Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 55(10) (2024) 261-264
DOI: 10.22060/mej.2024.22544.7642

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

A. M. Alimardan[1], M. Norouzi[1]*, M. Ghatee[2], M. B. Nazari[1], M. H. Izadifard[1], A. H. Yaghoobi[1]

[1] Department of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
[2] 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 their force-deflection features 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.

Review History:

Received: Jul. 08, 2023
Revised: Dec. 11, 2023
Accepted: Jan. 08, 2024
Available Online: Feb. 02, 2024

Keywords:

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

1- Introduction

Magnetorheological elastomers (MREs) are a large class of magnetorheological materials that react to external magnetic stimulation, and their rheological properties can be quickly and reversibly controlled by applying a magnetic field [1-3]. These materials are formed by placing magnetized particles in a rubber matrix and are divided into two groups, isotropic and anisotropic. The production of these two groups of elastomers depends on the presence or absence of magnetic flux density during the curing process [4]. In recent years, MREs have garnered considerable attention in engineering circles due to their tunable stiffness and damping qualities. Upon reviewing existing research, it is generally observed that previous studies have examined the dynamic behavior of MREs with consideration of a constant pre-strain. The current research aims to experimentally investigate the impact of static pre-strain on the tensile and compressive storage and loss moduli, as well as the stress-strain hysteresis traits of isotropic MREs through dynamic tension-compression testing. Additionally, the study aims to develop a comprehensive nonlinear viscoelastic model that incorporates the effect of pre-strain to gain deeper insight into the MRE's behavior under diverse loading conditions. The key innovations of this study include:

• A thorough examination of the impact of static pre-strain on the tensile and compressive storage and loss moduli, as well as the stress-strain hysteresis traits of MREs in dynamic tension-compression testing.

• An exploration into the influence of various parameters, such as frequency, strain, and magnetic flux density, on the dynamic response of MREs.

• The development of a comprehensive nonlinear viscoelastic model considering the impact of static pre-strain, aimed at predicting the stress-strain relationship and dynamic moduli of MREs under various loading conditions.

2- Methodology

In this study, according to ISO 7743 and ASTM D395-03 standards, three cylindrical MRE samples with a diameter of 29±0.5 mm and a height of 12.5±0.5 mm (shape factor 0.58) were fabricated and were composed of 70% mass fraction of carbonyl iron particles (CIPs), 20% mass fraction of silicone polymer, and 10% mass fraction of silicone oil. The dynamic tension-compression test was conducted using an INSTRON 8802 servo-hydraulic fatigue testing system. The experiment design included factorial combinations of

*Corresponding author's email: mnorouzi@shahroodut.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

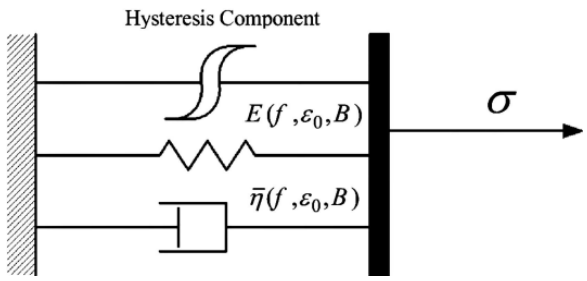


Fig. 1. The viscoelastic model presented by Vatandoost et al. [6]

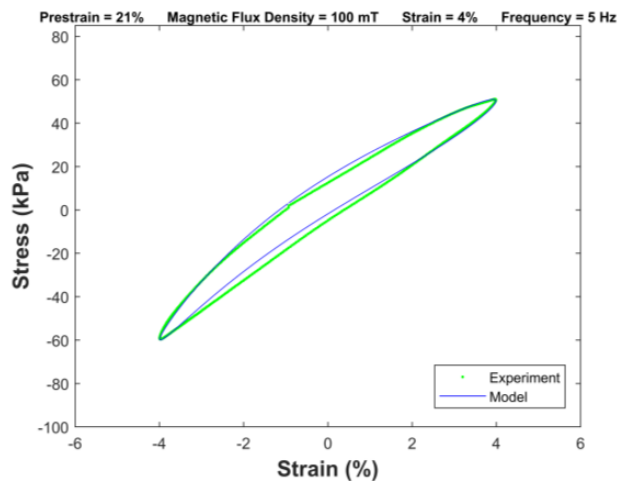
four excitation frequencies (1, 3, 5, and 7 Hz) applied at four different strains (4%, 8%, 12%, and 16%), along with four different amounts of magnetic flux density (0, 100, 200, and 300 mT), and two static pre-strains (0% and 21%) for each elastomer sample, resulting in a total of 128 tests. The steady-state force and displacement data were low-pass filtered. The moving average was selected as the smoothing method which is a low-pass filter. After filtering, the data was averaged, and the resultant mean force-displacement loop was meticulously analyzed to calculate the tensile and compressive storage and loss moduli of the elastomers. In this study, dynamic moduli were calculated by employing the Roger Brown method [5]. After the dynamic moduli calculation, the mean force-displacement loops were transformed into mean stress-strain loops to model the stress-strain hysteresis traits of the MREs. The cornerstone of this research is the introduction of a groundbreaking and comprehensive model, which integrates the effect of pre-strain in forecasting the viscoelastic behavior of MREs. This model is an enhancement of the viscoelastic model previously developed by Vatandoost et al. [6], as illustrated in Figure 1, augmented with the inclusion of a constant pre-strain factor to amplify its predictive accuracy.

By incorporating the static pre-strain constant (ε_p) into the model, its constitutive equations are predicted as Equation (1). In this equation, $\sigma_{(t)}$ and $\varepsilon_{(t)}$ are stress output and strain input, while E, η, α, and β denote the dynamic storage modulus (equivalent stiffness), loss modulus (effective viscosity, equivalent damping), the asymmetric hysteresis (or tension–compression asymmetry), and strain-stiffening behavior, respectively. Furthermore, f, B, ε_0, and ε_p correspond to the driving frequency, magnetic flux density, loading strain, and static pre-strain, respectively.

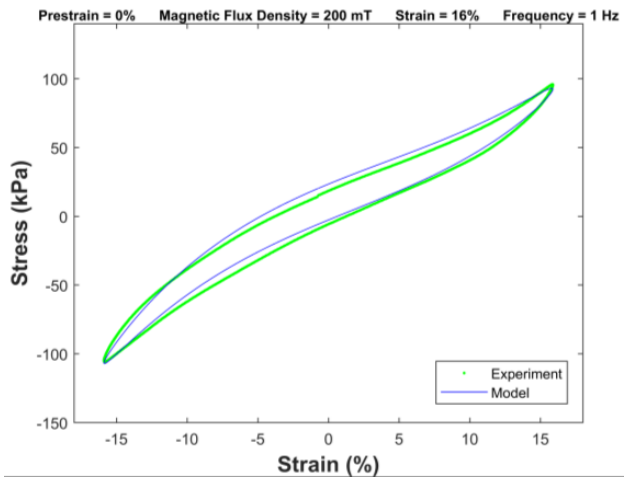
$$\begin{aligned}
\sigma_{MRE} &= \sigma_{Viscoelastic} + \sigma_{Hysteresis} \\
\sigma_{Viscoelastic} &= E(f,\varepsilon_0,B,\varepsilon_p)\varepsilon(t) + \eta(f,\varepsilon_0,B,\varepsilon_p)\dot{\varepsilon}(t) \\
\sigma_{Hysteresis} &= \alpha(f,\varepsilon_0,B,\varepsilon_p)\varepsilon^2(t) + \beta(f,\varepsilon_0,B,\varepsilon_p)\varepsilon^3(t)
\end{aligned} \tag{1}$$

3- Discussion and Results

The accuracy of the proposed model has been validated in Figure 2, where the predicted response of the MRE has been compared to the corresponding experimental results subject



(a)



(b)

Fig. 2. 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%, pre-strain of 21%, frequency of 5 Hz, and magnetic flux density of 100 mT, and (b) At a strain of 16%, pre-strain of 0%, frequency of 1 Hz, and magnetic flux density of 200 mT

to different levels of pre-strain and excitation conditions. As shown in Figure 2, the model accurately predicted the hysteresis response of the MREs at different levels of pre-strain. It is important to note that the accuracy of the model was maintained under other loading conditions and field intensities. To evaluate the accuracy of the proposed model compared to the experimental data, the fitness index has been introduced as:

$$\%fitnessvalue = \left[1 - \frac{norm\left(\tau_{Model} - \tau_{Exp}\right)}{norm\left(\tau_{Exp} - mean\left(\tau_{Exp}\right)\right)}\right] \times 100 \tag{2}$$

Where *norm* is the normal mean function and τ_{Model} and τ_{Exp} denote the estimated tension and the corresponding experimental values, respectively. Results showed a compatibility of over 90% between the proposed model and the experiments for all loading conditions and field intensities, which illustrates the capability of the model to approximate MRE characteristics in practical applications.

4- Conclusions

In this study, the impact of static pre-strain on the tensile and compressive storage and loss moduli and the stress-strain hysteresis traits of isotropic MREs in dynamic tension-compression testing was investigated and in the next step, a comprehensive nonlinear viscoelastic model considering the impact of static pre-strain, aimed at predicting the stress-strain relationship and dynamic moduli of MREs under various loading conditions was proposed. Three of the most important findings from this research are summarized as follows:

• Applying static pre-strain increases the values of tensile and compressive storage and loss moduli at all strains, frequencies, and magnetic flux densities.

• 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.

• The proposed nonlinear model has a relatively accurate response (with compatibility of over 90%) for all loading conditions and can be used to approximate MRE characteristics in practical applications.

References

[1] T.J. Fiske, H.S. Gokturk, D.M. Kalyon, Percolation in magnetic composites, Journal of Materials Science, 32 (1997) 5551-5560.

[2] L. Chen, X.L. Gong, W.H. Li, Microstructures and viscoelastic properties of anisotropic magnetorheological elastomers, Smart materials and structures, 16(6) (2007) 2645.

[3] J.D. Carlson, M.R. Jolly, MR fluid, foam and elastomer devices, mechatronics, 10(4-5) (2000) 555-569.

[4] A.K. Bastola, M. Hossain, A review on magneto-mechanical characterizations of magnetorheological elastomers, Composites Part B: Engineering, 200 (2020) 108348.

[5] R. Brown, Physical testing of rubber, Springer Science & Business Media, 2006.

[6] 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.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. M. Alimardan, M. Norouzi, M. Ghatee, M. B. Nazari, M. H. Izadifard, A. H. Yaghoobi, Investigating the Effect of Static Pre-Strain on Tension-Compression Mode Properties of Isotropic Magnetorheological Elastomers , Amirkabir J. Mech Eng., 55(10) (2024) 261-264.

DOI: 10.22060/mej.2024.22544.7642

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۵، شماره ۱۰، سال ۱۴۰۲، صفحات ۱۲۳۳ تا ۱۲۶۰
DOI: 10.22060/mej.2024.22544.7642

بررسی تاثیر پیش‌کرنش استاتیکی بر مدول دینامیکی و رفتار تنش-کرنش الاستومر مگنتورئولوژیکال همسانگرد تحت بارگذاری دینامیکی کششی-فشاری

امیرمسعود علیمردان[۱]، محمود نوروزی[۱،*]، مجتبی قطعی[۲]، محمدباقر نظری[۱]، محمدحسین ایزدی‌فرد[۱]، امیرحسین یعقوبی[۱]

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
۲- دانشکده مهندسی شیمی و مواد، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

خلاصه: 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 میرایی قابل تنظیم، دارای کاربردهای فراوانی در صنعت شده‌اند. 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 کشش-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 ۲۸۸/۳۲٪ در کرنش ۴٪، فرکانس ۷ هرتز و بدون اعمال پیش‌کرنش ایجاد می‌شود.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۷
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۲۰
پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱۸
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۱۱/۱۳

کلمات کلیدی:
الاستومر مگنتورئولوژیکال
پیش‌کرنش استاتیکی
مدول دینامیکی
تنش-کرنش
الگوریتم ژنتیک

۱- مقدمه

مواد هوشمند دسته‌ای از مواد هستند که عموماً خواص مادی آنها تحت تاثیر محرک‌های خارجی (اعم از جریان الکتریکی، کرنش مکانیکی، میدان مغناطیسی و دما) تغییر می‌یابد [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 [۲-۴]. سیالات و الاستومرهای مگنتورئولوژیکال، دو دسته اصلی از مواد مگنتورئولوژیکال به حساب می‌آیند. الاستومرهای مگنتورئولوژیکال از قرارگیری ذرات مغناطیس‌شونده 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 ویسکوالاستیک دسته‌بندی می‌شوند و در آنها، تنش هم به کرنش و هم به نرخ کرنش وابسته است [۶]. با قرار دادن این مواد تحت چگالی شار مغناطیسی، ذرات مغناطیس‌شونده 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 سال های 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. امروزه، 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

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mnorouzi@shahroodut.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

میلادی توسط رابینو[1] [۸] با مطالعه بر روی کلاچ سیال مگنتورئولوژیکال آغاز شد. پس از آن، ریگبی[2] و همکاران [۹] در سال ۱۹۸۳ میلادی برای اولین بار الاستومرهای مگنتورئولوژیکال را معرفی کردند و بر روی رفتار آنها تحت تنش‌های الاستیک و میدان‌های مغناطیسی مختلف تحقیق کردند. یک دهه بعد، شیگا[3] و همکاران [۱۰] اثر الکترورویسکوالاستیک 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[4] و همکاران [۱۱] انجام گردید و منجر به ارائه یک مدل دو قطبی شبه‌استاتیکی برای تحلیل تغییرات مدول الاستومر شد. بلوم[5] 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 می‌یابد. شیگا و همکاران [۱۳] نشان دادند وقتی مقدار کرنش بیشتر از ۱ درصد شود، مدول ذخیره برشی کاهش می‌یابد. جو[6] 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[7] 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 می‌یابد، درحالیکه در فرکانس ۵۰ هرتز و کرنش ۲۰ درصد، مدول ذخیره برشی ۲۵۲ درصد افزایش می‌یابد. در رابطه با بررسی اثر عامل‌شکل و ضخامت نمونه‌های الاستومر بر روی خواص مکانیکی و رئولوژیکی آنها، وطن‌دوست[8] و همکاران [۱۶] با انجام تست کشش–فشار تحت پیش‌کرنش ثابت ۲۱ درصد و مقادیر مختلفی از کرنش، چگالی شار مغناطیسی و فرکانس بر روی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال همسانگرد و ناهمسانگرد که دارای عامل‌شکل ۰/۳۷۵، ۰/۵۶ و ۰/۷۵ و درصد حجمی‌های متفاوتی از پودر آهن کربونیل (۱۵ و ۳۰ درصد) بودند، گزارش کردند که با افزایش عامل‌شکل، مقدار مدول ذخیره و مدول اتلاف همه نمونه‌های همسانگرد و ناهمسانگرد افزایش می‌یابد. یعقوبی[9] 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 ۰/۲۶۸، ۰/۳۲۱، ۰/۴۰۵ و ۰/۵۳۹ بودند، گزارش کردند که با کاهش نسبت ابعادی، مقدار مدول ذخیره افزایش می‌یابد و مقدار مدول اتلاف تغییر چندانی نمی‌کند. گردانی‌نژاد[10] و همکاران [۱۸] با انجام تست کشش–فشار و تست برش بر روی چند نمونه الاستومر مگنتورئولوژیکال ناهمسانگرد با ضخامت‌های مختلف (۶/۳۵ تا ۲۵/۴ 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 مغناطیس‌شونده و میزان چگالی شار مغناطیسی حین تست می‌باشد. در ارتباط با بررسی اثرات اندازه و جنس ذرات مغناطیس‌شونده، جین[11] و همکاران [۱۹] با ساخت الاستومرهای ناهمسانگرد از ذرات آهن با اندازه‌های ۵، ۱۴، ۳۸، ۷۴ و ۱۵۰ میکرون و بررسی آنها در مد برشی، گزارش کردند که مقدار اثر مگنتورئولوژیکال با افزایش اندازه ذرات مغناطیس‌شونده از ۵ تا ۷۴ میکرون، افزایش و از ۷۴ تا ۱۵۰ میکرون، کاهش می‌یابد. وو[12] و همکاران [۲۰] با ساخت نمونه‌های الاستومر ناهمسانگرد از ذرات آهن کربونیل با اندازه‌های ۱/۷، ۲/۸، ۳/۹، ۴/۶ و ۷/۲ میکرون و درصد وزنی‌های ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درصد و بررسی آنها تحت تست فشار استاتیک و شبه استاتیک، گزارش کردند که مقدار اثر مگنتورئولوژیکال با افزایش اندازه ذرات مغناطیس‌شونده از ۱/۷ تا ۴/۶ میکرون، افزایش و از ۴/۶ تا ۷/۲ میکرون، کاهش می‌یابد. پدلکا[13] و همکاران [۲۱] با انجام پژوهش بر روی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال ناهمسانگردی که از ذرات مغناطیس‌شونده متفاوت یعنی نانوسیم آهن، کبالت 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[14] 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[15] و

1 Rabinow
2 Rigbi
3 Shiga
4 Jolly
5 Blom
6 Ju
7 Dargahi
8 Vatandoost
9 Yaghoobi
10 Gordaninejad
11 Jin
12 Wu
13 Padalka
14 Shi
15 Zhang

همکاران [۲۳] در پژوهش خود به بررسی جنس ماده ماتریس پرداختند و گزارش کردند که اثر مگنتورئولوژیکال و خواص مکانیکی الاستومرهایی که از لاستیک طبیعی تشکیل شده‌اند بهتر از الاستومرهایی هستند که از لاستیک سیس-پلی‌بوتادین تشکیل شده‌اند. ندجار[1] و همکاران [۲۴] با پژوهش بر روی الاستومرهای سیلیکونی، خواص مکانیکی و رئولوژیکی مناسب و داشتن ویسکوزیته پایین در هنگام پخش شدن ذرات مغناطیس‌شونده را گزارش کردند. در خصوص بررسی اثر دما بر روی خواص مکانیکی و رئولوژیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال، وان[2] و همکاران [۲۵] با بررسی اثر دما بر روی الاستومرهای ناهمسانگرد، گزارش کردند که مقدار مدول ذخیره فشاری با افزایش دما تا میزان ۵۰ درجه سلسیوس، کاهش یافته و سپس با افزایش دما از ۵۰ تا ۶۰ 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 متشکل 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[3] و همکاران [۲۷] با انجام تست کشش-فشار تحت پیش‌کرنش ثابت ۵ درصد بر روی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال همسانگرد، نشان دادند که مقدار اثر مگنتورئولوژیکال با افزایش فرکانس از ۰/۱ هرتز تا ۱ هرتز افزایش می‌یابد. مارتینز[4] 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 میلی تسلا، فرکانس ۱ تا ۳۰ هرتز و پیش‌کرنش ۶، 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[5] 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 ۱۵، 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. ژانگ 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[6] [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[7] و مقدار اثر مگنتورئولوژیکال ماکزیمم[8] 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 برهمکنش ذرات در الاستومرهای مگنتورئولوژیکال می‌باشد؛ درحالی که دیدگاه ویسکوالاستیک، مبتنی بر رابطه بین نیرو-جابه‌جایی یا تنش-کرنش الاستومرهای مگنتورئولوژیکال در حالت‌های مختلف مخصوصا 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[9] می‌باشد که از یک جزء بوخ-ون، یک المان فنری و یک المان استهلاکی تشکیل می‌شود [۳۲]. یانگ[10] و همکاران [۳۳]

1 Nedjar
2 Wan
3 Koo
4 Martins
5 $MR_{E'}$

6 Tian
7 Zero-field storage and loss modulus
8 Maximum magnetorheological effect
9 Bouc-Wen model
10 Yang

با بکارگیری جزء بوخ-ون، مدلی ارائه دادند و اثر پارامترهای مختلف مدل بر شکل حلقه هیسترزیس را تشریح کردند. لی[1] و همکاران [۳۴] جهت پیش‌بینی رفتار دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال با موازی کردن یک المان فنری با مدل سه پارامتری جامد استاندارد[2]، یک مدل چهار ثابته ویسکوالاستیک خطی ارائه دادند که ضرایب آن علاوه بر چگالی شار مغناطیسی، تابع کرنش نیز می‌باشند. ایم[3] و همکاران [۳۵] یک مدل دو جزئی که از ترکیب موازی مدل رمبرگ-اسگود[4] و مدل ماکسول[5] تشکیل شده بود، ارائه کردند. بخش ماکسول این مدل، رفتار ویسکوالاستیک ماده و بخش رمبرگ-اسگود آن رفتار غیرخطی ماده را توجیه می‌کرد. یو[6] و همکاران [۳۲] برای یک نمونه ایزولاتور(جداساز) ارتعاش الاستومر مگنتورئولوژیکال، یک مدل کرنش سخت‌شونده[7] ارائه دادند. این مدل، از موازی کردن یک المان ماکسول اصلاح شده - که شامل یک جزء کرنش سخت‌شونده و یک جزء استهلاکی بود - با مدل سه پارامتری جامد استاندارد تشکیل شده بود. نوروزی[8] و همکاران [۳۶] جهت مدل کردن داده‌های تجربی تنش-کرنش حاصل از تست الاستومرهای مگنتورئولوژیکال همسانگرد در حالت برشی، مدل گسترش یافته کلوین-ویت[9] 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 عموما مطالعات پیشین، با در نظر گرفتن یک پیش‌کرنش ثابت به بررسی رفتار دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال پرداخته‌اند. اعمال پیش‌کرنش استاتیکی به نمونه‌های الاستومر می‌تواند باعث تغییر فاصله بین ذرات مغناطیس‌شونده 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 (۴٪ تا ۱۶٪)، چگالی شار مغناطیسی (۰ تا ۳۰۰ میلی تسلا) و با اعمال پیش‌کرنش‌های فشاری مختلف (۲۱٪ و ۰٪)، به بررسی تجربی اثر پیش‌کرنش استاتیکی بر مدول ذخیره و اتلاف و رفتار 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 رفتار 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 انتها، 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 رفتار 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 رفتار تنش-کرنش و مدول‌های دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال در مقادیر مختلفی از چگالی شار مغناطیسی، پیش‌کرنش استاتیکی، فرکانس وکرنش ورودی.

۲- مراحل آزمایش

۲- ۱- ساخت نمونه‌های الاستومر مگنتورئولوژیکال

الاستومرهای مگنتورئولوژیکال از سه قسمت اصلی ماتریس، ذرات مغناطیس‌شونده 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 مغناطیس‌شونده جهت دستیابی به اثر مگنتورئولوژیکال مناسب در الاستومرها، ۷۰ درصد وزنی گزارش شده است [۳۸] و از این رو، مطابق با جدول ۱، برای رسیدن به 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.

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

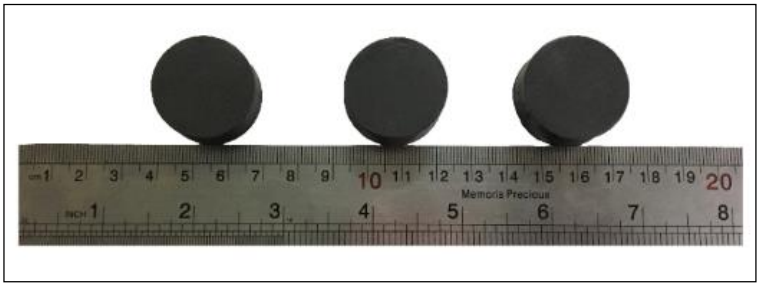
1 Li
2 Three-parameter standard solid model
3 Eem
4 Ramberg-Osgood
5 Maxwell
6 Yu
7 Strain stiffening model
8 Norouzi
9 Kelvin-Voigt

جدول ۱. اجزای تشکیل دهنده نمونه‌های الاستومر مگنتورئولوژیکال

Table 1. Constituent components of magnetorheological elastomer samples

مواد تشکیل دهنده	مشخصات	درصد وزنی
پودر آهن کربونیل[1]	محصول شرکت بی اِی اِس اِف کشور آلمان قطر متوسط ذرات برابر با ۵ میکرون	٪۷۰
پلیمر سیلیکون	محصول شرکت پرفکت شیمی کشور ایران مدل آر تی وی ۲ - ۴۴۰۵	٪۲۰
روغن سیلیکون	محصول شرک کِی سی سی کشور کره جنوبی ویسکوزیته برابر با ۱۰۰ سانتی استوکس	٪۱۰

[1] Carbonyl iron particles (CIPs)



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

Fig. 1. Three magnetorheological elastomer samples after curing

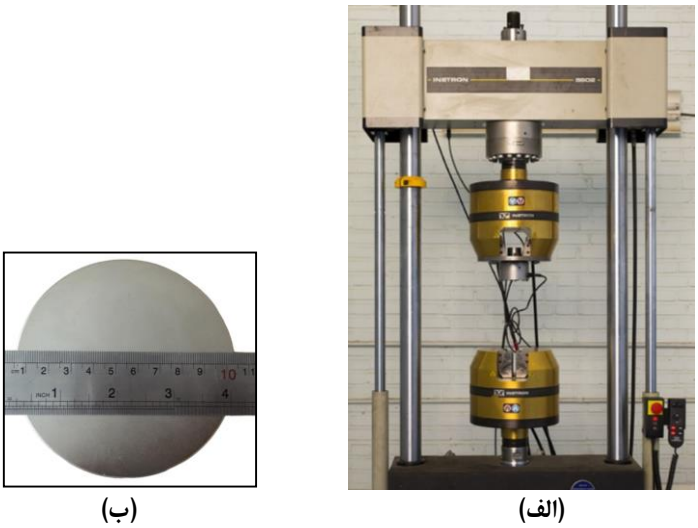
[۳۷] با یکدیگر هم زده می‌شوند. پس از آن، هاردنر یا همان جزء دوم پلیمر سیلیکون، مطابق با دستور شرکت سازنده، به مخلوط اضافه شده و مجددا کل مواد به مدت دو دقیقه با هم مخلوط می‌گردند. پس از اتمام فرآیند مخلوط شدن مواد، به دلیل به وجود آمدن حباب‌های هوا در هنگام هم زدن، فرآیند حباب‌زدایی انجام می‌شود و ظرف 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[1] و اِی اِس تی اِم دی۳۹۵-۰۳[2]، سه نمونه استوانه‌ای به قطر ۰/۵±۲۹ میلیمتر و ارتفاع ۰/۵±۱۲/۵ میلیمتر (عامل شکل ۰/۵۸) جهت انجام تست دینامیکی کشش-فشار ساخته می‌شوند. شکل ۱ نمونه‌های الاستومر را پس از خشک شدن نشان می‌دهد.

۲- 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

1 ISO 7743

2 ASTM D395–03



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

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

هیدرولیکی متحرک در پایین می‌باشد که مقادیر مختلفی از فرکانس تحریک و درصد کرنش را تولید می‌کند و دارای یک لودسل در بالا می‌باشد که میزان نیروی وارد شده از طرف نمونه را با دقت ۰/۰۰۱ نیوتن اندازه‌گیری می‌نماید. با استفاده از کنترلر این دستگاه می‌توان مقادیر ورودی اعم از میزان دامنه جابه‌جایی (درصد کرنش)، نرخ جابه‌جایی (فرکانس)، میزان پیش‌کرنش، نوع شکل جابه‌جایی، 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 ۳۱۶[1] ساخته شد تا چگالی شار مغناطیسی، بدون تضعیف بر روی نمونه‌ها اعمال شود. پس از اتصال نمونه‌ها به دستگاه، هر سه نمونه الاستومرهای مگنتورئولوژیکال ساخته شده تحت بارگذاری دینامیکی کششی-فشاری و در مقادیر فرکانس‌های تحریک ۱، ۳، ۵ و ۷ هرتز، جابه‌جایی‌های اعمالی ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ میلیمتر (که درصد کرنش‌های معادل آن برای نمونه‌ها که دارای ارتفاع ۱۲/۵ میلیمتر هستند، به ترتیب برابر با ۴٪، ۸٪، ۱۲٪ و ۱۶٪ می‌شود)، چگالی شارهای مغناطیسی ۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی تسلا 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 جابه‌جایی موردنظر (۲/۶۲۵ میلیمتر)، به طرف بالا حرکت داده شد تا نمونه‌ها به این میزان فشرده شوند. در این آزمایش، نوع شکل جابه‌جایی 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 الاستومرهای مگنتورئولوژیکال را تغییر داد. در این پژوهش، نحوه انجام آزمایش دینامیکی کشش-فشار و نحوه اعمال ورودی به نمونه‌ها مطابق با استاندارد ایزو ۱۰۸۴۶[2] صورت گرفت. در این استاندارد، نحوه بدست آوردن مشخصات

1 Stainless steel 316

2 ISO 10846

دینامیکی قطعات ارتجاعی مشخص شده است. روش انجام آزمایشات نیز بر اساس روش مستقیم[1] استاندارد طراحی گردید. در این روش، اعمال ورودی به نمونه از سمت پایین، به صورت جابه‌جایی 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 جابه‌جایی‌ها استخراج شدند. پس از اتمام هر تست، تمامی جابه‌جایی‌ها و نیروهای متناظر با آنها که توسط لودسل اندازه‌گیری شده بودند، به همراه زمان و شماره سیکل آنها در یک فایل اکسل ذخیره شدند.

۲- ۳- تفسیر فیزیکی داده‌های آزمایش دینامیکی کشش-فشار

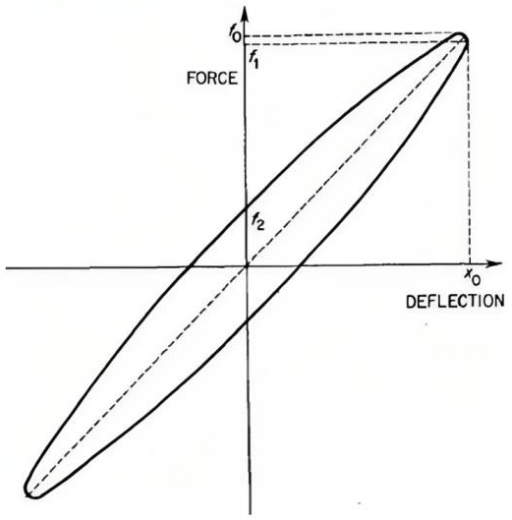
داده‌های اولیه و خام به دست آمده از آزمایش، به صورت نیرو بر حسب جابه‌جایی هستند. اگر نمودار نیرو-جابه‌جایی داده‌های به دست آمده ترسیم شوند، مسیری بیضی شکل به وجود می‌آید که به آن حلقه هیسترزیس می‌گویند. مساحت حلقه‌های هیسترزیس، بیانگر انرژی تلف شده در هر سیکل یا میرایی معادل و شیب حلقه‌های هیسترزیس، 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[2] 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[3] 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[4] [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.

$$E' = \frac{f_1 h}{A x_0} \tag{۱}$$

$$E'' = \frac{f_2 h}{A x_0} \tag{۲}$$

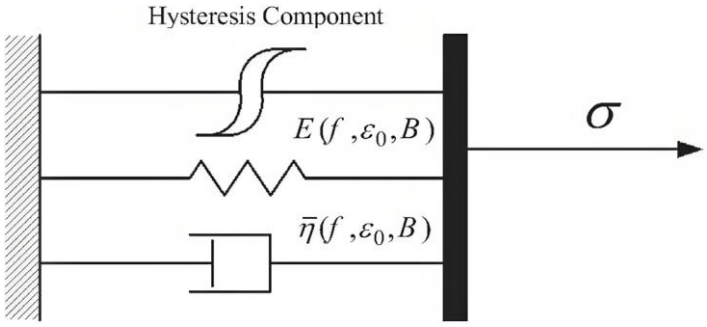
در روابط بالا، پارامترهای f_1، f_2، x_0، A و h، با توجه به شکل ۳، به ترتیب نیروی متناظر با بیشترین جابه‌جایی، نیروی متناظر با جابه‌جایی صفر، بیشترین جابه‌جایی، سطح مقطع موثر نمونه و ضخامت نمونه می‌باشند. پارامتر f_0 که در تصویر ۳ نمایش داده شده نیز برابر با بیشترین نیرو می‌باشد. در این پژوهش، به دلیل اعمال پیش‌کرنش نسبتا 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، مجددا از روابط (۱) و (۲) استفاده خواهد شد؛ با این تفاوت که برای این حالت، پارامترهای f_1، f_2 و x_0 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 الاستومرها و 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 (۶۶۰/۵۲ میلیمتر مربع) و برای تبدیل داده‌های جابه‌جایی به کرنش، باید آنها را بر ضخامت نمونه (۱۲/۵ میلیمتر) تقسیم کرد.

1 Direct method
2 Smooth
3 Interp1
4 Roger Brown



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

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



شکل ۴. مدل ویسکوالاستیک وطن‌دوست و همکاران [۳۷]

Fig. 4. The viscoelastic model presented by Vatandoost et al. [37]

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، پیش‌کرنش استاتیکی نیز یکی از عوامل تاثیر گذار بر رفتار این مواد می‌باشد. در این پژوهش، به منظور لحاظ کردن اثر پیش‌کرنش 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 پیش‌کرنش استاتیکی به مدل اضافه گردیده است. 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 پیش‌کرنش استاتیکی (ε_p) به مدل، روابط ساختاری آن به صورت معادله (۳) پیش‌بینی می‌گردد.

$$\begin{aligned}\sigma_{MRE} &= \sigma_{Viscoelastic} + \sigma_{Hysteresis}\\ \sigma_{Viscoelastic} &= E(f,\varepsilon_0,B,\varepsilon_p)\varepsilon(t)\\ &\quad + \eta(f,\varepsilon_0,B,\varepsilon_p)\dot{\varepsilon}(t)\\ \sigma_{Hysteresis} &= \alpha(f,\varepsilon_0,B,\varepsilon_p)\varepsilon^2(t)\\ &\quad + \beta(f,\varepsilon_0,B,\varepsilon_p)\varepsilon^3(t)\end{aligned} \tag{۳}$$

در رابطه (۳)، متغیرهای $\varepsilon_{(t)}$ و $\sigma_{(t)}$ به ترتیب کرنش ورودی و تنش خروجی در واحد زمان و ثوابت E، η، α و β به ترتیب مدول ذخیره (نمایانگر مدول یانگ[1] ماده)، مدول اتلاف (نمایانگر ویسکوزیته دینامیکی موثر ماده)، مدول عدم تقارن هیسترزیس غیرخطی در حالت کشش–فشار و مدول کرنش–سخت‌شوندگی غیرخطی هستند. پارامترهای f، ε_0، B و ε_p نیز به ترتیب فرکانس تحریک (نرخ کرنش ورودی)، کرنش ورودی، چگالی شار مغناطیسی و پیش‌کرنش استاتیکی اعمالی می‌باشند. در این پژوهش، ضرایب مدل پیشنهادی یعنی ثوابت E، η، α و β، 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:

$$Error = \frac{1}{N\times M\times R}\times \sqrt{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M}\sum_{k=1}^{R}\left(\sigma_{Model}(i,j,k)-\sigma_{Exp}(i,j,k)\right)^2} \tag{۴}$$

در رابطه بالا، N، M و R به ترتیب برابر با تعداد مجموعه داده‌های مختلف مرتبط با کرنش، فرکانس و پیش‌کرنش استاتیکی بوده و σ_{Model} و σ_{Exp}، 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.

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(2\pi f t) \tag{۵}$$

$$E(f,\varepsilon_0,B,\varepsilon_p) = a_{E(B)}\left(\frac{f}{f_R}\right)^{b_{E(B)}}(\varepsilon_0)^{c_{E(B)}}(1+\varepsilon_p)^{d_{E(B)}} \tag{۶}$$

$$\eta(f,\varepsilon_0,B,\varepsilon_p) = a_{\eta(B)}\left(\frac{f}{f_R}\right)^{b_{\eta(B)}}(\varepsilon_0)^{c_{\eta(B)}}(1+\varepsilon_p)^{d_{\eta(B)}} \tag{۷}$$

$$\alpha(f,\varepsilon_0,B,\varepsilon_p) = a_{\alpha(B)}\left(\frac{f}{f_R}\right)^{b_{\alpha(B)}}(\varepsilon_0)^{c_{\alpha(B)}}(1+\varepsilon_p)^{d_{\alpha(B)}} \tag{۸}$$

$$\beta(f,\varepsilon_0,B,\varepsilon_p) = a_{\beta(B)}\left(\frac{f}{f_R}\right)^{b_{\beta(B)}}(\varepsilon_0)^{c_{\beta(B)}}(1+\varepsilon_p)^{d_{\beta(B)}} \tag{۹}$$

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

۳- بحث و تحلیل نتایج آزمایش‌ها و مدلسازی

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

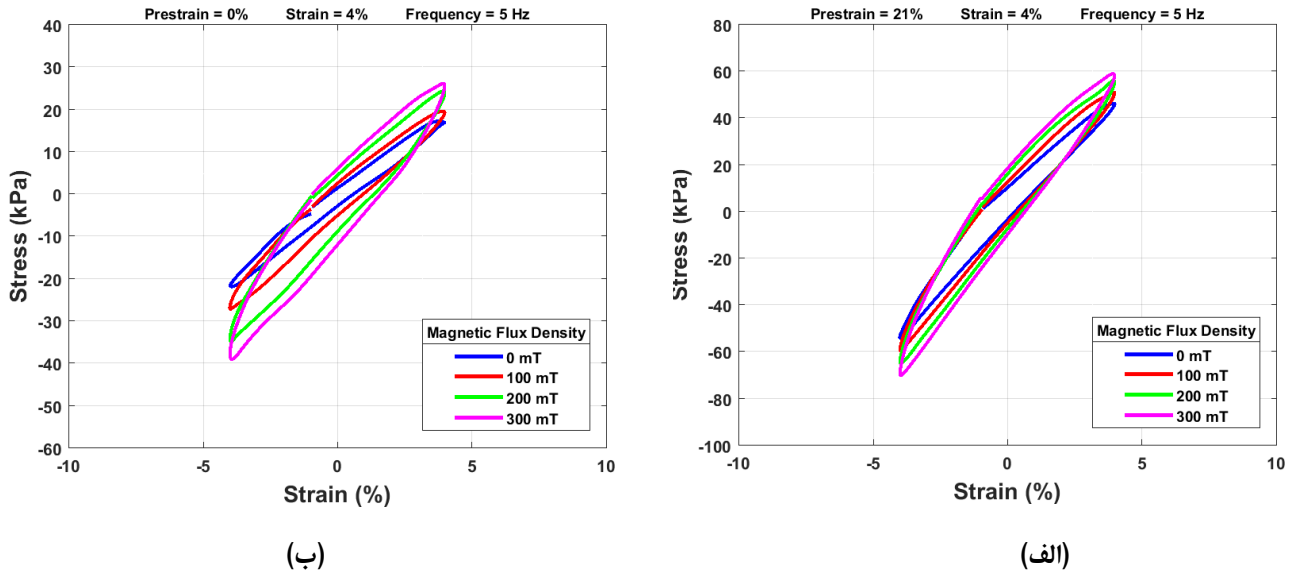
با توجه به اینکه در این تحقیق، الاستومرهای مگنتورئولوژیکال از پلیمر سیلیکون بسیار نرم ساخته شده‌اند و ذرات مغناطیس‌شونده موجود در آنها دارای آزادی نسبی برای حرکت جزئی می‌باشند، هنگامی که الاستومرها در

1 Young's modulus

جدول ۲. تفسیر فیزیکی ثابت‌های مدل پیشنهادی

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

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

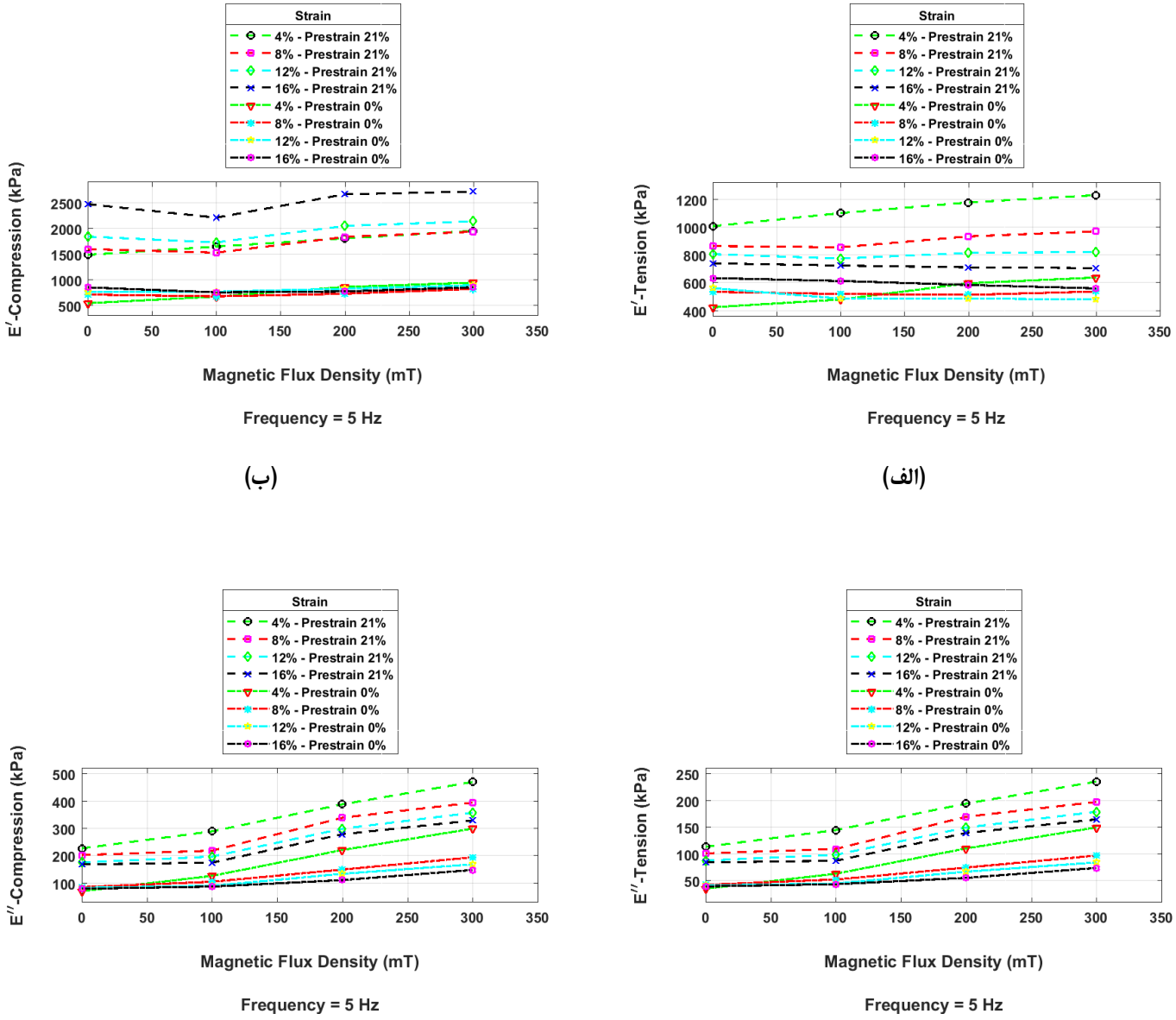


شکل ۵. نمودارهای تنش-کرنش الاستومرها در کرنش ۴٪، فرکانس ۵ هرتز و چگالی شارهای مغناطیسی مختلف. الف) در حالت با پیش‌کرنش استاتیکی ۲۱٪ و ب) در حالت بدون پیش‌کرنش استاتیکی

Fig. 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

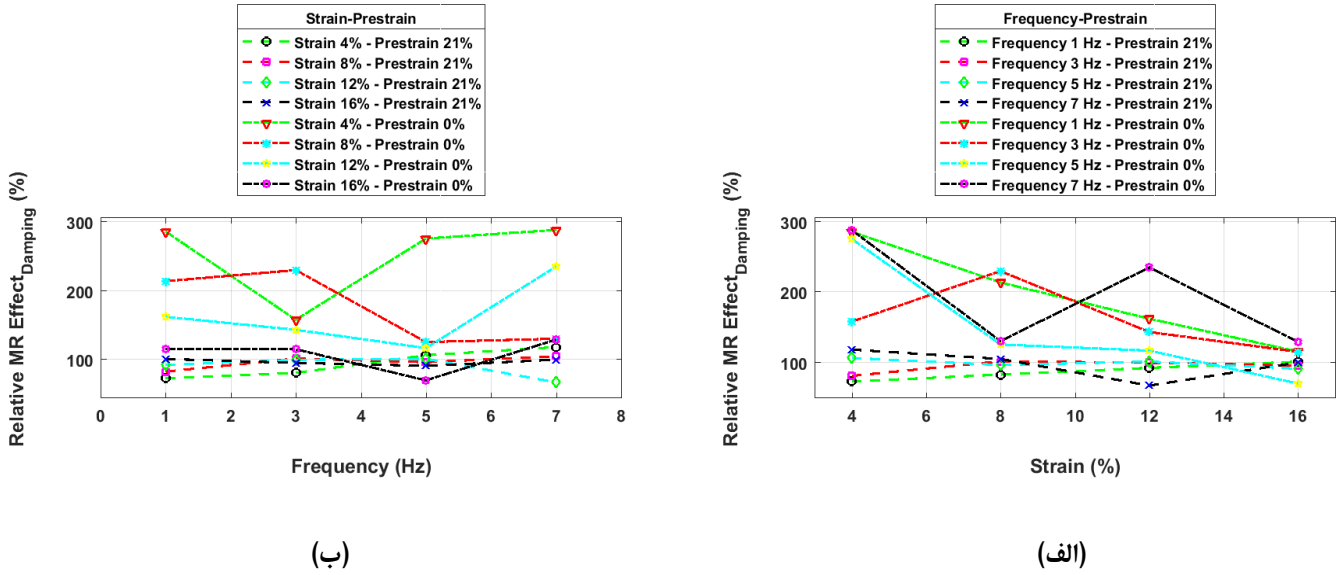
حضور چگالی شار مغناطیسی خارجی قرار می‌گیرند، ذرات آهن موجود در آنها قطبیده شده و در مسیر چگالی شار مغناطیسی عبوری مرتب می‌شوند و به همین دلیل، مقدار صلبیت الاستومرها بیشتر می‌شود. با افزایش مقدار چگالی شار مغناطیسی اعمالی، مقدار صلبیت آنها نیز بیشتر خواهد شد. در شکل ۵، می‌توان این رفتار الاستومر مگنتورئولوژیکال 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، شیب 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 آهنی موجود در الاستومر به یکدیگر نزدیک‌تر شده و نیروی مغناطیسی بین آنها افزایش می‌یابد که این امر، باعث افزایش میزان صلبیت 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.

در تصویر ۶، تغییرات مدول ذخیره کششی، مدول ذخیره فشاری، 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 پیش‌کرنش 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 پیش‌کرنش 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



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 کرنش‌های متفاوت در حالت با و بدون اعمال پیش‌کرنش استاتیکی

Fig. 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



(ب) (الف)

شکل ۷. تغییرات اثر مگنتورئولوژیکال نسبی الاستومر مگنتورئولوژیکال برحسب الف) کرنش در فرکانس‌های مختلف و ب) فرکانس در کرنش‌های مختلف در دو حالت با و بدون اعمال پیش‌کرنش استاتیکی

Fig. 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

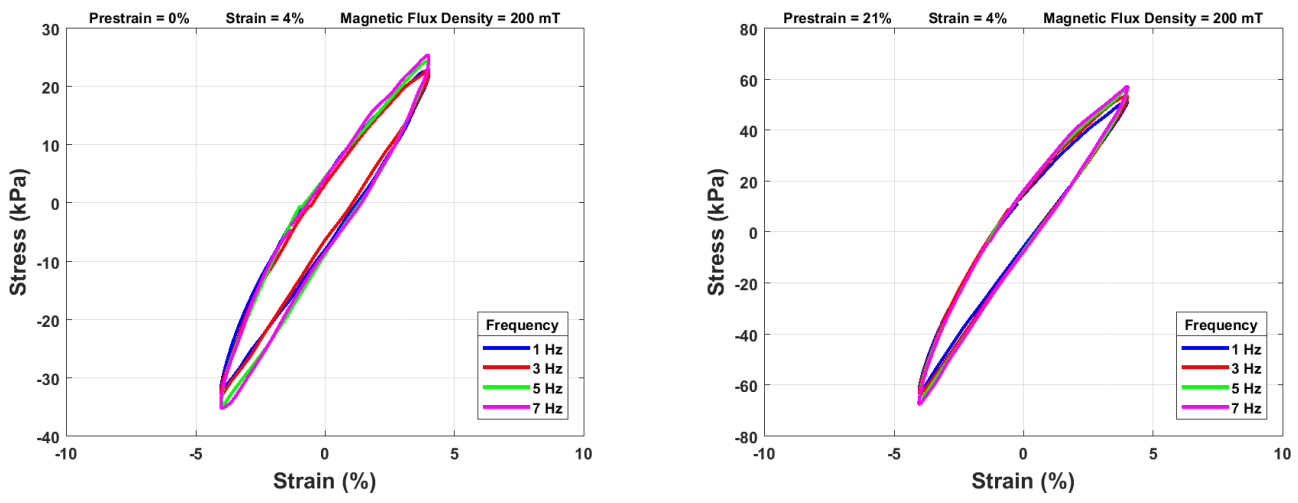
و بدون اعمال پیش‌کرنش استاتیکی، مقدار مدول ذخیره فشاری از مدول ذخیره کششی بیشتر می‌باشد. در ارتباط با تغییرات مدول اتلاف کششی و فشاری نسبت به چگالی شار مغناطیسی نیز، همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش چگالی شار مغناطیسی، مدول اتلاف کششی و فشاری در هر دو حالت با و بدون اعمال پیش‌کرنش استاتیکی، در تمامی 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 توانایی 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 فشاری از مدول اتلاف کششی بیشتر می‌باشد. از مقایسه نمودارهای (الف)، (ب)، (ج) و (د) در تصویر ۶، مشاهده می‌شود که اعمال پیش‌کرنش استاتیکی، باعث تند شدن شیب افزایش مدول ذخیره و اتلاف کششی و فشاری نسبت به چگالی شار مغناطیسی در یک فرکانس معین و کرنش‌های ورودی متفاوت خواهد شد.

۳- ۱- ۱- اثر مگنتورئولوژیکال

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

$$\%MReffect_{Damping} = \frac{\left(A_{\text{Stress-Strain Loop}}\right)_{B_{max}} - \left(A_{\text{Stress-Strain Loop}}\right)_{B_{min}}}{\left(A_{\text{Stress-Strain Loop}}\right)_{B_{min}}} \times 100 \qquad (۱۰)$$

در رابطه بالا، پارامترهای $(A_{\text{Stress-Strain Loop}})_{Bmax}$ و $(A_{\text{Stress-Strain Loop}})_{Bmin}$، به ترتیب مساحت محصور شده درون حلقه هیسترزیس تنش-کرنش در بیشترین چگالی شار (۳۰۰ میلی تسلا) و کمترین چگالی شار (صفر میلی تسلا) است. در نمودار (الف) شکل ۷، تغییرات اثر مگنتورئولوژیکال نسبی الاستومر برحسب کرنش، در فرکانس‌های مختلف و در دو حالت با و بدون اعمال پیش‌کرنش استاتیکی نمایش داده شده است. با توجه به این تصویر، در حالتی که پیش‌کرنش استاتیکی اعمال می‌شود، با افزایش کرنش ورودی،



(ب) (الف)

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

Fig. 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

مقدار اثر مگنتورئولوژیکال نسبی در کلیه فرکانس‌ها تقریبا ثابت می‌ماند؛ زیرا میزان پیش‌کرنش استاتیکی اعمالی، از بالاترین کرنش ورودی که ۱۶٪ است، بیشتر است و این امر، باعث کم اثر شدن تغییرات کرنش در مقدار اثر مگنتورئولوژیکال می‌گردد. اما در صورت عدم اعمال پیش‌کرنش، با افزایش کرنش ورودی، مقدار اثر مگنتورئولوژیکال نسبی در کلیه فرکانس‌ها کاهش می‌یابد. علاوه بر این، مقدار اثر مگنتورئولوژیکال نسبی، در حالتی که پیش‌کرنش استاتیکی اعمال می‌شود، کمتر از حالت بدون اعمال پیش‌کرنش است و دلیل این امر، فشردگی بیش از حد الاستومر به دلیل اعمال پیش‌کرنش است که اجازه نمی‌دهد چگالی شار مغناطیسی اعمالی، باعث مرتب کردن ذرات مغناطیس‌شونده و به عبارتی، افزایش اثر مگنتورئولوژیکال گردد. در نمودار (ب) شکل ۷ نیز، تغییرات اثر مگنتورئولوژیکال نسبی الاستومر برحسب فرکانس، در کرنش‌های مختلف و در دو حالت با و بدون اعمال پیش‌کرنش استاتیکی نمایش داده شده است. با توجه به این تصویر، در حالتی که پیش‌کرنش استاتیکی اعمال می‌شود، با افزایش فرکانس تحریک، مقدار اثر مگنتورئولوژیکال نسبی در کلیه کرنش‌ها تقریبا ثابت است و در حالت بدون اعمال پیش‌کرنش، با افزایش فرکانس، مقدار اثر مگنتورئولوژیکال نسبی در کرنش‌های ۴٪، ۱۲٪ و ۱۶٪ افزایش و در کرنش ۸٪، کاهش می‌یابد. دلیل این روند ثابت در حضور پیش‌کرنش استاتیکی بالا نیز همان فشردگی بیش از حد الاستومر است که اجازه نمی‌دهد در فرکانس‌های 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 ملاحظه‌ای در میزان اثر مگنتورئولوژیکال می‌گردد. لازم به ذکر است که بیشترین اثر مگنتورئولوژیکال نسبی به میزان ۲۸۸/۳۲٪ در کرنش ۴٪، فرکانس ۷ هرتز و در حالت بدون اعمال پیش‌کرنش استاتیکی ایجاد شده است.

۳- ۲- تحلیل تاثیر پیش‌کرنش استاتیکی بر مدول‌های دینامیکی و رفتار تنش-کرنش الاستومر مگنتورئولوژیکال در فرکانس‌های تحریک متفاوت

در تصویر ۸، نمودارهای تنش-کرنش الاستومر مگنتورئولوژیکال در دو حالت با و بدون اعمال پیش‌کرنش استاتیکی، در کرنش ۴٪، چگالی شار مغناطیسی ۲۰۰ میلی تسلا و فرکانس‌های مختلف ۱، ۳، ۵ و ۷ هرتز ترسیم شده‌اند. مطابق با این تصویر، با افزایش مقدار فرکانس تحریک، شیب 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 اثر افزایش فرکانس، در هر دو حالت می‌باشد. علاوه بر این، میزان شیب حلقه‌ها (یا همان سفتی معادل الاستومر) در هر یک از فرکانس‌های

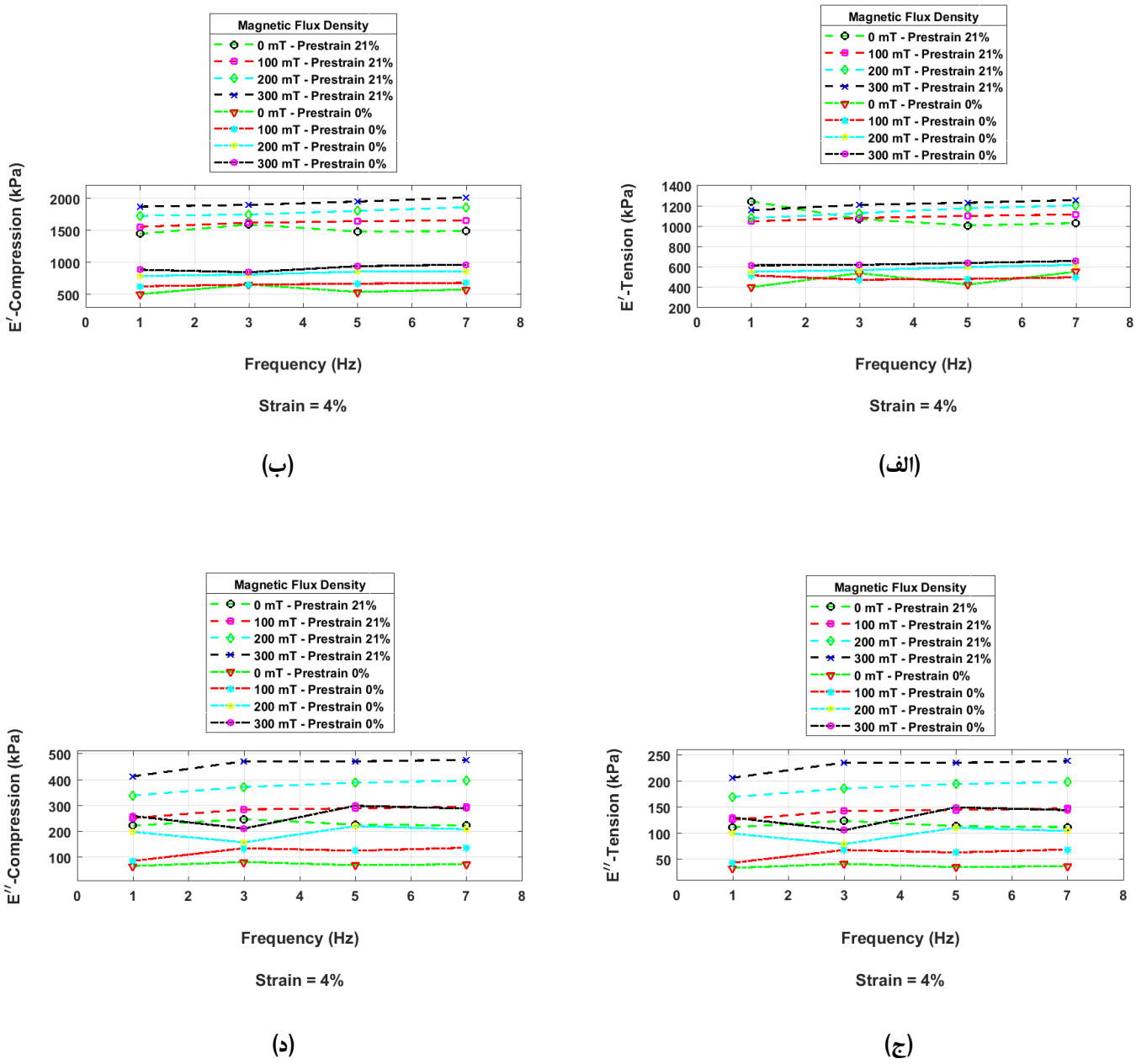
حالت با پیش‌کرنش استاتیکی (تصویر ۸(الف))، بیشتر از شیب حلقه‌های متناظر در حالت بدون پیش‌کرنش استاتیکی (تصویر ۸(ب)) است. به عنوان مثال، میزان شیب حلقه تنش-کرنش نمایش داده شده برای فرکانس ۷ هرتز در تصویر ۸(الف) (حالت با پیش‌کرنش استاتیکی)، بیشتر از میزان شیب حلقه تنش-کرنش نشان داده شده برای فرکانس ۷ هرتز 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 مغناطیس‌شونده 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.

در تصویر ۹، تغییرات مدول ذخیره کششی، مدول ذخیره 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 شیب 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 تند شدن شیب 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.

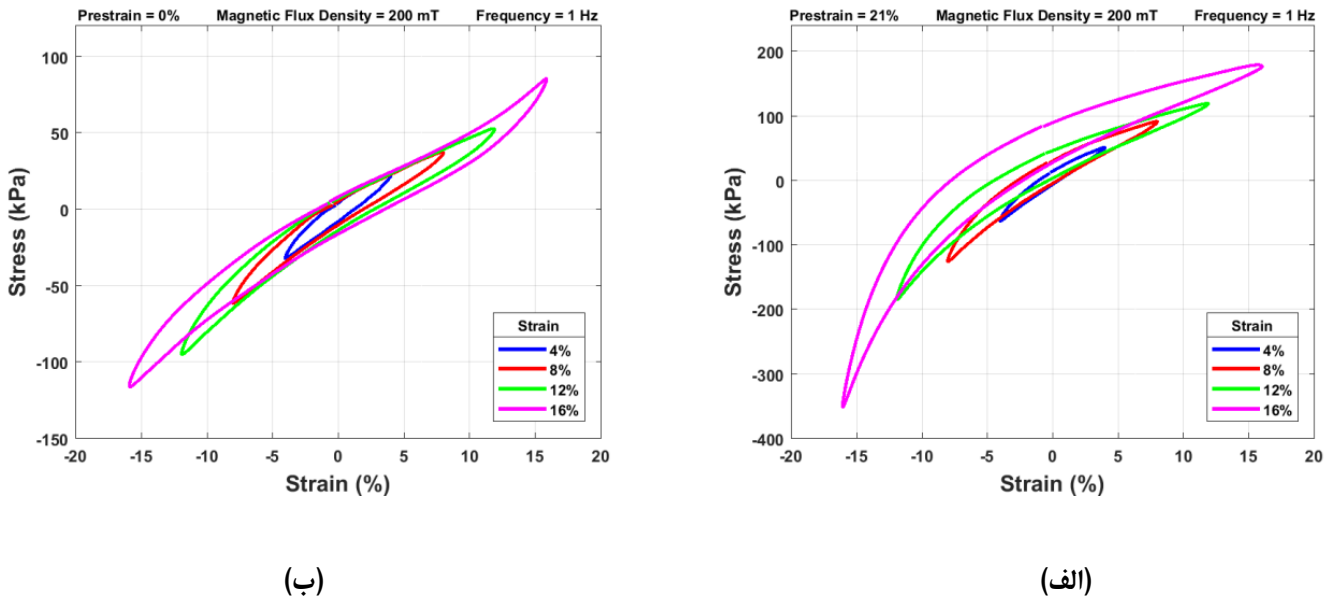
۳- ۳- تحلیل تاثیر پیش‌کرنش استاتیکی بر مدول‌های دینامیکی و رفتار تنش-کرنش الاستومر مگنتورئولوژیکال در کرنش‌های ورودی متفاوت

نمودارهای هیسترزیس تنش-کرنش الاستومر مگنتورئولوژیکال در دو حالت با و بدون اعمال پیش‌کرنش استاتیکی، در فرکانس ۱ هرتز، چگالی شار مغناطیسی ۲۰۰ میلی تسلا 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، شیب حلقه‌های هیسترزیس (سفتی معادل الاستومر) در مسیر فشار، افزایش و در مسیر کشش، کاهش می‌یابد. دلیل این امر، کاهش و افزایش فاصله بین ذرات مغناطیس‌شونده 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



شکل ۹. تغییرات الف) مدول ذخیره کششی، ب) مدول ذخیره 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

Fig. 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



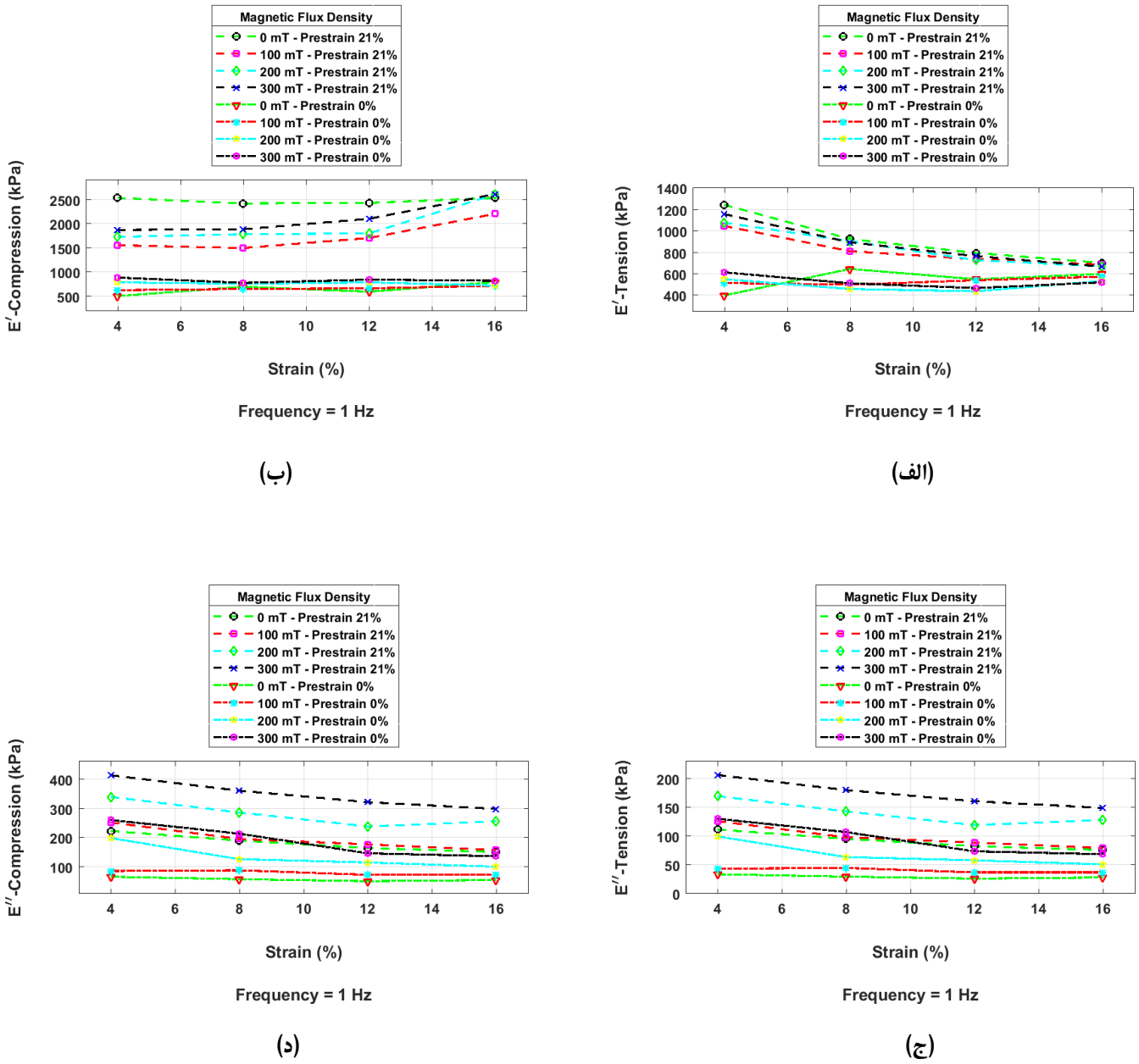
(ب) (الف)

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

Fig. 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

استاتیکی باعث افزایش شیب حلقه‌های هیسترزیس تنش-کرنش هم در مسیر کشش و هم در مسیر فشار، در کلیه کرنش‌ها می‌شود. در تصویر ۱۱، تغییرات مدول ذخیره کششی، مدول ذخیره 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 تسلا افزایش و در دیگر چگالی شارهای مغناطیسی، تقریبا 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 تقریبا 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 تسلا کاهش و در چگالی شارهای صفر و ۱۰۰ میلی تسلا، تقریبا 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 ذخیره 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

Fig. 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

جدول ۳. مقادیر ثابت‌های مدل پیشنهادی

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

ضریب \ چگالی شار مغناطیسی (mT)	۰	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰
$a_{E(B)}$ (kPa)	۱۹/۸۲۳۵	۱۶/۸۵۵۳	۱۶/۸۵۵۲	۱۶/۸۵۵۱
$b_{E(B)}$	-۰/۰۸۴۰	۰/۰۱۸۲	۰/۰۳۳۳	۰/۰۴۱۳
$c_{E(B)}$	-۰/۲۵۵۶	-۰/۲۵۵۴	-۰/۲۵۰۴	-۰/۲۴۹۶
$d_{E(B)}$	-۰/۲۲۵۲	-۰/۲۲۰۳	-۰/۲۲۰۲	-۰/۲۲۰۱
$a_{\eta(B)}$ (kPa.s)	۰/۳۹۵۸	۰/۴۰۰۶	۰/۴۹۲۴	۰/۶۱۳۷
$b_{\eta(B)}$	-۰/۹۷۰۸	-۰/۹۳۱۵	-۰/۹۰۸۹	-۰/۹۰۸۷
$c_{\eta(B)}$	-۰/۲۶۴۸	-۰/۲۴۲۲	-۰/۱۷۴۲	-۰/۱۷۴۰
$d_{\eta(B)}$	-۰/۵۰۲۱	-۰/۲۸۸۹	-۰/۲۰۴۷	-۰/۲۰۲۷
$a_{\alpha(B)}$ (kPa)	-۳/۰۷۰۴	-۱/۲۴۱۲	-۱/۲۴۱۱	-۱/۲۴۰۹
$b_{\alpha(B)}$	-۰/۴۱۵۸	۰/۰۵۲۵	۰/۰۵۲۷	۰/۰۸۴۳
$c_{\alpha(B)}$	-۰/۵۷۵۶	-۰/۴۶۴۰	-۰/۳۶۷۴	-۰/۳۴۵۹
$d_{\alpha(B)}$	-۰/۷۰۳۷	-۰/۴۳۵۹	-۰/۳۵۷۱	-۰/۳۳۶۱
$a_{\beta(B)}$ (kPa)	۱/۰۷۷۳	۰/۲۶۴۵	۰/۲۶۴۴	۰/۲۶۴۳
$b_{\beta(B)}$	-۰/۷۲۸۸	-۰/۰۰۵۴	۰/۱۱۷۱	۰/۲۲۳۱
$c_{\beta(B)}$	-۱/۲۳۶۱	-۰/۹۸۶۴	-۰/۹۱۸۸	-۰/۸۵۶۵
$d_{\beta(B)}$	-۰/۵۴۲۹	-۰/۴۲۷۲	-۰/۲۱۰۷	-۰/۲۰۲۹

۳- ۴- محاسبه ضرایب مدل پیشنهادی

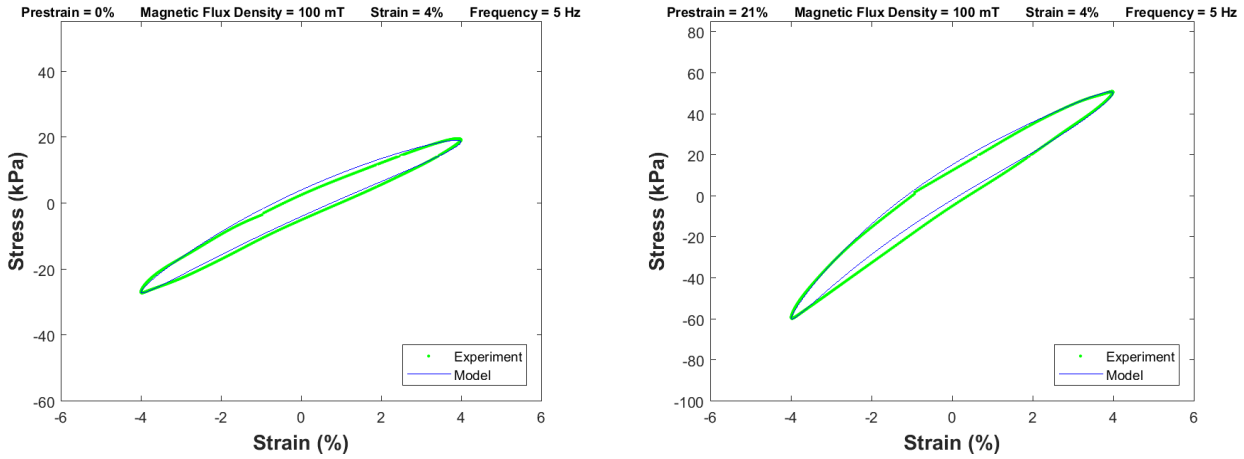
به منظور بدست آوردن مقادیر ثابت‌های موجود در مدل پیشنهادی (پارامترهای جدول ۲)، از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است تا مقادیر بهینه برای ثوابت بدست آیند. از آنجایی که پارامتر چگالی شار مغناطیسی، در کاربردها و دستگاه‌های حاوی الاستومر مگنتورئولوژیکال، به عنوان پارامتر کنترل‌گر[1] می‌باشد، مقادیر ثوابت به 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 صورت توابع چندجمله‌ای درجه دو و سه و توابع نمایی استخراج شده‌اند. لازم به ذکر است که برای انجام این عمل، از جعبه ابزار برازش منحنی نرم‌افزار متلب استفاده شده است. در جدول ۴، مقادیر عددی ثابت‌های موجود در معادلات (۱-الف) الی (۱۶-الف) ارائه شده است.

1 Controller

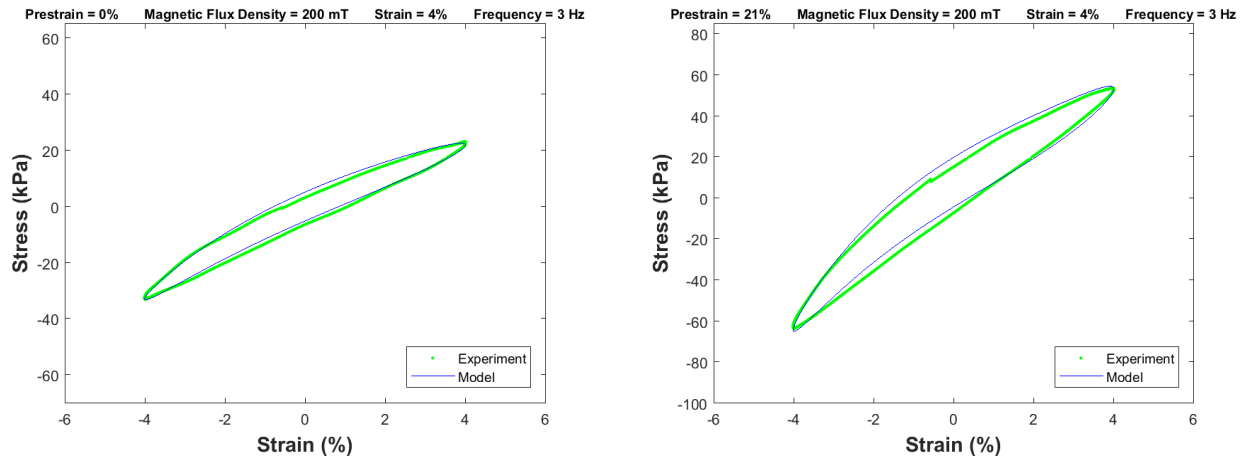
جدول ۴.مقادیر ضرایب موجود در ثابت‌های مدل پیشنهادی

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

ردیف	ضریب	یکا	مقدار	ردیف	ضریب	یکا	مقدار	ردیف	ضریب	یکا	مقدار
۱	e_{E1}	$kPa.mT^{-3}$	$-۴/۹۴۷\times۱۰^{-۷}$	۲۳	$f_{\eta3}$	mT^{-1}	۰/۰۰۰۴۵۷۵	۴۵	$h_{\alpha1}$	mT^{-3}	$۲/۱۸۷\times۱۰^{-۸}$
۲	e_{E2}	$kPa.mT^{-2}$	۰/۰۰۰۲۹۶۸	۲۴	$f_{\eta4}$	۱	-۰/۹۷۰۸	۴۶	$h_{\alpha2}$	mT^{-2}	$-۱/۶۰۱\times۱۰^{-۵}$
۳	e_{E3}	$kPa.mT^{-1}$	-۰/۰۵۴۴۲	۲۵	$g_{\eta1}$	mT^{-3}	$-۱/۸۸۷\times۱۰^{-۸}$	۴۷	$h_{\alpha3}$	mT^{-1}	۰/۰۰۴۰۶
۴	e_{E4}	kPa	۱۹/۸۲	۲۶	$g_{\eta2}$	mT^{-2}	$۷/۹۳\times۱۰^{-۶}$	۴۸	$h_{\alpha4}$	۱	-۰/۷۰۳۷
۵	f_{E1}	mT^{-3}	$۱/۳۳۳\times۱۰^{-۸}$	۲۷	$g_{\eta3}$	mT^{-1}	-۰/۰۰۰۳۷۸۳	۴۹	$e_{\beta1}$	$kPa.mT^{-3}$	$-۱/۳۵۵\times۱۰^{-۷}$
۶	f_{E2}	mT^{-2}	$-۸/۳۵۵\times۱۰^{-۶}$	۲۸	$g_{\eta4}$	۱	-۰/۲۶۴۸	۵۰	$e_{\beta2}$	$kPa.mT^{-2}$	$۸/۱۲۷\times۱۰^{-۵}$
۷	f_{E3}	mT^{-1}	۰/۰۰۱۷۲۴	۲۹	$h_{\eta1}$	mT^{-3}	$۷/۸\times۱۰^{-۹}$	۵۱	$e_{\beta3}$	$kPa.mT^{-1}$	-۰/۰۱۴۹
۸	f_{E4}	۱	-۰/۰۸۴	۳۰	$h_{\eta2}$	mT^{-2}	$-۸/۷۹\times۱۰^{-۶}$	۵۲	$e_{\beta4}$	kPa	۱/۰۷۷
۹	g_{E1}	mT^{-3}	$-۱/۵\times۱۰^{-۹}$	۳۱	$h_{\eta3}$	mT^{-1}	۰/۰۰۲۹۳۳	۵۳	$f_{\beta1}$	۱	۰/۰۳۸۳۷
۱۰	g_{E2}	mT^{-2}	$۶/۹\times۱۰^{-۷}$	۳۲	$h_{\eta4}$	۱	-۰/۵۰۲۱	۵۴	$f_{\beta2}$	mT^{-1}	۰/۰۰۵۸۷۸
۱۱	g_{E3}	mT^{-1}	$-۵/۲\times۱۰^{-۵}$	۳۳	$e_{\alpha1}$	kPa	-۱/۸۲۹	۵۵	$f_{\beta3}$	۱	-۰/۷۶۷۲
۱۲	g_{E4}	۱	-۰/۲۵۵۶	۳۴	$e_{\alpha2}$	mT^{-1}	-۰/۱۱۸۱	۵۶	$f_{\beta4}$	mT^{-1}	-۰/۰۲۳۳۲
۱۳	h_{E1}	mT^{-3}	۸×۱۰^{-۱۰}	۳۵	$e_{\alpha3}$	kPa	-۱/۲۴۱	۵۷	$g_{\beta1}$	mT^{-3}	$۲/۹۴۷\times۱۰^{-۸}$
۱۴	h_{E2}	mT^{-2}	$-۴/۸\times۱۰^{-۷}$	۳۶	$e_{\alpha4}$	mT^{-1}	$-۱/۶۱۲\times۱۰^{-۶}$	۵۸	$g_{\beta2}$	mT^{-2}	$-۱/۷۹۴\times۱۰^{-۵}$
۱۵	h_{E3}	mT^{-1}	$۸/۹\times۱۰^{-۵}$	۳۷	$f_{\alpha1}$	mT^{-3}	$۸/۳۲۵\times۱۰^{-۸}$	۵۹	$g_{\beta3}$	mT^{-1}	۰/۰۰۳۹۹۷
۱۶	h_{E4}	۱	-۰/۲۲۵۲	۳۸	$f_{\alpha2}$	mT^{-2}	$-۴/۸۳۸\times۱۰^{-۵}$	۶۰	$g_{\beta4}$	۱	-۱/۲۳۶
۱۷	$e_{\eta1}$	$kPa.s.mT^{-3}$	$-۹/۵۸۳\times۱۰^{-۹}$	۳۹	$f_{\alpha3}$	mT^{-1}	۰/۰۰۸۶۸۸	۶۱	$h_{\beta1}$	mT^{-3}	$-۵/۱۵۸\times۱۰^{-۸}$
۱۸	$e_{\eta2}$	$kPa.s.mT^{-2}$	$۷/۲۲۵\times۱۰^{-۶}$	۴۰	$f_{\alpha4}$	۱	-۰/۴۱۵۸	۶۲	$h_{\beta2}$	mT^{-2}	$۲/۰۵۱\times۱۰^{-۵}$
۱۹	$e_{\eta3}$	$kPa.s.mT^{-1}$	-۰/۰۰۰۵۷۸۷	۴۱	$g_{\alpha1}$	mT^{-3}	$-۱/۰۰۲\times۱۰^{-۸}$	۶۳	$h_{\beta3}$	mT^{-1}	-۰/۰۰۰۳۷۸۷
۲۰	$e_{\eta4}$	$kPa.s$	۰/۳۹۵۸	۴۲	$g_{\alpha2}$	mT^{-2}	$۲/۲۵۵\times۱۰^{-۶}$	۶۴	$h_{\beta4}$	۱	-۰/۵۴۲۹
۲۱	$f_{\eta1}$	mT^{-3}	$-۹/۵\times۱۰^{-۱۰}$	۴۳	$g_{\alpha3}$	mT^{-1}	۰/۰۰۰۹۹۰۷				
۲۲	$f_{\eta2}$	mT^{-2}	$-۵/۵\times۱۰^{-۷}$	۴۴	$g_{\alpha4}$	۱	-۰/۵۷۵۶				



(الف)



(ب)

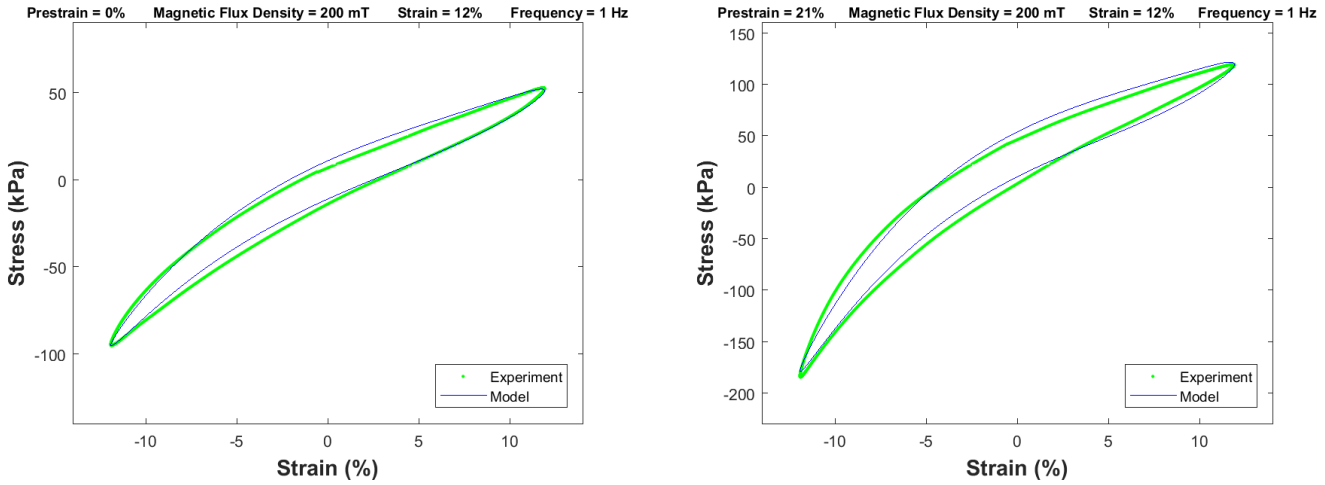
شکل ۱۲. نمودارهای هیسترزیس تنش-کرنش بر اساس مدل پیشنهادی و داده‌های آزمایشگاهی در دو حالت با و بدون اعمال پیش‌کرنش استاتیکی. الف) در کرنش ۴٪، فرکانس ۵ هرتز و چگالی شار مغناطیسی ۱۰۰ میلی تسلا، ب) در کرنش ۴٪، فرکانس ۳ هرتز و چگالی شار مغناطیسی ۲۰۰ میلی تسلا، ج) در کرنش ۱۲٪، فرکانس ۱ هرتز و چگالی شار مغناطیسی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

Fig. 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 (To be Continued)

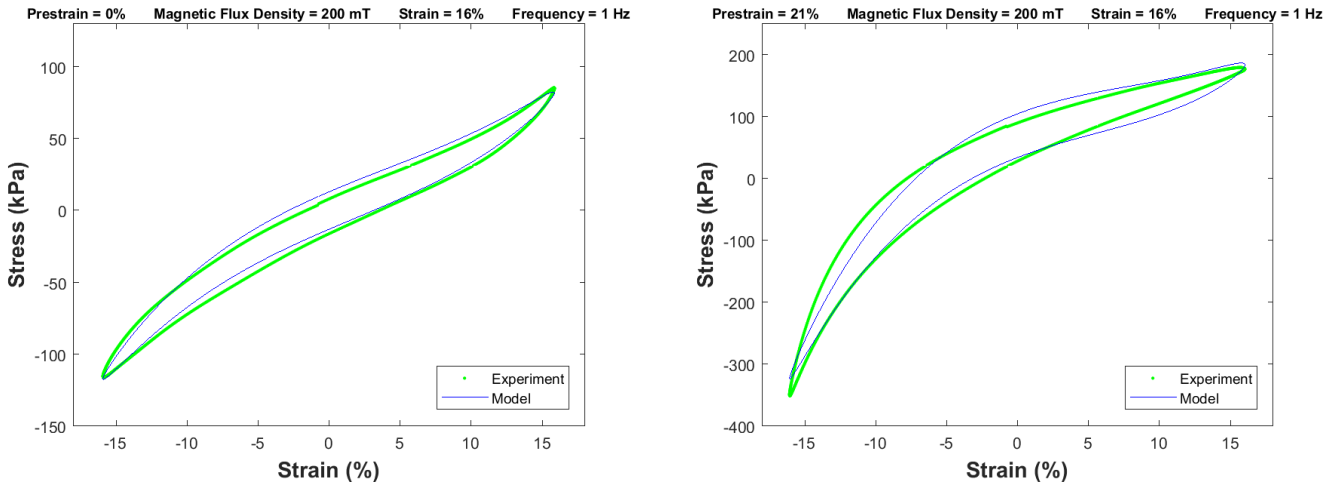
۳- ۵- اعتبارسنجی[1] مدل پیشنهادی

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 شارها، فرکانس‌ها و کرنش‌های ورودی مختلف ترسیم شده است. با توجه به این تصاویر، می‌توان اعتبار مدل را به صورت کیفی مشاهده نمود. 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:

1 Validation



(ج)



(د)

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 تسلا، ب) در کرنش ۴٪، فرکانس ۳ هرتز و چگالی شار مغناطیسی ۲۰۰ میلی تسلا، ج) در کرنش ۱۲٪، فرکانس ۱ هرتز و چگالی شار مغناطیسی ۲۰۰ میلی تسلا، د) در کرنش ۱۶٪، فرکانس ۱ هرتز و چگالی شار مغناطیسی ۲۰۰ میلی تسلا

Fig. 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

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

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

$$\%fitnessvalue = \left[1-\frac{norm\left(\tau_{Model}-\tau_{Exp}\right)}{norm\left(\tau_{Exp}-mean\left(\tau_{Exp}\right)\right)}\right]\times 100 \qquad (۱۱)$$

در رابطه بالا، $norm$ تابع میانگین نرمال[1]، τ_{Model} تنش بدست آمده از مدل پیشنهادی و τ_{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.

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 الاستومرهای مگنتورئولوژیکال در شرایط مختلف بارگذاری دارد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به بررسی تاثیر پیش‌کرنش 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 (۴٪ تا ۱۶٪)، چگالی شار مغناطیسی (۰ تا ۳۰۰ میلی تسلا) و با اعمال پیش‌کرنش‌های فشاری مختلف (۲۱٪ و ۰٪)، اثر پیش‌کرنش استاتیکی بر مدول ذخیره و اتلاف و رفتار تنش-کرنش الاستومرهای مگنتورئولوژیکال در کرنش‌ها، فرکانس‌ها و چگالی شارهای متفاوت، به طور تجربی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. در ادامه، به منظور لحاظ کردن اثر پیش‌کرنش استاتیکی در پیش‌بینی رفتار ویسکوالاستیک الاستومرهای مگنتورئولوژیکال، یک مدل جدید و جامع با در نظر گرفتن این اثر ارائه گردید. نتایج اصلی حاصل از این آزمایش، به

1 Normal mean function

شرح زیر می‌باشند:

- اعمال پیش‌کرنش استاتیکی، باعث افزایش مقدار مدول ذخیره و اتلاف کششی و فشاری در کلیه کرنش‌ها، فرکانس‌ها و چگالی شارهای مغناطیسی می‌شود.
- در یک میزان کرنش و فرکانس معین، با اعمال پیش‌کرنش استاتیکی، شیب حلقه‌های هیسترزیس تنش-کرنش (که بیانگر سفتی معادل الاستومر می‌باشد)، در کلیه چگالی شارهای مغناطیسی افزایش می‌یابد.
- اعمال پیش‌کرنش استاتیکی، باعث تند شدن شیب افزایش مدول ذخیره و اتلاف کششی و فشاری نسبت به چگالی شار مغناطیسی در یک فرکانس معین و کرنش‌های ورودی متفاوت می‌شود.
- مقدار اثر مگنتورئولوژیکال نسبی، در حالتی که پیش‌کرنش استاتیکی اعمال می‌شود، کمتر از حالت بدون اعمال پیش‌کرنش است و دلیل این امر، فشردگی بیش از حد الاستومر به دلیل اعمال پیش‌کرنش است که اجازه نمی‌دهد چگالی شار مغناطیسی اعمالی، باعث مرتب کردن ذرات مغناطیس‌شونده و به عبارتی، افزایش اثر مگنتورئولوژیکال گردد.
- بیشترین اثر مگنتورئولوژیکال نسبی به میزان ۲۸۸/۳۲٪ در کرنش ۴٪، فرکانس ۷ هرتز و در حالت بدون اعمال پیش‌کرنش استاتیکی ایجاد شده است.
- در یک میزان کرنش و چگالی شار مغناطیسی معین، با اعمال پیش‌کرنش استاتیکی، شیب حلقه‌های هیسترزیس تنش-کرنش (سفتی معادل الاستومر)، در کلیه فرکانس‌ها افزایش می‌یابد.
- اعمال پیش‌کرنش استاتیکی، تاثیری در تند شدن شیب افزایش مدول ذخیره و اتلاف کششی و فشاری نسبت به فرکانس در یک کرنش معین و چگالی شارهای مغناطیسی متفاوت، ندارد.
- 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.
- مدل غیرخطی پیشنهاد شده دارای پاسخ نسبتا دقیقی (با درصد تطابق حدود ۹۰ درصد) برای کلیه حالت‌های بارگذاری می‌باشد و از آن می‌توان در پیش‌بینی رفتار تنش-کرنش و مدول‌های دینامیکی الاستومرهای مگنتورئولوژیکال در مقادیر مختلفی از چگالی شار مغناطیسی، پیش‌کرنش استاتیکی، فرکانس وکرنش ورودی استفاده کرد.

۵- فهرست علائم

علائم انگلیسی

A	سطح مقطع موثر نمونه، mm^2
B	چگالی شار مغناطیسی، mT
E	مدول یانگ ماده، kPa
E'	مدول ذخیره، kPa
E''	مدول اتلاف، kPa
f	فرکانس تحریک (نرخ کرنش ورودی)، Hz
f_R	فرکانس تحریک مرجع، Hz
f_0	بیشترین نیرو، N
f_1	نیروی متناظر با بیشترین جابه‌جایی، N
f_2	نیروی متناظر با جابه‌جایی صفر، N
$\%fitnessvalue$	شاخص درصد تطابق، %
h	ضخامت نمونه، mm
$\%MReffect$	اثر مگنتورئولوژیکال نسبی از دیدگاه توانایی الاستومر در برابر اتلاف انرژی، %
$norm$	تابع میانگین نرمال
t	زمان سیکل، s
x_0	بیشترین جابه‌جایی، mm

علائم یونانی

α	مدول عدم تقارن هیسترزیس غیرخطی در حالت کشش-فشار، kPa
β	مدول کرنش-سخت‌شوندگی غیرخطی، kPa
ε_p	پیش‌کرنش استاتیکی، %
ε_0	کرنش تحریک، %
ε	کرنش ورودی در واحد زمان، %
$\dot{\varepsilon}$	نرخ کرنش ورودی در واحد زمان، 1/s
η	ویسکوزیته دینامیکی موثر ماده، kPa.s
σ	تنش خروجی در واحد زمان، kPa
τ	تنش خروجی، kPa

زیرنویس

B_{max}	بیشترین چگالی شار مغناطیسی (۳۰۰ میلی تسلا)
B_{min}	کمترین چگالی شار مغناطیسی (صفر میلی تسلا)
$Damping$	اتلاف
Exp	آزمایش
$Hysteresis$	هیسترزیس
$Model$	مدل
MRE	الاستومر مگنتورئولوژیکال
$Stress\text{-}Strain\ Loop$	حلقه هیسترزیس تنش-کرنش
$Viscoelastic$	ویسکوالاستیک

منابع

[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, Magnetroviscoelastic 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.

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. Kosasih, 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

[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

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.

پیوست

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. M. Alimardan, M. Norouzi, M. Ghatee, M. B. Nazari, M. H. Izadifard1, A. H. Yaghoobi1, Investigating the Effect of Static Pre-Strain on Tension-Compression Mode Properties of Isotropic Magnetorheological Elastomers, Amirkabir J. Mech Eng., 55(10) (2024) 1233-1260.

DOI: 10.22060/mej.2024.22544.7642