

# بررسی تاثیر پیش‌کرنش استاتیکی بر مدول دینامیکی و رفتار تنش-کرنش الاستومر

## مگنتورئولوژیکال همسانگرد تحت بارگذاری دینامیکی کشنی-فشاری

امیر مسعود علیمردان<sup>۱</sup>، محمود نوروزی<sup>۱\*</sup>، مجتبی قطعی<sup>۲</sup>، محمدحسین ایزدی‌فردا<sup>۱</sup>، امیرحسین یعقوبی<sup>۱</sup>

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شهرود، شهرود، ایران، [mnorouzi@shahroodut.ac.ir](mailto:mnorouzi@shahroodut.ac.ir)

۲- دانشکده مهندسی شیمی و مواد، دانشگاه صنعتی شهرود، شهرود، ایران

### چکیده

امروزه، با توجه به حرکت صنایع در مسیر هوشمندسازی، استفاده از مواد هوشمند در صنعت به طور پیوسته در حال گسترش است. الاستومرهای مگنتورئولوژیکال، از جمله مواد هوشمندی هستند که به دلیل داشتن دو ویژگی مهم یعنی سفتی و میرابی قابل تنظیم، دارای کاربردهای فراوانی در صنعت شده اند. با توجه به این مهم، شناخت رفتار و عملکرد این مواد در سیستم‌های مختلف یک امر ضروری می‌باشد. در این پژوهش، با ساخت الاستومرهای مگنتورئولوژیکال و انجام آزمایش کشنی-فشار تحت مقادیر مختلفی از فرکانس، کرنش، چگالی شار مغناطیسی و پیش‌کرنش بر روی آنها، به بررسی رفتار این مواد و تحلیل اثر پیش‌کرنش بر مدول دینامیکی و رفتار تنش-کرنش آنها و مدلسازی این رفتار پرداخته می‌شود. ارزیابی اثر پیش‌کرنش بر مدول دینامیکی و رفتار تنش-کرنش، بررسی اثر پارامترهای دیگری چون فرکانس، کرنش و چگالی شار مغناطیسی بر پاسخ دینامیکی این مواد، و ارائه یک مدل جدید با لحاظ کردن اثر پیش‌کرنش برای پیش‌بینی رفتار آنها در شرایط بارگذاری مختلف، از نوآوری‌های مهم این پژوهش به شمار می‌آیند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهند که اعمال پیش‌کرنش، باعث افزایش مدول دینامیکی در کلیه حالت‌های بارگذاری می‌شود. علاوه بر آن، مقدار اثر مگنتورئولوژیکال نسبی با اعمال پیش‌کرنش کمتر شده و بیشترین اثر مگنتورئولوژیکال نسبی به میزان  $288/32\%$  در کرنش  $7$  هرتز و بدون اعمال پیش‌کرنش ایجاد می‌شود.

### کلمات کلیدی

الاستومر مگنتورئولوژیکال، پیش‌کرنش استاتیکی، مدول دینامیکی، تنش-کرنش، الگوریتم ژنتیک.

مواد هوشمند دسته‌ای از مواد هستند که عموماً خواص مادی آنها تحت تاثیر محرك‌های خارجی (اعم از جریان الکتریکی، کرنش مکانیکی، میدان مغناطیسی و دما) تغییر می‌باید [۱]. مواد مگنتورئولوژیکال، دسته بزرگی از مواد هوشمند را تشکیل می‌دهند که نسبت به تحریک مغناطیسی خارجی، واکنش نشان می‌دهند و می‌توان خواص رئولوژیکی آنها را با اعمال میدان مغناطیسی، بطور سریع و برگشت‌پذیر کنترل کرد [۴-۲]. سیالات و الاستومرهای مگنتورئولوژیکال، دو دسته اصلی از مواد مگنتورئولوژیکال به حساب می‌آیند. الاستومرهای مگنتورئولوژیکال از قرارگیری ذرات مغناطیسی‌شونده در یک ماتریس الاستومری یا لاستیکی تشکیل می‌شوند و به دو گروه همسانگرد و ناهمسانگرد تقسیم‌بندی می‌شوند. ساخت این دو گروه از الاستومرهای مگنتورئولوژیکال، بستگی به حضور و عدم حضور چگالی شار مغناطیسی در حین فرایند پخت دارد [۵]. این مواد در رده مواد یوسکوالاستیک دسته‌بندی می‌شوند و در آنها، تنفس هم به کرنش و هم به نرخ کرنش وابسته است [۶]. با قرار دادن این مواد تحت چگالی شار مغناطیسی، ذرات مغناطیسی‌شونده موجود در آنها در راستای خطوط چگالی شار، جابه‌جا شده و تشکیل زنجیره می‌دهند و به اینصورت، باعث تغییر خواص رئولوژیکی ماده می‌شوند [۷]. در سال‌های اخیر، دو ویژگی منحصر به فرد الاستومرهای مگنتورئولوژیکال یعنی سفتی و میرایی قابل تنظیم آنها، باعث استفاده چشمگیر این مواد در کاربردهای مختلف مهندسی شده است. با استفاده از این مواد، می‌توان ارتعاشات مکانیکی را کنترل و جذب نمود و یا خصوصیات ارتعاشی سیستم‌ها نظیر فرکانس‌های داخلی را متناسب با ورودی‌ها تغییر داد. امزوه، با توجه به حرکت صنایع در مسیر هوشمندسازی، استفاده از مواد هوشمند و به خصوص مواد مگنتورئولوژیکال در صنعت و سیستم‌های مهندسی به طور پیوسته در حال گسترش است. با توجه به این مهم، شناخت رفتار این مواد و نحوه عملکردشان در سیستم‌های مختلف، یک امر ضروری و مهم می‌باشد.

تحقیقات در زمینه مواد مگنتورئولوژیکال، نخستین بار در سال ۱۹۴۸ میلادی توسط رابینو<sup>۱</sup> [۸] با مطالعه بر روی کلاچ سیال مگنتورئولوژیکال آغاز شد. پس از آن، ریگی<sup>۲</sup> و همکاران [۹] در سال ۱۹۸۳ میلادی برای اولین بار الاستومرهای مگنتورئولوژیکال را معرفی کردند و بر روی رفتار آنها تحت تنفس‌های الاستیک و میدان‌های مغناطیسی مختلف تحقیق کردند. یک دهه بعد، شیگا<sup>۳</sup> و همکاران [۱۰] اثر الکتروویوسکوالاستیک الاستومرهای سیلیکونی و دارای ذرات نیمه هادی را تحت تاثیر میدان الکتریکی بررسی کردند. اولین تحقیق جامع بر روی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال در سال ۱۹۹۶ میلادی توسط ژولی<sup>۴</sup> و همکاران [۱۱] انجام گردید و منجر به ارائه یک مدل دو قطبی شباهستاتیکی برای تحلیل تغییرات مدول الاستومر شد. بلوم<sup>۵</sup> و همکاران [۱۲] با انجام تست‌های برشی بر روی الاستومرهای حساس به میدان مغناطیسی در فرکانس‌های بالا دریافتند که با افزایش چگالی شار مغناطیسی، مدول ذخیره برشی افزایش پیدا می‌کند و مدول اتلاف برشی کاهش می‌باید. شیگا و همکاران [۱۳] نشان دادند وقتی مقدار کرنش بیشتر از ۱ درصد شود، مدول ذخیره برشی کاهش می‌باید. جو<sup>۶</sup> و همکاران [۱۴] با پژوهش بر روی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال متخلخل، افزایش ۱۷۰ درصدی سفتی در چگالی شار مغناطیسی ۶۰۰ میلی تسلا را ثبت کردند. درگاهی<sup>۷</sup> و همکاران [۱۵] با انجام پژوهش بر روی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال همسانگرد نشان دادند که در چگالی شار مغناطیسی ۴۵۰ میلی تسلا، فرکانس ۰/۱ هرتز و کرنش ۲/۵ درصد، مدول ذخیره برشی ۱۶۷۲ درصد افزایش می‌باید، درحالیکه در فرکانس ۵۰ هرتز و کرنش ۲۰ درصد، مدول ذخیره برشی ۲۵۲ درصد افزایش می‌باید. در رابطه با بررسی اثر عامل شکل و ضخامت نمونه‌های الاستومر بر روی خواص مکانیکی و رئولوژیکی آنها، وطن دوست<sup>۸</sup> و همکاران [۱۶] با انجام تست کشش-پشار تحت پیش‌کرنش ثابت ۲۱ درصد و مقادیر مختلفی از کرنش، چگالی شار مغناطیسی و فرکانس بر روی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال همسانگرد و ناهمسانگرد که دارای عامل شکل ۰/۳۷۵، ۰/۰۵۶ و ۰/۰۷۵ و

<sup>1</sup> Rabinow

<sup>2</sup> Rigbi

<sup>3</sup> Shiga

<sup>4</sup> Jolly

<sup>5</sup> Blom

<sup>6</sup> Ju

<sup>7</sup> Dargahi

<sup>8</sup> Vatandoost

درصد حجمی‌های متفاوتی از پودر آهن کربونیل (۱۵ و ۳۰ درصد) بودند، گزارش کردند که با افزایش عامل شکل، مقدار مدول ذخیره و مدول اتلاف همه نمونه‌های همسانگرد و ناهمسانگرد افزایش می‌یابد. یعقوبی<sup>۱</sup> و همکاران [۱۷] با انجام تست کشش-فشار تحت مقادیر مختلفی از کرنش، چگالی شار مغناطیسی و فرکانس بر روی الاستومرهای همسانگرد که دارای نسبت ابعادی  $0.268/0.321$  و  $0.405/0.539$  بودند، گزارش کردند که با کاهش نسبت ابعادی، مقدار مدول ذخیره افزایش می‌یابد و مقدار مدول اتلاف تغییر چندانی نمی‌کند. گردانی نژاد<sup>۲</sup> و همکاران [۱۸] با انجام تست کشش-فشار و تست برش بر روی چند نمونه الاستومر مگنتورولوژیکال ناهمسانگرد با ضخامت‌های مختلف ( $6/35$  تا  $25/4$  میلیمتر) و درصد وزنی‌های متفاوت از پودر آهن کربونیل (۳۰ تا ۷۰ درصد) که دارای سطح مقطع‌های دایروی و مستطیلی بودند، گزارش کردند که تغییرات در مدول یانگ و مدول برشی نمونه‌ها مستقل از تغییر ضخامت آنها بوده و تنها تابع درصد وزنی ذرات مغناطیسی‌شونده و میزان چگالی شار مغناطیسی‌های حین تست می‌باشد. در ارتباط با بررسی اثرات اندازه و جنس ذرات مغناطیسی‌شونده، جین<sup>۳</sup> و همکاران [۱۹] با ساخت الاستومرهای ناهمسانگرد از ذرات آهن با اندازه‌های  $5, 14, 38, 74$  و  $150$  میکرون و بررسی آنها در مدد برشی، گزارش کردند که مقدار اثر مگنتورولوژیکال با افزایش اندازه ذرات مغناطیسی‌شونده از  $5$  تا  $74$  میکرون، افزایش و از  $74$  تا  $150$  میکرون، کاهش می‌یابد. وو<sup>۴</sup> و همکاران [۲۰] با ساخت نمونه‌های الاستومر ناهمسانگرد از ذرات آهن کربونیل با اندازه‌های  $1, 7, 20, 30, 40, 50$  و  $60$  درصد و بررسی آنها تحت تست فشار استاتیک و شبه استاتیک، گزارش کردند که مقدار اثر مگنتورولوژیکال با افزایش اندازه ذرات مغناطیسی‌شونده از  $1/7$  تا  $4/6$  میکرون، افزایش و از  $4/6$  تا  $7/2$  میکرون، کاهش می‌یابد. پدلکا<sup>۵</sup> و همکاران [۲۱] با انجام پژوهش بر روی الاستومرهای مگنتورولوژیکال ناهمسانگردی که از ذرات مغناطیسی‌شونده متفاوت یعنی نانوسیم آهن، کپالت و نیکل ساخته شده بودند، گزارش کردند که در تمامی کرنش‌ها و چگالی شارهای مغناطیسی، بیشترین و کمترین مقادیر مدول ذخیره به ترتیب مربوط به نمونه‌های حاوی نیکل و آهن بودند. شی<sup>۶</sup> و همکاران [۲۲] با بررسی پایداری اکسیداسیون الاستومرهای ساخته شده از پودر آهن کربونیل و پودر فروسیلیس، گزارش کردند که نمونه‌های حاوی پودر فروسیلیس دارای پایداری اکسیداسیون بیشتری بودند. ژانگ<sup>۷</sup> و همکاران [۲۳] در پژوهش خود به بررسی جنس ماده ماتریس پرداختند و گزارش کردند که اثر مگنتورولوژیکال و خواص مکانیکی الاستومرهایی که از لاستیک طبیعی تشکیل شده‌اند بهتر از الاستومرهایی هستند که از لاستیک سیس-پلی‌بوتادین تشکیل شده‌اند. ندجار<sup>۸</sup> و همکاران [۲۴] با پژوهش بر روی الاستومرهای سیلیکونی، خواص مکانیکی و رئولوژیکی مناسب و داشتن ویسکوزیته پایین در هنگام پخش شدن ذرات مغناطیسی‌شونده را گزارش کردند. در خصوص بررسی اثر دما بر روی خواص مکانیکی و رئولوژیکی الاستومرهای مگنتورولوژیکال، وان<sup>۹</sup> و همکاران [۲۵] با بررسی اثر دما بر روی الاستومرهای ناهمسانگرد، گزارش کردند که مقدار مدول ذخیره فشاری با افزایش دما تا میزان  $50$  درجه سلسیوس، کاهش یافته و سپس با افزایش دما از  $50$  تا  $60$  درجه سلسیوس، افزایش می‌یابد. ژانگ و همکاران [۲۶] با بررسی اثر دما بر روی دو دسته از الاستومرهای ناهمسانگردی که ماتریس آنها از لاستیک طبیعی و لاستیک سیس-پلی‌بوتادین تشکیل شده بود، گزارش کردند که مدول ذخیره و اتلاف برشی در نمونه‌های مشکل از لاستیک سیس-پلی‌بوتادین با افزایش دما، کاهش می‌یابند؛ و در نمونه‌های متشکل از لاستیک طبیعی، با افزایش دما، این مدول‌ها ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابند. کو<sup>۱۰</sup> و همکاران [۲۷] با انجام تست کشش-فشار تحت پیش‌کرنش ثابت  $5$  درصد بر روی الاستومرهای مگنتورولوژیکال همسانگرد، نشان دادند که مقدار اثر مگنتورولوژیکال با افزایش فرکانس از  $1/1$  هرتز تا  $1$  هرتز افزایش می‌یابد.

<sup>1</sup> Yaghoobi

<sup>2</sup> Gordaninejad

<sup>3</sup> Jin

<sup>4</sup> Wu

<sup>5</sup> Padalka

<sup>6</sup> Shi

<sup>7</sup> Zhang

<sup>8</sup> Nedjar

<sup>9</sup> Wan

<sup>10</sup> Koo

مارتینز<sup>۱</sup> و همکاران [۲۸] با انجام تست کشش-فشار تحت پیشکرنش ثابت ۶/۵ درصد بر روی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال ناهمسانگرد، نشان دادند که مدول ذخیره و مدول اتلاف با افزایش چگالی شار مغناطیسی افزایش می‌یابند. وطن‌دوست و همکاران [۲۹] با انجام تست کشش-فشار تحت کرنش ثابت ۲/۵ درصد، چگالی شار مغناطیسی ۰ تا ۷۵۰ میلی‌تسلا، فرکانس ۱ تا ۳۰ هرتز و پیش‌کرنش ۱۱ و ۲۱ درصد بر روی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال همسانگرد و ناهمسانگرد که حاوی درصد حجمی‌های متفاوتی از پودر آهن کربونیل (۱۵، ۳۰ و ۴۵ درصد) بودند، نشان دادند که مقدار اثر مگنتورئولوژیکال نسبی مدول الاستیک<sup>۲</sup> برای نمونه‌های همسانگرد حاوی ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درصد پودر آهن کربونیل، در پیش‌کرنش ۶ درصد و به ترتیب در فرکانس‌های ۱۰، ۱۰ و ۱ هرتز بیشترین افزایش را خواهد داشت که میزان این افزایش به ترتیب ۲۸۶، ۹۷۳ و ۲۲۵۸ درصد است؛ و برای نمونه‌های ناهمسانگرد حاوی ۳۰ و ۴۵ درصد پودر آهن کربونیل نیز بیشترین میزان افزایش در پیش‌کرنش ۶ درصد و به ترتیب در فرکانس‌های ۲۰، ۲۰ و ۳۰ هرتز اتفاق می‌افتد که میزان آن به ترتیب ۳۲۰، ۲۹۳ و ۳۸۶ درصد است. در خصوص اثرات راستای زنجیره‌های آهنی (جهت ناهمسانگردی) بر روی خواص مکانیکی و رئولوژیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال نیز پژوهش‌های زیادی صورت گرفته است. زانگ و همکاران [۳۰] با انجام پژوهش بر روی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال ناهمسانگرد، ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه در مد برشی، گزارش کردند که هر چه زاویه بین راستای زنجیره‌های آهنی و افق بیشتر شود، مقدار مدول برشی و اثر مگنتورئولوژیکال بیشتر خواهد شد. تیان<sup>۳</sup> [۳۱] و همکاران با انجام تست برش خالص نوسانی تحت فرکانس ثابت ۰/۳ هرتز بر روی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال ناهمسانگرد ۴۵ درجه که حاوی درصد وزنی‌های متفاوتی از روغن سیلیکون (۰ و ۱۵ درصد) بودند، نشان دادند که مقدار مدول ذخیره و مدول اتلاف در چگالی شار مغناطیسی صفر<sup>۴</sup> و مقدار اثر مگنتورئولوژیکال ماکریزم<sup>۵</sup> مربوط به نمونه‌های ناهمسانگرد حاوی ۱۵ درصد روغن سیلیکون، به ترتیب کمتر و بیشتر از نمونه‌های بدون روغن سیلیکون بودند.

در رابطه با مدلسازی رفتار الاستومرهای مگنتورئولوژیکال نیز پژوهش‌های زیادی صورت گرفته است. به طور کلی، برای مدلسازی رفتار الاستومرهای مگنتورئولوژیکال دو دیدگاه وجود دارد: ۱- دیدگاه ریزساختاری (میکروسکوپی). ۲- دیدگاه ویسکوالاستیک (ماکروسکوپی). دیدگاه ریزساختاری، مبتنی بر بررسی میکروسکوپی برهmekنیش ذرات در الاستومرهای مگنتورئولوژیکال می‌باشد؛ در حالی که دیدگاه ویسکوالاستیک، مبتنی بر رابطه بین نیرو جابه‌جایی یا تنش-کرنش الاستومرهای مگنتورئولوژیکال در حالت‌های مختلف مخصوصاً حالت برشی و حالت کشش-فشار می‌باشد و شامل دو بخش ویسکوالاستیک و ریاضی-تجربی خواهد بود. این دیدگاه به دلیل قابلیت استفاده راحت‌تر و سریع‌تر در مدلسازی رفتار الاستومرهای مگنتورئولوژیکال، نسبت به دیدگاه ریزساختاری دارای کاربرد بیشتری می‌باشد. یکی از مدل‌های پایه جهت مدلسازی رفتار هیسترزیس، مدل بوخ-ون<sup>۶</sup> می‌باشد که از یک جزء بوخ-ون، یک المان فری و یک المان استهلاکی تشکیل می‌شود [۳۲]. زانگ<sup>۷</sup> و همکاران [۳۳] با بکارگیری جزء بوخ-ون، مدلی ارائه دادند و اثر پارامترهای مختلف مدل بر شکل حلقه هیسترزیس را تشریح کردند. لی<sup>۸</sup> و همکاران [۳۴] جهت پیش‌بینی رفتار دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال با موازی کردن یک المان فری با مدل سه پارامتری جامد استاندارد<sup>۹</sup>، یک مدل چهار ثابتne ویسکوالاستیک خطی ارائه دادند که ضرایب آن علاوه بر چگالی شار مغناطیسی،تابع کرنش نیز می‌باشند. ایم<sup>۱۰</sup> و همکاران [۳۵] یک مدل دو جزئی که از ترکیب موازی مدل رمبرگ-اسگود<sup>۱۱</sup> و مدل ماکسول<sup>۱۲</sup> تشکیل شده بود، ارائه کردند. بخش ماسکول این مدل،

<sup>1</sup> Martins

<sup>2</sup>  $MR_E$

<sup>3</sup> Tian

<sup>4</sup> Zero-field storage and loss modulus

<sup>5</sup> Maximum magnetorheological effect

<sup>6</sup> Bouc-Wen model

<sup>7</sup> Yang

<sup>8</sup> Li

<sup>9</sup> Three-parameter standard solid model

<sup>10</sup> Eem

<sup>11</sup> Ramberg-Osgood

<sup>12</sup> Maxwell

Riftar ویسکوالاستیک ماده و بخش رمبرگ-اسگود آن Riftar غیرخطی ماده را توجیه می‌کرد. یو<sup>۱</sup> و همکاران [۳۲] برای یک نمونه ایزولاتور(جداساز) ارتعاش الاستومر مگنتورئولوژیکال، یک مدل کرنش سختشونده<sup>۲</sup> ارائه دادند. این مدل، از موازی کردن یک المان ماسکول اصلاح شده - که شامل یک جزء کرنش سختشونده و یک جزء استهلاکی بود - با مدل سه پارامتری جامد استاندارد تشکیل شده بود. نوروزی<sup>۳</sup> و همکاران [۳۶] جهت مدل کردن داده‌های تجربی تنش-کرنش حاصل از تست الاستومرهای مگنتورئولوژیکال همسانگرد در حالت برشی، مدل گسترش یافته کلوین-ویت<sup>۴</sup> را ارائه دادند که ضرایب آن تابع چگالی شار مغناطیسی، فرکانس و کرنش بودند.

با مروری بر پژوهش‌های صورت گرفته تا به امروز، می‌توان دریافت که عموماً مطالعات پیشین، با در نظر گرفتن یک پیش‌کرنش ثابت به بررسی Riftar دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال پرداخته‌اند. اعمال پیش‌کرنش استاتیکی به نمونه‌های الاستومر می‌تواند باعث تغییر فاصله بین ذرات مغناطیسی‌شونده و برهم خوردن توزیع این ذرات در داخل ماتریس شود که این امر، باعث ایجاد تغییر در خواص رئولوژیکی و مکانیکی الاستومرها خواهد شد. در پژوهش حاضر، با ساخت الاستومرهای مگنتورئولوژیکال همسانگرد و انجام آزمایش دینامیکی کشش-فشار بر روی آنها تحت مقادیر مختلفی از فرکانس تحریک (۱ تا ۷ هرتز)، درصد کرنش (۰٪ تا ۱۶٪)، چگالی شار مغناطیسی (۰ تا ۳۰۰ میلی تسل) و با اعمال پیش‌کرنش‌های فشاری مختلف (۱۱٪ و ۲۱٪)، به بررسی تجربی اثر پیش‌کرنش استاتیکی بر مدول ذخیره و اتلاف و Riftar تنش-کرنش الاستومرهای مگنتورئولوژیکال پرداخته خواهد شد. سپس، به مدل‌سازی داده‌های تنش-کرنش بر اساس دیدگاه ویسکوالاستیک (ماکروسکوپی) پرداخته می‌شود و یک مدل ویسکوالاستیک غیرخطی جامع با در نظر گرفتن اثر پیش‌کرنش استاتیکی برای توضیح Riftar این مواد تحت شرایط بارگذاری فوق ارائه خواهد گردید. به منظور ایجاد مدل، از مدل وطن‌دوست و همکاران [۳۷] به عنوان مدل پایه استفاده خواهد شد و در ادامه، ثابت پیش‌کرنش استاتیکی به مدل اضافه خواهد گردید و در انتهای، به اعتبارسنجی مدل ارائه شده پرداخته خواهد شد. نوآوری‌های مهم این پژوهش شامل موارد زیر می‌باشد:

- ارزیابی اثر پیش‌کرنش استاتیکی بر مدول ذخیره و اتلاف و Riftar تنش-کرنش الاستومرهای مگنتورئولوژیکال در حالت دینامیکی کشش-فشار.
- بررسی اثر پارامترهای دیگری چون فرکانس تحریک، درصد کرنش و چگالی شار مغناطیسی بر پاسخ دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال در حالت دینامیکی کشش-فشار.
- ارائه یک مدل جدید و جامع با در نظر گرفتن اثر پیش‌کرنش استاتیکی برای پیش‌بینی Riftar تنش-کرنش و مدول‌های دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال در مقادیر مختلفی از چگالی شار مغناطیسی، پیش‌کرنش استاتیکی، فرکانس و کرنش ورودی.

## ۲- مراحل آزمایش

### ۱- ساخت نمونه‌های الاستومر مگنتورئولوژیکال

الاستومرهای مگنتورئولوژیکال از سه قسمت اصلی ماتریس، ذرات مغناطیسی‌شونده و افزودنی، تشکیل می‌شوند و با توجه به نوع کاربرد، درصد وزنی این سه جزء مشخص می‌شود. در پژوهش حاضر، این سه جزء، به ترتیب پلیمر سیلیکون، پودر آهن کربونیل و روغن سیلیکون می‌باشند. با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته، مقدار مناسب ذرات مغناطیسی‌شونده جهت دستیابی به اثر مگنتورئولوژیکال مناسب در الاستومرهای ۷۰ درصد وزنی گزارش شده است [۳۸] و از این رو، مطابق با جدول ۱، برای رسیدن به

<sup>1</sup> Yu

<sup>2</sup> Strain stiffening model

<sup>3</sup> Norouzi

<sup>4</sup> Kelvin-Voigt

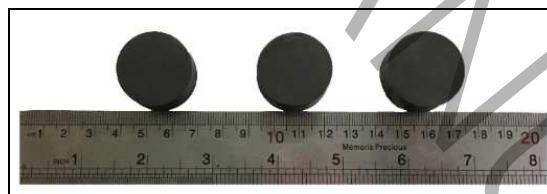
بهترین عملکرد از لحاظ افزایش سفتی در برابر چگالی شار مغناطیسی، مقدار درصد وزنی ذرات آهنی برای ساخت الاستومرها ۷۰ درصد وزنی در نظر گرفته شده است. درصد وزنی سایر اجزا نیز در این جدول آورده شده است.

جدول ۱: اجزاء تشکیل دهنده نمونه‌های الاستومر مگنتورئولوژیکال

Table 1. Constituent components of magnetorheological elastomer samples

مواد تشکیل دهنده	مشخصات	درصد وزنی
پودر آهن کربونیل <sup>۱</sup>	محصول شرکت بی‌ای‌اس‌اف کشور آلمان قطر متوسط ذرات برابر با ۵ میکرون	%۷۰
پلیمر سیلیکون	محصول شرکت پرفکت شیمی کشور ایران مدل آر‌تی‌وی ۲ - ۴۴۰۵	%۲۰
روغن سیلیکون	محصول شرکت سی‌سی کشور کره جنوبی ویسکوزیته برابر با ۱۰۰ سانتی استوکس	%۱۰

جهت ساخت نمونه‌ها، ابتدا پودر آهن کربونیل و روغن سیلیکون به مدت ۵ دقیقه با هم مخلوط می‌شوند [۳۷]. در ادامه پلیمر سیلیکون به میزان محاسبه شده به مخلوط اضافه شده و کل مواد به مدت ۱۰ دقیقه [۳۷] با یکدیگر هم زده می‌شوند. پس از آن، هاردنر یا همان جزء دوم پلیمر سیلیکون، مطابق با دستور شرکت سازنده، به مخلوط اضافه شده و مجدداً کل مواد به مدت دو دقیقه با هم مخلوط می‌گرددند. پس از اتمام فرآیند مخلوط شدن مواد، به دلیل به وجود آمدن حباب‌های هوا در هنگام هم زدن، فرآیند حباب زدایی انجام می‌شود و ظرف حاوی الاستومر برای مدت ۵ دقیقه تحت خلاء ۱- بار قرار می‌گیرد [۳۹]. پس از فرآیند حباب‌زدایی، الاستومر درون قالب ریخته شده و به مدت ۳۶ ساعت در دمای اتاق قرار می‌گیرد تا نمونه به طور کامل خشک شود. در نهایت، مطابق با استانداردهای ایزو ۷۷۴۳<sup>۲</sup> و ای‌اس‌تی‌ام دی ۳۹۵-۰۳<sup>۳</sup>، سه نمونه استوانه‌ای به قطر ۰/۵۲۹ ± ۰/۰۵ میلیمتر و ارتفاع ۰/۰۵ میلیمتر (عامل شکل ۱) جهت انجام تست دینامیکی کشش-فشار ساخته می‌شوند. شکل ۱ نمونه‌های الاستومر را پس از خشک شدن نشان می‌دهد.



شکل ۱: سه عدد نمونه الاستومر مگنتورئولوژیکال پس از خشک شدن

Figure 1. Three magnetorheological elastomer samples after curing

## ۲- پیکربندی آزمایش دینامیکی کشش-فشار

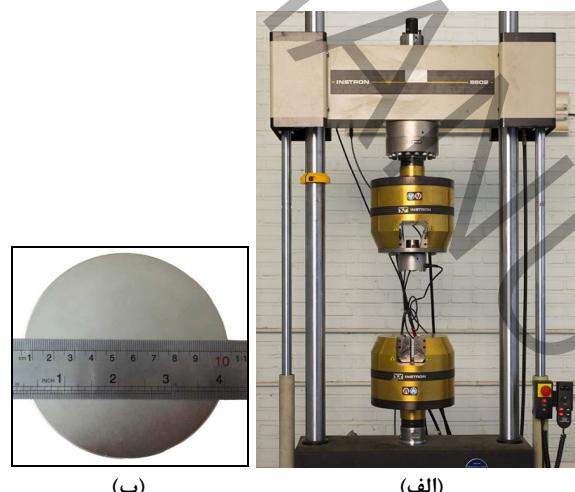
در این پژوهش، جهت انجام آزمایش دینامیکی کشش-فشار، مطابق شکل ۲(الف) از دستگاه سروهیدرولیک خستگی اینسترون مدل ۸۸۰۲ استفاده شده است. با توجه به این تصویر، این دستگاه شامل یک فک هیدرولیکی متحرک در پایین می‌باشد که مقادیر مختلفی از فرکانس تحریک و درصد کرنش را تولید می‌کند و دارای یک لوడسل در بالا می‌باشد که میزان نیروی وارد شده از طرف

<sup>1</sup> Carbonyl iron particles (CIPs)

<sup>2</sup> ISO 7743

<sup>3</sup> ASTM D395-03

نمونه را با دقت ۰.۰۱ نیوتون اندازه‌گیری می‌نماید. با استفاده از کنترلر این دستگاه می‌توان مقادیر ورودی اعم از میزان دامنه جایی (درصد کرنش)، نرخ جایه‌جایی (فرکانس)، میزان پیش‌کرنش، نوع شکل جایه‌جایی، تعداد سیکل و نرخ نمونه‌برداری را تعیین و به نمونه اعمال کرد. در این آزمایش، جهت بستن نمونه‌های الاستومر مگنتورئولوژیکال به دستگاه سروهیدرولیک، فیکسچرهایی از جنس فولاد نگیر و ضدزنگ ۱۳۱۶ ساخته شد تا چگالی شار مغناطیسی، بدون تضعیف بر روی نمونه‌ها اعمال شود. پس از اتصال نمونه‌ها به دستگاه، هر سه نمونه الاستومرها مگنتورئولوژیکال ساخته شده تحت بارگذاری دینامیکی کششی-فشاری و در مقادیر فرکانس‌های تحریک ۱، ۳، ۵ و ۷ هرتز، جایه‌جایی‌های اعمالی ۰/۰۵، ۱/۵ و ۲ میلیمتر (که درصد کرنش‌های معادل آن برای نمونه‌ها که دارای ارتفاع ۱۲/۵ میلیمتر هستند، به ترتیب برابر با ۰/۴، ۰/۸، ۰/۱۲ و ۰/۱۶٪ می‌شود)، چگالی شارهای مغناطیسی ۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌تسلا و پیش‌کرنش‌های فشاری ۰٪ و ۲۱٪ مورد آزمایش قرار گرفتند. با استفاده از فک هیدرولیکی دستگاه، مقادیر مختلف فرکانس تحریک و درصد کرنش تولید و به نمونه‌ها اعمال شد. برای اعمال پیش‌کرنش فشاری ۲۱٪ به نمونه‌ها نیز، فک پایینی دستگاه به میزان دامنه جایه‌جایی موردنظر (۲/۶۲۵ میلیمتر)، به طرف بالا حرکت داده شد تا نمونه‌ها به این میزان فشرده شوند. در این آزمایش، نوع شکل جایه‌جایی به صورت سینوسی و تعداد سیکل برابر با ۵۰ سیکل انتخاب گردید و نرخ نمونه‌برداری نیز بر روی ۵۰۰۰ هرتز تنظیم شد. همچنین، جهت تولید چگالی شار مغناطیسی در محل نمونه در حین انجام تست، از تعدادی آهنرباهای دائمی نئودیمیوم به قطر ۱۰۰ میلیمتر و ضخامت ۱۰ میلیمتر استفاده شد که تصویر یک نمونه از این آهنرباها در شکل ۲(ب) نمایش داده شده است. با تغییر تعداد آهنرباها در هر طرف نمونه، می‌توان چگالی شار مغناطیسی اعمال شده بر روی الاستومرها مگنتورئولوژیکال را تغییر داد. در این پژوهش، نحوه انجام آزمایش دینامیکی کشش-فشار و نحوه اعمال ورودی به نمونه‌ها مطابق با استاندارد ایزو ۲۱۰۸۴۶ صورت گرفت. در این استاندارد، نحوه بدست آوردن مشخصات دینامیکی قطعات ارجاعی مشخص شده است. روش انجام آزمایشات نیز بر اساس روش مستقیم استاندارد طراحی گردید. در این روش، اعمال ورودی به نمونه از سمت پایین، به صورت جایه‌جایی بوده و نیرویی که از طرف نمونه به لودسل اعمال می‌شود، خروجی موردنظر ما در سمت بالا می‌باشد. مشخصات دینامیکی نیز مطابق با این نیروها و جایه‌جایی‌ها استخراج شدند. پس از اتمام هر تست، تمامی جایه‌جایی‌ها و نیروهای متناظر با آنها که توسط لودسل اندازه‌گیری شده بودند، به همراه زمان و شماره سیکل آنها در یک فایل اکسل ذخیره شدند.



شکل ۲: (الف) دستگاه سروهیدرولیک خستگی اینسترون مدل ۸۸۰۲ و (ب) یک نمونه آهنربا نئودیمیوم مورد استفاده در آزمایش دینامیکی کشش-فشار

**Figure 2. (a) INSTRON 8802 servohydraulic fatigue testing system and (b) A permanent neodymium magnet (N42) used in the tension-compression dynamic test**

<sup>1</sup> Stainless steel 316

<sup>2</sup> ISO 10846

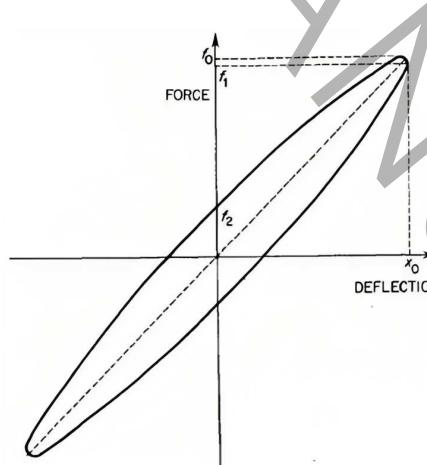
### ۳-۲- نتیجه‌گیری داده‌های آزمایش دینامیکی کشش-فشار

داده‌های اولیه و خام به دست آمده از آزمایش، به صورت نیرو بر حسب جابه‌جایی هستند. اگر نمودار نیرو-جابه‌جایی داده‌های به دست آمده ترسیم شوند، مسیری بیضی شکل به وجود می‌آید که به آن حلقه هیسترزیس می‌گویند. مساحت حلقه‌های هیسترزیس، بیانگر انرژی تلف شده در هر سیکل یا میرایی معادل و شبیه حلقه‌های هیسترزیس، بیانگر انرژی ذخیره شده در هر سیکل یا سفتی معادل می‌باشد. نمودارهای نیرو-جابه‌جایی ترسیم شده از روی داده‌های خام، دارای درجات مختلفی از نویز می‌باشند. برای حذف نویز این نمودارها، از دستور نرم کردن<sup>۱</sup> در نرم افزار متلب و روش میانگین متحرک استفاده می‌شود که یک نوع فیلتر پایین‌گذر است. پس از نویزگیری، باید عمل میانگین‌گیری بین داده‌ها انجام شود. از آنجایی که به منظور رعایت شرط تکرارپذیری، هر تست در هر یک از شرایط بارگذاری، بر روی سه نمونه الاستومر مشابه انجام شده است، جهت میانگین‌گیری، هر سه حلقه هیسترزیسی که در یک کرنش، فرکانس، چگالی شار و پیش‌کرنش، از هر یک از سه نمونه مشابه بدست آمده‌اند را ثبت کرده و سپس با استفاده از دستور درون یابی<sup>۲</sup> در نرم افزار متلب، بین این سه حلقه عمل میانگین‌گیری انجام می‌شود تا در نهایت، یک حلقه هیسترزیس نیرو-جابه‌جایی میانگین بدست آید. با بدست آمدن حلقه نیرو-جابه‌جایی میانگین، می‌توان به محاسبه مدول ذخیره و مدول اتلاف پرداخت. مدول ذخیره و مدول اتلاف به ترتیب معیارهایی برای سنجش میزان توانایی جسم در ذخیره‌سازی و اتلاف انرژی می‌باشند. در مواد ویسکوالاستیک، جهت بیان مدول مکانیکی، از مدول مختلط استفاده می‌شود که بخش حقیقی آن بیانگر مدول ذخیره می‌باشد که با نماد  $E'$  نمایش داده می‌شود و بخش موهومی آن بیانگر مدول اتلاف می‌باشد که با نماد  $E''$  نمایش داده می‌شود. در این تحقیق، جهت محاسبه این مدول‌های دینامیکی از روش راجر براون<sup>۳</sup> [۴۰] استفاده شده است. در این روش، مقادیر مدول‌های ذخیره ( $E'$ ) و مدول‌های اتلاف ( $E''$ ) از روی حلقه‌های نیرو-جابه‌جایی میانگین و از طریق روابط (۱) و (۲) بدست می‌آیند.

$$E' = \frac{f_1 h}{A x_0} \quad (1)$$

$$E'' = \frac{f_2 h}{A x_0} \quad (2)$$

در روابط بالا، پارامترهای  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $A$ ,  $x_0$ ,  $h$  با توجه به شکل ۳، به ترتیب نیروی متناظر با بیشترین جابه‌جایی، نیروی متناظر با جابه‌جایی صفر، بیشترین جابه‌جایی، سطح مقطع موثر نمونه و ضخامت نمونه می‌باشند. پارامتر  $f_0$  که در تصویر ۳ نمایش داده شده



شکل ۳: حلقه نیرو-جابه‌جایی استفاده شده در روش راجر براون [۴۰]

Figure 3. The force-displacement loop used in Roger Brown's method [40]

<sup>1</sup> Smooth

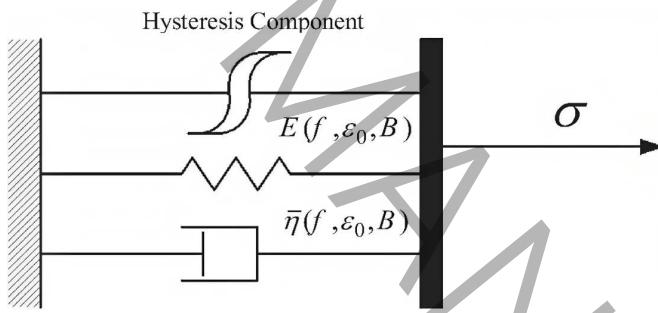
<sup>2</sup> Interp1

<sup>3</sup> Roger Brown

نیز برابر با بیشترین نیرو می‌باشد. در این پژوهش، به دلیل اعمال پیش‌کنش نسبتاً بالا به نمونه‌ها، کلیه حلقه‌های هیسترزیس به صورت غیرخطی هستند و مسیر فشار نسبت به مسیر کشش، دارای شیب بیشتری می‌باشد و انرژی بیشتری را نیز ذخیره می‌کند. از این‌رو، با هدف شناسایی کامل‌تر رفتار آنها، مدول‌های ذخیره و اتلاف به طور جداگانه برای مسیر فشار نیز محاسبه شده‌اند تا حالت غیرخطی آنها بهتر مدل شود. به همین منظور، برای محاسبه مدول‌های ذخیره و اتلاف فشاری، مجدداً از روابط (۱) و (۲) استفاده خواهد شد؛ با این تفاوت که برای این حالت، پارامترهای  $f_1$ ،  $f_2$  و  $\alpha$  به ترتیب نیروی متناظر با بیشترین جابه‌جایی در حالت فشار، نیروی متناظر با جابه‌جایی صفر در حالت فشار و بیشترین جابه‌جایی در مسیر فشار خواهند بود. پس از محاسبه مدول‌های ذخیره و اتلاف در حالت کششی و فشاری از روی حلقه‌های نیرو-جابه‌جایی میانگین، به منظور به دست آوردن رفتار تنش-کرنش الاستومرا-بررسی این رفتار در مقادیر مختلفی از چگالی شار مغناطیسی، فرکانس تحریک و درصد کرنش، باید این حلقه‌ها به حلقه‌های تنش-کرنش میانگین تبدیل شوند. برای تبدیل داده‌های نیرو به تنش، باید آنها را بر سطح مقطع نمونه ( $66 \times 52$  میلیمتر مربع) و برای تبدیل داده‌های جابه‌جایی به کرنش، باید آنها را بر ضخامت نمونه ( $12/5$  میلیمتر) تقسیم کرد.

#### ۴-۲-۴- مدلسازی

همانطور که پیشتر اشاره شد، رفتار رئولوژی الاستومر مگنتورئولوژیکال به چگالی شار مغناطیسی، فرکانس و کرنش ورودی وابسته است. علاوه بر موارد ذکر شده، پیش‌کنش استاتیکی نیز یکی از عوامل تاثیر گذار بر رفتار این مواد می‌باشد. در این پژوهش، به منظور لحاظ کردن اثر پیش‌کنش استاتیکی در پیش‌بینی رفتار ویسکوالاستیک الاستومرهای مگنتورئولوژیکال، یک مدل جدید و جامع با در نظر گرفتن این اثر ارائه گردیده است. به منظور ایجاد مدل، از مدل ویسکوالاستیک وطن‌دوست و همکاران [۳۷] (مطابق شکل ۴) به عنوان مدل پایه استفاده شده است و در ادامه، ثابت پیش‌کنش استاتیکی به مدل اضافه گردیده است.



شکل ۴: مدل ویسکوالاستیک وطن‌دوست و همکاران [۳۷]

Figure 4. Viscoelastic model presented by Vatandoost et al. [37]

مطابق با شکل ۴، مدل حاضر نیز از یک جز هیسترزیس و دو جزء فنر و میراگر غیرخطی تشکیل شده است. با توجه به اضافه نمودن ثابت پیش‌کنش استاتیکی ( $E_p$ ) به مدل، روابط ساختاری آن به صورت معادله (۳) پیش‌بینی می‌گردد.

$$\begin{aligned} \sigma_{MRE} &= \sigma_{Viscoelastic} + \sigma_{Hysteresis} \\ \sigma_{Viscoelastic} &= E(f, \epsilon_0, B, \epsilon_p) \epsilon(t) + \eta(f, \epsilon_0, B, \epsilon_p) \dot{\epsilon}(t) \\ \sigma_{Hysteresis} &= \alpha(f, \epsilon_0, B, \epsilon_p) \epsilon^2(t) + \beta(f, \epsilon_0, B, \epsilon_p) \epsilon^3(t) \end{aligned} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، متغیرهای  $\epsilon(t)$  و  $\sigma(t)$  به ترتیب کرنش ورودی و تنش خروجی در واحد زمان و ثوابت  $E$  و  $\eta$  به ترتیب مدول یانگ<sup>۱</sup> ماده، ویسکوزیته دینامیکی موثر ماده، مدول عدم تقارن هیسترزیس غیرخطی در حالت کشش-فشار و مدول کرنش-سخت شوندگی غیرخطی هستند. پارامترهای  $f$ ،  $\epsilon_0$  و  $E_p$  نیز به ترتیب فرکانس تحریک (نرخ کرنش ورودی)، کرنش ورودی، چگالی شار

<sup>۱</sup> Young's modulus

مغناطیسی و پیش‌کرنش استاتیکی اعمالی می‌باشند. در این پژوهش، ضرایب مدل پیشنهادی یعنی ثوابت  $E$ ,  $\eta$ ,  $\alpha$  و  $\beta$ ، از طریق کمینه کردن تابع خطا که به صورت مجموع مربعات اختلاف بین داده‌های حاصل از مدل پیشنهادی (معادله (۳)) و داده‌های آزمایشگاهی تعریف می‌شود، بدست می‌آیند. این تابع خطا، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Error = \frac{1}{N \times M \times R} \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^R (\sigma_{Model}(i, j, k) - \sigma_{Exp}(i, j, k))^2} \quad (4)$$

در رابطه بالا،  $N$  و  $M$  و  $R$  به ترتیب برابر با تعداد مجموعه داده‌های مختلف مرتبط با کرنش، فرکانس و پیش‌کرنش استاتیکی بوده و  $\sigma_{Exp}$  و  $\sigma_{Model}$ ، به ترتیب تنش بدست آمده از مدل پیشنهادی و تنش بدست آمده از آزمایشات هستند. در ادامه، جهت به حداقل رساندن اختلاف بین مقادیر تنش آزمایشگاهی و مقادیر تنش به دست آمده از مدل، از روش‌های بهینه‌سازی از جمله روش کمترین مربعات و الگوریتم ژنتیک در جعبه بهینه‌سازی نرم افزار متلب استفاده می‌شود و بدین ترتیب، ضرایب مدل پیشنهادی از طریق بهینه‌سازی تابع خطا به دست می‌آیند. با توجه به نوع محاسبات الگوریتم ژنتیک، بهترین ثوابت که باعث کمینه شدن تابع خطا گردند، استخراج خواهند شد. پس از بدست آمدن ثوابت مدل، این ثوابت بر حسب توابع توانی که بر حسب ورودی‌ها می‌باشند، به صورت زیر پیش‌بینی می‌گردند.

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(2\pi f t) \quad (5)$$

$$E(f, \varepsilon_0, B, \varepsilon_p) = a_{E(B)} \left( \frac{f}{f_R} \right)^{b_{E(B)}} (\varepsilon_0)^{c_{E(B)}} (1 + \varepsilon_p)^{d_{E(B)}} \quad (6)$$

$$\eta(f, \varepsilon_0, B, \varepsilon_p) = a_{\eta(B)} \left( \frac{f}{f_R} \right)^{b_{\eta(B)}} (\varepsilon_0)^{c_{\eta(B)}} (1 + \varepsilon_p)^{d_{\eta(B)}} \quad (7)$$

$$\alpha(f, \varepsilon_0, B, \varepsilon_p) = a_{\alpha(B)} \left( \frac{f}{f_R} \right)^{b_{\alpha(B)}} (\varepsilon_0)^{c_{\alpha(B)}} (1 + \varepsilon_p)^{d_{\alpha(B)}} \quad (8)$$

$$\beta(f, \varepsilon_0, B, \varepsilon_p) = a_{\beta(B)} \left( \frac{f}{f_R} \right)^{b_{\beta(B)}} (\varepsilon_0)^{c_{\beta(B)}} (1 + \varepsilon_p)^{d_{\beta(B)}} \quad (9)$$

در روابط (۶) الی (۹)،  $f_R$  فرکانس تحریک مرجع است و مقدار آن برایر با ۱ هرتز می‌باشد. در جدول ۲، تفسیر فیزیکی ثوابت موجود در معادلات (۶) الی (۹) بیان شده است.

جدول ۲: تفسیر فیزیکی ثابت‌های مدل پیشنهادی

Table 2. Physical characteristics of the constants in the proposed model

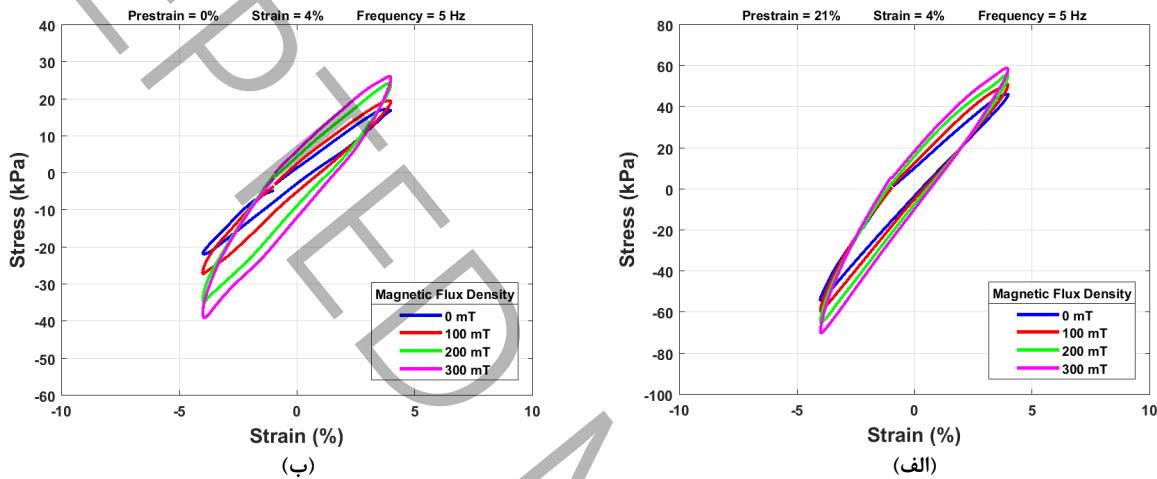
تفسیر فیزیکی	یکا	ضریب
اثر چگالی شار مغناطیسی بر روی مدول ذخیره	$kPa$	$a_{E(B)}$
اثر نرخ کرنش بر روی مدول ذخیره	۱	$b_{E(B)}$
اثر کرنش بر روی مدول ذخیره	۱	$c_{E(B)}$
اثر پیش‌کرنش استاتیکی بر روی مدول ذخیره	۱	$d_{E(B)}$
اثر چگالی شار مغناطیسی بر روی مدول اتلاف	$kPas$	$a_{\eta(B)}$
اثر نرخ کرنش بر روی مدول اتلاف	۱	$b_{\eta(B)}$
اثر کرنش بر روی مدول اتلاف	۱	$c_{\eta(B)}$
اثر پیش‌کرنش استاتیکی بر روی مدول اتلاف	۱	$d_{\eta(B)}$
اثر چگالی شار مغناطیسی بر روی مدول عدم تقارن هیسترزیس غیرخطی	$kPa$	$a_{a(B)}$
اثر نرخ کرنش بر روی مدول عدم تقارن هیسترزیس غیرخطی	۱	$b_{a(B)}$
اثر کرنش بر روی مدول عدم تقارن هیسترزیس غیرخطی	۱	$c_{a(B)}$
اثر پیش‌کرنش استاتیکی بر روی مدول عدم تقارن هیسترزیس غیرخطی	۱	$d_{a(B)}$
اثر چگالی شار مغناطیسی بر روی مدول کرنش-سخت‌شوندگی غیرخطی	$kPa$	$a_{\beta(B)}$
اثر نرخ کرنش بر روی مدول کرنش-سخت‌شوندگی غیرخطی	۱	$b_{\beta(B)}$
اثر کرنش بر روی مدول کرنش-سخت‌شوندگی غیرخطی	۱	$c_{\beta(B)}$
اثر پیش‌کرنش استاتیکی بر روی مدول کرنش-سخت‌شوندگی غیرخطی	۱	$d_{\beta(B)}$

### ۳- بحث و تحلیل نتایج آزمایش‌ها و مدل‌سازی

#### ۳-۱- تحلیل تأثیر پیش‌کرنش استاتیکی بر مدول‌های دینامیکی و رفتار تنش-کرنش الاستومر مگنتورئولوژیکال در چگالی شارهای مغناطیسی متفاوت

با توجه به اینکه در این تحقیق، الاستومرهای مگنتورئولوژیکال از پلیمر سیلیکون بسیار نرم ساخته شده‌اند و ذرات مغناطیسی شونده موجود در آنها دارای آزادی نسبی برای حرکت جزئی می‌باشند، هنگامی که الاستومرهای رفتار تنش-کرنش استاتیکی قرار می‌گیرند، ذرات آهن موجود در آنها قطبیده شده و در مسیر چگالی شار مغناطیسی عبوری مرتب می‌شوند و به همین دلیل، مقدار صلبیت الاستومرهای بیشتر می‌شود. با افزایش مقدار چگالی شار مغناطیسی اعمالی، مقدار صلبیت آنها نیز بیشتر خواهد شد. در شکل ۵، می‌توان این رفتار الاستومر مگنتورئولوژیکال را مشاهده نمود. در این شکل، نمودارهای تنش-کرنش الاستومر مگنتورئولوژیکال در دو حالت با و بدون اعمال پیش‌کرنش استاتیکی، در کرنش ۴٪، فرکانس ۵ هرتز و چگالی شارهای مغناطیسی مختلف، ۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی تسلا ترسیم شده‌اند. مطابق با این تصویر، با افزایش مقدار چگالی شار مغناطیسی اعمالی، شبیح حلقه‌های هیسترزیس در هر دو حالت با و بدون اعمال پیش‌کرنش استاتیکی، افزایش می‌یابد که بیانگر افزایش سفتی معادل الاستومر و مقدار مدول ذخیره آن

در هر دو حالت می‌باشد. علاوه بر این، میزان شیب حلقه‌ها (یا همان سفتی معادل الاستومر) در هر یک از چگالی شارهای مغناطیسی حالت با پیش‌کرنش استاتیکی، بیشتر از شیب حلقه‌های متناظر در حالت بدون پیش‌کرنش استاتیکی است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در یک میزان کرنش و فرکانس معین، با اعمال پیش‌کرنش استاتیکی، شیب حلقه‌های هیسترزیس تنش-کرنش در کلیه چگالی شارهای مغناطیسی افزایش می‌یابد. زیرا در حالتی که پیش‌کرنش استاتیکی به الاستومر اعمال می‌شود، ذرات آهنه موجود در الاستومر به یکدیگر نزدیک‌تر شده و نیروی مغناطیسی بین آنها افزایش می‌یابد که این امر، باعث افزایش میزان صلابت الاستومر می‌شود؛ و اگر در این حالت، چگالی شار مغناطیسی نیز به الاستومر اعمال گردد، به دلیل افزایش دو چندان نیروی مغناطیسی بین ذرات، میزان سفتی آن نیز دو چندان خواهد شد.

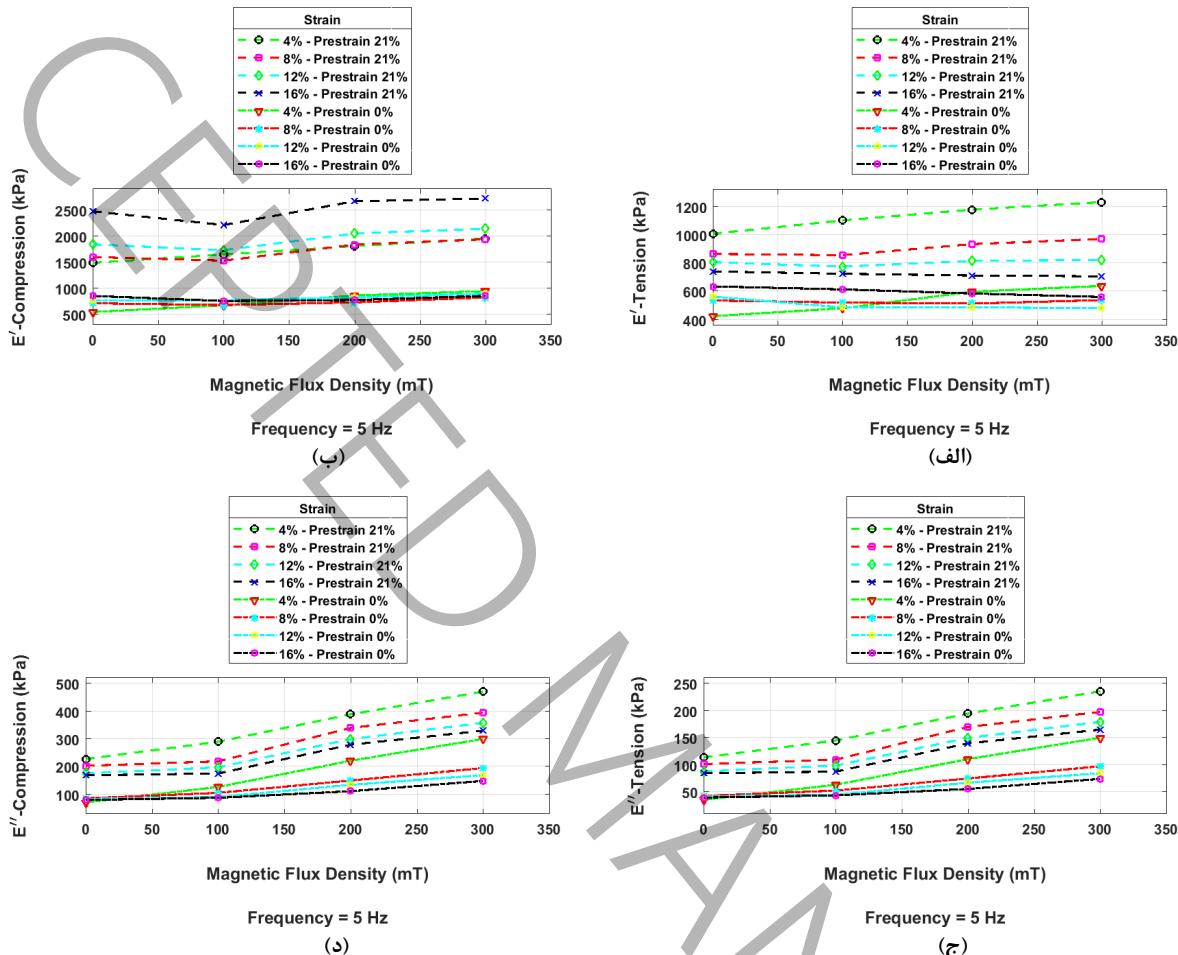


شکل ۵: نمودارهای تنش-کرنش الاستومرها در کرنش ۴٪، فرکانس ۵ هرتز و چگالی شارهای مغناطیسی مختلف. (الف) در حالت با پیش‌کرنش استاتیکی ۲۱٪ و (ب) در حالت بدون پیش‌کرنش استاتیکی

**Figure 5. Stress-strain diagrams of MRE at a strain of 4%, frequency of 5 Hz, and various magnetic flux densities. (a) With 21% static pre-strain and (b) Without static pre-strain**

در تصویر ۶، تغییرات مدول ذخیره کششی، مدول اتلاف کششی و مدول اتلاف فشاری الاستومر مگنتورئولوژیکال نسبت به چگالی شار مغناطیسی در فرکانس ۵ هرتز و کرنش‌های ورودی متفاوت در حالت با و بدون اعمال پیش کرنش استاتیکی نمایش داده شده است. با توجه به این تصویر، با افزایش چگالی شار مغناطیسی، مدول ذخیره کششی و ذخیره فشاری الاستومر مگنتورئولوژیکال در هر دو حالت با و بدون اعمال پیش‌کرنش استاتیکی، در تمامی کرنش‌ها افزایش می‌یابد که این افزایش، در حالتی که پیش‌کرنش استاتیکی اعمال می‌شود، بیشتر است. دلیل این امر، آن است که علاوه بر چگالی شار مغناطیسی، اعمال پیش کرنش استاتیکی نیز باعث افزایش دو چندان سفتی خواهد شد. همچنین، با مقایسه نمودارهای (الف) و (ب) در تصویر ۶، می‌توان نتیجه گرفت که در هر دو حالت با و بدون اعمال پیش‌کرنش استاتیکی، مقدار مدول ذخیره فشاری از مدول ذخیره کششی بیشتر می‌باشد. در ارتباط با تغییرات مدول اتلاف کششی و فشاری نسبت به چگالی شار مغناطیسی نیز، همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش چگالی شار مغناطیسی، مدول اتلاف کششی و فشاری در هر دو حالت با و بدون اعمال پیش‌کرنش استاتیکی، در تمامی کرنش‌ها افزایش می‌یابد که این افزایش، در حالتی که پیش‌کرنش استاتیکی اعمال می‌شود، با شیب بیشتری اتفاق می‌افتد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در هر دو حالت با و بدون اعمال پیش‌کرنش استاتیکی، در تمامی کرنش‌ها، با افزایش مقدار چگالی شار مغناطیسی، میزان قوانینی الاستومر مگنتورئولوژیکال در میرایی انرژی و ارتعاشات احتمالی در حالت کششی و فشاری افزایش می‌یابد. همچنین، با مقایسه نمودارهای (ج) و (د) در تصویر ۶، می‌توان نتیجه گرفت که در هر دو حالت با و بدون اعمال پیش‌کرنش استاتیکی، مقدار مدول اتلاف کششی از مدول اتلاف فشاری بیشتر می‌باشد. از مقایسه نمودارهای (الف)، (ب)، (ج) و (د) در تصویر ۶، مشاهده می‌شود که

اعمال پیش کرنش استاتیکی، باعث تند شدن شب افزایش مدول ذخیره و اتلاف کششی و فشاری نسبت به چگالی شار مغناطیسی در یک فرکانس معین و کرنش های ورودی متفاوت خواهد شد.



شکل ۶: تغییرات (الف) مدول ذخیره کششی، (ب) مدول ذخیره فشاری، (ج) مدول اتلاف کششی و (د) مدول اتلاف فشاری الاستومر نسبت به چگالی شار مغناطیسی در فرکانس ۵ هرتز و کرنش های متفاوت در حالت با و بدون اعمال پیش کرنش استاتیکی

**Figure 6. Variations in (a) Tensile storage modulus, (b) Compressive storage modulus, (c) Tensile loss modulus, and (d) Compressive loss modulus of the MRE relative to magnetic flux density at a frequency of 5 Hz, various strains, and different levels of static pre-strain**

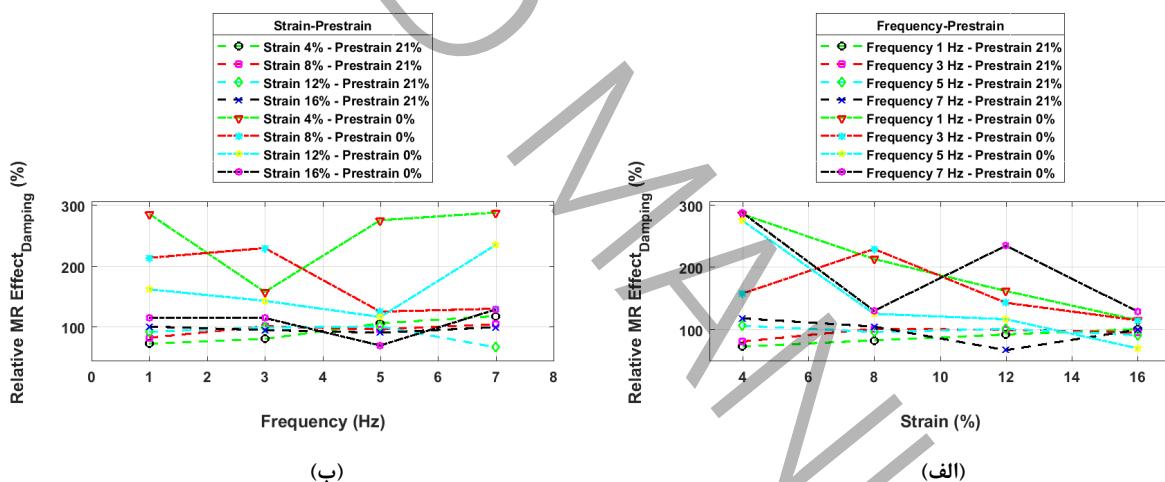
### ۱-۳-۱-۱) اثر مگنتورئولوژیکال

در این بخش، به بررسی تغییرات اثر مگنتورئولوژیکال نسبت به عوامل مختلف پرداخته می شود. اثر مگنتورئولوژیکال نسبی از دیدگاه توانایی الاستومر در برابر اتلاف انرژی، از رابطه (۱۰) بدست می آید.

$$\%MReff_{Damping} = \frac{(A_{\text{Stress-Strain Loop}})_{B_{\max}} - (A_{\text{Stress-Strain Loop}})_{B_{\min}}}{(A_{\text{Stress-Strain Loop}})_{B_{\min}}} \times 100 \quad (10)$$

در رابطه بالا، پارامترهای  $(A_{\text{Stress-Strain Loop}})_{B_{\max}}$  و  $(A_{\text{Stress-Strain Loop}})_{B_{\min}}$  هیسترزیس تنش-کرنش در بیشترین چگالی شار (۳۰۰ میلی تسل) و کمترین چگالی شار (صفر میلی تسل) است. در نمودار (الف) شکل ۷، تغییرات اثر مگنتورئولوژیکال نسبی الاستومر بر حسب کرنش، در فرکانس های مختلف و در دو حالت با و بدون اعمال پیش

کرنش استاتیکی نمایش داده شده است. با توجه به این تصویر، در حالتی که پیش کرنش استاتیکی اعمال می شود، با افزایش کرنش ورودی، مقدار اثر مگنتورئولوژیکال نسبی در کلیه فرکانس ها تقریباً ثابت می ماند؛ زیرا میزان پیش کرنش استاتیکی اعمالی، از بالاترین کرنش ورودی که ۱۶٪ است، بیشتر است و این امر، باعث کم اثر شدن تغییرات کرنش در مقدار اثر مگنتورئولوژیکال می گردد. اما در صورت عدم اعمال پیش کرنش، با افزایش کرنش ورودی، مقدار اثر مگنتورئولوژیکال نسبی در کلیه فرکانس ها کاهش می یابد. علاوه بر این، مقدار اثر مگنتورئولوژیکال نسبی، در حالتی که پیش کرنش استاتیکی اعمال می شود، کمتر از حالت بدون اعمال پیش کرنش است و دلیل این امر، فشردگی بیش از حد الاستومر به دلیل اعمال پیش کرنش است که اجازه نمی دهد چگالی شار مغناطیسی اعمالی، باعث مرتب کردن ذرات مغناطیسی شونده و به عبارتی، افزایش اثر مگنتورئولوژیکال گردد. در نمودار (ب) شکل ۷ نیز، تغییرات اثر مگنتورئولوژیکال نسبی الاستومر بر حسب فرکانس، در کرنش های مختلف و در دو حالت با و بدون اعمال پیش کرنش استاتیکی نمایش داده شده است. با توجه به این تصویر، در حالتی که پیش کرنش استاتیکی اعمال می شود، با افزایش فرکانس تحریک، مقدار اثر مگنتورئولوژیکال نسبی در کرنش های ۴٪ و ۱۶٪ افزایش و در کرنش ۸٪ کاهش می یابد. دلیل این روند ثابت در حضور پیش کرنش استاتیکی بالا نیز همان فشردگی بیش از حد الاستومر است که اجازه نمی دهد در فرکانس های مختلف، تغییرات چگالی شار مغناطیسی اعمالی، به صورت محسوس باعث تغییر در میرایی الاستومر گردد که در نتیجه، این امر باعث عدم به وجود آمدن تغییر قابل ملاحظه ای در میزان اثر مگنتورئولوژیکال می گردد. لازم به ذکر است که بیشترین اثر مگنتورئولوژیکال نسبی به میزان ۳۲٪/۲۸۸ در کرنش ۴٪، فرکانس ۷ هرتز و در حالت بدون اعمال پیش کرنش استاتیکی ایجاد شده است.

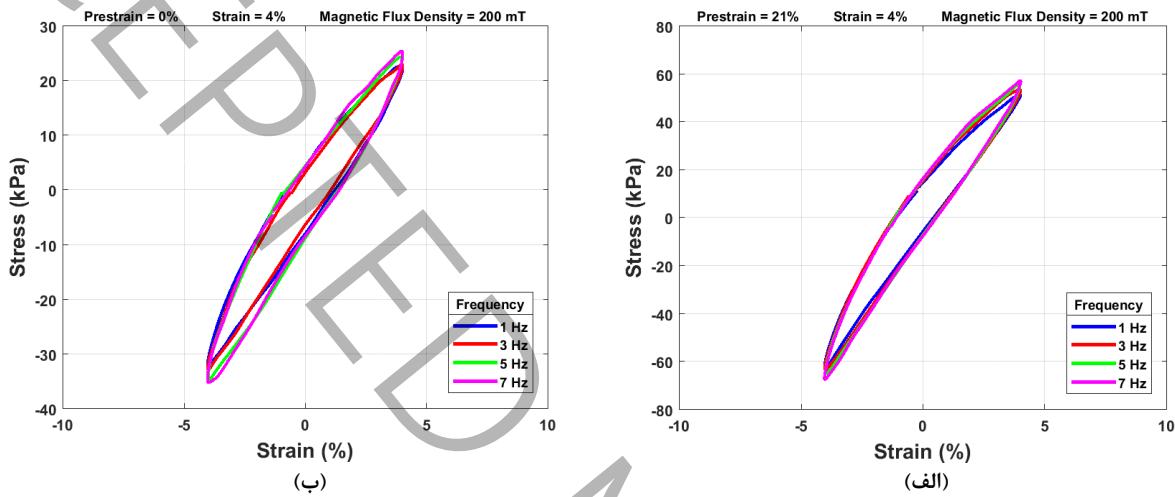


شکل ۷: تغییرات اثر مگنتورئولوژیکال نسبی الاستومر مگنتورئولوژیکال بر حسب (الف) کرنش در فرکانس های مختلف و (ب) فرکانس در کرنش های مختلف در دو حالت با و بدون اعمال پیش کرنش استاتیکی

**Figure 7. Variations in the relative MR effect of the MRE relative to (a) Strain at different frequencies and (b) Frequency at different strains, under different levels of static pre-strain**

۲-۳- تحلیل تأثیر پیش کرنش استاتیکی بر مدول های دینامیکی و رفتار تنش-کرنش الاستومر مگنتورئولوژیکال در فرکانس های تحریک متفاوت در تصویر ۸، نمودارهای تنش-کرنش الاستومر مگنتورئولوژیکال در دو حالت با و بدون اعمال پیش کرنش استاتیکی، در کرنش ۴٪، چگالی شار مغناطیسی ۲۰۰ میلی تسلو و فرکانس های مختلف ۱، ۳، ۵ و ۷ هرتز ترسیم شده اند. مطابق با این تصویر، با افزایش مقدار فرکانس تحریک، شبیه حلقه های هیسترزیس در هر دو حالت با و بدون اعمال پیش کرنش استاتیکی، افزایش می یابد که بیانگر افزایش سفتی معادل الاستومر و مقدار مدول ذخیره آن در اثر افزایش فرکانس، در هر دو حالت می یابد. علاوه بر این، میزان شبیه حلقه ها (یا همان سفتی معادل الاستومر) در هر یک از فرکانس های حالت با پیش کرنش استاتیکی (تصویر ۸(الف)), بیشتر از شبیه حلقه های متناظر در حالت بدون پیش کرنش استاتیکی (تصویر ۸(ب)) است. به عنوان مثال، میزان شبیه حلقه تنش-کرنش نمایش داده شده

برای فرکانس ۷ هرتز در تصویر ۸(الف) (حالت با پیش‌کرنش استاتیکی)، بیشتر از میزان شیب حلقه تنش-کرنش نشان داده شده برای فرکانس ۷ هرتز در تصویر ۸(ب) (حالت بدون پیش‌کرنش استاتیکی) است. دلیل این پدیده این است که با اعمال پیش‌کرنش، میزان فشردگی الاستومر بیشتر شده و این امر، باعث کاهش فاصله بین ذرات مغناطیسی‌شونده و افزایش نیروی مغناطیسی بین آنها می‌گردد که این اتفاق، افزایش سفتی یا همان مدول ذخیره الاستومرها را به همراه خواهد داشت. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که در یک میزان کرنش و چگالی شار مغناطیسی معین، با اعمال پیش‌کرنش استاتیکی، شیب حلقه‌های هیسترزیس تنش-کرنش در کلیه فرکانس‌ها افزایش می‌یابد.



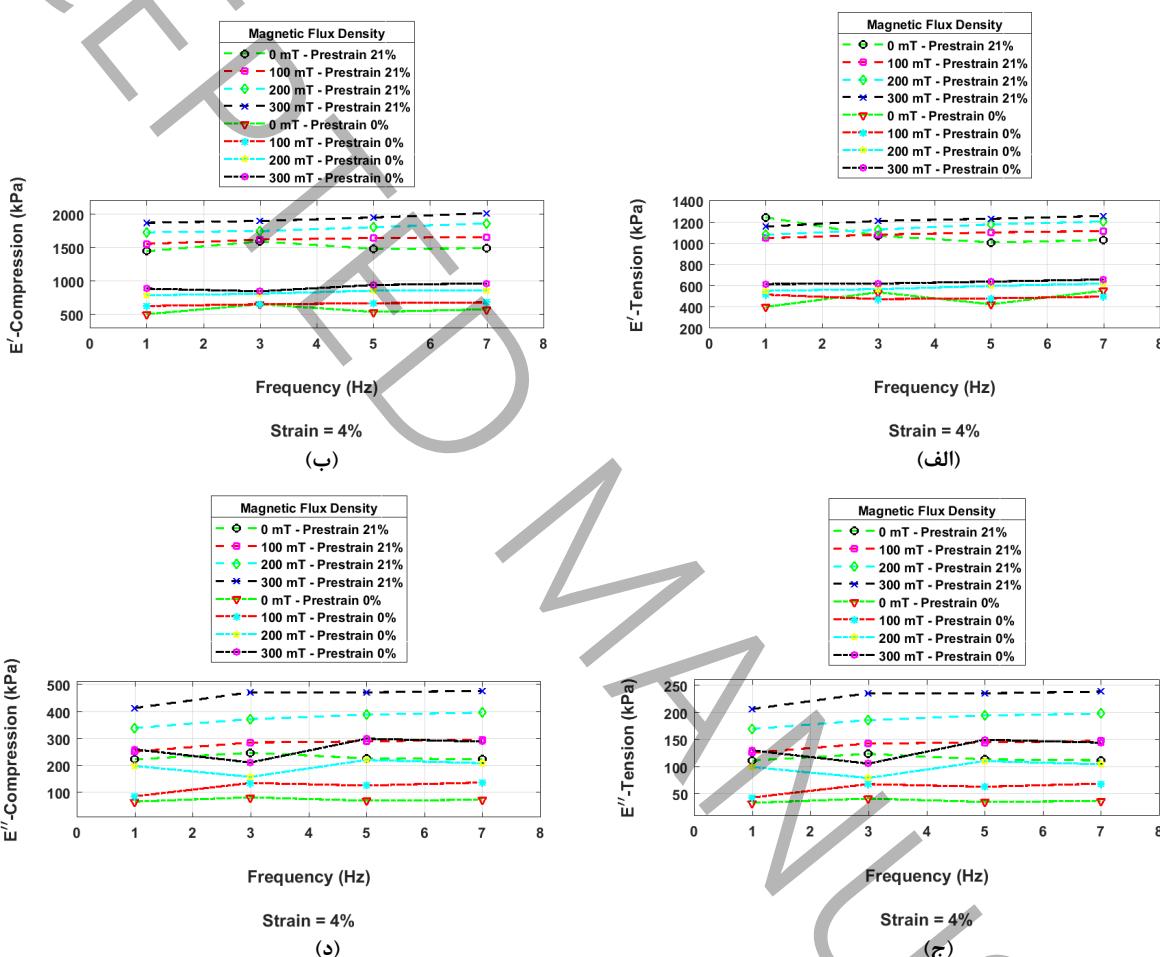
شکل ۸: نمودارهای تنش-کرنش الاستومرها در کرنش ۴٪، چگالی شار مغناطیسی ۲۰۰ میلی تسللا و فرکانس‌های مختلف. (الف) در حالت با پیش‌کرنش استاتیکی ۰٪ و (ب) در حالت بدون پیش‌کرنش استاتیکی ۲۱٪

**Figure 8. Stress-strain diagrams of MRE at a strain of 4%, magnetic flux density of 200 mT, and various frequencies. (a) With 21% static pre-strain and (b) Without static pre-strain**

در تصویر ۹، تغییرات مدول ذخیره کششی، مدول اتلاف فشاری، مدول اتلاف کششی و مدول اتلاف فشاری الاستومر مگنتورئولوژیکال نسبت به فرکانس در کرنش ۴٪ و چگالی شارهای مغناطیسی متفاوت در حالت با و بدون اعمال پیش‌کرنش استاتیکی نمایش داده شده است. با توجه به این تصویر، با افزایش فرکانس، مدول ذخیره کششی و ذخیره فشاری الاستومر مگنتورئولوژیکال در هر دو حالت با و بدون اعمال پیش‌کرنش استاتیکی، در تمامی چگالی شارهای مغناطیسی افزایش می‌یابد و این افزایش، در هر دو حالت با شبیه کندی صورت می‌پذیرد. همچنین، با مقایسه نمودارهای (الف) و (ب) در تصویر ۹، می‌توان نتیجه گرفت که به ازای یک چگالی شار مغناطیسی معین، مقدار مدول ذخیره کششی و فشاری، در حالتی که پیش‌کرنش استاتیکی اعمال می‌شود، بیشتر از حالت بدون اعمال پیش‌کرنش است (زیرا همانطور که در این دو تصویر مشخص است، خطوط خطچین (حالت با پیش‌کرنش استاتیکی) در بالای خطوط نقطه-خطچین (حالت بدون پیش‌کرنش استاتیکی) قرار گرفته‌اند) و دلیل این امر، کاهش فاصله بین ذرات آهنی و افزایش نیروی مغناطیسی بین آنها و در نتیجه، افزایش میزان سفتی الاستومر در اثر اعمال پیش‌کرنش است. علاوه بر این، با توجه به نمودارهای (الف) و (ب) در تصویر ۹، می‌توان مشاهده نمود که در هر یک از حالات با یا بدون اعمال پیش‌کرنش، مقدار مدول ذخیره فشاری در یک چگالی شار مغناطیسی معین بیشتر از مقدار مدول ذخیره کششی در همان چگالی شار می‌باشد.

در مورد تغییرات مدول اتلاف کششی و فشاری نسبت به فرکانس تحریک نیز، با توجه به نمودارهای (ج) و (د) شکل ۹، مشاهده می‌شود که با افزایش فرکانس، مدول اتلاف کششی و فشاری در هر دو حالت با و بدون اعمال پیش‌کرنش استاتیکی، در تمامی چگالی شارهای مغناطیسی افزایش می‌یابد و به ازای یک چگالی شار مغناطیسی معین، مقدار مدول اتلاف کششی و فشاری، در حالت با اعمال پیش‌کرنش استاتیکی، بیشتر از حالتی است که پیش‌کرنش اعمال نمی‌شود (زیرا با توجه به این دو تصویر نیز، خطوط خطچین (حالت با پیش‌کرنش) بالاتر از خطوط نقطه-خطچین (حالت بدون پیش‌کرنش) قرار گرفته‌اند). همچنین، با مقایسه گراف‌های (ج) و (د) در

تصویر ۹، می‌توان مشاهده کرد که در هر یک از حالات با یا بدون اعمال پیش‌کرنش استاتیکی، مقدار مدول اتلاف فشاری در یک چگالی شار مغناطیسی معین بیشتر از مقدار مدول اتلاف کششی در همان چگالی شار است. با مقایسه نمودارهای (الف)، (ب)، (ج) و (د) در تصویر ۹، مشاهده می‌شود که اعمال پیش‌کرنش استاتیکی، تاثیری در تندر شدن شبیه افزایش مدول ذخیره و اتلاف کششی و فشاری نسبت به فرکانس در یک کرنش معین و چگالی شارهای مغناطیسی متفاوت، ندارد. همچنین، با مقایسه نمودارهای (الف) تا (د) در تصویر ۹، می‌توان نتیجه گرفت که در هر یک از حالات با یا بدون اعمال پیش‌کرنش استاتیکی، افزایش چگالی شار مغناطیسی اعمالی، باعث افزایش مقدار مدول در کلیه فرکانس‌ها خواهد شد.

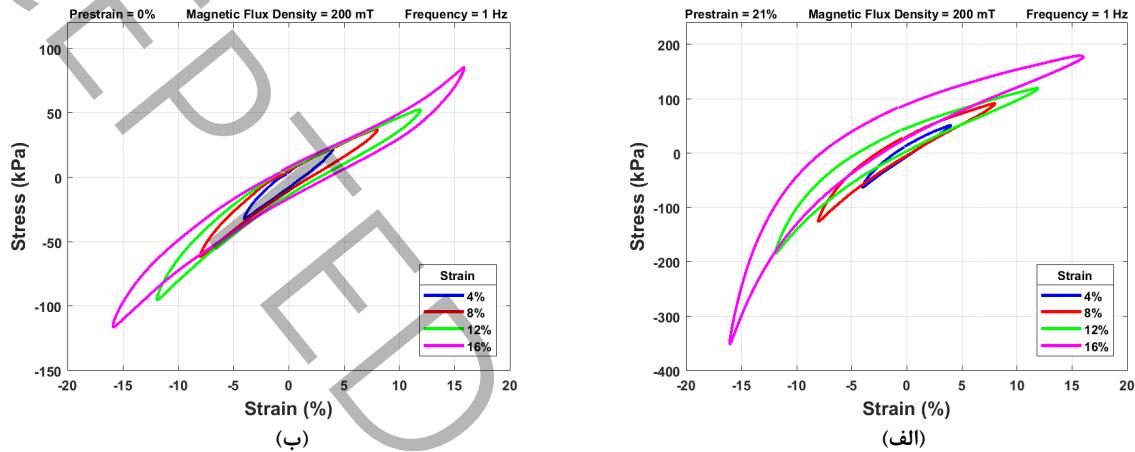


شکل ۹: تغییرات (الف) مدول ذخیره کششی، (ب) مدول اتلاف فشاری، (ج) مدول اتلاف کششی و (د) مدول اتلاف فشاری الاستومر نسبت به فرکانس در کرنش ۴٪ و چگالی شارهای مغناطیسی متفاوت در حالت با و بدون اعمال پیش‌کرنش استاتیکی

**Figure 9. Variations in (a) Tensile storage modulus, (b) Compressive storage modulus, (c) Tensile loss modulus, and (d) Compressive loss modulus of the MRE relative to frequency at a strain of 4%, various magnetic flux densities, and different levels of static pre-strain**

۳- تحلیل تأثیر پیش‌کرنش استاتیکی بر مدول‌های دینامیکی و رفتار تنش-کرنش الاستومر مگنتورئولوژیکال در کرنش‌های ورودی متفاوت نمودارهای هیسترزیس تنش-کرنش الاستومر مگنتورئولوژیکال در دو حالت با و بدون اعمال پیش‌کرنش استاتیکی، در فرکانس ۱ هرتز، چگالی شار مغناطیسی ۲۰۰ میلی تولا و کرنش‌های مختلف ۴٪، ۸٪، ۱۲٪ و ۱۶٪ در تصویر ۱۰ ترسیم شده‌اند. مطابق با این تصویر، با افزایش کرنش اعمالی، در هر دو حالت با و بدون اعمال پیش‌کرنش استاتیکی، شبیه حلقه‌های هیسترزیس (سفتی معادل الاستومر) در مسیر فشار، افزایش و در مسیر کشش، کاهش می‌یابد. دلیل این امر، کاهش و افزایش فاصله بین ذرات مغناطیسی‌شونده

به ترتیب در فشار و کشش است که به ترتیب، باعث افزایش و کاهش نیروی مغناطیسی بین ذرات و در نتیجه، افزایش و کاهش سفتی معادل و مدول ذخیره می‌شود. علاوه بر این، میزان شیب حلقه‌ها در مسیر کشش و فشار در هر یک از کرنش‌ها در حالت با پیش‌کرنش استاتیکی، بیشتر از شیب حلقه‌ها در مسیر متناظر در حالت بدون پیش‌کرنش استاتیکی است و دلیل این امر، افزایش میزان سفتی الاستومر در اثر اعمال پیش‌کرنش می‌باشد. به طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که در یک میزان فرکانس و چگالی شار مغناطیسی معین، اعمال پیش‌کرنش استاتیکی باعث افزایش شیب حلقه‌های هیسترزیس تنش-کرنش هم در مسیر کشش و هم در مسیر فشار، در کلیه کرنش‌ها می‌شود.



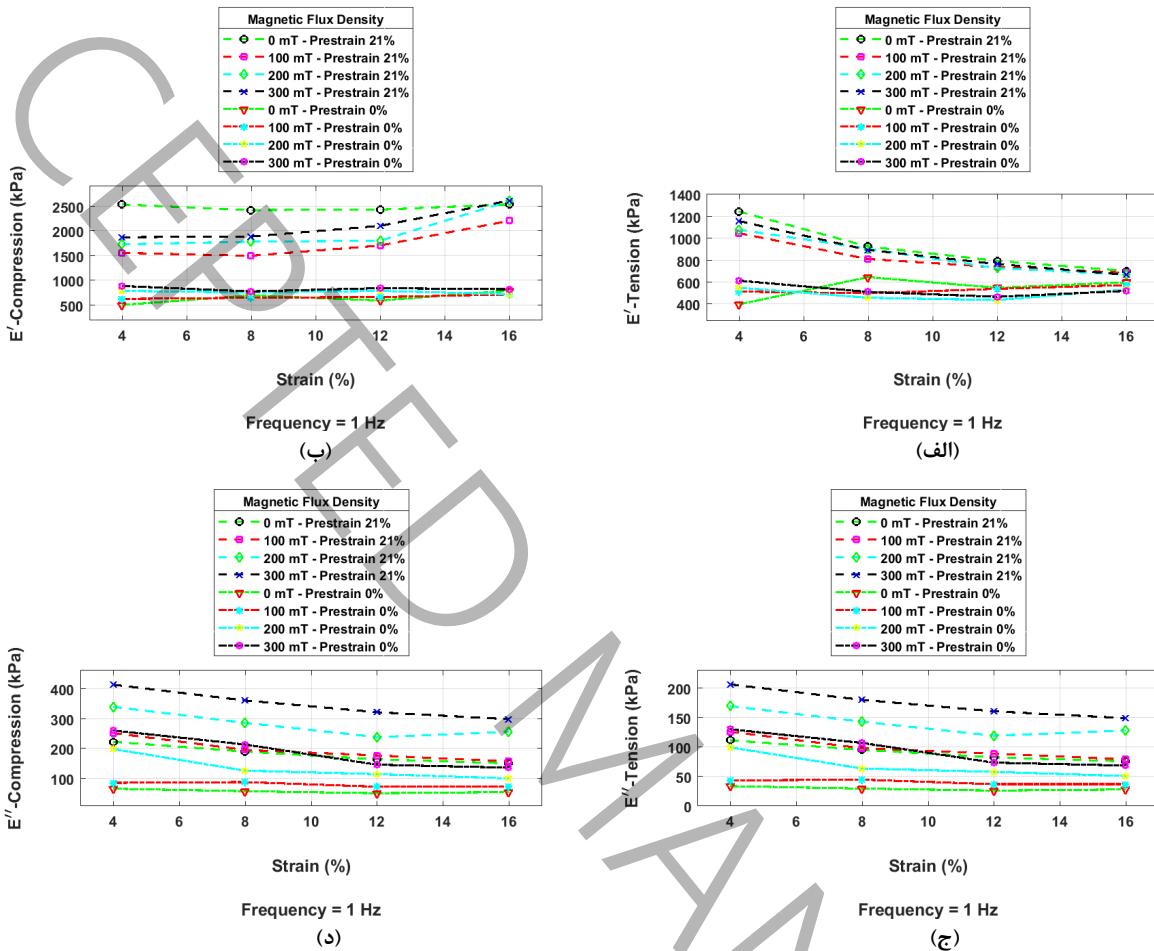
شکل ۱۰: نمودارهای تنش-کرنش الاستومرها در فرکانس ۱ هرتز، چگالی شار مغناطیسی ۲۰۰ میلی تسللا و کرنش‌های مختلف. (الف) در حالت با پیش‌کرنش استاتیکی ۲۱٪ و (ب) در حالت بدون پیش‌کرنش استاتیکی

**Figure 10. Stress-strain diagrams of MRE at a frequency of 1 Hz, magnetic flux density of 200 mT, and various strains. (a) With 21% static pre-strain and (b) Without static pre-strain**

در تصویر ۱۱، تغییرات مدول ذخیره کششی، مدول اتلاف فشاری، مدول اتلاف کششی و مدول اتلاف فشاری الاستومر مگنتورئولوژیکال نسبت به کرنش در فرکانس ۱ هرتز و چگالی شارهای مغناطیسی متفاوت در حالت با و بدون اعمال پیش‌کرنش استاتیکی نمایش داده شده است. با توجه به این تصویر، مدول ذخیره کششی در حالتی که پیش‌کرنش استاتیکی اعمال می‌شود، با افزایش کرنش، در تمامی چگالی شارهای مغناطیسی کاهش می‌یابد و در حالت بدون اعمال پیش‌کرنش استاتیکی، مدول ذخیره کششی با افزایش کرنش، در چگالی شار مغناطیسی صفر میلی تسللا افزایش و در دیگر چگالی شارهای مغناطیسی، تقریباً ثابت می‌ماند. مدول ذخیره فشاری الاستومر نیز در حالت با اعمال پیش‌کرنش استاتیکی، با افزایش کرنش، در تمامی چگالی شارهای مغناطیسی افزایش می‌یابد و در حالتی که پیش‌کرنش استاتیکی اعمال نمی‌شود، مدول ذخیره فشاری با افزایش کرنش، در کلیه چگالی شارهای مغناطیسی تقریباً ثابت می‌ماند. همچنین، با مقایسه نمودارهای (الف) و (ب) در تصویر ۱۱، می‌توان نتیجه گرفت که مقدار مدول ذخیره کششی و فشاری، در حالتی که پیش‌کرنش استاتیکی اعمال می‌شود، بیشتر از حالت بدون اعمال پیش‌کرنش است و دلیل این امر، افزایش میزان سفتی الاستومر در اثر اعمال پیش‌کرنش می‌باشد. علاوه بر این، در هر دو حالت با و بدون اعمال پیش‌کرنش استاتیکی، مقدار مدول ذخیره فشاری از مدول ذخیره کششی بیشتر می‌باشد.

در رابطه با تغییرات مدول اتلاف کششی و فشاری نسبت به کرنش ورودی نیز، با توجه به نمودارهای (ج) و (د) شکل ۱۱، مشاهده می‌شود که مدول اتلاف کششی و فشاری در حالتی که پیش‌کرنش استاتیکی اعمال می‌شود، با افزایش کرنش، در تمامی چگالی شارهای مغناطیسی کاهش می‌یابد و در حالت بدون اعمال پیش‌کرنش استاتیکی، مدول اتلاف کششی و فشاری با افزایش کرنش، در چگالی شارهای مغناطیسی ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی تسللا کاهش و در چگالی شارهای صفر و ۱۰۰ میلی تسللا، تقریباً ثابت می‌ماند. همچنین مشاهده می‌شود که مقدار مدول اتلاف کششی و فشاری، در حالتی که پیش‌کرنش استاتیکی اعمال می‌شود، بیشتر از حالت بدون

اعمال پیش‌کرنش است و در هر دو حالت با و بدون اعمال پیش‌کرنش استاتیکی، مقدار مدول اتلاف فشاری از مدول اتلاف کششی بیشتر می‌باشد.



شکل ۱۱: تغییرات (الف) مدول ذخیره کششی، (ب) مدول اتلاف فشاری، (ج) مدول اتلاف کششی و (د) مدول اتلاف فشاری الاستومر نسبت به کرنش در فرکانس ۱ هرتز و چگالی شارهای مغناطیسی متفاوت در حالت با و بدون اعمال پیش‌کرنش استاتیکی

**Figure 11. Variations in (a) Tensile storage modulus, (b) Compressive storage modulus, (c) Tensile loss modulus, and (d) Compressive loss modulus of the MRE relative to strain at a frequency of 1 Hz, various magnetic flux densities, and different levels of static pre-strain**

### ۳-۴- محاسبه ضرایب مدل پیشنهادی

به منظور بدست آوردن مقادیر ثابت‌های موجود در مدل پیشنهادی (پارامترهای جدول ۲)، از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است تا مقادیر بهینه برای ثوابت بدست آیند. از آنجایی که پارامتر چگالی شار مغناطیسی، در کاربردها و دستگاه‌های حاوی الاستومر مکنتورئولوژیکال، به عنوان پارامتر کنترل گر<sup>۱</sup> می‌باشد، مقادیر ثوابت به ازای هر چگالی شار مغناطیسی، به صورت جداگانه محاسبه شده است. در جدول ۳، مقادیر استخراج شده از الگوریتم ژنتیک ارائه شده است. پس از بدست آمدن مقادیر کلیه ثوابت، باید آنها را به صورت توابعی بر حسب چگالی شار مغناطیسی نوشت. این توابع، مطابق با معادلات (۱-الف) الی (۱۶-الف) موجود در پیوست، به

<sup>1</sup> Controller

صورت توابع چندجمله‌ای درجه دو و سه و توابع نمایی استخراج شده‌اند. لازم به ذکر است که برای انجام این عمل، از جعبه ابزار برآش منحنی نرم‌افزار متلب استفاده شده است.

جدول ۳: مقادیر ثابت‌های مدل پیشنهادی

Table 3. The values of the constants in the proposed model

ضریب	(mT)	چگالی شار مغناطیسی		
۳۰۰	۲۰۰	۱۰۰	.	
۱۶/۸۵۵۱	۱۶/۸۵۵۲	۱۶/۸۵۵۳	۱۹/۸۲۳۵	$a_{E(B)}$ (kPa)
-۰/۰۴۱۳	-۰/۰۳۳۳	-۰/۰۱۸۲	-۰/۰۸۴۰	$b_{E(B)}$
-۰/۲۴۹۶	-۰/۲۵۰۴	-۰/۲۵۵۴	-۰/۲۵۵۶	$c_{E(B)}$
-۰/۲۲۰۱	-۰/۲۲۰۲	-۰/۲۲۰۳	-۰/۲۲۵۲	$d_{E(B)}$
-۰/۶۱۳۷	-۰/۴۹۲۴	-۰/۴۰۰۶	-۰/۳۹۵۸	$a_{\eta(B)}$ (kPa.s)
-۰/۹۰۸۷	-۰/۹۰۸۹	-۰/۹۳۱۵	-۰/۹۷۰۸	$b_{\eta(B)}$
-۰/۱۷۴۰	-۰/۱۷۴۲	-۰/۱۴۲۲	-۰/۲۶۴۸	$c_{\eta(B)}$
-۰/۲۰۲۷	-۰/۲۰۴۷	-۰/۲۸۸۹	-۰/۰۵۰۲۱	$d_{\eta(B)}$
-۱/۲۴۰۹	-۱/۲۴۱۱	-۱/۲۴۱۲	-۳/۰۷۰۴	$a_{\alpha(B)}$ (kPa)
-۰/۰۸۴۳	-۰/۰۵۲۷	-۰/۰۵۲۵	-۰/۱۵۱۸	$b_{\alpha(B)}$
-۰/۳۴۵۹	-۰/۳۶۷۴	-۰/۴۶۴۰	-۰/۰۵۷۵۶	$c_{\alpha(B)}$
-۰/۳۳۶۱	-۰/۳۵۷۱	-۰/۴۳۵۹	-۰/۰۷۰۳۷	$d_{\alpha(B)}$
-۰/۲۶۴۳	-۰/۲۶۴۴	-۰/۲۶۴۵	۱/۰۷۷۳	$a_{\beta(B)}$ (kPa)
-۰/۲۲۳۱	-۰/۱۱۷۱	-۰/۰۰۵۴	-۰/۰۷۲۸۸	$b_{\beta(B)}$
-۰/۰۸۵۶۵	-۰/۹۱۸۸	-۰/۹۸۶۴	-۱/۲۳۶۱	$c_{\beta(B)}$
-۰/۰۲۰۲۹	-۰/۲۱۰۷	-۰/۰۴۲۷۲	-۰/۰۵۴۲۹	$d_{\beta(B)}$

در جدول ۴، مقادیر عددی ثابت‌های موجود در معادلات (۱-الف) الی (۱۶-الف) ارائه شده است.

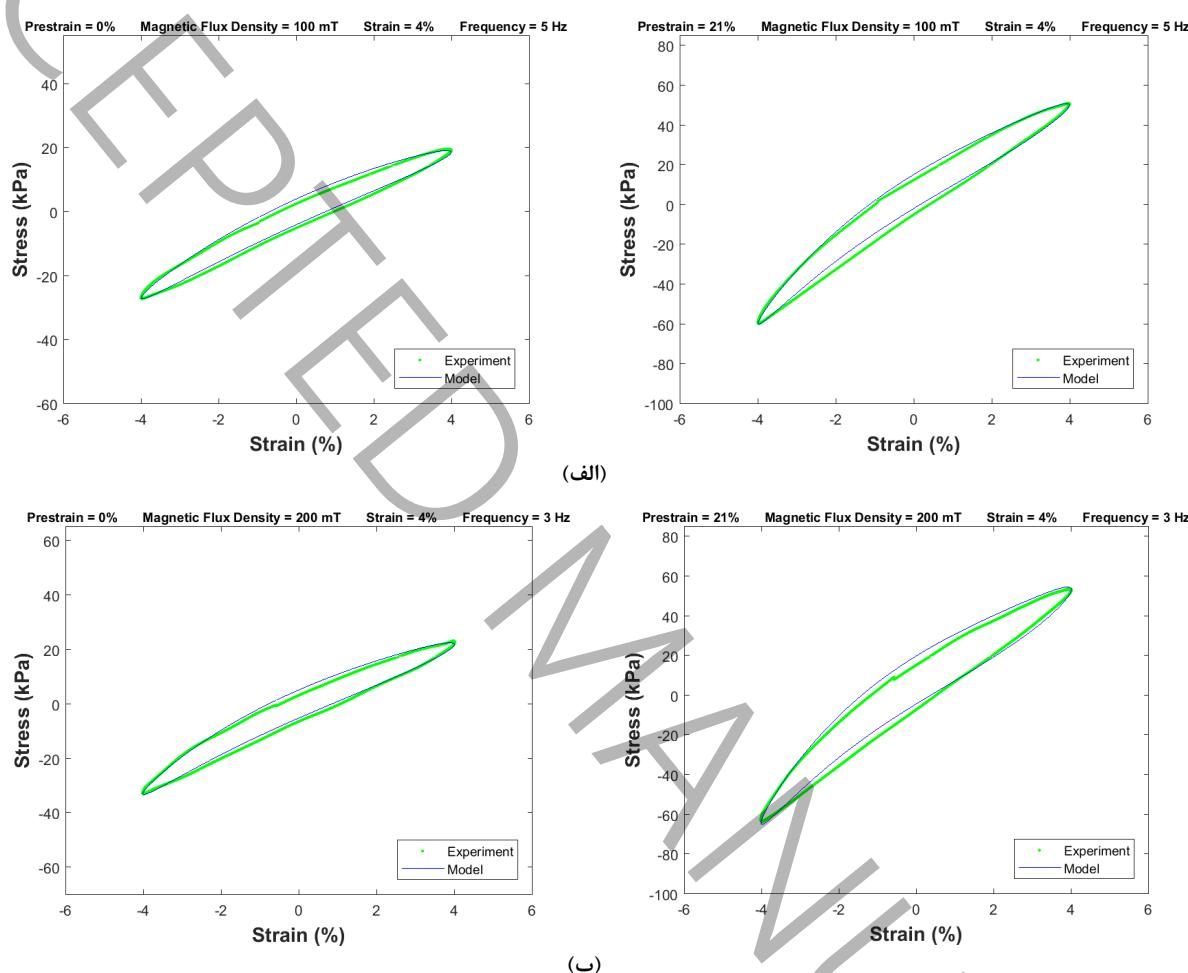
جدول ۴: مقادیر ضرایب موجود در ثابت‌های مدل پیشنهادی

Table 4. The values of the coefficients of the constants in the proposed model

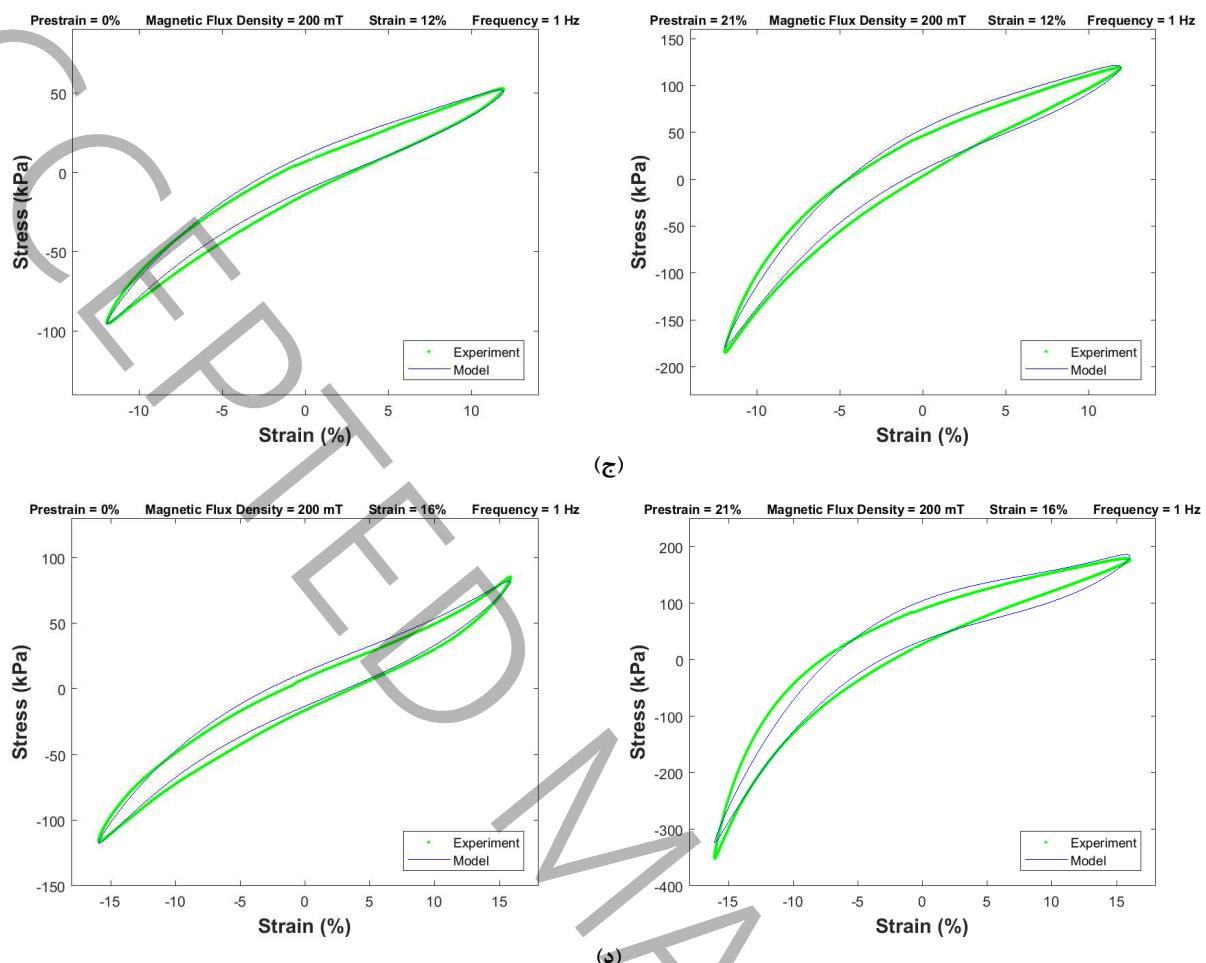
مقدار	یکا	ضریب	ردیف	مقدار	یکا	ضریب	ردیف	مقدار	یکا	ضریب	ردیف
$2/187 \times 10^{-8}$	$mT^{-3}$	$h_{a1}$	۴۵	$-/...4575$	$mT^{-1}$	$f_{\eta 3}$	۲۳	$-4/947 \times 10^{-7}$	$kPa.mT^{-3}$	$e_{E1}$	۱
$-1/6.1 \times 10^{-5}$	$mT^{-2}$	$h_{a2}$	۴۶	$-0/970.8$	۱	$f_{\eta 4}$	۲۴	$-/...2968$	$kPa.mT^{-2}$	$e_{E2}$	۲
$-/...40.6$	$mT^{-1}$	$h_{a3}$	۴۷	$-1/887 \times 10^{-8}$	$mT^{-3}$	$g_{\eta 1}$	۲۵	$-0/0.5442$	$kPa.mT^{-1}$	$e_{E3}$	۳
$-0/70.37$	۱	$h_{a4}$	۴۸	$7/93 \times 10^{-9}$	$mT^{-2}$	$g_{\eta 2}$	۲۶	$19/82$	$kPa$	$e_{E4}$	۴
$-1/3\Delta\Delta \times 10^{-7}$	$kPa.mT^{-3}$	$e_{\beta 1}$	۴۹	$-0/...0.3783$	$mT^{-1}$	$g_{\eta 3}$	۲۷	$1/333 \times 10^{-8}$	$mT^{-3}$	$f_{E1}$	۵
$8/127 \times 10^{-5}$	$kPa.mT^{-2}$	$e_{\beta 2}$	۵۰	$-0/2648$	۱	$g_{\eta 4}$	۲۸	$-8/355 \times 10^{-9}$	$mT^{-2}$	$f_{E2}$	۶
$-0/0.149$	$kPa.mT^{-1}$	$e_{\beta 3}$	۵۱	$7/8 \times 10^{-9}$	$mT^{-3}$	$h_{\eta 1}$	۲۹	$-/...1724$	$mT^{-1}$	$f_{E3}$	۷
$1/0.77$	$kPa$	$e_{\beta 4}$	۵۲	$-8/79 \times 10^{-9}$	$mT^{-2}$	$h_{\eta 2}$	۳۰	$-0/0.84$	۱	$f_{E4}$	۸
$-/...3837$	۱	$f_{\beta 1}$	۵۳	$-/...2933$	$mT^{-1}$	$h_{\eta 3}$	۳۱	$-1/0 \times 10^{-9}$	$mT^{-3}$	$g_{E1}$	۹
$-/...0.5878$	$mT^{-1}$	$f_{\beta 2}$	۵۴	$-0/0.21$	۱	$h_{\eta 4}$	۳۲	$8/9 \times 10^{-7}$	$mT^{-2}$	$g_{E2}$	۱۰
$-0/7672$	۱	$f_{\beta 3}$	۵۵	$-1/829$	$kPa$	$e_{a1}$	۳۳	$-0/2 \times 10^{-5}$	$mT^{-1}$	$g_{E3}$	۱۱
$-0/0.2332$	$mT^{-1}$	$f_{\beta 4}$	۵۶	$-0/1181$	$mT^{-1}$	$e_{a2}$	۳۴	$-0/2556$	۱	$g_{E4}$	۱۲
$2/947 \times 10^{-8}$	$mT^{-3}$	$g_{\beta 1}$	۵۷	$-1/241$	$kPa$	$e_{a3}$	۳۵	$8 \times 10^{-10}$	$mT^{-3}$	$h_{E1}$	۱۳
$-1/794 \times 10^{-5}$	$mT^{-2}$	$g_{\beta 2}$	۵۸	$-1/812 \times 10^{-9}$	$mT^{-1}$	$e_{a4}$	۳۶	$-4/8 \times 10^{-9}$	$mT^{-2}$	$h_{E2}$	۱۴
$-/...0.3997$	$mT^{-1}$	$g_{\beta 3}$	۵۹	$8/325 \times 10^{-8}$	$mT^{-3}$	$f_{a1}$	۳۷	$8/9 \times 10^{-8}$	$mT^{-1}$	$h_{E3}$	۱۵
$-1/236$	۱	$g_{\beta 4}$	۶۰	$-4/838 \times 10^{-8}$	$mT^{-2}$	$f_{a2}$	۳۸	$-0/2252$	۱	$h_{E4}$	۱۶
$-0/158 \times 10^{-8}$	$mT^{-3}$	$h_{\beta 1}$	۶۱	$-/...8688$	$mT^{-1}$	$f_{a3}$	۳۹	$-9/583 \times 10^{-9}$	$kPa.s.mT^{-3}$	$e_{\eta 1}$	۱۷
$2/0.51 \times 10^{-5}$	$mT^{-2}$	$h_{\beta 2}$	۶۲	$-0/4158$	۱	$f_{a4}$	۴۰	$7/225 \times 10^{-9}$	$kPa.s.mT^{-2}$	$e_{\eta 2}$	۱۸
$-/...0.3787$	$mT^{-1}$	$h_{\beta 3}$	۶۳	$-1/0.2 \times 10^{-8}$	$mT^{-3}$	$g_{a1}$	۴۱	$-/...0.5787$	$kPa.s.mT^{-1}$	$e_{\eta 3}$	۱۹
$-0/0.5429$	۱	$h_{\beta 4}$	۶۴	$2/255 \times 10^{-9}$	$mT^{-2}$	$g_{a2}$	۴۲	$0/3958$	$kPa.s$	$e_{\eta 4}$	۲۰
$-/...0.9907$				$mT^{-1}$	$g_{a3}$	۴۳	$-9/5 \times 10^{-10}$	$mT^{-3}$	$f_{\eta 1}$	۲۱	
$-0/5756$				۱	$g_{a4}$	۴۴	$-5/5 \times 10^{-9}$	$mT^{-2}$	$f_{\eta 2}$	۲۲	

### ۳-۵-اعتبارسنجی<sup>۱</sup> مدل پیشنهادی

در تصویر ۱۲، نمودارهای هیسترزیس تنش-کرنش بر اساس مدل پیشنهادی و داده‌های آزمایشگاهی، در دو حالت با و بدون اعمال پیش‌کرنش استاتیکی، در چگالی شاره‌ها، فرکانس‌ها و کرنش‌های ورودی مختلف ترسیم شده است. با توجه به این تصاویر، می‌توان اعتبار مدل را به صورت کیفی مشاهده نمود.



<sup>1</sup> Validation



شکل ۱۲: نمودارهای هیسترزیس تنش-کرنش بر اساس مدل پیشنهادی و داده‌های آزمایشگاهی در دو حالت با و بدون اعمال پیشکرنش استاتیکی. (الف) در کرنش ۴٪، فرکانس ۵ هرتز و چگالی شار مغناطیسی ۱۰۰ میلی تسلایا، (ب) در کرنش ۴٪، فرکانس ۳ هرتز و چگالی شار مغناطیسی ۲۰۰ میلی تسلایا، (ج) در کرنش ۱۲٪، فرکانس ۱ هرتز و چگالی شار مغناطیسی ۲۰۰ میلی تسلایا، (د) در کرنش ۱۶٪، فرکانس ۱ هرتز و چگالی شار مغناطیسی ۲۰۰ میلی تسلایا

**Figure 12. Comparisons of the stress-strain hysteresis traits estimated by the proposed model with the experimental records subject to different levels of pre-strain and excitation conditions. (a) At a strain of 4%, frequency of 5 Hz, and magnetic flux density of 100 mT, (b) At a strain of 4%, frequency of 3 Hz, and magnetic flux density of 200 mT, (c) At a strain of 12%, frequency of 1 Hz, and magnetic flux density of 200 mT, and (d) At a strain of 16%, frequency of 1 Hz, and magnetic flux density of 200 mT**

به منظور ارزیابی و اعتبارسنجی کمی پاسخ‌های حاصل از مدل پیشنهادی و محاسبه میزان مطابقت این پاسخ‌ها با داده‌های آزمایشگاهی در شرایط مختلف بارگذاری، از شاخص درصد تطابق استفاده گردیده است. این شاخص، طبق معادله (۱۱) تعریف می‌شود:

$$\%fitnessvalue = \left[ 1 - \frac{norm(\tau_{Model} - \tau_{Exp})}{norm(\tau_{Exp} - mean(\tau_{Exp}))} \right] \times 100 \quad (11)$$

در رابطه بالا، ( $\tau_{Model}$ ) تنش میانگین نرمال<sup>۱</sup> و  $\tau_{Exp}$  تنش بدست آمده از آزمایشات هستند. در جدول ۵، میزان درصد تطابق پاسخ‌های حاصل از مدل پیشنهادی با داده‌های آزمایشگاهی نمایش داده شده در نمودارهای تصویر ۱۲ آورده شده است.

جدول ۵: میزان درصد تطابق پاسخ‌های حاصل از مدل پیشنهادی با داده‌های آزمایشگاهی

**Table 5. The values of the compatibility of the stress-strain hysteresis traits estimated by the proposed model with the experimental records**

میزان درصد تطابق (%)	پیش‌کنش استاتیکی	شرایط بارگذاری
۹۵/۲۸۵۰	%۲۱	کرنش ۴٪، فرکанс ۵ هرتز و چگالی شار مغناطیسی ۱۰۰ میلی تсла
۹۴/۳۵۵۱	%۰	
۹۴/۰۵۲۰	%۲۱	کرنش ۴٪، فرکанс ۳ هرتز و چگالی شار مغناطیسی ۲۰۰ میلی تsla
۹۴/۶۶۸۰	%۰	
۹۴/۰۵۹۱	%۲۱	کرنش ۱۲٪، فرکанс ۱ هرتز و چگالی شار مغناطیسی ۲۰۰ میلی تsla
۹۴/۸۴۷۰	%۰	
۹۱/۳۷۰۶	%۲۱	کرنش ۱۶٪، فرکанс ۱ هرتز و چگالی شار مغناطیسی ۲۰۰ میلی تsla
۹۴/۵۵۲۳	%۰	

میزان تطابق پاسخ‌های حاصل از مدل پیشنهادی با داده‌های آزمایشگاهی توسط شاخص درصد تطابق به صورت مجزا برای هر آزمایش محاسبه گردیده است و مقدار آن در هر یک از شرایط بارگذاری، به طور میانگین در حدود ۹۰ درصد بدست آمده است. این میزان از تطابق، نشان از مناسب بودن این مدل در پیش‌بینی رفتار الاستومرها مگنتورئولوژیکال در شرایط مختلف بارگذاری دارد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به بررسی تاثیر پیش‌کنش استاتیکی بر مدول دینامیکی و رفتار تنش-کرنش الاستومر مگنتورئولوژیکال همسانگرد تحت بارگذاری دینامیکی کششی-فشاری و مدلسازی رفتار آنها در شرایط بارگذاری مختلف پرداخته شد. در ابتدا، با ساخت نمونه‌های الاستومر مگنتورئولوژیکال و سپس، انجام آزمایش دینامیکی کشش-فشار بر روی آنها تحت مقادیر مختلفی از فرکانس تحریک (۱ تا ۷ هرتز)، درصد کرنش (۰٪ تا ۱۶٪)، چگالی شار مغناطیسی (۰ تا ۳۰۰ میلی تsla) و با اعمال پیش‌کنش‌های فشاری مختلف (۱۱٪ و ۰٪)، اثر پیش‌کنش استاتیکی بر مدول ذخیره و اتلاف و رفتار تنش-کرنش الاستومرها مگنتورئولوژیکال در کرنش‌ها، فرکانس‌ها و چگالی شارهای متفاوت، به طور تجربی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. در ادامه، به منظور لحاظ کردن اثر پیش‌کنش استاتیکی در پیش‌بینی رفتار ویسکوالاستیک الاستومرها مگنتورئولوژیکال، یک مدل جدید و جامع با در نظر گرفتن این اثر ارائه گردید. نتایج اصلی حاصل از این آزمایش، به شرح زیر می‌باشند:

<sup>۱</sup> Normal mean function

## ۵- فهرست علائم

### علام انجليسى

mm <sup>2</sup>	سطح مقطع موثر نمونه،	A
mT	چگالی شار مغناطیسی،	B
kPa	مدول یانگ ماده،	E
kPa	مدول ذخیره،	E'
kPa	مدول اتلاف،	E''
Hz	فرکانس تحریک (زیر کردن ورودی)،	f
Hz	فرکانس تحریک مرجع،	f <sub>R</sub>
N	بیشترین نیرو،	f <sub>0</sub>
N	نیروی متناظر با بیشترین جایه جایی،	f <sub>1</sub>
N	نیروی متناظر با جایه جایی صفر،	f <sub>2</sub>
%	شاخص درصد تطابق،	%fitnessvalue
mm	ضخامت نمونه،	h
%	اثر مگنتورئولوژیکال نسبی از دیدگاه توانایی الاستومر در برابر اتلاف انرژی،	%MReffect
نرم	تابع میانگین نرمال	norm
s	زمان سیکل،	t
mm	بیشترین جایه جایی،	x <sub>0</sub>

علامه یونانی

مدول عدم تقارن هیسترزیس غیرخطی در حالت کشش-فشار،	$kPa$	$\alpha$
مدول کرنش-سخت‌شوندگی غیرخطی،	$kPa$	$\beta$
پیش‌کرنش استاتیکی،	%	$\varepsilon_p$
کرنش تحریک،	%	$\varepsilon_0$
کرنش ورودی در واحد زمان،	%	$\varepsilon$
نرخ کرنش ورودی در واحد زمان،	1/s	$\dot{\varepsilon}$
ویسکوزیته دینامیکی موثر ماده،	$kPa.s$	$\eta$
تنش خروجی در واحد زمان،	$kPa$	$\sigma$
تنش خروجی،	$kPa$	$\tau$
زیرنویس		
بیشترین چگالی شار مغناطیسی (۳۰۰ میلی تسلا)		$B_{max}$
کمترین چگالی شار مغناطیسی (صفر میلی تسلا)		$B_{min}$
اتلاف		<i>Damping</i>
آزمایش		<i>Exp</i>
هیسترزیس		<i>Hysteresis</i>
مدل		<i>Model</i>
الاستومر مگنتورئولوژیکال		<i>MRE</i>
حلقه هیسترزیس تنش-کرنش		<i>Stress-Strain Loop</i>
ویسکوالاستیک		<i>Viscoelastic</i>

۶- منابع و مراجع

- [1] A. Ritter, Smart materials in architecture, interior architecture and design, Walter de Gruyter, 2006.
- [2] T.J. Fiske, H.S. Gokturk, D.M. Kalyon, Percolation in magnetic composites, Journal of Materials Science, 32 (1997) 5551-5560.
- [3] L. Chen, X.L. Gong, W.H. Li, Microstructures and viscoelastic properties of anisotropic magnetorheological elastomers, Smart materials and structures, 16(6) (2007) 2645.
- [4] J.D. Carlson, M.R. Jolly, MR fluid, foam and elastomer devices, mechatronics, 10(4-5) (2000) 555-569.
- [5] A.K. Bastola, M. Hossain, A review on magneto-mechanical characterizations of magnetorheological elastomers, Composites Part B: Engineering, 200 (2020) 108348.
- [6] F. Guo, C.B. Du, R.P. Li, Viscoelastic parameter model of magnetorheological elastomers based on abel dashpot, Advances in Mechanical Engineering, 6 (2014) 629386.
- [7] M.R. Jolly, J.D. Carlson, B.C. Munoz, A model of the behaviour of magnetorheological materials, Smart materials and structures, 5(5) (1996) 607.
- [8] J. Rabinow, The magnetic fluid clutch, Electrical Engineering, 67(12) (1948) 1167-1167.
- [9] Z. Rigbi, L. Jilken, The response of an elastomer filled with soft ferrite to mechanical and magnetic influences, Journal of magnetism and magnetic materials, 37(3) (1983) 267-276.
- [10] T. Shiga, A. Okada, T. Kurauchi, Electroviscoelastic effect of polymer blends consisting of silicone elastomer and semiconducting polymer particles, Macromolecules, 26(25) (1993) 6958-6963.

- [11] M.R. Jolly, J.D. Carlson, B.C. Muñoz, T.A. Bullions, The magnetoviscoelastic response of elastomer composites consisting of ferrous particles embedded in a polymer matrix, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 7(6) (1996) 613-622.
- [12] P. Blom, L. Kari, A nonlinear constitutive audio frequency magneto-sensitive rubber model including amplitude, frequency and magnetic field dependence, *Journal of sound and vibration*, 330(5) (2011) 947-954.
- [13] T. Shiga, A. Okada, T. Kurauchi, Magnetoviscoelastic behavior of composite gels, *Journal of Applied Polymer Science*, 58(4) (1995) 787-792.
- [14] B.X. Ju, M. Yu, J. Fu, Q. Yang, X.Q. Liu, X. Zheng, A novel porous magnetorheological elastomer: preparation and evaluation, *Smart Materials and Structures*, 21(3) (2012) 035001.
- [15] A. Dargahi, R. Sedaghati, S. Rakheja, On the properties of magnetorheological elastomers in shear mode: Design, fabrication and characterization, *Composites Part B: Engineering*, 159 (2019) 269-283.
- [16] H. Vatandoost, M. Hemmatian, R. Sedaghati, S. Rakheja, Effect of shape factor on compression mode dynamic properties of magnetorheological elastomers, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 32(15) (2021) 1678-1699.
- [17] A. Yaghoobi, A. Jalali, M. Norouzi, M. Ghatee, Aspect Ratio Dependency of Magneto-Rheological Elastomers in Dynamic Tension-Compression Loading, *IEEE Transactions on Magnetics*, 58(5) (2022) 1-13.
- [18] F. Gordaninejad, X. Wang, P. Mysore, Behavior of thick magnetorheological elastomers, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 23(9) (2012) 1033-1039.
- [19] Q. Jin, Y.G. Xu, Y. Di, H. Fan, Influence of the particle size on the rheology of magnetorheological elastomer, *Materials Science Forum*, 80(9) (2015) 757-763.
- [20] C. Wu, C. Cheng, A. Abd El-Aty, T. Li, Y. Qin, Q. Yang, S. Hu, Y. Xu, X. Guo, Influence of particles size and concentration of carbonyl iron powder on magnetorheological properties of silicone rubber-based magnetorheological elastomer, *Materials Research Express*, 7(8) (2020) 086101.
- [21] O. Padalka, H.J. Song, N.M. Wereley, J.A. Filer II, R.C. Bell, Stiffness and damping in Fe, Co, and Ni nanowire-based magnetorheological elastomeric composites, *IEEE Transactions on Magnetics*, 46(6) (2010) 2275-2277.
- [22] G. Shi, W. Wang, G. Wang, F. Yang, X. Rui, Dynamic mechanical properties of FeSi alloy particles-filled magnetorheological elastomers, *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 58(15) (2019) 1625-1637.
- [23] W. Zhang, X.L. Gong, W.Q. Jiang, Y.C. Fan, Investigation of the durability of anisotropic magnetorheological elastomers based on mixed rubber, *Smart Materials and Structures*, 19(8) (2010) 085008.
- [24] A. Nedjar, S. Aguib, T. Djedid, A. Nour, A. Settet, M. Tourab, Analysis of the dynamic behavior of magnetorheological elastomer composite: Elaboration and identification of rheological properties, *Silicon*, 11(3) (2019) 1287-1293.
- [25] Y. Wan, Y. Xiong, S. Zhang, Temperature effect on viscoelastic properties of anisotropic magnetorheological elastomers under compression, *Smart Materials and Structures*, 28(1) (2018) 015005.
- [26] W. Zhang, X. Gong, S. Xuan, W. Jiang, Temperature-dependent mechanical properties and model of magnetorheological elastomers, *Industrial & engineering chemistry research*, 50(11) (2011) 6704-6712.
- [27] J.H. Koo, F. Khan, D.D. Jang, H.J. Jung, Dynamic characterization and modeling of magneto-rheological elastomers under compressive loadings, *Smart Materials and Structures*, 19(11) (2010) 117002.

- [28] A. Martins, A. Fereidooni, A. Suleman, V.K. Wickramasinghe, Test rig development and characterization of magnetorheological elastomers, in: 25th AIAA/AHS Adaptive Structures Conference, 2017, pp. 0733.
- [29] H. Vatandoost, R. Sedaghati, S. Rakheja, M. Hemmatian, Effect of pre-strain on compression mode properties of magnetorheological elastomers, *Polymer Testing*, 93 (2021) 106888.
- [30] J. Zhang, H. Pang, Y. Wang, X. Gong, The magneto-mechanical properties of off-axis anisotropic magnetorheological elastomers, *Composites Science and Technology*, 191 (2020) 108079.
- [31] T. Tian, M. Nakano, Fabrication and characterisation of anisotropic magnetorheological elastomer with 45° iron particle alignment at various silicone oil concentrations, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 29(2) (2018) 151-159.
- [32] Y. Yu, Y. Li, J. Li, A novel strain stiffening model for magnetorheological elastomer base isolator and parameter estimation using improved particle swarm optimization, in: Sixth World Conference on Structural Control and Monitoring (6WCSCM), International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), 2014.
- [33] J. Yang, H. Du, W. Li, Y. Li, J. Li, S. Sun, H.X. Deng, Experimental study and modeling of a novel magnetorheological elastomer isolator, *Smart Materials and Structures*, 22(11) (2013) 117001.
- [34] W.H. Li, Y. Zhou, T.F. Tian, Viscoelastic properties of MR elastomers under harmonic loading, *Rheologica acta*, 49(7) (2010) 733-740.
- [35] S.H. Eem, H.J. Jung, J.H. Koo, Modeling of magneto-rheological elastomers for harmonic shear deformation, *IEEE transactions on magnetics*, 48(11) (2012) 3080-3083.
- [36] M. Norouzi, S.M. Sajjadi Alehashem, H. Vatandoost, Y.Q. Ni, M.M. Shahmardan, A new approach for modeling of magnetorheological elastomers, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 27(8) (2016) 1121-1135.
- [37] H. Vatandoost, M. Norouzi, S.M.S. Alehashem, S.K. Smoukov, A novel phenomenological model for dynamic behavior of magnetorheological elastomers in tension-compression mode, *Smart Materials and Structures*, 26(6) (2017) 065011.
- [38] K.M. Popp, M. Kröger, W.h. Li, X.Z. Zhang, P.B. Kosahih, MRE properties under shear and squeeze modes and applications, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 21(15) (2010) 1471-1477.
- [39] H. Vatandoost, M. Hemmatian, R. Sedaghati, S. Rakheja, Dynamic characterization of isotropic and anisotropic magnetorheological elastomers in the oscillatory squeeze mode superimposed on large static pre-strain, *Composites Part B: Engineering*, 182 (2020) 107648.
- [40] R. Brown, *Physical testing of rubber*, Springer Science & Business Media, 2006.

معادلات (۱۶-الف) الی (۱-الف) به شرح زیر می باشند:

$$a_{E(B)} = e_{E1}B^3 + e_{E2}B^2 + e_{E3}B + e_{E4} \quad (۱-الف)$$

$$b_{E(B)} = f_{E1}B^3 + f_{E2}B^2 + f_{E3}B + f_{E4} \quad (۲-الف)$$

$$c_{E(B)} = g_{E1}B^3 + g_{E2}B^2 + g_{E3}B + g_{E4} \quad (۳-الف)$$

$$d_{E(B)} = h_{E1}B^3 + h_{E2}B^2 + h_{E3}B + h_{E4} \quad (۴-الف)$$

$$a_{\eta(B)} = e_{\eta1}B^3 + e_{\eta2}B^2 + e_{\eta3}B + e_{\eta4} \quad (۵-الف)$$

$$b_{\eta(B)} = f_{\eta1}B^3 + f_{\eta2}B^2 + f_{\eta3}B + f_{\eta4} \quad (۶-الف)$$

$$c_{\eta(B)} = g_{\eta1}B^3 + g_{\eta2}B^2 + g_{\eta3}B + g_{\eta4} \quad (۷-الف)$$

$$d_{\eta(B)} = h_{\eta1}B^3 + h_{\eta2}B^2 + h_{\eta3}B + h_{\eta4} \quad (۸-الف)$$

$$a_{\alpha(B)} = e_{\alpha1}\exp(e_{\alpha2}B) + e_{\alpha3}\exp(e_{\alpha4}B) \quad (۹-الف)$$

$$b_{\alpha(B)} = f_{\alpha1}B^3 + f_{\alpha2}B^2 + f_{\alpha3}B + f_{\alpha4} \quad (۱۰-الف)$$

$$c_{\alpha(B)} = g_{\alpha1}B^3 + g_{\alpha2}B^2 + g_{\alpha3}B + g_{\alpha4} \quad (۱۱-الف)$$

$$d_{\alpha(B)} = h_{\alpha1}B^3 + h_{\alpha2}B^2 + h_{\alpha3}B + h_{\alpha4} \quad (۱۲-الف)$$

$$a_{\beta(B)} = e_{\beta1}B^3 + e_{\beta2}B^2 + e_{\beta3}B + e_{\beta4} \quad (۱۳-الف)$$

$$b_{\beta(B)} = f_{\beta1}\exp(f_{\beta2}B) + f_{\beta3}\exp(f_{\beta4}B) \quad (۱۴-الف)$$

$$c_{\beta(B)} = g_{\beta1}B^3 + g_{\beta2}B^2 + g_{\beta3}B + g_{\beta4} \quad (۱۵-الف)$$

$$d_{\beta(B)} = h_{\beta1}B^3 + h_{\beta2}B^2 + h_{\beta3}B + h_{\beta4} \quad (۱۶-الف)$$

# Investigating the Effect of Static Pre-Strain on Tension-Compression Mode Properties of Isotropic Magnetorheological Elastomers

Amirmasoud Alimardan<sup>a</sup>, Mahmood Norouzi<sup>a,1</sup>, Mojtaba Ghatee<sup>b</sup>, Mohammadbagher Nazari<sup>a</sup>, Mohammad Hossein Izadifard<sup>a</sup>, Amirhossein Yaghoobi<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Department of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

<sup>b</sup> Department of Chemical and Materials Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

## ABSTRACT

Magnetorheological elastomers are a class of smart materials and possess two unique features, i.e. adjustable hardness and damping capabilities. These characteristics make them widely used in various industrial applications. Hence, understanding their behavior in different systems is necessary. The focus of this work is to study the dynamic behavior of magnetorheological elastomers under different static pre-strains in tension-compression mode. In this study, three isotropic samples were fabricated and the force-deflection features of them were acquired under harmonic excitation with various strain amplitudes, static pre-strains, frequencies, and magnetic flux densities. Assess the effect of static pre-strain on the dynamic response of the magnetorheological elastomers, studying the effects of other parameters like strains, frequencies, and magnetic flux densities on the dynamic modulus of magnetorheological elastomers, and proposing a novel phenomenological-based model to predict the viscoelastic behavior of magnetorheological elastomers are the innovative aspects of this study. The results showed that the dynamic modulus of magnetorheological elastomers will increase by superimposing the static pre-strain. Furthermore, the relative MR effect decreases when the static pre-strain is applied. The maximum relative MR effect of 288.32% has been achieved at a strain of 4%, a frequency of 7 Hz, and without the application of static pre-strain.

## KEYWORDS

Magnetorheological elastomer, Static pre-strain, Dynamic modulus, Stress-strain, Genetic algorithm.

<sup>1</sup> Corresponding Author: Email: [mnorouzi@shahroodut.ac.ir](mailto:mnorouzi@shahroodut.ac.ir)