای مختلف



شکل ۲-۴۴ نمودارهای تنش-کرنش در دامنه کرنش ۸ درصد در فرکانس ۳ هرتز و در چگالی شارهای مختلف

### فصل ۳ (مدل‌سازی رفتار MRE تحت بارگذاری کششی-فشاری)

### ۱-۳ پیشگفتار

در این فصل که به مدل‌سازی رفتار MRE و ارائه‌ی مدلی کارآمد برای توصیف رفتار این ماده‌ی ویسکوالاستیک تحت بارگذاری کششی- فشاری اختصاص دارد، ابتدا مقدمات و شرحی از مدل‌های پایه‌ی ویسکوالاستیک بیان می‌شود. سپس به شرح نحوه‌ی انتخاب مدل اولیه و ساده‌سازی آن تا رسیدن به مدل نهایی پیشنهادی خواهیم پرداخت. در ادامه، مدل پیشنهادی برای توجیه و پیش‌بینی رفتار MRE معرفی می‌شود سپس روند یافتن مقادیر ثابت‌های مجهول مدل شرح داده شده است و جداول ثابت‌های بدست آمده نیز آورده شده‌اند. در پایان این فصل به مقایسه و ارزیابی نتایج حاصل از مدل، با نتایج آزمایشگاهی خواهیم پرداخت.

### ۲-۳ مقدمات

یک الاستومر MR در واقع نوعی ماده ویسکوالاستیک است که دارای خواص وابسته به میدان از قبیل سختی و دمپینگ می‌باشد. مدل کردن رفتار MRE گامی ضروری در توسعه‌ی کاربردهای مهندسی آن خواهد بود.

علی‌رغم انجام تحقیقاتی در گذشته روی رفتار ماده، مدل کردن رفتار هیستریزس آن نیازمند توجه بیشتری می‌باشد چراکه تاکنون تحقیقات محدودی در حالت‌های خاصی در این زمینه صورت گرفته است که پایه و اساس بیشتر این مطالعات، تحقیقات پیشین روی MRF ها بوده است که نمی‌تواند نتایج کاملاً صحیحی برای MRE ها نیز دربرداشته باشد. از طرفی تقریباً تمام پژوهش‌های پیشین صورت گرفته در زمینه‌ی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال، از نتایج تست برش و تئوری ویسکوزیته‌ی برشی برای بررسی و مدل‌سازی رفتار MRE استفاده کرده‌اند.

در این پژوهش با توجه به آنکه بار اعمالی به MRE از نوع نرمال و فشاری-کششی است پیشنهاد می‌شود از تئوری ویسکوزیته‌ی کشسانی<sup>۱</sup> یا طولی<sup>۲</sup> برای بررسی و مدل‌سازی رفتار MRE تحت بارگذاری کششی-فشاری استفاده شود. از ویسکوزیته‌ی کشسانی به عنوان ثابت ویسکوزیته تحت بارهای نرمال یا طولی استفاده می‌شود. این پارامتر اغلب در بررسی پلیمرها و جریان‌های ویسکوالاستیک مختلف تحت بارهای کششی در کاربردهای گوناگون صنعتی بکار گرفته می‌شود و می‌توان آن را با استفاده از رئومتر و به صورت نسبت تنش نرمال به نرخ کرنش ایجاد شده در نمونه اندازه گرفت.

بارهای کشسانی در حالت کلی به سه صورت ممکن است وارد شوند:

- حالت تک‌محوری که بار کشسانی فقط در یک جهت وارد می‌شود.
- حالت صفحه‌ای که بار کشسانی در دو جهت یک صفحه وارد می‌شود.
- حالت شعاعی که بار کشسانی در جهت شعاع نمونه‌ی استوانه‌ای وارد می‌شود.

هر کدام از این سه حالت روابط خاص خود را در محاسبات ویسکوالاستیک و ویسکوزیته‌ی کشسانی دارند. در این پژوهش با توجه به نوع بارگذاری حالت تک‌محوری یا uniaxial مد نظر خواهد بود.

برای سیالات، ویسکوزیته‌ی کشسانی تک‌محوری حدوداً ۳ برابر ویسکوزیته‌ی برشی است ( $\eta_E = 3\mu$ ) که این رابطه تحت عنوان قانون تروتن<sup>۳</sup> شناخته می‌شود. همچنین نسبت  $\eta_E$  به  $\mu$  را نسبت تروتن نامگذاری کرده‌اند. واضح است که نسبت تروتن در سیالات نیوتونی حدوداً برابر ۳ می‌باشد. این نسبت در سیالات غیر نیوتونی عموماً بیش از ۳ و در برخی موارد ده‌ها برابر این مقدار خواهد بود. ویسکوزیته‌ی کشسانی به صورت مقاومت سیال به هر جریان کشسانی نیز شناخته می‌شود [۶۰-۶۳].

در این پژوهش در کلیه‌ی موارد، منظور از ویسکوزیته با نماد  $\eta$ ، همان ویسکوزیته‌ی کشسانی یا  $\eta_E$  می‌باشد که به اختصار به صورت ساده بیان شده‌است. همچنین کمیت‌های  $\sigma$ ،  $\epsilon$ ،  $E$ ،  $\omega$ ،  $t$  و  $\delta$  به ترتیب معرف تنش، کرنش، مدول الاستیسیته، زمان و اختلاف فاز بین تنش و کرنش خواهند بود.

---

1. Extentional Viscosity  
2. Elongational Viscosity  
3. Trouton Law

برای یک جامد الاستیک ایده‌آل (که طبق قانون هوک رفتار می‌کند) که تحت بار نوسانی نرمال قرار

می‌گیرد روابط زیر صدق می‌کند:

$$\sigma = E \varepsilon$$

$$\sigma_0 \cos \omega t = E \varepsilon \rightarrow \varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} \cos \omega t \quad (1-3)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cos \omega t$$

همچنین یک سیال نیوتونی که تحت بار نوسانی نرمال قرار داشته باشد از روابط زیر تبعیت می‌کند:

$$\sigma = \eta \dot{\varepsilon}$$

$$\sigma_0 \cos \omega t = \eta \dot{\varepsilon}$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma_0}{\eta \omega} \sin \omega t \quad (2-3)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{\eta \omega} \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

دیده می‌شود که اختلاف فازی برابر  $\pi/2$  بین کرنش در سیال نیوتونی و جامد الاستیک وجود دارد.

بنابراین در مواد ویسکوالاستیک که به طور کلی خواص و رفتارهایی بین جامد الاستیک و سیال نیوتونی

دارند، اختلاف فازی بین 0 تا  $\pi/2$  وجود دارد و می‌توان روابط تنش و کرنش در تست نوسان نرمال یا

همان بارگذاری هارمونیک کششی-فشاری را با معرفی مدول مختلط یا مرکب با نماد  $E^*$  و همچنین

تنش مختلط و کرنش مختلط به ترتیب با نمادهای  $\sigma^*$  و  $\varepsilon^*$ ، به صورت زیر نوشت:

$$\varepsilon_{(t)} = \varepsilon_0 \cos(\omega t - \delta) \quad , \quad 0 < \delta < \frac{\pi}{2}$$

$$\sigma = \sigma_0 \cos \omega t = \operatorname{Re} \{ \sigma_0 e^{i \omega t} \} = \operatorname{Re} (\sigma^*)$$

$$\varepsilon_{(t)} = \varepsilon_0 \cos(\omega t - \delta) = \operatorname{Re} \{ \varepsilon_0 e^{i(\omega t - \delta)} \} = \operatorname{Re} (\varepsilon^*) \quad (3-3)$$

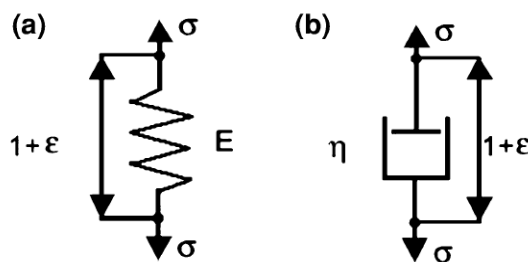
$$E^* = \frac{\sigma^*}{\varepsilon^*} \quad , \quad \eta^* = \frac{\sigma^*}{\dot{\varepsilon}^*}$$

$$E^* = E' + iE'' \quad , \quad E^* = \frac{\sigma^*}{\dot{\epsilon}^*} = \frac{\sigma_0 e^{i\omega t}}{\dot{\epsilon}_0 e^{i(\omega t - \delta)}} = \frac{\sigma_0}{\dot{\epsilon}_0} e^{i\delta} \quad (4-3)$$

$$\begin{cases} E' = \frac{\sigma_0}{\dot{\epsilon}_0} \cos \delta \\ E'' = \frac{\sigma_0}{\dot{\epsilon}_0} \sin \delta \end{cases} \rightarrow \tan \delta = \frac{E''}{E'} \quad (5-3)$$

در روابط (۴-۳) و (۵-۳)، بخش حقیقی مدول مختلط که با  $E'$  مشخص شده است مدول ذخیره ای نام دارد و مربوط به بخش هوکی رفتار ماده خواهد بود. بخش موهومی مدول مختلط نیز که دربردارنده ی مدول اتلافی یا  $E''$  است، مربوط به بخش ویسکوز رفتار ماده می باشد.

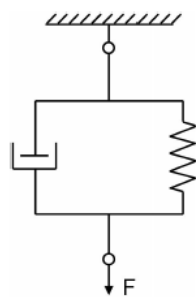
رفتار مواد ویسکوالاستیک توسط مدل های رئولوژیکی مختلفی توضیح داده می شود که در همه ی آنها از المان فنری (که دارای خاصیت الاستیک کامل خطی و بدون جرم است و از قانون هوک پیروی می کند و تنش در آن مستقیماً از طریق مدول الاستیسیته با مقدار کرنش در ارتباط است) و همچنین المان استهلاکی یا ویسکوز (که از قانون نیوتون پیروی می کند و در آن تنش از طریق ویسکوزیته با نرخ کرنش مرتبط است) استفاده می شود. در شکل ۱-۳ نمادهای این دو المان دیده می شود.



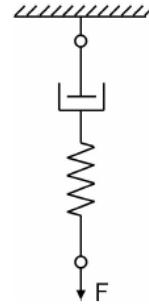
شکل ۱-۳ نماد المان های فنری و استهلاکی

با ترکیب این دو المان اصلی و با اعمال تغییراتی مدل های مختلفی برای توجیه رفتار ویسکوالاستیک ارائه شده است که دو مورد از ساده ترین این مدل ها به نام دو دانشمند برجسته در این حوزه، کلونین<sup>۱</sup> و ماکسول<sup>۲</sup> نامگذاری شده اند.

1. Kelvin  
2. Maxwell



(ب)



(الف)

شکل ۲-۳ نماد مدل‌های پایه‌ی ویسکوالاستیک: الف) مدل ماکسول ب) مدل کلوین

همانطور که در قسمت الف شکل ۲-۳ دیده می‌شود، مدل ماکسول از یک المان فنری و یک المان

استهلاکی تشکیل شده که بصورت سری با هم بسته شده‌اند.

روابط اولیه‌ی مدل ماکسول از این قرار است:

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

$$\sigma_{\text{total}} = \sigma_{\text{spring}} = \sigma_{\text{dashpot}} \quad (۶-۳)$$

$$\sigma_{\text{dashpot}} = \eta \dot{\varepsilon}_{\text{dashpot}}^{(1)}$$

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

در قسمت ب از شکل ۲-۳ مدل کلوین دیده می‌شود که از یک المان فنری و یک المان استهلاکی

است که به صورت سری بسته شده‌اند. روابط اولیه‌ی مدل کلوین بدین صورت می‌باشد:

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

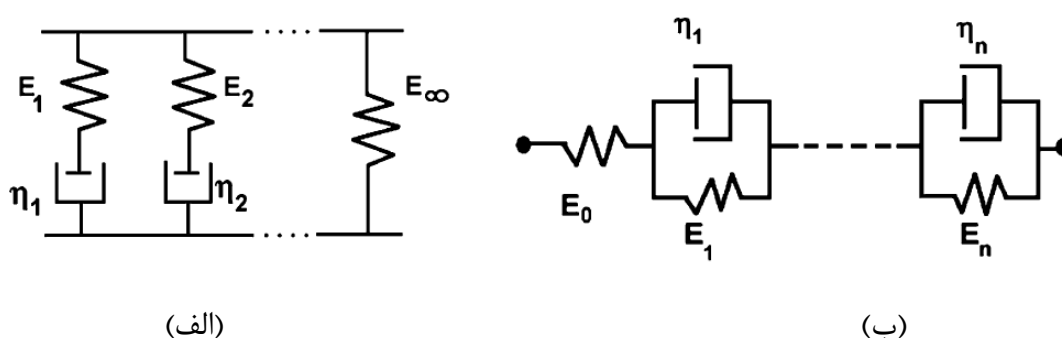
$$\sigma_{\text{total}} = \sigma_{\text{spring}} + \sigma_{\text{dashpot}}$$

$$\sigma_{\text{dashpot}} = \eta \dot{\varepsilon}_{\text{dashpot}}^{(1)} \quad (۷-۳)$$

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



از ترکیب مدل های ماکسول و کلونین و از بهم بستن  $n$  شاخه‌ی ماکسول به صورت موازی باهم و یا  $n$  شاخه‌ی کلونین بصورت سری به هم همراه با یک شاخه‌ی شامل تنها یک المان فنری، نمونه‌هایی از مدل های تعمیم یافته‌ی ماکسول و کلونین به صورتی که در شکل ۳-۳ دیده می‌شوند، تشکیل خواهند شد. در این پژوهش نیز تلاش شده است تا با ترکیبی از مدل های پایه‌ی ویسکوالاستیک به مدل پیشنهادی مناسب برسیم تا رفتار MRE را در بارگذاری کششی-فشاری، به درستی توصیف کند.



شکل ۳-۳ نمونه‌هایی از مدل های تعمیم یافته‌ی ماکسول و کلونین

### ۳-۳ نحوه‌ی انتخاب مدل پیشنهادی اولیه و روند رسیدن به مدل نهایی

به منظور ارائه‌ی یک مدل ویسکوالاستیک مناسب که بتواند عکس‌العمل و رفتار الاستومرهای مگنتورئولوژیکیال تحت بارگذاری کششی-فشاری را توصیف و توجیه کند، از مجموعه‌ای از اطلاعات استفاده کردیم. از جمله با بررسی تحقیقات گذشته و بررسی نقاط ضعف و قوت نتایج هر کدام از پژوهش‌های پیشین در باب الاستومرهای مگنتورئولوژیکیال، که عمدتاً رفتار این مواد را تحت بارهای برشی بررسی کرده‌اند و بر اساس همین آزمایش‌ها مدل هایی ارائه داده‌اند، و همچنین مطالعه‌ی ماهیت و ساختار MRE و رفتارهایی که این ماده در شرایط مختلف تست های کشش-فشار از خود نشان داد، به این نتیجه رسیدیم که با تلفیق چند المان ماکسول با المان‌هایی صرفاً فنری که همگی به صورت موازی با هم بسته شده‌اند می‌توان به مدلی مناسب برای این کاربرد دست یافت.

### ۳-۳-۱ روابط و ضوابط شاخه های ماکسول

روابط اولیه ی مدل ماکسول یا هر شاخه ی ماکسول در فرمول های (۳-۶) مطرح گردید. حال به سایر روابط و ضوابط هر شاخه ی ماکسول می پردازیم. با توجه به روابط (۳-۶) می توان رابطه ی (۳-۸) و در ادامه و با مشتق گیری نسبت به زمان رابطه ی (۳-۹) و همچنین رابطه ی (۳-۱۰) را نوشت:

$$\varepsilon_{\text{spr}} = \sigma_{\text{spr}} / E \quad (۳-۸)$$

$$\varepsilon_{\text{spr}}^{(1)} = \sigma_{\text{spr}}^{(1)} / E \quad (۳-۹)$$

$$\varepsilon_{\text{dash}}^{(1)} = \sigma_{\text{dash}} / \eta \quad (۳-۱۰)$$

اگر با توجه به روابط (۳-۶) ، روابط (۳-۹) و (۳-۱۰) را با هم جمع کنیم و در  $E\eta$  ضرب کنیم:

$$\sigma + \frac{\eta}{E} \sigma^{(1)} = \eta \varepsilon^{(1)} \quad (۳-۱۱)$$

همچنین اگر پارامتر  $\lambda$  را به صورت  $\eta/E$  تعریف کنیم:

$$\sigma + \lambda \dot{\sigma} = \eta \dot{\varepsilon} \quad (۳-۱۲)$$

معادله ی (۳-۱۲) ، معادله ی ساختاری هر شاخه ی ماکسول می باشد.

حال ویژگی های مدل ماکسول تحت تست نوسان را بررسی می کنیم. اگر به یک ماده ی ویسکوالاستیک که از مدل ماکسول پیروی می کند تنش نوسانی به صورت:

$$\sigma = \sigma_0 \cos(\omega t) \quad (۳-۱۳)$$

اعمال شود، با قرار دادن رابطه ی (۳-۱۳) در رابطه ی (۳-۱۲) خواهیم داشت:

$$\sigma_0 \cos \omega t - \lambda \sigma_0 \omega \sin \omega t = \eta \dot{\varepsilon} \quad \longrightarrow \quad \sin \omega t - \frac{1}{\lambda \omega} \cos \omega t = \frac{-\eta}{\lambda \sigma_0 \omega} \dot{\varepsilon} \quad (۳-۱۴)$$

با انجام تغییر متغیر  $\tan \theta = \frac{1}{\lambda \omega}$ :

$$\sin \omega t - \tan \theta \cos \omega t = \frac{-\eta}{\lambda \sigma_0 \omega} \dot{\varepsilon} \quad \longrightarrow \quad \sin \omega t - \frac{\sin \theta}{\cos \theta} \cos \omega t = \frac{-\eta}{\lambda \sigma_0 \omega} \dot{\varepsilon} \quad (۳-۱۵)$$

$$\sin \omega t \cos \theta - \sin \theta \cos \omega t = \frac{-\eta \cos \theta}{\lambda \sigma_0 \omega} \dot{\varepsilon} \longrightarrow \sin(\omega t - \theta) = \frac{-\eta \cos \theta}{\lambda \sigma_0 \omega} \dot{\varepsilon} \quad (۱۶-۳)$$

$$\longrightarrow \frac{-1}{\omega} \cos(\omega t - \theta) = \frac{-\eta \cos \theta}{\lambda \sigma_0 \omega} \varepsilon \quad (۱۷-۳)$$

در نتیجه خواهیم داشت:

$$\varepsilon = \frac{\lambda \sigma_0}{\eta \cos \theta} \cos(\omega t - \theta) \quad (۱۸-۳)$$

بنابراین می توان این گونه استنتاج کرد که:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cos(\omega t - \theta) \quad (۱۹-۳)$$

که در آن:

$$\tan \theta = \frac{1}{\lambda \omega}, \quad \varepsilon_0 = \frac{\lambda \sigma_0}{\eta \cos \theta} \quad (۲۰-۳)$$

خواهد بود و  $\theta$  معرف اختلاف فاز بین تنش و کرنش می باشد. رابطه ی (۱۹-۳) مقدار کرنش را به صورت

تابعی هارمونیک بیان می کند که در آن  $\omega$ ، سرعت و برحسب فرکانس ورودی برابر  $2\pi f$  می باشد.

همچنین با توجه به روابط (۲۰-۳) می توان نوشت:

$$\tan \theta = \frac{1}{\lambda \omega} \longrightarrow \begin{cases} \cos \theta = \frac{\lambda \omega}{\sqrt{1 + \lambda^2 \omega^2}} \\ \sin \theta = \frac{1}{\sqrt{1 + \lambda^2 \omega^2}} \end{cases} \quad (۲۱-۳)$$

از طرف دیگر داریم:

$$E^* = E' + iE'' \quad (۲۲-۳)$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon_0 \exp(i(\omega t - \theta)) \quad (۲۳-۳)$$

$$\sigma^* = \sigma_0 \exp(i\omega t) = E^* \varepsilon^* \quad (۲۴-۳)$$

با جاگذاری روابط (۲۳-۳) و (۲۴-۳) در رابطه ی (۲۲-۳) داریم:

$$\sigma_0 e^{i\omega t} = E^* \varepsilon_0 e^{i(\omega t - \theta)} \rightarrow \sigma_0 = \frac{E^* \varepsilon_0}{e^{i\theta}} \longrightarrow E^* = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} e^{i\theta}$$

$$\longrightarrow E' + iE'' = \frac{\sigma_0}{\left(\frac{\lambda \sigma_0}{\eta \cos \theta}\right)} (\cos \theta + i \sin \theta) \rightarrow \begin{cases} E' = \frac{\eta}{\lambda} \cos^2 \theta \\ E'' = \frac{\eta}{\lambda} \cos \theta \sin \theta \end{cases} \quad (25-3)$$

در نتیجه به روابط زیر در مورد مقادیر مدول ذخیره‌ای و مدول اتلافی هر شاخه‌ی ماکسول خواهیم رسید:

$$\begin{cases} E' = \frac{\eta \lambda \omega^2}{1 + (\lambda \omega)^2} \\ E'' = \frac{\eta \omega}{1 + (\lambda \omega)^2} \end{cases} \quad (26-3)$$

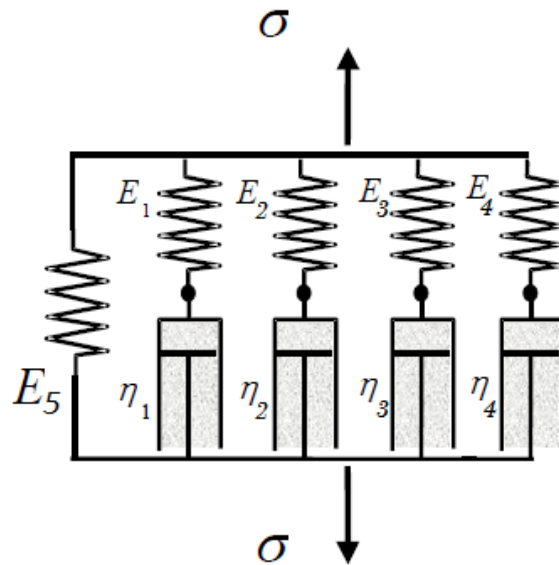
مدل مورد نظر ما، از کرنش نمونه به عنوان ورودی استفاده می‌کند و در شرایطی که E و η مورد نیاز خواهند بود تنش را محاسبه می‌کند هرچند عکس این روند نیز قابل انجام است.

با استفاده از روابط (26-3) و با توجه به این نکته که اگر چند شاخه‌ی ماکسول به طور موازی به هم بسته شوند تا تشکیل یک مدل جدید دهند، مقدار مدول ذخیره‌ای کل و همچنین مقدار مدول اتلافی کل مدل جدید را می‌توان از جمع مقادیر این دو مدول در تک تک شاخه‌ها بدست آورد، قادر خواهیم بود مقادیر E' و E'' برای هر شاخه را برحسب پارامترهایی که لازم می‌دانیم تعریف کنیم و با جمع‌شان به مقدار E' و E'' برای کل مدل دست پیدا کنیم. بنابراین برای مدلی شامل N شاخه‌ی ماکسول که همراه با یک شاخه‌ی فنری (E<sub>i</sub>) به صورت موازی به هم بسته شده‌اند خواهیم داشت:

$$\begin{cases} E'_{total} = \sum_{i=1}^N \frac{\eta_i \lambda_i \omega_i^2}{1 + (\lambda_i \omega_i)^2} + E_i \\ E''_{total} = \sum_{i=1}^N \frac{\eta_i \omega_i}{1 + (\lambda_i \omega_i)^2} \end{cases} \quad (27-3)$$

### ۲-۳-۳ مدل پیشنهادی اولیه

با توجه به فیزیک مسئله و رفتارهای پیچیده‌ی ماده در برخی موارد، مدل اولیه بصورت ترکیب موازی چهار المان ماکسول با یک المان هوکی یا فنری ارائه گردید. نماد شماتیک این مدل را در شکل ۴-۳ می‌توان دید.



شکل ۴-۳ مدل پیشنهادی پنج شاخه‌ای اولیه

رابطه‌ی اصلی و ساختاری این مدل در زیر آورده شده است:

$$\sigma + \alpha_1 \sigma^{(1)} + \alpha_2 \sigma^{(2)} + \alpha_3 \sigma^{(3)} + \alpha_4 \sigma^{(4)} = \beta_1 \varepsilon^{(1)} + \beta_2 \varepsilon^{(2)} + \beta_3 \varepsilon^{(3)} + \beta_4 \varepsilon^{(4)} + E_5 \quad (28-3)$$

که در این رابطه  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  ثابت‌های مدل‌اند که هرکدام برحسب  $\lambda$  ها و  $\eta$  ها قابل محاسبه‌اند.

با توجه به روابط (۲۷-۳) که به کمک آن‌ها مقدار تنش و کرنش‌های متناظر با هم و به تبع آن ماهیت رفتار ماده تحت شرایط مختلف معین می‌شود و این‌که نتایج تست کشش-فشار نشان داده است رفتارهای مختلف MRE تابع شرایط فرکانس، دامنه‌ی کرنش و چگالی شار مغناطیسی اعمالی به نمونه

خواهند بود، مقادیر  $\eta_i$  و  $\lambda_i$  برای هر شاخه‌ی ماکسول و مقدار  $E_i$  مربوط به شاخه‌ی فنری، به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\eta_i = \nu_i, \quad \lambda_i = \frac{\nu_i}{p_i} \varepsilon_0^{-m_i}, \quad E_i = p_i \varepsilon_0^{-m_i} \quad (29-3)$$

بنابراین در هر مدلی که از تلفیق موازی چند شاخه‌ی ماکسول با چند شاخه‌ی فنری تشکیل شود، و مقادیر  $\eta$  و  $\lambda$  و  $E$  طبق روابط (29-3) تعریف شوند، به ازای هر شاخه‌ی ماکسول 3 ثابت و به ازای هر شاخه‌ی فنری 2 ثابت متمایز در مدل وجود خواهد داشت. در نتیجه این مدل پیشنهادی که در شکل 3-4 ارائه شده است، شامل 14 ثابت متمایز خواهد بود که باید در حالت‌های مختلف محاسبه شوند تا در نهایت مدل پیشنهادی بیش‌ترین تطابق ممکن را بر نتایج آزمایشگاهی حاصل از تست کشش-فشار نمونه‌ی MRE داشته باشد.

### 3-3-3 ساده سازی مدل اولیه و رسیدن به مدل نهایی

همانطور که در بخش قبل اشاره شد، مدل پیشنهادی اولیه‌ی پنج شاخه‌ای، شامل 14 ثابت متمایز خواهد بود. بدست آوردن ثابت‌های مدل، نیازمند محاسبه‌ی پارامتری تنش حاصل از مدل برحسب ثابت‌های مجهول در تمامی 80 حالت تست و تشکیل تابع مجموع مربعات اختلاف بین تنش حاصل از مدل و تنش حاصل از نتایج آزمایشگاهی در تمامی حالات، به صورت تابعی از پارامترهای مجهول مدل، به عنوان تابع خطا، و مینیمم‌سازی تابع خطا با استفاده از نرم افزار MATLAB، خواهد بود (که این روند در بخش‌های بعدی تشریح خواهد شد) که هر حالت خود شامل تعداد زیادی نقطه در زمان‌های مختلف است که منحنی هیستریزیس آن حالت خاص را تشکیل می‌دهند اما مسئله‌ی اصلی آن است که انجام این روند هزینه‌ی محاسباتی قابل توجهی خواهد داشت، بنابراین منطقی‌ست حداقل امکان مدل مورد نظر را ساده‌تر کنیم و هزینه‌ی محاسباتی و حجم مدل را کاهش دهیم. در این پژوهش ابتدا روند

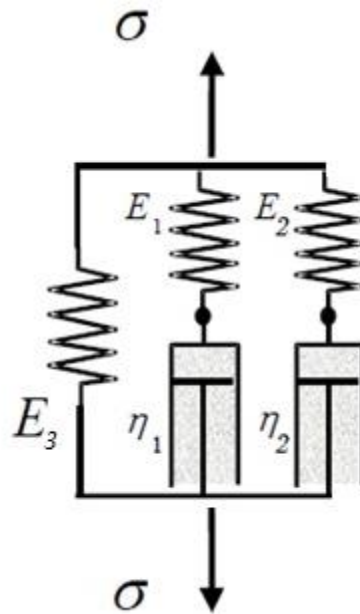
تعریف و مینیمم‌سازی تابع خطا با استفاده از نرم افزار MATLAB را، برای مدل اولیه‌ی پنج شاخه‌ای انجام دادیم و به نتایج کاملاً قابل قبولی دست یافتیم.

سپس در تلاش برای ساده‌سازی مدل اولیه، المان‌هایی را تک به تک از مدل حذف کرده و تغییر ایجاد شده در نتایج مدل را بررسی کردیم. با مقایسه‌ی مقدار تطابق نتایج مدل اولیه با نتایج مدل‌هایی که از حذف المان‌هایی از مدل اولیه بدست آمد، متوجه شدیم که مدلی سه‌شاخه‌ای که از حذف دو شاخه‌ی ماکسول از مدل پیشنهادی پنج شاخه‌ای بدست آوردیم، مدلی مناسب برای توجیه رفتار MRE در بارگذاری کششی- فشاری خواهد بود. چراکه با اعمال این تغییر، تعداد ثابت‌ها یا همان پارامترهای مجهول مدل که باید محاسبه شوند از ۱۴ به ۸ خواهد رسید که حجم مدل و محاسبات مربوط به آن را به طور قابل توجهی کاهش خواهد داد. از طرف دیگر، با حذف دو شاخه‌ی ماکسول از مدل اولیه، دقت مدل که همان میزان تطابق نتایج حاصل از مدل با نتایج آزمایشگاهی‌ست، کاهش چشمگیری نمی‌یابد. بطور خلاصه می‌توان گفت که تغییر مدل پیشنهادی از مدل پنج‌شاخه‌ای اولیه به مدل سه‌شاخه‌ای از لحاظ هزینه محاسباتی و دقت مدل کاملاً مقرون به صرفه است.

### ۳-۴ معرفی مدل پیشنهادی نهایی

پس از طی مراحل‌ی که در بخش قبل شرح داده شد به مدلی دست یافتیم که می‌تواند رفتار الاستومرهای مگنتورئولوژیکال را تحت بارگذاری کششی یا فشار و یا ترکیب کششی-فشاری، به درستی و با هزینه‌ی محاسباتی مناسب، توجیه کند.

مدل مورد نظر ما که در شکل ۳-۵ نشان داده شده است، ترکیبی‌ست از دو المان ماکسول با پارامترهای منحصر به فرد که به صورت موازی به یکدیگر و یک المان فنری بسته شده‌اند. این مدل را می‌توان نوعی از مدل‌های تعمیم‌یافته‌ی ماکسول نامید.



شکل ۵-۳ مدل پیشنهادی نهایی

با توجه به آنچه که در بخش ۲-۳ در مورد روابط مربوط به المان‌های ماکسول شرح داده شده روابط و پارامترهای مربوط به مدل نهایی بدین شرح می‌باشند (برخی روابط اولیه را که در بخش‌های قبلی این فصل شرح دادیم در این قسمت مجدداً آورده شده است):

$$\sigma^* = E^* \varepsilon^* \quad (۲۴-۳)$$

$$E^* = E' + iE'' \quad (۲۲-۳)$$

$$E' = \frac{\eta_1 \lambda_1 \omega^2}{1 + \lambda_1^2 \omega^2} + \frac{\eta_2 \lambda_2 \omega^2}{1 + \lambda_2^2 \omega^2} + E_3 \quad (۳۰-۳)$$

$$E'' = \frac{\eta_1 \omega}{1 + \lambda_1^2 \omega^2} + \frac{\eta_2 \omega}{1 + \lambda_2^2 \omega^2} \quad (۳۱-۳)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (۳۲-۳)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{E''}{E'} \quad (۳۳-۳)$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon_0 \exp(i(\omega t - \theta)) \quad (۲۳-۳)$$



### ۵-۳ نحوه ی بدست آوردن ثابت های مجهول مدل پیشنهادی

طبق روابط (۲۹-۳) که در بخش ۲-۳-۳ چگونگی بدست آوردن شان را شرح دادیم، برای المان های مدل نهایی روابط زیر را پیشنهاد می دهیم و هر پنج المان موجود در مدل ارائه شده را بر حسب هشت ثابت  $v_1, v_2, p_1, p_2, p_3, m_1, m_2, m_3$  به صورت زیر بازنویسی می کنیم :

$$\eta_1 = v_1 \quad , \quad \eta_2 = v_2 \quad (۳۴-۳)$$

$$\lambda_1 = \frac{v_1}{p_1} \varepsilon_0^{-m_1} \quad , \quad \lambda_2 = \frac{v_2}{p_2} \varepsilon_0^{-m_2} \quad (۳۵-۳)$$

$$E_3 = p_3 \varepsilon_0^{-m_3} \quad (۳۶-۳)$$

با جای گذاری مقادیر پنج پارامتر مدل از روابط (۳۴-۳) تا (۳۶-۳) در روابط (۳۰-۳) و (۳۱-۳)، مقادیر  $E'$  یا مدول ذخیره ای و  $E''$  یا مدول اتلافی، بر حسب ۸ ثابت بالا، برای هر حالت بدست خواهند آمد. سپس مقادیر پارامتری بدست آمده برای  $E'$  و  $E''$  را در معادله ی (۲۲-۳) قرار می دهیم تا مقادیر پارامتری  $E^*$  برای حالت های مختلف، بر حسب هشت ثابت مجهول بدست آید و مقدار آن را در معادله ی (۲۴-۳) قرار می دهیم تا مقادیر تنش مختلطی که مدل در هر حالت محاسبه می کند بدست آید. لازم به ذکر است در این مرحله مقادیر  $\varepsilon^*$  از رابطه ی (۲۳-۳) و با کمک رابطه ی (۳۳-۳) محاسبه می شود و در رابطه (۲۴-۳) قرار خواهند گرفت. حال، با داشتن مقادیر پارامتری  $\sigma^*$ ، و سپس با بکارگیری رابطه ی (۳-۳)، مقادیر تنش حقیقی بدست آمده توسط مدل، به صورت پارامتری بدست خواهند آمد. در این مرحله ۸۰ تنش حقیقی پارامتری که از مدل بدست آمده و متناظر است با ۸۰ حالت تست کشش- فشار انجام شده (۴ فرکانس  $4 \times$  دامنه ی کرنش  $5 \times$  شدت میدان مغناطیسی)، در اختیار داریم که همگی بر حسب ۸ ثابت مجهول مدل بدست آمده اند و هر کدام از این ۸۰ حالت خود شامل تعداد زیادی نقطه است که در زمان های مختلف اندازه گیری شده اند و مجموعه ی آن ها منحنی هیستریزس

تنش- کرنش را برای هر حالت مشخص خواهد کرد. برای مشخص کردن و یافتن مقدار عددی مناسب برای هر کدام از ثابت‌ها، به طوری که تنش‌ی که مدل محاسبه می‌کند در حد قابل قبولی منطبق بر تنش اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه در حالت‌های مختلف باشد، تابعی را به‌عنوان تابع خطا به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$\text{Error Function} = \sum_{i=1}^{80} \sum_{j=1}^{N_i} (\sigma_{i,j \text{ model}} - \sigma_{i,j \text{ experiment}})^2 \quad (3-37)$$

در رابطه‌ی بالا زیروند  $i$  مشخص‌کننده‌ی حالت تنش‌ها می‌باشد (یکی از حالات ۸۰ گانه با توجه به فرکانس، دامنه‌ی کرنش و چگالی شار مغناطیسی). مقدار  $N_i$  تعداد نقاط در حالت  $i$  خواهد بود و زیروند  $j$  نیز نشان دهنده‌ی نقطه‌ی  $j$ ام از حالت  $i$ ام می‌باشد.

با توجه به آن که مقادیر تنش آزمایشگاهی را به صورت عددی در اختیار داریم و مقادیر تنش هم به شکل پارامتری در رابطه‌ی (۳-۳۷) قرار می‌گیرند، مقدار تابع خطا پارامتری و بر حسب ۸ ثابت مجهول مدل خواهد بود. الگوریتم‌های متعددی برای بهینه‌سازی چنین توابعی وجود دارد که ما در این پژوهش از یک الگوریتم بهینه‌سازی خاص که در ابزارهای MATLAB نیز موجود است، به نام الگوریتم ژنتیک، برای مینیمم‌سازی مقدار تابع خطا و بدست آوردن مقادیر بهینه برای ۸ ثابت موجود در مدل استفاده کرده‌ایم تا حداکثر مقدار نهایی عددی تابع خطا را کم کنیم.

### ۳-۶ معرفی الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یا GA یک تکنیک جستجو در برنامه‌نویسی برای یافتن راه‌حل بهینه و مسائل بهینه‌سازی است. الگوریتم‌های ژنتیک یکی از انواع الگوریتم‌های تکاملی اند که از علم زیست‌شناسی و مباحث وراثت، جهش، انتخاب ناگهانی، انتخاب طبیعی و ترکیب، الهام گرفته‌اند. در این الگوریتم، تکامل از یک مجموعه‌ی کاملاً تصادفی از موجودیت‌ها شروع و در نسل‌های بعدی تکرار می‌شود. در هر نسل،

مناسب‌ترین‌ها انتخاب می‌شوند نه الزاما بهترین‌ها. بطور کلی الگوریتم‌های ژنتیک از اصول انتخاب طبیعی داروین برای یافتن فرمول بهینه جهت پیش‌بینی یا تطبیق الگو استفاده می‌کنند. این الگوریتم برای اولین بار توسط جان هالند و همکاران در سال ۱۹۷۰ معرفی شد. الگوریتم‌های ژنتیک اغلب گزینه خوبی برای تکنیک‌های پیش‌بینی بر مبنای رگرسیون می‌باشند [۶۴ و ۶۵].

یک GA برای حل یک مسئله، مجموعه‌ی بسیار بزرگی از راه‌حل‌های ممکن را تولید می‌کند. هر یک از این راه‌حل‌ها با استفاده از یک تابع تناسب مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. آنگاه تعدادی از بهترین راه‌حل‌ها باعث تولید راه‌حل‌های جدیدی می‌شوند که این کار باعث تکامل راه‌حل‌ها می‌گردد. در واقع الگوریتم ژنتیک فرضیه‌های جدید را با تغییر و ترکیب متوالی اجزا بهترین فرضیه‌های موجود تولید می‌کند. بدین ترتیب فضای جستجو در جهتی تکامل پیدا می‌کند که به راه‌حل مطلوب برسد. در صورت انتخاب صحیح پارامترها، این روش می‌تواند بسیار موثر عمل کند [۶۶-۶۹].

در هر مرحله مجموعه‌ای از فرضیه‌ها که جمعیت<sup>۱</sup> نامیده می‌شوند از طریق جایگزینی بخشی از جمعیت فعلی با فرزندان<sup>۲</sup> که از بهترین فرضیه‌های موجود حاصل شده‌اند بدست می‌آید. در هر بار تکرار، تمامی فرضیه‌ها با استفاده از یک تابع تناسب<sup>۳</sup> مورد ارزیابی قرار می‌گیرند آنگاه تعدادی از بهترین فرضیه‌ها با استفاده از یک تابع احتمال انتخاب شده و جمعیت جدید را تشکیل می‌دهند. تابع تناسب معیاری برای رتبه‌بندی فرضیه‌هاست که کمک می‌کند تا فرضیه‌های برتر برای نسل بعدی جمعیت انتخاب شوند. نحوه انتخاب این تابع بستگی به کاربرد مورد نظر دارد. تعدادی از این فرضیه‌های انتخاب شده به همان صورت مورد استفاده واقع شده و مابقی با استفاده از اپراتورهای ژنتیکی نظیر اپراتور تقاطع و اپراتور جهش برای تولید فرزندان بکار می‌روند [۷۰ و ۷۱].

اپراتور تقاطع با استفاده از دو رشته‌ی والد، دو رشته‌ی فرزند بوجود می‌آورد. اپراتور جهش برای

بوجود آوردن فرزند فقط از یک والد استفاده می‌کند [۷۲].

---

1. Population  
2. Fitness Function

از ویژگی‌های الگوریتم ژنتیک می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:

- امکان به تله افتادن این الگوریتم در مینی‌موم محلی کمتر از سایر روش‌هاست.
- از لحاظ محاسباتی پرهزینه است.
- از قواعد احتمالی (به‌جای قواعد قطعی) استفاده می‌کند.
- در این الگوریتم نیازی به اطلاع درباره مشتق‌پذیری تابع هدف نیست کافی است که برای مساله بتوان یک تابع برازش روی نتایج تعریف نمود.
- برای محیط‌های نوین‌تر مفید است.
- روش‌های متعددی برای سرعت‌دهی به الگوریتم و بهبود کیفیت جواب وجود دارد و به محض افزایش آگاهی از دامنه مساله می‌توان از این روش‌ها استفاده نمود.

به منظور استفاده از الگوریتم ژنتیک در محیط MATLAB، ابتدا ضابطه‌ی تابع خطا را طبق رابطه‌ی (۳-۳۷) به‌عنوان یک تابع تعریف می‌کنیم تا از آن به‌عنوان تابع تناسب در الگوریتم ژنتیک استفاده شود. سپس از ابزار optimization و انتخاب Solver: ga-genetic algorithm و دادن مقدار ۸ به قسمت Number of Variable کار را آغاز می‌کنیم. پس از هر بار اجرا شدن الگوریتم، جواب‌هایی به‌عنوان مقادیر بهینه برای ۸ ثابت توسط نرم افزار معرفی می‌شوند که با مقادیر بدست آمده از اجراهای قبلی متفاوتند. از طرفی با تغییر در تنظیمات و آپشن‌های جعبه ابزار بهینه‌سازی در MATLAB از جمله خارج کردن قسمت های Bounds و Population Size و Initial Range و Initial Scores از حالت اولیه و مقداردهی دستی به هر کدام، می‌توان جواب‌های بهتری بدست آورد به نحوی که مقدار عددی تابع خطا بیش‌تر کاهش یابد. تغییرات ذکر شده به صورت سعی و خطا اعمال و بررسی شد تا پس از ده‌ها بار اجرای الگوریتم ژنتیک با بهترین تنظیمات و آپشن‌های ممکن، بهترین مقدار ممکن برای چند ثابت بدست آید و مرتبه‌ی بزرگی و گستره‌ی صحیح تغییرات دیگر ثابت‌ها معین شود. برای رسیدن به مقدار نهایی برای ثابت‌های باقیمانده، الگوریتمی طراحی کردیم تا بتواند ثابت‌ها را بطور خودکار از باند

پایین تا باند بالا که با توجه به نتایج الگوریتم ژنتیک برایش تعریف می کنیم، تغییر دهد و بهترین مقدار را برای ثابت مورد نظر، که متناظر است با کمترین مقدار برای تابع خطا، بدست آورد. لازم به ذکر است این الگوریتم کار خود را یک به یک، در تک تک حالتها و در تک تک ثابتهای باقیمانده انجام می دهد.

### ۷-۳ شرح ثابتهای بدست آمده برای مدل پیشنهادی

اگر مجموعه ی ۸ پارامتر مجهول مدل را به صورت بردار  $b$  به شکل زیر تعریف کنیم:

$$b = [v_1, v_2, p_1, p_2, p_3, m_1, m_2, m_3]$$

در نتیجه ی روندی که در بخش قبل شرح داده شد، مقادیر زیر برای ثابتهای سوم تا هشتم معرفی می شوند که این مقادیر برای این ثابتها در تمام ۸۰ حالت یکسان و ثابت خواهند بود:

$$\begin{array}{lll} p_1 = 10^4 \text{ pa} & p_2 = 3 \times 10^4 \text{ pa} & p_3 = 10.34 \text{ pa} \\ m_1 = 0.74 & m_2 = 5.25 & m_3 = -0.58 \end{array}$$

بنابراین بردار ثابتهای مدل، در تمامی حالتها به صورت زیر خواهد بود:

$$b = [ b(1), b(2), 10^4, 3 \times 10^4, 10.34, 0.74, 5.25, -0.58 ]$$

همان طور که مشخص است، ثابتهای اول و دوم که همان  $v_1, v_2$  می باشند، بصورت یکسان در تمامی حالتها معرفی نشده اند بلکه برای تطابق بهتر نتایج مدل با نتایج آزمایشگاهی، در هر کدام از ۸۰ حالت تست، به هر کدام از این دو ثابت یک مقدار منحصر به فرد تعلق می گیرد. هرچند به پارامتر  $v_2$  در اکثر حالتها مقدار ۱۰۰ تعلق خواهد گرفت. بدین ترتیب واضح است مدلی که در این پژوهش ارائه داده ایم، دارای ۶ پارامتر کاملاً ثابت، یک پارامتر نیمه ثابت و یک پارامتر متغیر با شرایط تست خواهد بود.

با استفاده از الگوریتم دوم که پس از الگوریتم ژنتیک به صورتی که قبلاً در همین بخش شرح داده شد بکار گرفته می شود، در هر حالت مقدار مناسب برای ثابتهای اول و دوم تعیین شد به نحوی که مقدار تابع خطا کمترین مقدار ممکن باشد. نتایج این بخش که شامل تمامی مقادیر ثابت اول متناظر با حالت های مختلف است در جداول ۳-۱ تا ۴-۳ آورده شده است.

ثابت دوم مدل نیز در اکثر حالت‌ها دارای مقدار ۱۰۰ خواهد بود به جز در ۱۲ مورد خاص که همگی در دامنه‌ی کرنش ۱ درصد قرار دارند که در جدول ۳-۵ نشان داده شده است. بنابراین مقدار ثابت دوم در تمامی حالات دامنه‌های کرنش بالاتر از ۱ درصد برابر ۱۰۰ پاسکال خواهد بود.

جدول ۳-۱ مقادیر ثابت اول برحسب پاسکال در فرکانس ۱ هرتز در دامنه‌های کرنش و چگالی‌های شار مختلف

چگالی شار   دامنه کرنش	۱ درصد	۲ درصد	۴ درصد	۸ درصد
۰ میلی تسلا	892.86	773.76	743.74	716.92
۱۰۰ میلی تسلا	1334.00	1048.96	942.28	880.04
۱۷۰ میلی تسلا	2183.94	1636.24	1396.00	1242.98
۲۲۰ میلی تسلا	2628.36	2031.50	1658.50	1449.18
۲۶۰ میلی تسلا	3373.32	2513.54	2246.14	1889.66

جدول ۳-۲ مقادیر ثابت اول برحسب پاسکال در فرکانس ۳ هرتز در دامنه‌های کرنش و چگالی‌های شار مختلف

چگالی شار   دامنه کرنش	۱ درصد	۲ درصد	۴ درصد	۸ درصد
۰ میلی تسلا	273.82	227.52	213.32	196.70
۱۰۰ میلی تسلا	465.90	333.98	293.32	254.10
۱۷۰ میلی تسلا	794.04	557.28	476.12	394.76
۲۲۰ میلی تسلا	841.62	674.48	579.56	491.46
۲۶۰ میلی تسلا	932.40	904.16	785.00	648.30

جدول ۳-۳ مقادیر ثابت اول برحسب پاسکال در فرکانس ۵ هرتز در دامنه‌های کرنش و چگالی‌های شار مختلف

چگالی شار   دامنه کرنش	۱ درصد	۲ درصد	۴ درصد	۸ درصد
۰ میلی‌تسلا	171.56	113.34	106.82	94.98
۱۰۰ میلی‌تسلا	268.30	181.70	161.52	134.36
۱۷۰ میلی‌تسلا	483.40	346.48	281.30	228.88
۲۲۰ میلی‌تسلا	576.28	415.30	334.60	272.64
۲۶۰ میلی‌تسلا	670.58	558.02	458.34	395.24

جدول ۴-۳ مقادیر ثابت اول برحسب پاسکال در فرکانس ۸ هرتز در دامنه‌های کرنش و چگالی‌های شار مختلف

چگالی شار   دامنه کرنش	۱ درصد	۲ درصد	۴ درصد	۸ درصد
۰ میلی‌تسلا	46.86	40.00	39.16	33.02
۱۰۰ میلی‌تسلا	116.48	93.50	86.84	59.44
۱۷۰ میلی‌تسلا	203.04	201.98	159.36	119.04
۲۲۰ میلی‌تسلا	258.20	248.82	202.52	157.72
۲۶۰ میلی‌تسلا	367.98	354.32	290.00	228.40

جدول ۳-۵ مقادیر ثابت دوم برحسب پاسکال در دامنه‌ی کرنش ۱ درصد (حالت‌های خاص غیر ۱۰۰ پاسکال)

F=8 Hz	F=5 Hz	F=3 Hz	F=1 Hz	چگالی شار   فرکانس
100	100	100	100	۰ میلی تسلا
100	100	100	100	۱۰۰ میلی تسلا
250	270	350	710	۱۷۰ میلی تسلا
250	335	470	1510	۲۲۰ میلی تسلا
340	770	850	1870	۲۶۰ میلی تسلا

### ۳-۸ برازش منحنی روی ثابت اول مدل

همان‌طور که در بخش قبل شرح داده شد، مدل ارائه شده در دامنه‌های کرنش ۲، ۴ و ۸ درصد دارای هفت پارامتر کاملاً ثابت و یک پارامتر متغیر با شرایط بارگذاری (که همان پارامتر اول مدل یا  $v_1$  می‌باشد) خواهد بود. در ادامه با برازش منحنی‌هایی روی مقادیر پارامتر اول مدل و در نظر گرفتن این نکته که پارامتر اول با تغییر هر کدام از شرایط بارگذاری (فرکانس ورودی، دامنه‌ی کرنش و چگالی شار مغناطیسی) تغییر خواهد کرد، مدل پیشنهادی را تبدیل به مدلی با پارامترهای کاملاً ثابت در تمامی حالت‌های بارگذاری خواهیم کرد.

با توجه به وابستگی پارامتر اول مدل به چگالی شار مغناطیسی (B) و فرکانس ورودی (F) و همچنین دامنه‌ی کرنش ورودی (A)، برازش منحنی در سه مرحله و در محیط نرم‌افزار MATLAB و با استفاده از ابزار curve fitting این نرم‌افزار و به صورت زیر انجام شده است:

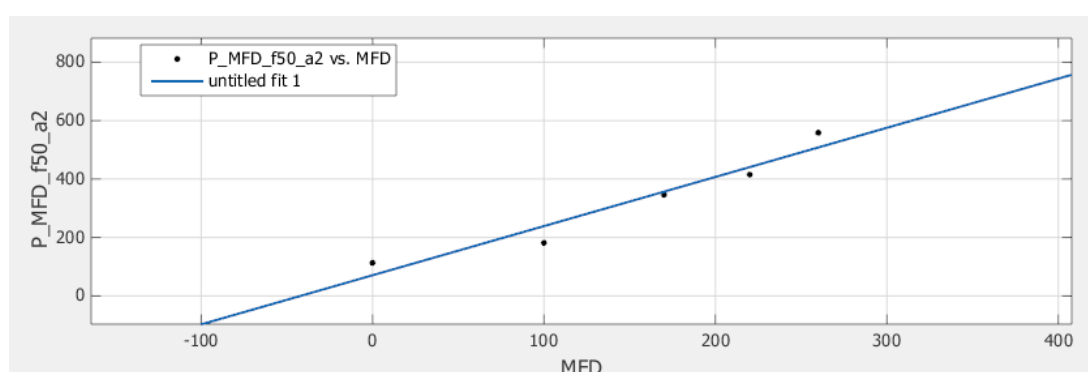
در مرحله‌ی اول در هر فرکانس و دامنه‌ی کرنش خاص (در مجموع ۱۶ حالت)، برازش منحنی برای مقادیر ثابت اول یا  $b(1)$  نسبت به چگالی شار مغناطیسی که در ادامه با نماد B نشان داده شده است



انجام شد. با توجه به سیر صعودی و تقریباً خطی مقادیر  $b(1)$  نسبت به  $B$ ، معادله‌ی (۳۸-۳) به صورت زیر و با دو ثابت  $n_1$  و  $n_2$  برای برازش مرحله‌ی اول در نظر گرفته شده است:

$$b(1) = n_1 B + n_2 \quad (38-3)$$

در شکل ۶-۳ نمونه‌ای از چگونگی برازش منحنی در مرحله‌ی اول نشان داده شده است. جداول ۳-۶ و ۷-۳ نیز مقادیر بدست آمده از برازش را برای ثابت‌های اول و دوم معادله‌ی (۳۸-۳) نشان می‌دهند.



شکل ۶-۳ محیط برازش منحنی در مرحله‌ی اول در فرکانس ۵ هرتز و دامنه‌ی کرنش ۲ درصد

$$n_1=1.682, n_2=70.74$$

جدول ۶-۳ مقادیر  $n_1$  معادله‌ی برازش منحنی ثابت اول نسبت به چگالی شار مغناطیسی

F=8 Hz	F=5 Hz	F=3 Hz	F=1 Hz	دامنه کرنش   فرکانس
1.174	1.996	2.665	9.389	a=1%
1.163	1.682	2.523	6.81	a=2%
0.921	1.306	2.117	5.446	a=4%
0.722	1.089	1.684	4.307	a=8%

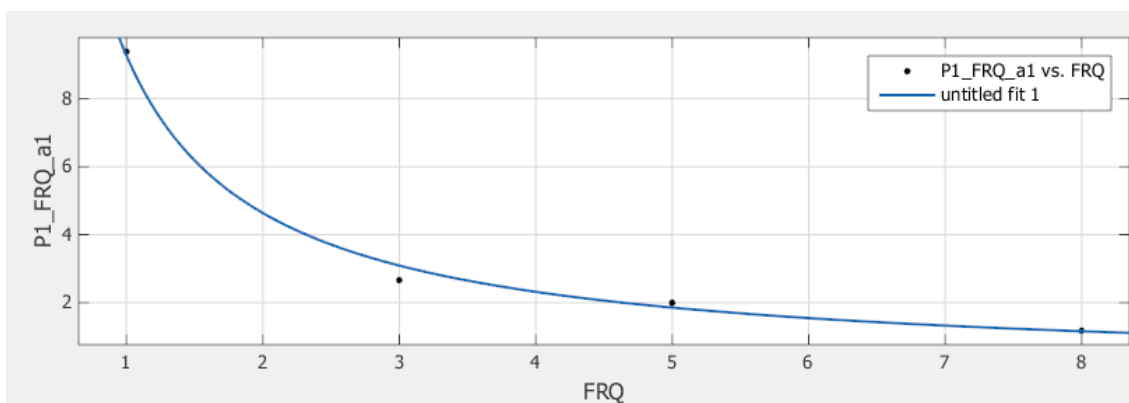
جدول ۳-۷ مقادیر  $n_2$  معادله‌ی برازش منحنی ثابت اول نسبت به چگالی شار مغناطیسی

F=8 Hz	F=5 Hz	F=3 Hz	F=1 Hz	دامنه کرنش   فرکانس
22.48	134.7	261.8	674.1	a=1%
11.7	70.74	161	596	a=2%
17.44	72.64	151.9	586.4	a=4%
11.2	61.87	144.5	589.7	a=8%

در مرحله‌ی دوم، روی ثابت‌های اول و دوم بدست آمده از برازش مرحله‌ی اول یعنی  $n_1$  و  $n_2$ ، عملیات برازش منحنی، این بار نسبت به فرکانس ورودی (F) انجام گردید. با توجه به چگونگی سیر نزولی مقادیر  $n_1$  و  $n_2$  با تغییر در F، توابعی مطابق معادله‌ی (۳-۳۹) برای برازش منحنی در این مرحله انتخاب شده است:

$$n_1 = q_1 F^{-1} \quad , \quad n_2 = q_2 F^{-1} \quad (3-39)$$

در شکل ۳-۷ نمونه‌ای از برازش منحنی در مرحله‌ی دوم دیده می‌شود. جدول ۳-۸ نیز مقادیر بدست آمده از برازش را برای معادله‌ی (۳-۳۹) نشان می‌دهد.



شکل ۳-۷ محیط برازش منحنی در مرحله‌ی دوم برای ثابت  $n_1$  در دامنه‌ی کرنش ۱ درصد،  $q_1 = 9.277$

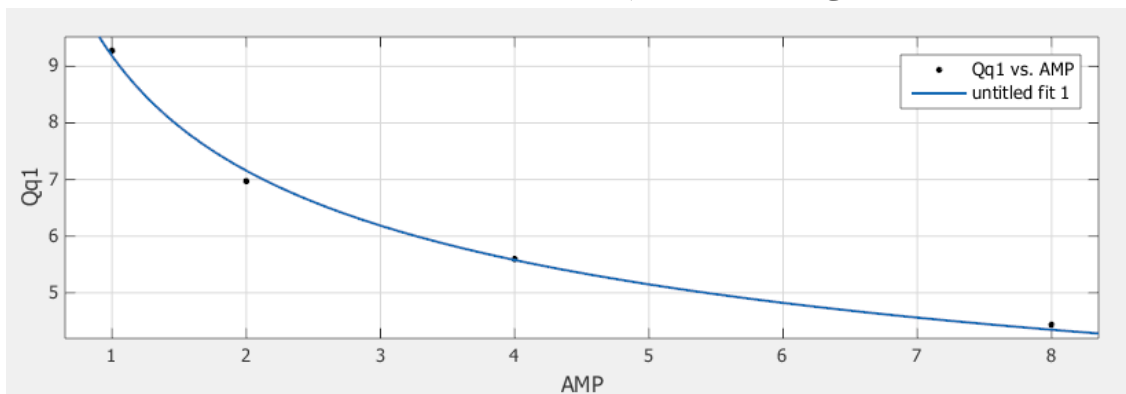
جدول ۳-۸ مقادیر  $q_1$  و  $q_2$  معادله‌ی (۳-۳۹) مربوط به مرحله‌ی دوم برازش منحنی ثابت اول

a=8%	a=4%	a=2%	a=1%	
4.437	5.595	6.972	9.277	$q_1$
558.5	560	570.3	678.3	$q_2$

در مرحله‌ی سوم، روی ثابت‌های بدست آمده از برازش مرحله‌ی دوم یعنی  $q_1$  و  $q_2$ ، عملیات برازش منحنی، این بار نسبت به دامنه‌ی کرنش ورودی (A) انجام شده است. با توجه به نحوه‌ی تغییر مقادیر  $q_1$  و  $q_2$  با تغییر در A، دو تابع مطابق معادله‌ی (۳-۴۰) برای برازش منحنی در این مرحله انتخاب شده است:

$$q_1 = r_1 A^{r_2} \quad , \quad q_2 = r_3 A^{r_4} + r_5 \quad (۳-۴۰)$$

در شکل ۳-۸ برازش منحنی در مرحله‌ی سوم روی مقادیر  $q_1$  نشان داده شده است.



شکل ۳-۸ محیط برازش منحنی در مرحله‌ی سوم برای ثابت  $q_1$  ،  $r_1 = 9.184$  ،  $r_2 = -0.3595$

با انجام مرحله‌ی سوم برازش منحنی، ثابت‌های معادله‌ی فوق به شرح زیر بدست آمده اند:

$$r_1 = 9.184 \quad , \quad r_2 = -0.3595 \quad , \quad r_3 = 119.7 \quad , \quad r_4 = -3.349 \quad , \quad r_5 = 558.6$$

حال به جمع بندی نتایج سه مرحله برازش منحنی می پردازیم:

با جای‌گذاری ۵ ثابت بالا در معادله‌ی (۳-۴۰) و با قرار دادن مقادیر حاصل از معادله‌ی (۳-۴۰) در معادله‌ی (۳-۳۹) و سپس با جاگذاری مقادیر حاصل از معادله‌ی (۳-۳۹) در معادله‌ی (۳-۳۸) قادر خواهیم بود پارامتر اول مدل پیشنهادی را در تمام حالت‌های بارگذاری با تقریب بسیار خوبی محاسبه کنیم. همچنین از مسیر دیگری می‌توان با قرار دادن معادله‌ی (۳-۴۰) در معادله‌ی (۳-۳۹) به معادله‌ی (۳-۴۱) به صورت زیر رسید:

$$n_1 = (r_1 A^{r_2}) F^{-1} \quad , \quad n_2 = (r_3 A^{r_4} + r_5) F^{-1} \quad (۳-۴۱)$$

سپس با جاگذاری معادله‌ی (۳-۴۱) در معادله‌ی (۳-۳۸) خواهیم داشت:

$$b(1) = \left( (r_1 A^{r_2}) F^{-1} B \right) + \left[ (r_3 A^{r_4} + r_5) F^{-1} \right]$$

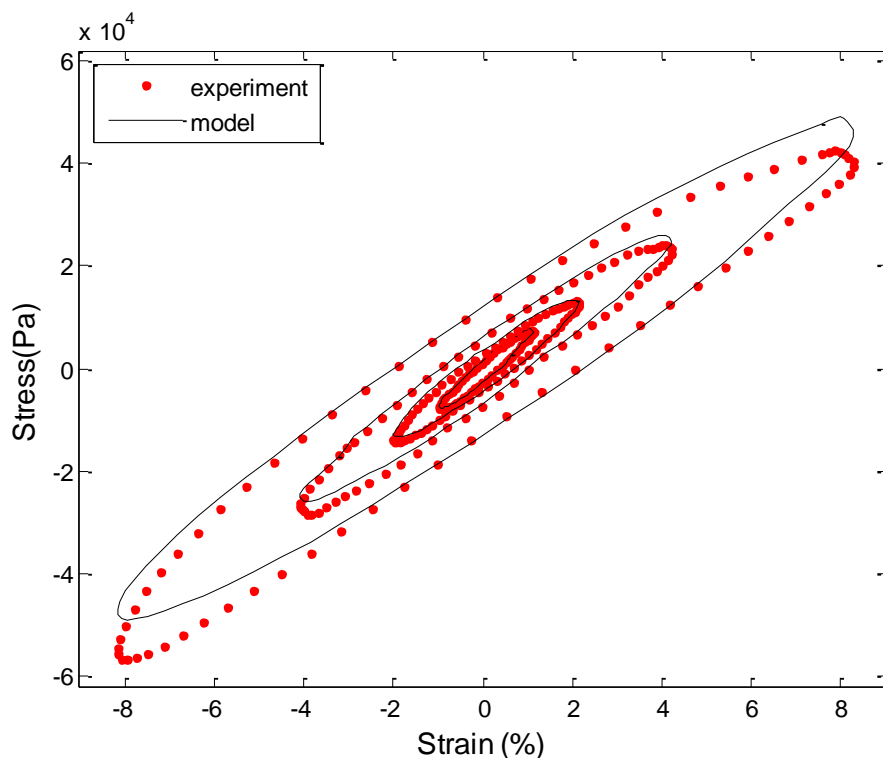
$$r_1 = 9.184 \quad , \quad r_2 = -0.3595 \quad , \quad r_3 = 119.7 \quad , \quad r_4 = -3.349 \quad , \quad r_5 = 558.6 \quad (۳-۴۲)$$

با استفاده از معادله‌ی (۳-۴۲) و ۵ ثابت مربوط به آن، مقدار پارامتر اول مدل در تمامی حالت‌ها در دسترس خواهد بود. در بخش‌های قبل شرح داده شد که کل مدل پیشنهادی در دامنه‌های کرنش ۲ و ۴ و ۸ درصد دارای ۷ پارامتر ثابت و ۱ پارامتر متغیر است. در این بخش نشان داده شد که، تنها پارامتر متغیر مدل یعنی پارامتر اول آن نیز با معادله‌ی (۳-۴۲) که دارای ۵ ثابت است محاسبه می‌شود. بنابراین مدل پیشنهادی نهایی در این پژوهش با بکارگیری ۱۲ پارامتر کاملاً ثابت، در تمامی حالت‌های فرکانس ورودی، شدت میدان مغناطیسی در دامنه‌های کرنش ورودی بیش از ۱ درصد جواب‌های صحیحی در بر خواهد داشت.

### ۹-۳ مقایسه‌ی نتایج مدل پیشنهادی با نتایج تست و اعتبارسنجی مدل

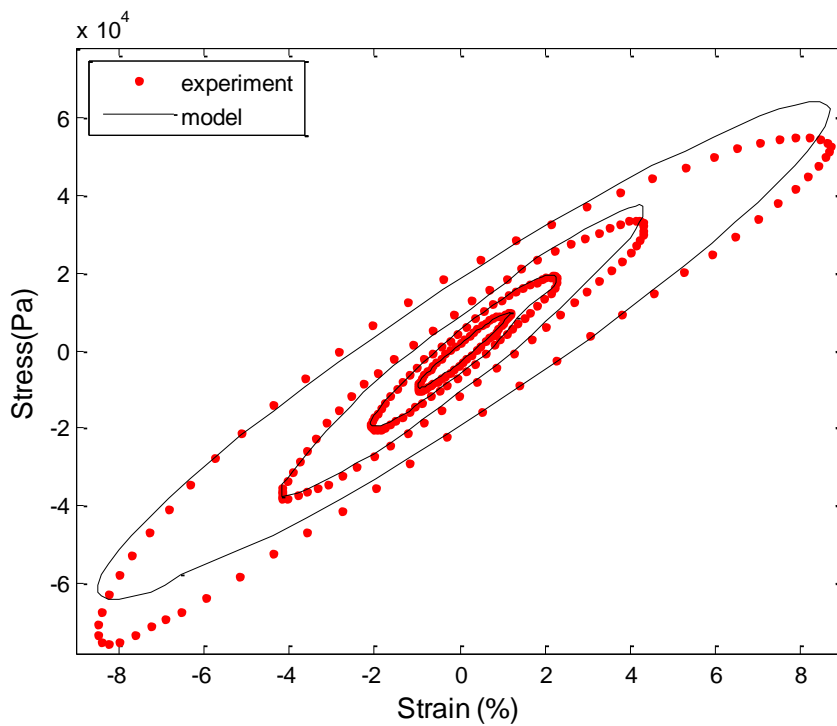
با مشخص شدن ثابت‌های مجهول مدل و کامل شدن آن، قادر خواهیم بود با دادن حالت و شرایط بارگذاری از قبیل فرکانس، دامنه‌ی کرنش و چگالی شار مغناطیسی به مدل و در نظر گرفتن مقادیر کرنش اعمالی به نمونه به عنوان ورودی، تنش متناظر را از طریق مدل محاسبه کنیم. برای راستی‌آزمایی و بررسی کیفیت مدل، میزان انطباق تنش بدست آمده توسط مدل را با تنش بدست آمده از تست کشش-فشار نمونه‌ی MRE در آزمایشگاه بررسی می‌کنیم.

شکل‌های ۹-۳ تا ۱۳-۳ مقایسه‌ی منحنی‌های تنش-کرنش نتایج مدل با نتایج آزمایشگاهی در فرکانس و چگالی شار ثابت در دامنه‌های کرنش گوناگون را نشان می‌دهند.

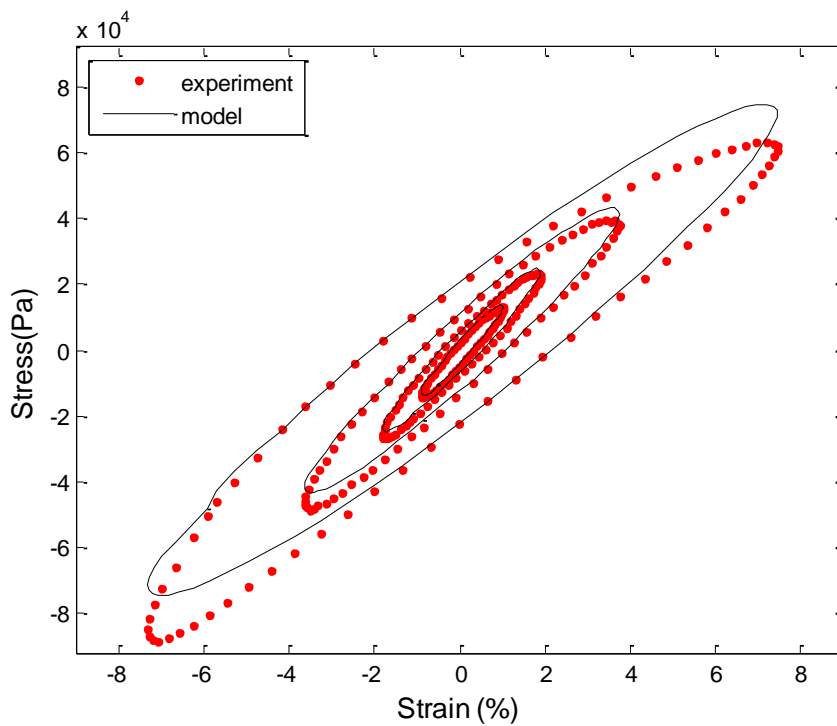


شکل ۹-۳ مقایسه منحنی‌های تنش-کرنش مدل با منحنی‌های حاصل از تست در  $B=0$  mTesla ,  $F=5$  Hz

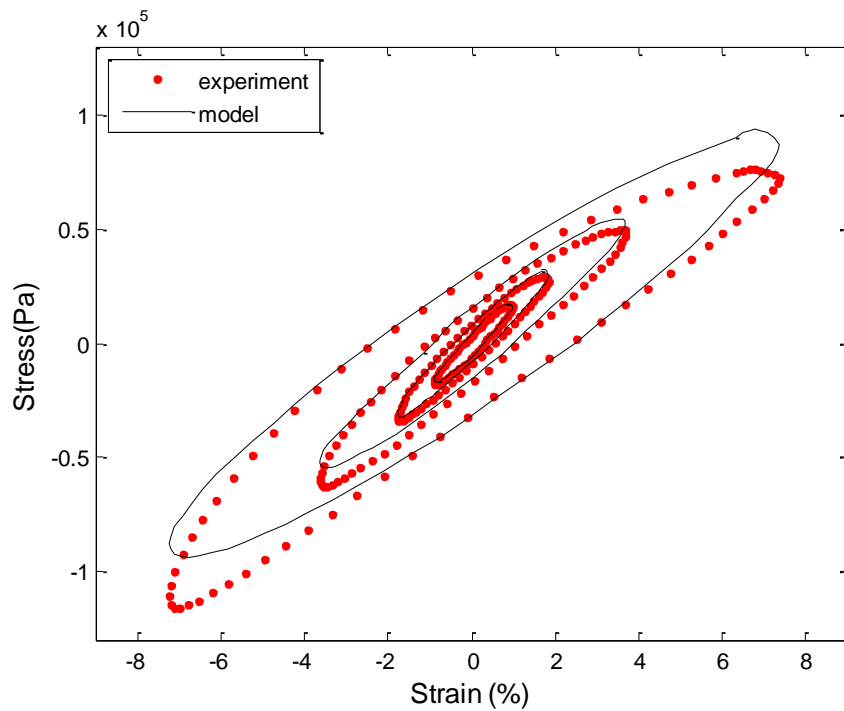
دامنه‌های کرنش مختلف



شکل ۱۰-۳ مقایسه منحنی‌های تنش-کرنش مدل با منحنی‌های حاصل از تست در  $B=100$  mTesla ,  $F=8$  Hz در دامنه‌های کرنش مختلف

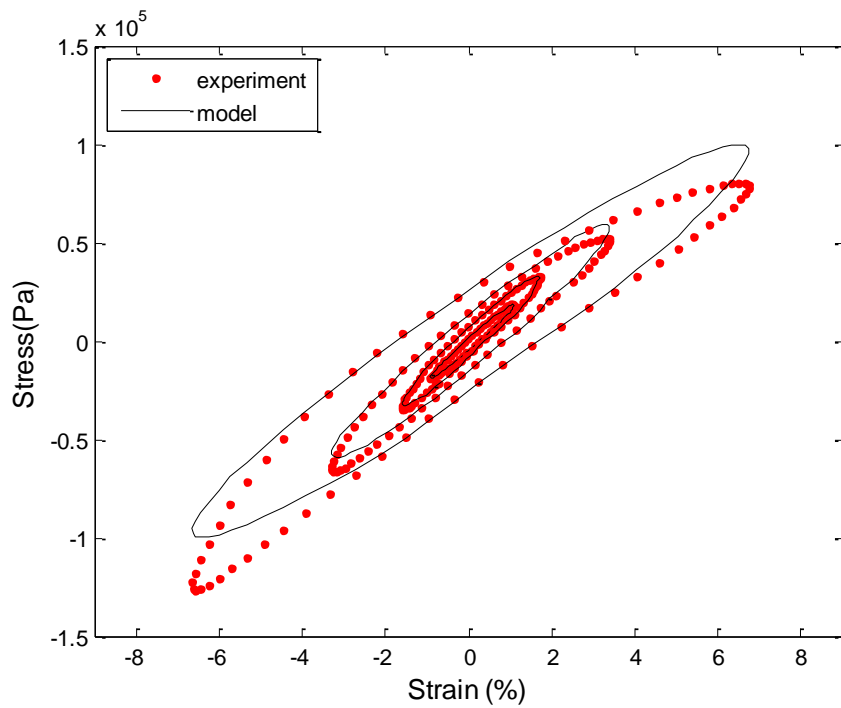


شکل ۱۱-۳ مقایسه منحنی‌های تنش-کرنش مدل با منحنی‌های حاصل از تست در  $B=170$  mTesla ,  $F=3$  Hz در دامنه‌های کرنش مختلف



شکل ۳-۱۲ مقایسه منحنی های تنش- کرنش مدل با منحنی های حاصل از تست در  $B=220 \text{ mTesla}$  ,  $F=5 \text{ Hz}$  در

دامنه های کرنش مختلف



شکل ۳-۱۳ مقایسه منحنی های تنش- کرنش مدل با منحنی های حاصل از تست در  $B=260 \text{ mTesla}$  ,  $F=1 \text{ Hz}$  در

دامنه های کرنش مختلف

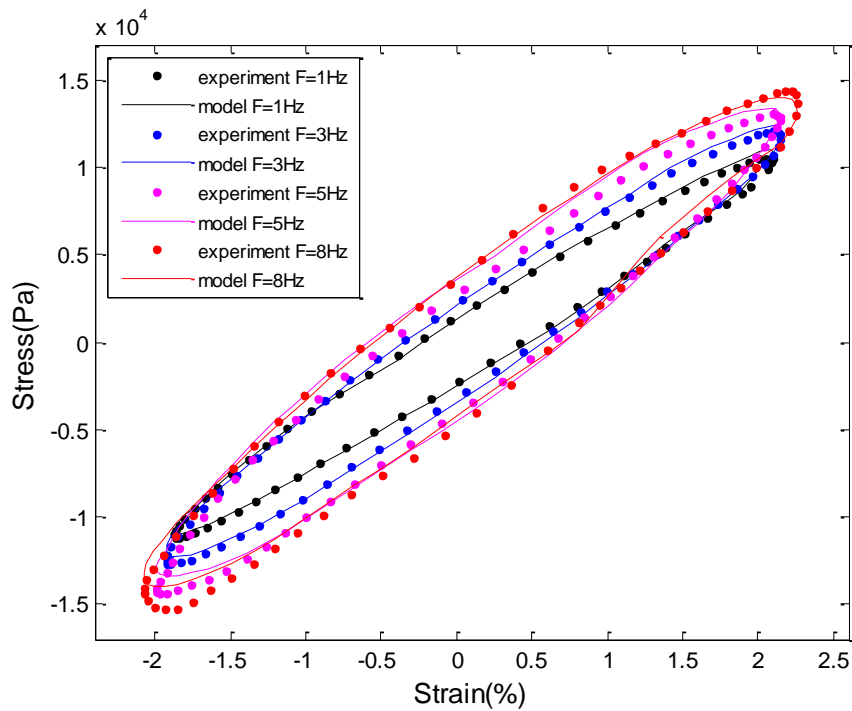
همان‌طور که در شکل‌های ۳-۹ تا ۳-۱۳ دیده می‌شود، مقدار تنش‌هایی که در شرایط مختلف توسط مدل محاسبه می‌شود انطباق قابل قبولی با تنش اندازه‌گیری شده از نتایج تست کشش-فشار نمونه‌ی MRE دارد. از شکل‌ها کاملاً مشخص است که در دامنه‌های کرنش ۱ و ۲ و ۴ درصد، نتایج مدل و تست کاملاً بر هم منطبقند پس در این درصدهای کرنش که منحنی‌های تنش-کرنش از حالت خطی خود خارج نشده‌اند کیفیت عملکرد مدل ارائه شده بسیار عالی خواهد بود. در دامنه کرنش ۸ درصد، در حالت‌هایی با چگالی شار بالا، در قسمتی از منحنی‌ها که مقدار کرنش از حدود ۶ درصد فراتر می‌رود، به تدریج نمودارهای حاصل از تست از حالت خطی خارج شده و فرم غیرخطی می‌گیرند. با توجه به آن که طبیعت مدل ارائه شده در این پژوهش خطی است، توانایی پیش‌بینی کامل این تغییر در رفتار نمونه را ندارد و نتایج مدل اندکی از نتایج تست فاصله می‌گیرد که البته این مقدار خطا می‌تواند قابل چشم‌پوشی باشد.

بطور خلاصه می‌توان اظهار داشت که عملکرد مدل سه‌شاخه‌ای ارائه شده در این پژوهش، در شرایط مختلف بارگذاری، به‌خصوص در کرنش‌های کم‌تر از ۸ درصد کاملاً قابل قبول می‌باشد و اعتبارسنجی شده‌است. با ذکر این نکته که انواع متفاوت MRE در کاربردهای گوناگون عمدتاً تحت کرنش‌های کوچک قرار می‌گیرند و در این ناحیه رفتاری خطی دارند، مدل خطی سه‌شاخه‌ای پیشنهادی در این پژوهش، مدلی مناسب، نسبتاً کم‌حجم و بسیار کارآمد و کاربردی خواهد بود که پاسخ‌گویی نیاز به شناخت و پیش‌بینی رفتار الاستومرهای مگنتورئولوژیکال در کاربردهای گوناگون می‌باشد.

شکل‌های ۳-۱۴ تا ۳-۱۷ مقایسه‌ی منحنی‌های تنش-کرنش نتایج مدل با نتایج آزمایشگاهی در دامنه‌ی کرنش و چگالی شار ثابت در فرکانس‌های گوناگون را نشان می‌دهند.

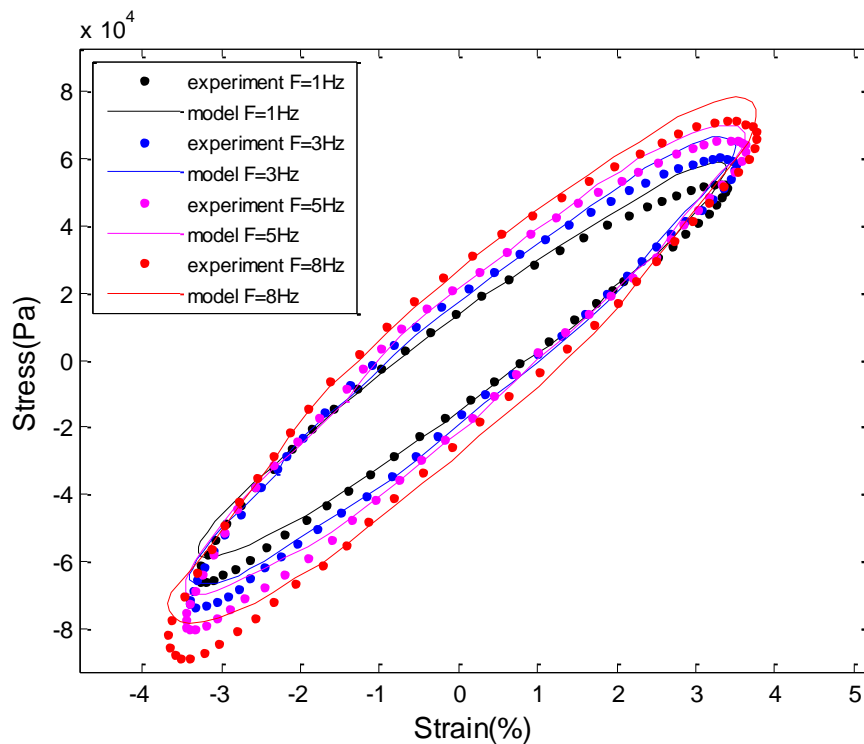
در شکل‌های ۳-۱۷ تا ۳-۲۰ مقایسه‌ی منحنی‌های تنش-کرنش نتایج مدل با نتایج آزمایشگاهی در دامنه‌ی کرنش و فرکانس ثابت در چگالی شارهای گوناگون نشان داده شده است.





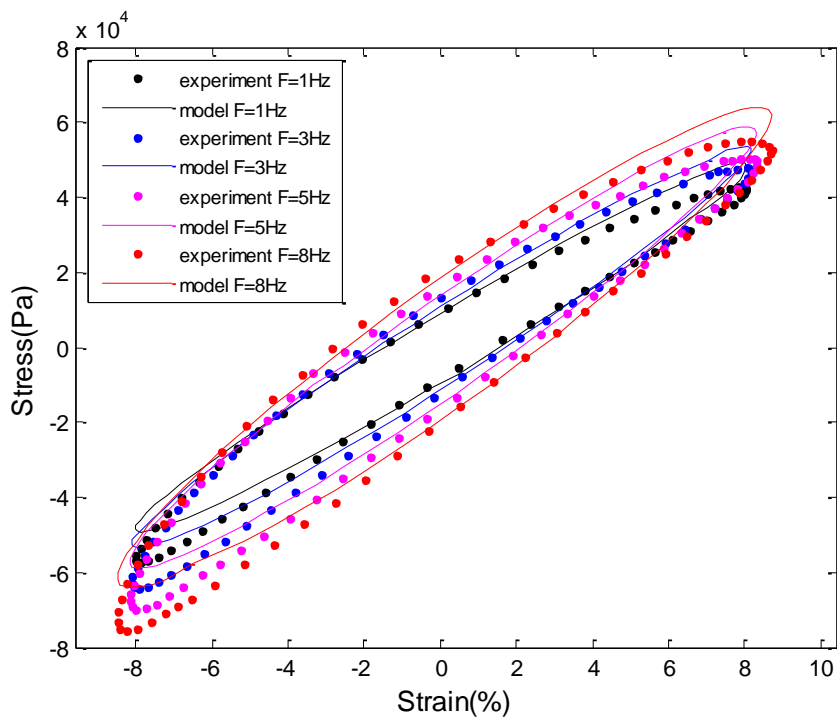
شکل ۳-۱۴ مقایسه منحنی های تنش- کرنش مدل با منحنی های حاصل از تست در  $B=0$  mTesla ,  $a=2\%$  در

فرکانس های مختلف

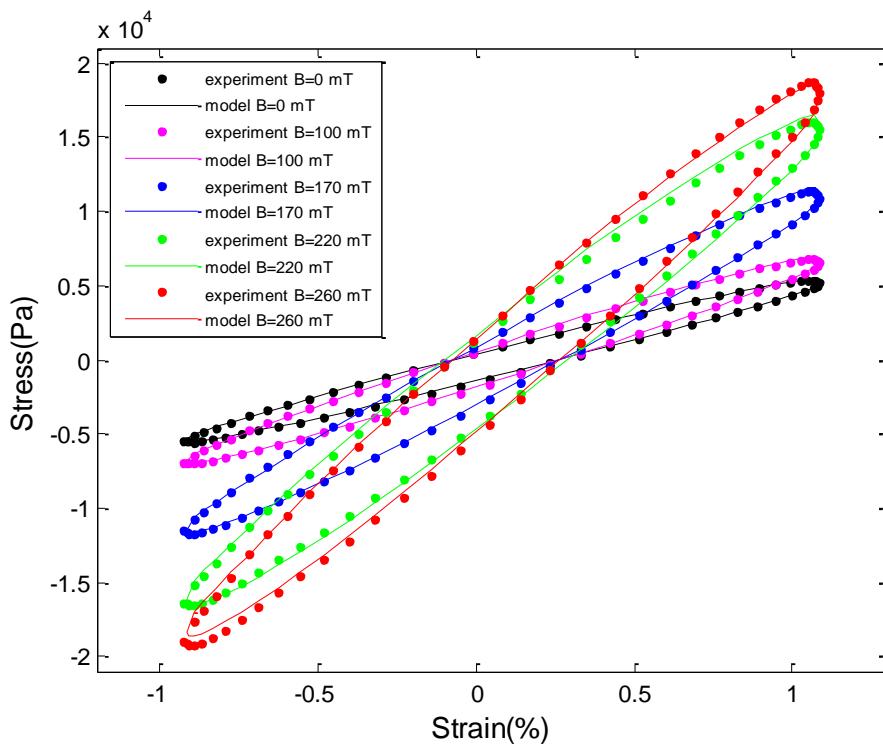


شکل ۳-۱۵ مقایسه منحنی های تنش- کرنش مدل با منحنی های حاصل از تست در  $B=260$  mTesla ,  $a=4\%$  در

فرکانس های مختلف

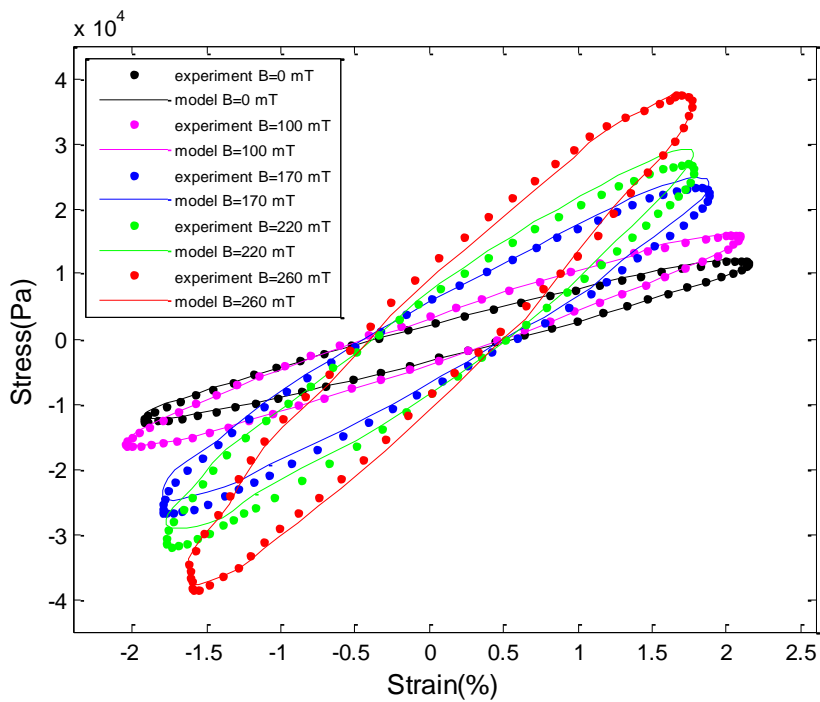


شکل ۳-۱۶ مقایسه منحنی های تنش- کرنش مدل با منحنی های حاصل از تست در  $B=100 \text{ mT}$  ,  $a=8\%$  در فرکانس های مختلف



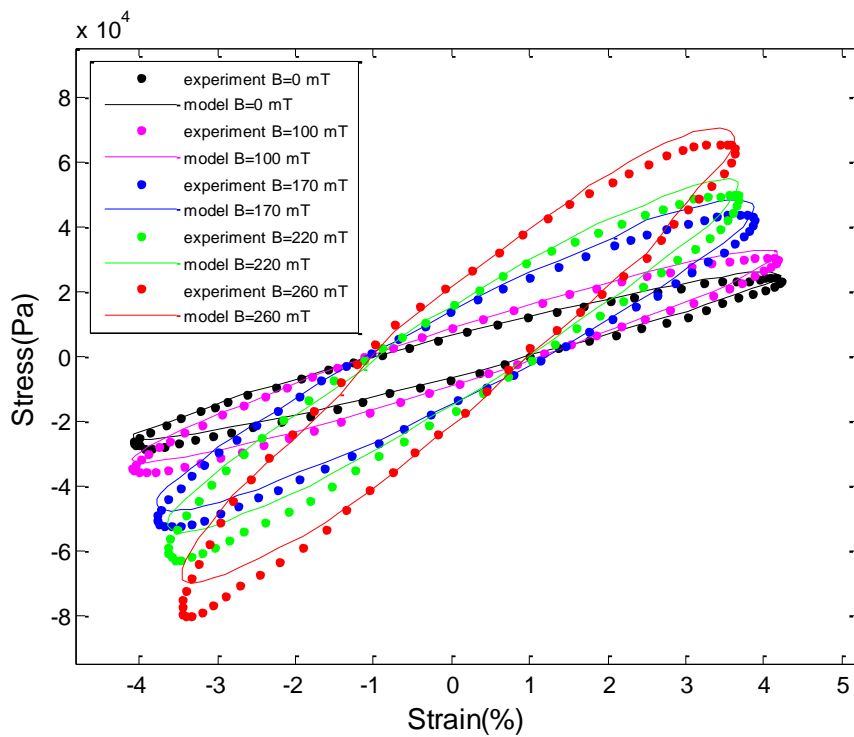
شکل ۳-۱۷ مقایسه منحنی های تنش- کرنش مدل با منحنی های حاصل از تست در  $F=1 \text{ Hz}$  ,  $a=1\%$

چگالی شارهای گوناگون



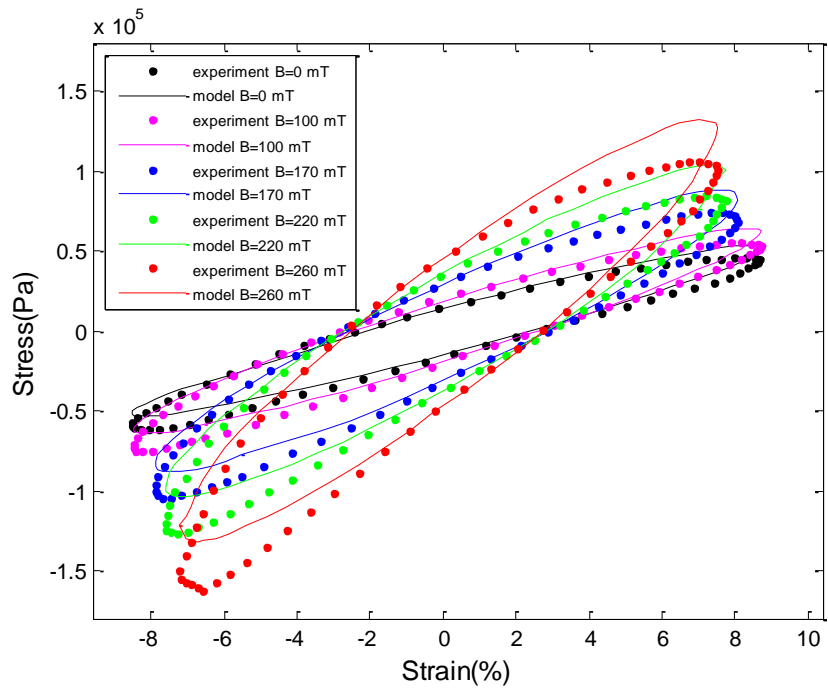
شکل ۳-۱۸ مقایسه منحنی های تنش- کرنش مدل با منحنی های حاصل از تست در  $F=3 \text{ Hz}$  ,  $a=2\%$  در

چگالی شارهای گوناگون



شکل ۳-۱۹ مقایسه منحنی های تنش- کرنش مدل با منحنی های حاصل از تست در  $F=5 \text{ Hz}$  ,  $a=4\%$  در چگالی

شارهای گوناگون



شکل ۳-۲۰ مقایسه منحنی های تنش- کرنش مدل با منحنی های حاصل از تست در  $F=8\text{ Hz}$ ,  $a=8\%$  در چگالی

شارهای گوناگون

## فصل ۴ (نتیجه‌گیری و پیشنهادات)

## ۴-۱ پیشگفتار

در این فصل به جمع‌بندی نتایج بدست آمده از تست‌های کشش-فشار MRE در شرایط مختلف و همچنین بکارگیری مدل پیشنهادی برای توجیه رفتار MRE خواهیم پرداخت.

## ۴-۲ جمع‌بندی نتایج

چنان که در فصل دوم این پژوهش شرح داده شد، تست کشش-فشار نمونه‌ی الاستومر مگنتورئولوژیکال با طراحی فیکسچری خاص و در شرایط مختلف بارگذاری از قبیل فرکانس‌های ورودی، دامنه‌های کرنش و شدت‌های میدان مغناطیسی گوناگون، صورت گرفت. نتایج تست نشان می‌دهد که منحنی‌های تنش-کرنش در دامنه‌های کرنش ۱ درصد و ۲ درصد کاملاً متقارن اند در حالی که در دامنه‌ی کرنش ۴ درصد در تعداد کمی از حالت‌ها و در دامنه‌ی کرنش ۸ درصد در تعداد قابل توجهی از حالات، چنین تطابقی وجود ندارد و در یک دامنه‌ی کرنش خاص و در فرکانس و مقدار چگالی شار مغناطیسی یکسان، مقدار تنش فشاری ایجاد شده بیش‌تر از تنش کششی خواهد بود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در این موارد الاستومر مگنتورئولوژیکال به افزایش کرنش در درصدهای بالای کرنش، در حالت فشاری مقاومت بیش‌تری نسبت به حالت کششی نشان می‌دهد و یا در فشار سخت‌تر از کشش خواهد بود. عدم تقارن منحنی‌ها، در بالاترین مقادیر B و F و a در میان ۸۰ حالت تست، یعنی در  $B=260 \text{ mT}$  و  $F=8 \text{ Hz}$  و  $a=8\%$  بیش‌ترین نمود را خواهد داشت. در این حالت حداکثر تنش فشاری تقریباً ۱,۵ برابر حداکثر تنش کششی است.

در مورد تاثیر اعمال میدان مغناطیسی بر MRE مشخص شد که در یک فرکانس و دامنه‌ی کرنش ثابت و معین با افزایش چگالی شار مغناطیسی اعمال شده بر نمونه، سطح محصور در منحنی و به تبع آن، انرژی‌ای که در هر سیکل توسط نمونه MRE دمپ می‌شود، در تمام فرکانس‌ها و دامنه‌های کرنش افزایش خواهد یافت. همچنین با افزایش مقدار چگالی شار مغناطیسی شیب منحنی‌های تنش-کرنش

افزایش می‌یابد. بنابراین در هر فرکانس و دامنه‌ی کرنش ثابت و معین، با افزایش چگالی شار مغناطیسی، سختی معادل نمونه‌ی MRE نیز افزایش خواهد یافت.

با بررسی تاثیر افزایش یا کاهش فرکانس ورودی بر نمونه‌ی MRE مشخص گردید که هم در حالت‌های در غیاب میدان و هم در حالت‌های در حضور میدان مغناطیسی، افزایش فرکانس ورودی در یک دامنه‌ی کرنش و چگالی شار ثابت و معین، باعث مقداری افزایش در شیب منحنی‌ها و به تبع آن باعث افزایش در سختی معادل نمونه‌ی MRE خواهد شد. همچنین در تمامی حالت‌ها، با افزایش فرکانس ورودی در یک دامنه‌ی کرنش و چگالی شار ثابت، سطح محصور در منحنی افزایش می‌یابد که به معنای افزایش انرژی اتلافی یا دمپ شده در هر سیکل با افزایش فرکانس ورودی خواهد بود.

برای بررسی تاثیر افزایش یا کاهش دامنه‌ی کرنش ورودی بر نمونه‌ی MRE، منحنی‌های تنش-کرنش را در فرکانس و چگالی شار ثابت و تحت دامنه‌های کرنش مختلف مورد بررسی قرار دادیم و این نتیجه حاصل شد که با افزایش مقدار دامنه‌ی کرنش در فرکانس و چگالی شار ثابت، شیب منحنی‌های تنش-کرنش کاهش می‌یابد که این به معنای کاهش سختی معادل نمونه‌ی MRE با افزایش دامنه‌ی کرنش است یا به اصطلاح، الاستومرهای مگنتورئولوژیکال تحت بارگذاری کششی-فشاری رفتار کرنش-نرم‌شونده یا Strain-Softening از خود نشان می‌دهند. از طرف دیگر، با افزایش دامنه‌ی کرنش سطح محصور در منحنی‌های هیستریزیس و به تبع آن مقدار انرژی اتلافی در هر سیکل افزایش خواهد یافت. در بخش بعدی به بررسی تغییرات مدول ذخیره‌ای یا  $E'$  و مدول اتلافی یا  $E''$  با تغییر در چگالی شار مغناطیسی اعمالی به نمونه، فرکانس ورودی و دامنه‌ی کرنش پرداختیم. نتایج حاصله نشان می‌دهند که مقادیر هر دو مدول  $E'$  و  $E''$  با افزایش شدت میدان مغناطیسی و همچنین با افزایش فرکانس ورودی، افزایش خواهند یافت. همچنین در مورد تاثیر افزایش دامنه‌ی کرنش بر دو مدول  $E'$  و  $E''$  مشخص شده است که مقدار  $E'$  با افزایش دامنه‌ی کرنش کاهش خواهد یافت ولی مقدار  $E''$  رابطه‌ی ثابت و مشخصی با دامنه‌ی کرنش ورودی ندارد.

در مبحث مدل‌سازی، برای پیش‌بینی و توجیه رفتار MRE تحت بارگذاری کششی-فشاری، مدلی از قسم مدل‌های تعمیم‌یافته‌ی مکسول ارائه شد که متشکل است از دو المان مکسول با پارامترهای منحصر به فرد که به صورت موازی به یکدیگر و یک المان فنری بسته شده‌اند. سپس با بکارگیری الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک و الگوریتم دیگری که در محیط نرم‌افزار متلب طراحی نمودیم، پارامترهای مجهول مدل در شرایط بارگذاری گوناگون بدست آمدند. مدل ارائه شده دارای ۱۲ پارامتر ثابت قابل استفاده در تمامی حالت‌های بارگذاری با دامنه‌ی بیش از ۱ درصد می‌باشد. بررسی انجام شده روی نتایج مدل و مقایسه‌ی این نتایج با نتایج بدست آمده از داده‌های آزمایشگاهی حاصل از تست کشش-فشار MRE نشان از تطابق مناسب مدل با رفتار واقعی نمونه‌ی الاستومر مگنتورئولوژیکال دارد چرا که درصد تطابق نتایج مدل با نتایج تست در حالت‌های مختلف بارگذاری، به طور میانگین در حدود ۹۲٪ بوده است. بخصوص در دامنه‌های کرنش ۰.۱٪ و ۰.۲٪ که درصد تطابق در اکثر موارد بیش از ۹۵٪ می‌باشد. بنابراین و با توجه به آن که الاستومرهای مگنتورئولوژیکال در اکثر کاربردهای صنعتی تنها تحت درصدهای کرنش پایین قرار می‌گیرند، مدل ارائه شده در این پژوهش، کارآمد، مناسب، کاربردی و حداقل امکان ساده ارزیابی می‌شود که می‌تواند پاسخ‌گوی نیاز به شناخت و پیش‌بینی رفتار این مواد پیچیده و هوشمند باشد.



## ۳-۴ پیشنهادها و چالش‌های آینده

- بررسی رفتار MRE در دامنه‌های کرنش بالا و میدان‌های مغناطیسی شدیدتر و فرکانس بالاتر
- بررسی خواص و رفتار MRE در مدهای ترکیبی برشی و نرمال
- مطالعه‌ی تاثیر سایر عوامل خارجی از قبیل دما، اصطکاک و خستگی بر عملکرد MRE
- ارائه‌ی مدل‌های غیرخطی برای توجیه رفتار MRE در دامنه‌های کرنش بالا
- بکارگیری MRE در کاربردهای جدید
- بهبود خواص و اثر مگنتورئولوژیکال در MRE با ایجاد تغییرات در مواد اولیه و فرآیند ساخت
- طراحی مدارها و استراتژی‌های کنترلی مناسب برای ابزارها و ضربه‌گیرهای شامل MRE
- طراحی سیم‌پیچ و پیکربندی مناسب و بهینه برای کاربردهای مختلف MRE



## پیوست‌ها

جدول آ-۱ درصد تطابق مدل با نتایج آزمایشگاهی در حالت های بارگذاری مختلف

Frequency (Hz)	a=1%	a=2%	a=4%	a=8%
<i>Magnetic flux density(0 mT)</i>				
1	98.42	97.15	94.70	89.03
3	98.04	97.10	92.01	88.47
5	95.23	92.65	92.77	87.75
8	92.19	94.16	93.03	86.72
<i>Magnetic flux density(100 mT)</i>				
1	98.60	96.94	94.35	87.87
3	93.34	97.24	94.62	87.28
5	95.22	95.18	93.05	86.57
8	94.02	95.35	91.32	86.69
<i>Magnetic flux density(170 mT)</i>				
1	98.52	92.01	89.92	85.54
3	92.02	93.03	91.58	85.28
5	94.24	93.83	91.65	85.06
8	94.46	94.03	92.22	84.97
<i>Magnetic flux density(220 mT)</i>				
1	97.18	91.71	93.91	82.04
3	93.25	92.01	90.22	82.62
5	94.76	93.24	89.11	82.38
8	95.71	91.78	89.23	81.63
<i>Magnetic flux density(260 mT)</i>				
1	97.39	95.68	90.38	80.85
3	94.51	95.37	91.88	80.71
5	94.73	93.67	90.70	80.64
8	94.45	92.01	91.19	81.64

جدول آ-۲ نمونه ای از نتایج ثبت شده قبل از نویزگیری از داده ها در تست کشش-فشار MRE

B=170 mT , F=5 Hz

	$\epsilon=1\%$	A=0.14 mm			$\epsilon=2\%$	A=0.27 mm	
Time (s)	Strain (%)	Dis (mm)	Force (N)	Time (s)	Strain (%)	Dis (mm)	Force (N)
0	-0/6666667	-0/09	-8/5	0	-1/4074074	-0/19	-31/36
0/00098	-0/6666667	-0/09	-7/98	0/00098	-1/4814815	-0/2	-32/14
0/00195	-0/6666667	-0/09	-7/44	0/00195	-1/6296296	-0/22	-32/84
0/00293	-0/6666667	-0/09	-6/9	0/00293	-1/5555556	-0/21	-33/45
0/00391	-0/5185185	-0/07	-6/28	0/00391	-1/6296296	-0/22	-34/06
0/00488	-0/5185185	-0/07	-5/6	0/00488	-1/7037037	-0/23	-34/63
0/00586	-0/4444444	-0/06	-4/97	0/00586	-1/7037037	-0/23	-34/99
0/00684	-0/4444444	-0/06	-4/37	0/00684	-1/6296296	-0/22	-35/38
0/00781	-0/4444444	-0/06	-3/73	0/00781	-1/7777778	-0/24	-35/68
0/00879	-0/4444444	-0/06	-3/12	0/00879	-1/7037037	-0/23	-35/87
0/00977	-0/3703704	-0/05	-2/55	0/00977	-1/8518519	-0/25	-35/96
0/01074	-0/3703704	-0/05	-2/01	0/01074	-1/9259259	-0/26	-36/1
0/01172	-0/2962963	-0/04	-1/48	0/01172	-2	-0/27	-36/16
0/0127	-0/2222222	-0/03	-0/95	0/0127	-1/9259259	-0/26	-36/07
0/01367	-0/1481481	-0/02	-0/43	0/01367	-2	-0/27	-36/06
0/01465	-0/2222222	-0/03	0	0/01465	-1/8518519	-0/25	-35/99
0/01563	-0/1481481	-0/02	0/47	0/01563	-1/8518519	-0/25	-35/91
0/0166	-0/1481481	-0/02	0/87	0/0166	-2	-0/27	-35/85
0/01758	-0/2222222	-0/03	1/34	0/01758	-2	-0/27	-35/82
0/01855	-0/0740741	-0/01	1/88	0/01855	-2/0740741	-0/28	-35/78
0/01953	0/07407407	0/01	2/38	0/01953	-2/0740741	-0/28	-35/74
0/02051	-0/0740741	-0/01	3	0/02051	-2	-0/27	-35/65
0/02148	0/07407407	0/01	3/59	0/02148	-2/0740741	-0/28	-35/53
0/02246	0/07407407	0/01	4/2	0/02246	-2	-0/27	-35/35
0/02344	-0/0740741	-0/01	4/87	0/02344	-2	-0/27	-35/19
0/02441	0/07407407	0/01	5/56	0/02441	-2	-0/27	-34/95
0/02539	0/07407407	0/01	6/27	0/02539	-2/0740741	-0/28	-34/63
0/02637	0/07407407	0/01	6/98	0/02637	-2/1481481	-0/29	-34/38
0/02734	0/22222222	0/03	7/73	0/02734	-2	-0/27	-33/95
0/02832	0/14814815	0/02	8/38	0/02832	-2	-0/27	-33/44
0/0293	0/37037037	0/05	9/03	0/0293	-1/9259259	-0/26	-32/97
0/03027	0/2962963	0/04	9/61	0/03027	-1/9259259	-0/26	-32/43
0/03125	0/2962963	0/04	10/11	0/03125	-1/9259259	-0/26	-31/83

0/03223	0/37037037	0/05	10/59		0/03223	-2	-0/27	-31/26
0/0332	0/37037037	0/05	11/08		0/0332	-2/0740741	-0/28	-30/7
0/03418	0/37037037	0/05	11/42		0/03418	-2	-0/27	-30/08
0/03516	0/51851852	0/07	11/78		0/03516	-2	-0/27	-29/46
0/03613	0/59259259	0/08	12/12		0/03613	-1/9259259	-0/26	-28/89
0/03711	0/51851852	0/07	12/41		0/03711	-1/8518519	-0/25	-28/3
0/03809	0/51851852	0/07	12/7		0/03809	-1/9259259	-0/26	-27/69
0/03906	0/66666667	0/09	13/12		0/03906	-1/8518519	-0/25	-27/07
0/04004	0/59259259	0/08	13/49		0/04004	-1/8518519	-0/25	-26/48
0/04102	0/66666667	0/09	13/81		0/04102	-1/8518519	-0/25	-25/78
0/04199	0/66666667	0/09	14/21		0/04199	-1/8518519	-0/25	-25/13
0/04297	0/74074074	0/1	14/7		0/04297	-1/7037037	-0/23	-24/4
0/04395	0/66666667	0/09	15/02		0/04395	-1/6296296	-0/22	-23/64
0/04492	0/74074074	0/1	15/49		0/04492	-1/6296296	-0/22	-22/82
0/0459	0/74074074	0/1	15/99		0/0459	-1/6296296	-0/22	-21/93
0/04688	0/81481481	0/11	16/4		0/04688	-1/6296296	-0/22	-20/96
0/04785	0/74074074	0/1	16/76		0/04785	-1/6296296	-0/22	-19/99
0/04883	0/88888889	0/12	17/21		0/04883	-1/6296296	-0/22	-19/01
0/0498	0/88888889	0/12	17/47		0/0498	-1/5555556	-0/21	-17/89
0/05078	0/88888889	0/12	17/72		0/05078	-1/4814815	-0/2	-16/75
0/05176	0/88888889	0/12	17/93		0/05176	-1/3333333	-0/18	-15/62
0/05273	0/96296296	0/13	18/11		0/05273	-1/2592593	-0/17	-14/44
0/05371	0/96296296	0/13	18/17		0/05371	-1/2592593	-0/17	-13/28
0/05469	1/03703704	0/14	18/27		0/05469	-1/2592593	-0/17	-12/21
0/05566	1/03703704	0/14	18/29		0/05566	-1/2592593	-0/17	-11/16
0/05664	1/11111111	0/15	18/26		0/05664	-1/1111111	-0/15	-10/02
0/05762	1/03703704	0/14	18/24		0/05762	-1/037037	-0/14	-9/08
0/05859	1/03703704	0/14	18/22		0/05859	-0/962963	-0/13	-8/11
0/05957	1/03703704	0/14	18/15		0/05957	-0/962963	-0/13	-7/12
0/06055	1/11111111	0/15	18/19		0/06055	-0/8888889	-0/12	-6/19
0/06152	1/03703704	0/14	18/17		0/06152	-0/8148148	-0/11	-5/26
0/0625	1/18518519	0/16	18/2		0/0625	-0/8888889	-0/12	-4/34
0/06348	1/18518519	0/16	18/25		0/06348	-0/7407407	-0/1	-3/41
0/06445	1/11111111	0/15	18/26		0/06445	-0/6666667	-0/09	-2/42
0/06543	1/11111111	0/15	18/24		0/06543	-0/5185185	-0/07	-1/36
0/06641	1/11111111	0/15	18/3		0/06641	-0/4444444	-0/06	-0/32
0/06738	1/03703704	0/14	18/36		0/06738	-0/3703704	-0/05	0/79
0/06836	1/03703704	0/14	18/38		0/06836	-0/3703704	-0/05	1/9
0/06934	1/11111111	0/15	18/36		0/06934	-0/2962963	-0/04	3/02
0/07031	1/25925926	0/17	18/35		0/07031	-0/2962963	-0/04	4/17
0/07129	1/11111111	0/15	18/19		0/07129	-0/1481481	-0/02	5/37
0/07227	1/25925926	0/17	18/06		0/07227	-0/2962963	-0/04	6/48
0/07324	1/11111111	0/15	17/88		0/07324	-0/1481481	-0/02	7/61
0/07422	1/03703704	0/14	17/61		0/07422	-0/0740741	-0/01	8/68

0/0752	1/03703704	0/14	17/29		0/0752	0/07407407	0/01	9/76
0/07617	1/11111111	0/15	17/06		0/07617	0/14814815	0/02	10/73
0/07715	1/18518519	0/16	16/81		0/07715	0/14814815	0/02	11/65
0/07813	1/18518519	0/16	16/51		0/07813	0/14814815	0/02	12/51
0/0791	1/25925926	0/17	16/25		0/0791	0/2962963	0/04	13/38
0/08008	1/18518519	0/16	15/99		0/08008	0/22222222	0/03	14/22
0/08105	1/03703704	0/14	15/62		0/08105	0/37037037	0/05	15/07
0/08203	1/11111111	0/15	15/39		0/08203	0/51851852	0/07	15/88
0/08301	1/11111111	0/15	15/14		0/08301	0/51851852	0/07	16/68
0/08398	1/11111111	0/15	14/91		0/08398	0/59259259	0/08	17/48
0/08496	1/11111111	0/15	14/69		0/08496	0/74074074	0/1	18/34
0/08594	1/18518519	0/16	14/55		0/08594	0/81481481	0/11	19/12
0/08691	1/03703704	0/14	14/22		0/08691	0/81481481	0/11	19/93
0/08789	1/11111111	0/15	13/93		0/08789	0/88888889	0/12	20/76
0/08887	1/03703704	0/14	13/63		0/08887	0/81481481	0/11	21/57
0/08984	0/96296296	0/13	13/27		0/08984	1/11111111	0/15	22/42
0/09082	0/96296296	0/13	12/85		0/09082	1/18518519	0/16	23/23
0/0918	1/03703704	0/14	12/44		0/0918	1/03703704	0/14	24/02
0/09277	0/96296296	0/13	11/98		0/09277	1/18518519	0/16	24/77
0/09375	1/03703704	0/14	11/41		0/09375	1/18518519	0/16	25/39
0/09473	1/03703704	0/14	10/88		0/09473	1/25925926	0/17	26/04
0/0957	0/88888889	0/12	10/23		0/0957	1/33333333	0/18	26/64
0/09668	0/74074074	0/1	9/56		0/09668	1/33333333	0/18	27/13
0/09766	0/74074074	0/1	8/97		0/09766	1/40740741	0/19	27/6
0/09863	0/81481481	0/11	8/38		0/09863	1/40740741	0/19	27/96
0/09961	0/81481481	0/11	7/74		0/09961	1/48148148	0/2	28/23
0/10059	0/81481481	0/11	7/24		0/10059	1/55555556	0/21	28/57
0/10156	0/74074074	0/1	6/73		0/10156	1/62962963	0/22	28/85
0/10254	0/74074074	0/1	6/15		0/10254	1/48148148	0/2	29/02
0/10352	0/74074074	0/1	5/67		0/10352	1/7037037	0/23	29/29
0/10449	0/74074074	0/1	5/17		0/10449	1/7037037	0/23	29/51
0/10547	0/66666667	0/09	4/57		0/10547	1/7037037	0/23	29/72
0/10645	0/59259259	0/08	4/09		0/10645	1/85185185	0/25	30/08
0/10742	0/59259259	0/08	3/55		0/10742	1/85185185	0/25	30/35
0/1084	0/51851852	0/07	2/98		0/1084	1/85185185	0/25	30/61
0/10938	0/59259259	0/08	2/46		0/10938	1/92592593	0/26	30/92
0/11035	0/44444444	0/06	1/88		0/11035	1/92592593	0/26	31/23
0/11133	0/37037037	0/05	1/25		0/11133	1/85185185	0/25	31/48
0/1123	0/51851852	0/07	0/64		0/1123	2	0/27	31/74
0/11328	0/37037037	0/05	-0/03		0/11328	1/92592593	0/26	31/98
0/11426	0/37037037	0/05	-0/73		0/11426	2	0/27	32/13
0/11523	0/2962963	0/04	-1/41		0/11523	2	0/27	32/26
0/11621	0/2962963	0/04	-2/13		0/11621	2/07407407	0/28	32/37

0/11719	0/14814815	0/02	-2/85		0/11719	2/14814815	0/29	32/38
0/11816	0/14814815	0/02	-3/49		0/11816	2/07407407	0/28	32/28
0/11914	0/14814815	0/02	-4/13		0/11914	2/07407407	0/28	32/16
0/12012	0/14814815	0/02	-4/77		0/12012	2/14814815	0/29	32/01
0/12109	0/14814815	0/02	-5/28		0/12109	2/14814815	0/29	31/83
0/12207	0/14814815	0/02	-5/83		0/12207	2/07407407	0/28	31/7
0/12305	0/07407407	0/01	-6/36		0/12305	2/14814815	0/29	31/44
0/12402	0	0	-6/83		0/12402	2/07407407	0/28	31/24
0/125	-0/0740741	-0/01	-7/29		0/125	2/22222222	0/3	31/1
0/12598	-0/0740741	-0/01	-7/72		0/12598	2/14814815	0/29	30/84
0/12695	-0/0740741	-0/01	-8/12		0/12695	2/14814815	0/29	30/59
0/12793	-0/1481481	-0/02	-8/55		0/12793	2/14814815	0/29	30/36
0/12891	-0/0740741	-0/01	-8/93		0/12891	2/14814815	0/29	30/08
0/12988	-0/1481481	-0/02	-9/39		0/12988	2/14814815	0/29	29/72
0/13086	-0/1481481	-0/02	-9/88		0/13086	2/14814815	0/29	29/46
0/13184	-0/2222222	-0/03	-10/45		0/13184	2/14814815	0/29	29/19
0/13281	-0/2962963	-0/04	-11		0/13281	2/22222222	0/3	28/78
0/13379	-0/2222222	-0/03	-11/54		0/13379	2/14814815	0/29	28/39
0/13477	-0/2222222	-0/03	-12/16		0/13477	2/14814815	0/29	27/92
0/13574	-0/2962963	-0/04	-12/78		0/13574	2/07407407	0/28	27/37
0/13672	-0/3703704	-0/05	-13/38		0/13672	2/07407407	0/28	26/87
0/1377	-0/4444444	-0/06	-14/03		0/1377	2	0/27	26/22
0/13867	-0/4444444	-0/06	-14/6		0/13867	2	0/27	25/5
0/13965	-0/5185185	-0/07	-15/12		0/13965	1/92592593	0/26	24/8
0/14063	-0/5925926	-0/08	-15/61		0/14063	1/92592593	0/26	24/05
0/1416	-0/5185185	-0/07	-16/03		0/1416	1/92592593	0/26	23/3
0/14258	-0/5185185	-0/07	-16/35		0/14258	1/92592593	0/26	22/51
0/14355	-0/4444444	-0/06	-16/68		0/14355	1/85185185	0/25	21/72
0/14453	-0/6666667	-0/09	-16/97		0/14453	1/77777778	0/24	20/92
0/14551	-0/6666667	-0/09	-17/2		0/14551	1/77777778	0/24	20/12
0/14648	-0/7407407	-0/1	-17/41		0/14648	1/7037037	0/23	19/39
0/14746	-0/7407407	-0/1	-17/56		0/14746	1/7037037	0/23	18/61
0/14844	-0/7407407	-0/1	-17/68		0/14844	1/77777778	0/24	17/89
0/14941	-0/7407407	-0/1	-17/84		0/14941	1/62962963	0/22	17/11
0/15039	-0/7407407	-0/1	-18		0/15039	1/62962963	0/22	16/33
0/15137	-0/6666667	-0/09	-18/1		0/15137	1/48148148	0/2	15/48
0/15234	-0/8148148	-0/11	-18/35		0/15234	1/48148148	0/2	14/67
0/15332	-0/8888889	-0/12	-18/56		0/15332	1/40740741	0/19	13/8
0/1543	-0/8888889	-0/12	-18/79		0/1543	1/48148148	0/2	12/92
0/15527	-0/8888889	-0/12	-19/04		0/15527	1/33333333	0/18	11/94
0/15625	-0/8888889	-0/12	-19/21		0/15625	1/33333333	0/18	10/94
0/15723	-0/8888889	-0/12	-19/38		0/15723	1/33333333	0/18	9/85
0/1582	-0/8888889	-0/12	-19/56		0/1582	1/18518519	0/16	8/74
0/15918	-0/8888889	-0/12	-19/71		0/15918	1/18518519	0/16	7/61

0/16016	-0/8888889	-0/12	-19/77	0/16016	1/03703704	0/14	6/45
0/16113	-1/037037	-0/14	-19/88	0/16113	1/03703704	0/14	5/37
0/16211	-1/037037	-0/14	-19/92	0/16211	0/96296296	0/13	4/24
0/16309	-0/962963	-0/13	-19/86	0/16309	0/96296296	0/13	3/1
0/16406	-0/962963	-0/13	-19/83	0/16406	0/96296296	0/13	1/98
0/16504	-0/962963	-0/13	-19/75	0/16504	0/81481481	0/11	0/87
0/16602	-0/962963	-0/13	-19/67	0/16602	0/66666667	0/09	-0/2
0/16699	-0/962963	-0/13	-19/55	0/16699	0/66666667	0/09	-1/17
0/16797	-0/962963	-0/13	-19/47	0/16797	0/66666667	0/09	-2/18
0/16895	-1/1111111	-0/15	-19/36	0/16895	0/44444444	0/06	-3/15
0/16992	-1/1111111	-0/15	-19/3	0/16992	0/51851852	0/07	-3/99
0/1709	-1/037037	-0/14	-19/2	0/1709	0/37037037	0/05	-4/92
0/17188	-1/037037	-0/14	-19/14	0/17188	0/2962963	0/04	-5/86
0/17285	-0/962963	-0/13	-19/12	0/17285	0/2962963	0/04	-6/7
0/17383	-1/037037	-0/14	-19/06	0/17383	0/22222222	0/03	-7/69
0/1748	-1/1111111	-0/15	-19/08	0/1748	0/14814815	0/02	-8/69
0/17578	-1/037037	-0/14	-18/98	0/17578	0	0	-9/58
0/17676	-1/037037	-0/14	-18/96	0/17676	0	0	-10/66
0/17773	-1/1111111	-0/15	-18/87	0/17773	-0/0740741	-0/01	-11/72
0/17871	-1/037037	-0/14	-18/74	0/17871	0	0	-12/77
0/17969	-1/1851852	-0/16	-18/6	0/17969	-0/2222222	-0/03	-13/9
0/18066	-1/037037	-0/14	-18/34	0/18066	-0/2222222	-0/03	-14/98
0/18164	-0/962963	-0/13	-18/08	0/18164	-0/2962963	-0/04	-16/04
0/18262	-1/037037	-0/14	-17/77	0/18262	-0/44444444	-0/06	-17/18
0/18359	-1/037037	-0/14	-17/4	0/18359	-0/44444444	-0/06	-18/23
0/18457	-1/1111111	-0/15	-17/01	0/18457	-0/5185185	-0/07	-19/17
0/18555	-1/037037	-0/14	-16/49	0/18555	-0/5185185	-0/07	-20/1
0/18652	-0/962963	-0/13	-16/01	0/18652	-0/6666667	-0/09	-21/05
0/1875	-0/962963	-0/13	-15/56	0/1875	-0/6666667	-0/09	-21/83
0/18848	-0/962963	-0/13	-15/02	0/18848	-0/8148148	-0/11	-22/62
0/18945	-0/962963	-0/13	-14/6	0/18945	-0/8888889	-0/12	-23/46
0/19043	-0/962963	-0/13	-14/15	0/19043	-0/8888889	-0/12	-24/09
0/19141	-0/962963	-0/13	-13/74	0/19141	-1/037037	-0/14	-24/77
0/19238	-0/8888889	-0/12	-13/32	0/19238	-1/037037	-0/14	-25/48
0/19336	-0/8888889	-0/12	-12/97	0/19336	-1/037037	-0/14	-26/12
0/19434	-0/8888889	-0/12	-12/55	0/19434	-1/1111111	-0/15	-26/81
0/19531	-0/8148148	-0/11	-12/12	0/19531	-1/1111111	-0/15	-27/54
0/19629	-0/8148148	-0/11	-11/72	0/19629	-1/1851852	-0/16	-28/28
0/19727	-0/8148148	-0/11	-11/23	0/19727	-1/2592593	-0/17	-28/97
0/19824	-0/7407407	-0/1	-10/74	0/19824	-1/4074074	-0/19	-29/8
0/19922	-0/6666667	-0/09	-10/18	0/19922	-1/4074074	-0/19	-30/55
0/2002	-0/7407407	-0/1	-9/61	0/2002	-1/4814815	-0/2	-31/27



جدول آ-۳ نمونه ای از نتایج ثبت شده قبل از نوبزگیری از داده ها در تست کشش-فشار MRE

B=260 mT , F=8 Hz

	$\epsilon=4\%$	A=0.50 mm			$\epsilon=8\%$	A=1.00 mm	
Time (s)	Strain (%)	Dis (mm)	Force (N)	Time (s)	Strain (%)	Dis (mm)	Force (N)
0	-3/6	-0/45	-62/54	0	-8/72	-1/09	-198/49
0/00098	-3/44	-0/43	-57/84	0/00098	-8/64	-1/08	-194/47
0/00195	-3/28	-0/41	-53/04	0/00195	-8/72	-1/09	-189/96
0/00293	-3/28	-0/41	-48/21	0/00293	-8/72	-1/09	-184/75
0/00391	-2/96	-0/37	-43/26	0/00391	-8/64	-1/08	-178/96
0/00488	-2/96	-0/37	-38/35	0/00488	-8/48	-1/06	-172/72
0/00586	-2/64	-0/33	-33/28	0/00586	-8/32	-1/04	-165/99
0/00684	-2/48	-0/31	-28/2	0/00684	-8/24	-1/03	-158/73
0/00781	-2/4	-0/3	-23/11	0/00781	-8/08	-1/01	-150/96
0/00879	-2/32	-0/29	-17/97	0/00879	-7/92	-0/99	-142/88
0/00977	-2/16	-0/27	-12/85	0/00977	-7/76	-0/97	-134/49
0/01074	-1/92	-0/24	-7/68	0/01074	-7/52	-0/94	-125/62
0/01172	-1/76	-0/22	-2/6	0/01172	-7/44	-0/93	-116/52
0/0127	-1/52	-0/19	2/52	0/0127	-7/12	-0/89	-107/27
0/01367	-1/28	-0/16	7/58	0/01367	-6/96	-0/87	-97/84
0/01465	-1/12	-0/14	12/48	0/01465	-6/64	-0/83	-88/09
0/01563	-0/96	-0/12	17/35	0/01563	-6/4	-0/8	-78/36
0/0166	-0/64	-0/08	22/1	0/0166	-6	-0/75	-68/72
0/01758	-0/48	-0/06	26/71	0/01758	-5/68	-0/71	-59/02
0/01855	-0/24	-0/03	31/14	0/01855	-5/2	-0/65	-49/3
0/01953	0	0	35/42	0/01953	-4/96	-0/62	-39/86
0/02051	0/16	0/02	39/53	0/02051	-4/56	-0/57	-30/64
0/02148	0/48	0/06	43/51	0/02148	-4/24	-0/53	-21/53
0/02246	0/64	0/08	47/32	0/02246	-3/76	-0/47	-12/64
0/02344	0/8	0/1	50/99	0/02344	-3/36	-0/42	-4/1
0/02441	1/12	0/14	54/5	0/02441	-2/96	-0/37	4/25
0/02539	1/36	0/17	57/88	0/02539	-2/64	-0/33	12/38
0/02637	1/52	0/19	61/13	0/02637	-2/24	-0/28	20/26
0/02734	1/84	0/23	64/28	0/02734	-1/84	-0/23	27/87
0/02832	2	0/25	67/28	0/02832	-1/44	-0/18	35/27
0/0293	2/08	0/26	70/07	0/0293	-0/96	-0/12	42/5
0/03027	2/4	0/3	72/81	0/03027	-0/56	-0/07	49/43

0/03125	2/56	0/32	75/28		0/03125	-0/08	-0/01	56/14
0/03223	2/72	0/34	77/7		0/03223	0/4	0/05	62/61
0/0332	2/88	0/36	79/94		0/0332	0/8	0/1	68/85
0/03418	3/04	0/38	81/86		0/03418	1/36	0/17	74/85
0/03516	3/28	0/41	83/67		0/03516	1/68	0/21	80/56
0/03613	3/36	0/42	85/27		0/03613	2/08	0/26	85/96
0/03711	3/44	0/43	86/61		0/03711	2/56	0/32	91/05
0/03809	3/6	0/45	87/67		0/03809	2/96	0/37	95/86
0/03906	3/68	0/46	88/51		0/03906	3/36	0/42	100/3
0/04004	3/92	0/49	89/18		0/04004	3/68	0/46	104/35
0/04102	3/92	0/49	89/58		0/04102	4/24	0/53	108/2
0/04199	4/16	0/52	89/76		0/04199	4/56	0/57	111/69
0/04297	4/08	0/51	89/71		0/04297	4/96	0/62	114/72
0/04395	4/24	0/53	89/59		0/04395	5/36	0/67	117/61
0/04492	4/32	0/54	89/3		0/04492	5/76	0/72	120/2
0/0459	4/32	0/54	88/79		0/0459	6/16	0/77	122/46
0/04688	4/4	0/55	88/24		0/04688	6/48	0/81	124/47
0/04785	4/4	0/55	87/46		0/04785	6/8	0/85	126/27
0/04883	4/56	0/57	86/63		0/04883	7/04	0/88	127/82
0/0498	4/48	0/56	85/53		0/0498	7/28	0/91	129/14
0/05078	4/48	0/56	84/39		0/05078	7/6	0/95	130/27
0/05176	4/56	0/57	83/06		0/05176	7/76	0/97	131/19
0/05273	4/48	0/56	81/45		0/05273	7/92	0/99	131/86
0/05371	4/48	0/56	79/73		0/05371	8/08	1/01	132/36
0/05469	4/4	0/55	77/87		0/05469	8/24	1/03	132/62
0/05566	4/48	0/56	75/79		0/05566	8/48	1/06	132/64
0/05664	4/32	0/54	73/42		0/05664	8/56	1/07	132/46
0/05762	4/16	0/52	70/89		0/05762	8/72	1/09	131/92
0/05859	4/16	0/52	68/21		0/05859	8/8	1/1	131/16
0/05957	4	0/5	65/33		0/05957	8/96	1/12	130/13
0/06055	3/92	0/49	62/22		0/06055	8/96	1/12	128/68
0/06152	3/76	0/47	58/91		0/06152	9/04	1/13	126/9
0/0625	3/68	0/46	55/57		0/0625	9/12	1/14	124/95
0/06348	3/52	0/44	52/07		0/06348	9/04	1/13	122/6
0/06445	3/44	0/43	48/45		0/06445	8/88	1/11	119/88
0/06543	3/28	0/41	44/77		0/06543	8/8	1/1	117/01
0/06641	3/12	0/39	41		0/06641	8/8	1/1	113/94
0/06738	2/96	0/37	37/2		0/06738	8/72	1/09	110/59
0/06836	2/88	0/36	33/32		0/06836	8/56	1/07	106/96
0/06934	2/72	0/34	29/43		0/06934	8/4	1/05	103/26
0/07031	2/48	0/31	25/46		0/07031	8/32	1/04	99/35
0/07129	2/4	0/3	21/42		0/07129	8/24	1/03	95/2
0/07227	2/32	0/29	17/39		0/07227	8	1	90/81

0/07324	2	0/25	13/24		0/07324	7/76	0/97	86/36
0/07422	1/92	0/24	9/06		0/07422	7/6	0/95	81/67
0/0752	1/6	0/2	4/74		0/0752	7/36	0/92	76/71
0/07617	1/44	0/18	0/34		0/07617	7/12	0/89	71/56
0/07715	1/2	0/15	-4/17		0/07715	6/88	0/86	66/29
0/07813	1/04	0/13	-8/76		0/07813	6/48	0/81	60/81
0/0791	0/72	0/09	-13/41		0/0791	6/16	0/77	54/96
0/08008	0/56	0/07	-18/16		0/08008	5/84	0/73	48/96
0/08105	0/32	0/04	-22/99		0/08105	5/44	0/68	42/81
0/08203	0/08	0/01	-27/86		0/08203	5/12	0/64	36/34
0/08301	-0/08	-0/01	-32/67		0/08301	4/88	0/61	29/74
0/08398	-0/32	-0/04	-37/55		0/08398	4/48	0/56	22/86
0/08496	-0/56	-0/07	-42/32		0/08496	4	0/5	15/83
0/08594	-0/8	-0/1	-47/11		0/08594	3/68	0/46	8/58
0/08691	-0/96	-0/12	-51/79		0/08691	3/28	0/41	1/21
0/08789	-1/2	-0/15	-56/31		0/08789	2/8	0/35	-6/36
0/08887	-1/36	-0/17	-60/75		0/08887	2/48	0/31	-14/02
0/08984	-1/6	-0/2	-65		0/08984	2/08	0/26	-21/88
0/09082	-1/68	-0/21	-69/17		0/09082	1/52	0/19	-29/85
0/0918	-1/92	-0/24	-73/12		0/0918	1/12	0/14	-37/87
0/09277	-2	-0/25	-76/92		0/09277	0/64	0/08	-45/98
0/09375	-2/32	-0/29	-80/59		0/09375	0/24	0/03	-54/16
0/09473	-2/48	-0/31	-84/07		0/09473	-0/16	-0/02	-62/34
0/0957	-2/64	-0/33	-87/42		0/0957	-0/72	-0/09	-70/53
0/09668	-2/8	-0/35	-90/63		0/09668	-1/12	-0/14	-78/76
0/09766	-2/96	-0/37	-93/65		0/09766	-1/6	-0/2	-86/97
0/09863	-3/2	-0/4	-96/56		0/09863	-1/92	-0/24	-95/16
0/09961	-3/2	-0/4	-99/25		0/09961	-2/32	-0/29	-103/32
0/10059	-3/36	-0/42	-101/77		0/10059	-2/8	-0/35	-111/44
0/10156	-3/44	-0/43	-104/17		0/10156	-3/12	-0/39	-119/44
0/10254	-3/6	-0/45	-106/21		0/10254	-3/6	-0/45	-127/32
0/10352	-3/84	-0/48	-108/04		0/10352	-4/08	-0/51	-135/09
0/10449	-3/92	-0/49	-109/59		0/10449	-4/4	-0/55	-142/64
0/10547	-3/92	-0/49	-110/73		0/10547	-4/64	-0/58	-149/89
0/10645	-4/08	-0/51	-111/47		0/10645	-5/12	-0/64	-156/92
0/10742	-4/16	-0/52	-111/9		0/10742	-5/44	-0/68	-163/59
0/1084	-4/24	-0/53	-111/91		0/1084	-5/84	-0/73	-169/88
0/10938	-4/24	-0/53	-111/52		0/10938	-6/16	-0/77	-175/79
0/11035	-4/32	-0/54	-110/62		0/11035	-6/48	-0/81	-181/28
0/11133	-4/32	-0/54	-109/31		0/11133	-6/72	-0/84	-186/27
0/1123	-4/4	-0/55	-107/71		0/1123	-7/04	-0/88	-190/8
0/11328	-4/4	-0/55	-105/67		0/11328	-7/2	-0/9	-194/8
0/11426	-4/48	-0/56	-103/27		0/11426	-7/44	-0/93	-198/32
0/11523	-4/4	-0/55	-100/49		0/11523	-7/76	-0/97	-201/39

<b>0/11621</b>	-4/32	-0/54	-97/53		0/11621	-7/92	-0/99	-203/78
<b>0/11719</b>	-4/32	-0/54	-94/29		0/11719	-8	-1	-205/67
<b>0/11816</b>	-4/24	-0/53	-90/77		0/11816	-8/16	-1/02	-207/05
<b>0/11914</b>	-4/16	-0/52	-87/08		0/11914	-8/4	-1/05	-207/78
<b>0/12012</b>	-4	-0/5	-83/28		0/12012	-8/48	-1/06	-207/85
<b>0/12109</b>	-4	-0/5	-79/3		0/12109	-8/56	-1/07	-207/29
<b>0/12207</b>	-3/92	-0/49	-75/21		0/12207	-8/64	-1/08	-206/15
<b>0/12305</b>	-3/84	-0/48	-71/02		0/12305	-8/72	-1/09	-204/19
<b>0/12402</b>	-3/6	-0/45	-66/65		0/12402	-8/64	-1/08	-201/56
<b>0/125</b>	-3/52	-0/44	-62/11		0/125	-8/8	-1/1	-198/32

## منابع

- [1] Carlson J.D., Jolly M.R., 2000, MR fluid, foam and elastomer devices, **Mechatronics v10, pp555–6.**
- [2] Chen L., Gong X., Li W., 2007, Microstructures and viscoelastic properties of anisotropic magnetorheological elastomers, **Smart Mater. Struct. v16, pp2645–9.**
- [3] Fiske, T. J., Gokturk, H. S., Kalyon, D. M., 1997, Percolation in magnetic composites, **Journal of Materials Science, v32, pp. 5551-5560.**
- [4] Popp K., Kroger M., Li W., Zhang X., Kosasih P., 2010, MRE properties under shear and squeeze modes and applications, **J. Intell. Mater. Syst. Struct. v21, pp1471–7.**
- [5] Rabinow J., 1948, Magnetic Fluid Clutch, **National Bureau of Standards Technical News Bulletin v32, pp54–60.**
- [6] Klingenberg D.J., 2001, Magnetorheology: applications and challenges, **AIChE J. v47(2), pp246–249.**
- [7] Rabinow J., 1951, Magnetic fluid torque and force transmitting device, **US Patent 2,575,360.**
- [8] Rigbi Z., Jilken L., 1983, The response of an elastomer filled with soft ferrite to mechanical and magnetic influences, **J. Magnetism Magnetic Mater. v37, pp267–76.**
- [9] Heinonen J., 2006, **Preliminary Study of Modelling Dynamic Properties of Magnetorheological Fluid Damper**, VTT publications, p36.
- [10] Shiga T., Okada A., Kurauchi T., 1993, Elastoviscoelastic effect of a polymer blends consisting of silicon elastomer and semiconducting polymer particles, **Macromolecules 26 6958–63.**
- [11] Jolly M.R., Carlson J. D., Munoz B.C., Bullions T.A., 1996, The magneto viscoelastic response of elastomer composites consisting of ferrous particles embedded in a polymer matrix, **J. Intell. Mater. Syst. Struct. v7, pp613–22.**
- [12] Bica I., 2006, Advances in magnetorheological suspension: production and properties, **J. Ind. Eng.Chem. 12(4), 501–515.**

- [13] Collette C., Kroll G., Saive G., Guillemier V., Avraam M., Preumont A., 2009, Isolation and damping properties of magnetorheologic elastomers, **J. Phys.: Conf. Ser.** **149**, 012091.
- [14] Kallio M., 2005, PhD. Thesis, "The Elastic and Damping Properties of Magnetorheological Elastomers", Tampere University of Technology, Finland.
- [15] Wu J., Gong X., Fan Y., Xia H., 2010, Anisotropic polyurethane magnetorheological elastomer prepared through in situ polycondensation under a magnetic field, **Smart Mater. Struct.** **19** 105007.
- [16] Ying Z.G., Ni Y.Q., Sajjadi M., 2013, Nonlinear dynamic characteristics of magnetorheological visco-elastomers, **Sci China Tech Sci** **56**, pp878–883.
- [17] Stepanov G.V., Abramchuk S.S., Grishin D.A., Nikitin L.V., Kramarenko E.Y., Khokhlov A.R., 2007, Effect of a homogeneous magnetic field on the viscoelastic behavior of magnetic elastomers, **Polymer** **48** pp488–95.
- [18] Leblanc J.L., 2002, Rubber-filler interactions and rheological properties in filled compounds, **Progress in Polymer Sci.** **27** pp627–87.
- [19] Munoz B.C., Jolly M.R., 2001, Composites with field responsive rheology Performance of Plastics, **Smart Materials and Structures** pp553–74.
- [20] Lokander M., Stenberg B., 2003, Performance of isotropic magnetorheological rubber materials, **Polym. Test.** **22** pp245–51.
- [21] Shen Y., Golnaraghi M.F., Heppler G.R., 2004, Experimental research and modeling of magnetorheological elastomers, **J. Intell. Mater. Syst. Struct.** **15**.
- [22] Tian T.F., Li W.H., Alici G., Du H., Deng M.Y., 2011, Microstructure and magnetorheology of graphite-based MR elastomers, **Rheol. Acta** **50** pp825–36.
- [23] Liao G.J., Gong X.L., Xuan S.H., Kang C.J., Zong L.H., 2012, Development of a real-time tunable stiffness and damping vibration isolator based on magnetorheological elastomer, **J. Intell. Mater. Syst. Struct.** **23** pp25–33.
- [24] Li W.H., Zhang X.Z., Du H., 2013, Magnetorheological elastomers and their applications, **Adv. Struct. Mater.** **11** pp357–74.
- [25] Ginder J.M., Scholoter W.F., Nichols M.E., 2001, Magnetorheological elastomers in tunable vibration absorbers, **Proc. SPIE** **4331** pp103–10.
- [26] Li W.H., Nakano M., 2013, Fabrication and characterization of PDMS based magnetorheological elastomers, **Smart Mater. Struct.** **22** 055035.

- [27] Li Y., Li J., Li W., Samali B., 2013, Development and characterization of a magnetorheological elastomer based adaptive seismic isolator, **Smart Mater. Struct.** **22**, **035005**, pp12-24.
- [28] Wang J., Meng G., 2001, Magnetorheological fluid devices: principles, characteristics and applications in mechanical engineering, **Proc. Inst. Mech. Eng. L J. Mater. Des. Appl.** **215** pp165–74.
- [29] Goncalves F.D., Carlson J.D., 2009, An alternate operation mode for MR fluids magnetic gradient pinch, **J. Phys.: Conf. Ser.** **149** 012050.
- [30] Ginder J.M., Nichols M.E., Elie L.D., Clark S.M., 2000, Controllable-stiffness components based on magnetorheological elastomers, **Smart Structures and Material 2000: Smart Structures and Integrated Systems, Proc. SPIE 3985**, pp 418–25.
- [31] Martin J.E., Anderson R.A., Odinek J., Adolf D., Williamson J., 2003, Controlling percolation in fieldstructured particle composites: observations of giant thermoresistance, piezoresistance and chemiresistance, **Phys. Rev. B** **67** 094207.
- [32] Böse H., Rabindranath R., Ehrlich J., 2012, Soft magnetorheological elastomers as new actuators for valves, **J. Intell. Mater. Syst. Struct.** **23** pp989–94.
- [33] Hu G., Guo M., Li W., Du H., Alici G., 2011, Experimental investigation of the vibration characteristics of a magnetorheological elastomer sandwich beam under non-homogeneous small magnetic fields, **Smart Mater. Struct.** **20(12)**, pp1–7.
- [34] Kavlicoglu B., Wallis B., Sahin H., Liu Y., 2011, Magnetorheological elastomer mount for shock and vibration isolation, **Journal of Mechanical Science and Technology**, v26, pp2523-34.
- [35] Ubaidillah, Sutrisno J., Purwanto A., Mazlan S.A., 2014, Recent Progress on Magnetorheological Solids: Materials, Fabrication, Testing, **Advanced Engineering Materials**, Vol. 903, pp 279-284.
- [36] Zhou Y., 2009, M.S. Thesis, "MR elastomers for structural control ", Faculty of Engineering, University of Wollongong.
- [37] Nagarajaiah S., 2006, Nonlinear seismic response spectra of smart sliding isolated structures with independently variable MR dampers and variable stiffness SAIVS system, **Struct. Eng. Mech.** **24(3)**, pp375–393.
- [38] Eem S.H., Jung H.J., Koo J.H., 2011, Application of MR elastomers for improving seismic protection of seismic protection of base-isolated structure, **IEEE Trans. Magn.** **47(10)**.

- [39] Eem S.H., Jung H.J., Koo J.H., 2013, Seismic performance evaluation of an MR elastomer-based smart base isolation system using real-time hybrid simulation, **Smart Mater. Struct.** **22**, 055003, pp10-27.
- [40] Gudmundsson, I., 2011, M.S. Thesis, "A Feasibility Study of Magnetorheological Elastomers for a Potential Application in Prosthetic Devices", Faculty of Industrial Engineering, Mechanical Engineering and Computer, University of Iceland.
- [41] Ruddy C., Ahearne E., Byrne G., 2012, A review of magnetorheological elastomers: properties and applications, **Advanced Manufacturing Science (AMS) Research vol 20** p289-67.
- [42] Kallio M., Lindroos, T., Aalto S., Jarvinen E., Karna T., Meinander T., 2007, Dynamic compression testing of a tunable spring element consisting of a magnetorheological elastomer, **Smart Mater. Struct.**, **16**, p506.
- [43] Lokander M., Stenberg B., 2003, Improving magnetorheological effect in isotropic magnetorheological rubber materials, **Polym. Test.** **22** pp677–80.
- [44] Jolly M.R., Carlson J.D., Munoz B.C., 1996, A model of the behaviour of magnetorheological materials, **Smart Mater. Struct.** **5** pp607–14.
- [45] Ginder J.M., Clark S.M., Schlotter W.F., Nichols M.E., 2002, Magnetostrictive phenomena in magnetorheological elastomers, **Int. J Mod. Phys. B** **16** 2412–8.
- [46] Zhou G.Y., 2003, Shear properties of magnetorheological elastomers, **Smart Mater. Struct.** **12** pp139–46.
- [47] Shiga T., Okada A., Kurauchi T., 1995, Magnetroviscoelastic behavior of composite gels, **J. Appl. Polym. Sci.** **58** pp787–92.
- [48] Davis L.C., 1999, Model of magnetorheological elastomers, **J. Appl. Phys.** **v85** pp3348–51.
- [49] Farshad M., Benine A., 2004, Magnetoactive elastomer composites, **Polym. Test.** **v23** pp347–53.
- [50] Liao G., Gong X., Shouhu X., 2013, Magnetic Field-Induced Compressive Property of Magnetorheological Elastomer under High Strain Rate, **Industrial & Engineering Chemistry Research**, **v52**, pp8445-8453.
- [51] Zheng X., Yang C., Fu J., Yu M., 2014, A new magnetorheological elastomer isolator in shear-compression mixed mode, **2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)**, Wollongong, Australia.



- [52] Li, W.H., Zhou Y., Tian T.F., 2010, Viscoelastic properties of MR elastomers under harmonic loading, **Rheologica Acta**, v49 7 pp733-740.
- [53] Eem, S.H., Jung H.J., Koo J.H., 2012, Modeling of magneto-rheological elastomers for harmonic shear deformation, **Magnetics, IEEE Transactions on**, v48 11 pp3080-3083.
- [54] Chen L., Jerrams S., 2011, A Rheological model of the dynamic behavior of magnetorheological elastomers, **Journal of Applied Physics**, v110 p1.
- [55] Yang J., Du H., Li W., Li Y., Li J., 2013, Experimental study and modeling of a novel magnetorheological elastomer isolator, **Smart Materials and Structures**, v22 p11.
- [56] Behrooz M., Wang X., Gordaninejad F., 2014, Performance of a new magnetorheological elastomer isolation system, **Smart Materials and Structures**, v23 4 p045014.
- [57] Li Y., Li J., Tian T., Li W., 2013, A highly adjustable magnetorheological elastomer base isolator for applications of real-time adaptive control., **Smart Materials and Structures**, v22 9 p095020.
- [58] 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, **6th World Conference on Structural Control and Monitoring, IASCM**.
- [59] Brown R., 2006, **Physical Testing of Rubber**, vol. 1, Springer Science, united states of America, pp. 177.
- [60] Steffe J.F., 1996, **Rheological Methods in Food Process Engineering**, vol.1, Michigan State University, USA, pp.255-376.
- [61] Bird R.B., Armstrong R.C., Hassager O., 1987, **Dynamics of polymeric liquids**, vol.1, 2ed, John Wiley & Sons. Inc, Canada, pp128-149.
- [62] Tanner R.I., Walters K., 1998, **Rheology:An Historical Perspective**, Elsevier Science, Netherlands, pp145-162.
- [63] Petrie C.J.S., 1985, **Elongational Flows**, Chem. Engr. Commun., London, pp179-254.
- [64] Goldberg D., 1989, **Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning**, Addison-Wesley, Reading, MA.

- 
- [65] Holland H., 1993, **Adaptation in Natural and Artificial System**, Second ed., MIT Press, Cambridge, MA.
- [66] Mohammadian M., Stonier R.J., 1995, **Fuzzy logic and genetic algorithms for intelligent control and obstacle avoidance**, Complexity International, v2.
- [67] Jansen, L.M. and Dyke, S.J., 2000, Semiactive Control Strategies for MR Dampers: Comparative Study, **Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 126, No. 8, pp795-803.**
- [68] Jeong H.K., 2003, Using Magneto-Rheological Damper in Semi-active Tuned Vibration Absorbers to Control Structural Vibrations, thesis presented to University of Blacksburg, Virginia, in partial fulfillment of the requirement for the degree of Doctor of Philosophy.
- [69] Hrovat D., Barak P., Rabins M., 1983, Semi-active versus passive or active tuned mass damper for structural control, **ASCE, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 190, No. 3, 1983, pp691-705.**
- [70] Padmavathi G., Mandan M.G., Mitrab S.P., Chaudhuria K.K., 2005, Neural modelling of Mooney viscosity of polybutadiene rubber, **Computers and Chemical Engineering 29, pp1677–1685.**
- [71] Jones D.R., 2001, A taxonomy of global optimization methods based on response surfaces, **Journal of Global Optimization 21, pp345–383.**
- [72] Devos O., Duponchel L., 2011, Parallel genetic algorithm co-optimization of spectral pre-processing and wavelength selection for PLS regression, **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems 107, pp50–58.**

## **Abstract**

Characterization and modeling of the performance of magnetorheological elastomer is the purpose of this study. Magnetorheological elastomer or MRE is a smart viscoelastic material with variable rheological properties. By use of experimental data that has done at different loading conditions such as 1, 3, 5 and 8 Hz of input frequency and 0, 100, 170, 220 and 260 mTesla of magnetic flux density and 1, 2, 4 and 8 percent of strain amplitude, the reaction of the material under different condition is studied. Removing noise from experimental data is done by use of wavelet transform at MATLAB software. The dynamic characterization of magnetorheological elastomer is experimentally explored at various input conditions of normal tests and the input condition dependencies of storage modulus and loss modulus of sample has explored. A generalized Maxwell viscoelastic model is improved to explain the relationships between normal stress and strain of magnetorheological elastomers based on input frequency, strain amplitude, and magnetic flux density. The coefficients of the model under various input conditions, such as magnetic flux density, strain amplitude and input frequency, are calculated by using genetic algorithm. Finally, comparisons between the proposed model and experimental data are discussed, and the results proves the success of phenomenological model in describing the behavior of magnetorheological elastomers under tensile-compressive loadings, very well. The presented model is useful to simulate the performances of magnetorheological elastomer base devices under normal small strain loadings.

## **Keywords:**

Magnetorheological elastomer, magnetorheological effect, generalized maxwell model, genetic algorithm





**Shahrood University of Technology**

**Faculty of Mechanic Engineering**

**Characterization and Modeling of Magnetorheological Elastomer  
under Compressive-Tensile Loadings**

**Mehdi Gilani**

**Supervisor:**

**Dr Mahmood Norouzi**

**Advisor:**

**Dr Seyed Masoud Sajjadi Alehashem**

**2016**