Research article

Available in: http://jips.ippi.ac.ir

Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian),
Vol. 32, No. 1, 65-78
April-May 2019
ISSN: 1016-3255
Online ISSN: 2008-0883
DOI: 10.22063/JIPST.2019.1637

Effects of SBR Molecular Structure and Filler Type on the Hyper-Viscoelastic Behavior of SBR/BR Radial Tyre Tread Compounds Using a Combined Numerical/Experimental Approach

Sedigheh Samaei, Mir Hamid Reza Ghoreishy*, and Ghasem Naderi

Department of Rubber Processing and Engineering, Faculty of Processing, Iran Polymer and Petrochemical Institute, P.O. Box 14975-112, Tehran, Iran

Received: 11 November 2018, accepted: 19 February 2019

ABSTRACT

Hypothesis: Reduction of rolling resistance in tyres plays a crucial role in reducing global warming and CO_2 emissions. Consequently, the prediction of energy dissipation in tyre tread compounds has received increasing interest from tyre manufacturers to design low dissipative compounds. In the present work, a triple model based on the Ogden hyperelastic equation, Bergstrom-Boyce nonlinear viscoelastic relationship in conjunction with a stress softening equation was proposed for the prediction of the force-displacement behavior of tread compounds.
Methods: Two series of rubber blends compounds based on SBR/BR solution and SBR/BR emulation reinforced by two carbon black (CB) grades and a surface-modified silica were prepared. Each series was comprised of three blends with different filler contents. The total part of filler in each compound was kept constant as 80 phr. The first compound contained 80 phr of CB without any silica, while the second and third compounds were prepared using 20 and 40 phr silica as replacement. The mechanical behavior of the cured compounds was determined using a tensile test carried out on a ribbon type sample with 2X11 cm dimension and ATM D412 C test specimens. An optimization loop was designed in Isight code using three Abaqus, data matching and optimization components. The developed algorithm was used for the determination of the parameters of the mentioned model.
Findings: It is shown that the proposed material model and the developed numerical algorithm can predict the mechanical behavior of the compounds during a loading/unloading cycle. The trends of the variations of the predicted parameters are in reasonable agreement with macro- and micro- structure of the SBR and filler type (CB or silica). It is also found that the addition of silica to rubber compound has 25-35% decreasing effect on energy dissipation. Moreover, solution SBR has approximately 50% more reduction effect on energy dissipation compared to emulsion SBR at equal filler type and content.

Keywords:
SBR,
BR,
silica,
hyper-viscoelastic,
finite element method

(*)To whom correspondence should be addressed.
E-mail: m.h.r.ghoreishy@ippi.ac.ir

Please cite this article using:
Samaei S., Ghoreishy M.H.R., and Naderi Gh., Effects of SBR Molecular Structure and Filler Type on the Hyper-Viscoelastic Behavior of SBR/BR Radial Tyre Tread Compounds Using a Combined Numerical/Experimental Approach, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **32**, 65-78, 2019.

مقاله پژوهشی

اثر ساختار مولکولی SBR و نوع پرکننده بر رفتار ابرگرانروکشسان آمیزه‌های SBR/BR رویه تایر سواری به‌کمک روش ترکیبی عددی-تجربی

صدیقه سمایی، میرحمیدرضا قریشی*، قاسم نادری

تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، پژوهشکده فرایند،گروه لاستیک، صندوق پستی ۱۱۲-۱۴۹۷۵

دریافت: ۱۳۹۷/۸/۲۰، پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۳۰

قابل دسترس در نشانی: http://jips.ippi.ac.ir

مجله علوم و تکنولوژی پلیمر،
سال سی‌ودوم، شماره ۱،
صفحه ۷۸-۶۵، ۱۳۹۸
ISSN: 1016-3255
Online ISSN: 2008-0883
DOI: 10.22063/JIPST.2019.1637

چکیده

فرضیه: کاهش مقاومت غلتشی تایر نقش بسیار مهمی در دستیابی به کاهش CO_2 و گرمایش جهانی دارد. از این‌رو، توجه ویژه‌ای برای پیش‌بینی اتلاف انرژی در آمیزه رویه توسط سازندگان تایر شده تا آمیزه‌هایی با اتلاف انرژی کم طراحی و به‌کار گرفته شوند. در این پژوهش، مدل مکانیکی سه‌گانه متشکل از مدل ابرکشسان سه‌جمله‌ای Ogden، مدل گرانروکشسان غیرخطی Bergstrom-Boyce همراه با مدل نرم‌شدگی تنش Ogden-Rouxbrgh برای بیان رفتار مکانیکی نیرو-تغییر مکان لاستیک پیشنهاد شد.

روش‌ها: ابتدا دو مجموعه آمیزه لاستیکی بر پایه آمیخته کائوچوهای SBR/BR محلولی و امولسیونی تقویت‌شده با دو نوع دوده و سیلیکای اصلاح‌شده سطحی ساخته شدند. مقدار کل پرکننده ثابت و برابر ۸۰ phr درنظر گرفته شد. هر مجموعه شامل سه آمیزه با مقادیر مختلف از پرکننده‌ها بود. بدین ترتیب که در آمیزه اول ۸۰ phr دوده بدون سیلیکا و در آمیزه‌های دوم و سوم به ترتیب ۲۰ و ۴۰ phr سیلیکا به‌جای دوده جایگزین شدند. رفتار مکانیکی کششی آمیزه‌های پخت‌شده روی نمونه نواری‌شکل با عرض ۲ cm که زیر بار رفت‌وبرگشتی قرارگرفته بود و نیز آزمون کشش با استاندارد ASTM D412 C تعیین شدند. الگوریتم چرخه‌ای بهینه‌سازی‌شده بر اساس مدل اجزای محدود نمونه نواری‌شکل ساخته‌شده در نرم‌افزار Abaqus به همراه دو جزء انطباق نتایج و بهینه‌سازی (Nelder-Mead) در نرم‌افزار Isight طراحی شد. از این الگوریتم برای تعیین پارامترهای مدل مکانیکی استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی با داده‌های تجربی حاکی از دقت زیاد مدل پیشنهادی است. پیش‌بینی اثر نوع کائوچوی SBR (محلولی یا امولسیونی) و نوع و مقدار پرکننده (دوده و سیلیکا) به‌کمک پارامترهای پیش‌بینی‌شده مدل مطالعه شد. نشان داده شد، ارتباط بسیار خوبی بین تغییرات این پارامترها با ساختار کائوچو و نحوه عملکرد پرکننده‌ها وجود دارد. همچنین مشخص شد، کائوچوی SBR محلولی نسبت به نوع امولسیونی ٪۵۰ عملکرد بهتری دارد و نیز افزودن سیلیکا موجب کاهش ٪۲۵ تا ٪۳۵ اتلاف انرژی می‌شود.

واژه‌های کلیدی

کائوچوی SBR،
کائوچوی BR،
سیلیکا،
ابرگرانروکشسان،
روش اجزای محدود

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:
m.h.r.ghoreishy@ippi.ac.ir

مقدمه

تایر از مهم‌ترین اجزای وسیله نقلیه بوده به نحوی که عملکرد خودرو بسیار متأثر از کارایی تایرهای آن است. تایر از بخش‌های مختلفی ساخته‌شده که رویه مهم‌ترین آن است، به نوعی که بخش بسیار مهمی از کارآمدی تایر وابسته به آمیزه، شکل هندسی و نقش (pattern) رویه است. علت این موضوع آن بوده که رویه رابط مستقیم بین بدنه اصلی تایر و زمین است و تمام نیروها و گشتاورهای میان خودرو و زمین از راه آن انتقال می‌یابند. رفتار فیزیکی-مکانیکی آمیزه لاستیکی رویه تایر بر فرسایش، اتلاف انرژی و چنگ‌زنی یا کشانش تایر بسیار مؤثر است. تلاش‌های فراوانی انجام‌شده تا برای هر تایر آمیزه بهینه‌ای طراحی شود، به‌گونه‌ای که بتواند هر سه این پارامترها را در سطح قابل قبولی نگه دارد. از این میان، اتلاف انرژی در بارگذاری چرخه‌ای تایر که از آن با نام مقاومت غلتشی یاد می‌شود، اثر بسزایی بر مصرف سوخت، ایمنی و عملکرد تایر دارد و بنابراین بسیار مورد توجه قرارگرفته است. با توجه به تعداد زیادتر و سهم بیشتر تایرهای سواری و نیز برقراری الزامات قانونی و استانداردهای اجباری، پژوهش‌های فراوانی در این زمینه انجام شده است. بر این اساس امروزه اغلب آمیزه‌های رویه تایرهای سواری بر پایه آمیخته دو کائوچوی استیرن-بوتادی‌ان (SBR) و پلی‌بوتادی‌ان (BR) همراه با پرکننده‌های تقویت‌کننده دوده و سیلیکا ساخته می‌شوند. در زمینه استفاده از سیلیکا در آمیزه‌های لاستیکی مصرفی در تایر به‌ویژه رویه تایرهای سواری مطالب بسیار فراوانی چاپ شده است که برای مثال می‌توان به مرجع ۱ رجوع کرد که در آن توضیحات مفصلی درباره سازوکار تقویت‌کنندگی سیلیکا در آمیزه‌های لاستیکی بر پایه کائوچوی SBR به‌ویژه نوع محلولی آن داده شده است. به‌طور خلاصه استفاده از سیلیکا به همراه عامل جفت‌کننده سیلانی مناسب نظیر بیس(تری‌اتوکسی‌سیلیل‌پروپیل)تتراسولفید، TESPT، می‌تواند موجب کاهش اتلاف انرژی با کاستن از شکست-واشکست اجزای پرکننده با یکدیگر و نیز کاهش تحرک گروه‌های آویزان و انتهایی زنجیرهای پلیمری شود. جست‌وجوهای مطالعاتی نشان داد، بخش شایان توجهی از پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه اختصاص به توسعه مدل‌های مکانیکی دارد که بتوان به‌کمک آن‌ها رفتار آمیزه و در نهایت مقاومت غلتشی را پیش‌بینی کرد. مواد لاستیکی به‌ویژه لاستیک‌های پرشده با مقادیر زیادی پرکننده دارای رفتار مکانیکی پیچیده و منحصربه‌فردی هستند و از نظریه‌های کشسانی خطی پیروی نمی‌کنند. بنابراین، برای توصیف دقیق رفتار آن‌ها به مدل‌های پیچیده ریاضی نیاز است که اغلب دارای پارامترهای متعددی نیز هستند. به‌طورکلی دو دسته مدل ریاضی برای توصیف رفتار مکانیکی لاستیک‌ها وجود دارد. دسته اول مدل‌های ابرکشسان هستند که در مسائل ساده کاربرد دارند و اثر زمان صرف‌نظرکردنی است. این دسته مدل‌ها به سه دسته مدل‌های پدیده‌نگر (phenomenological) مانند مدل‌های چندجمله‌ای، مدل‌های ساختار-پایه (mechanistic) مانند مدل Neo-Hooke و مدل‌هایی که بر پایه تلفیق این دو ساخته شده‌اند، تقسیم می‌شوند. منابع و مراجع متعددی برای بررسی انواع این مدل‌ها وجود دارند که از جمله آن‌ها می‌توان به Gent [۲]، Bergstrom [۳]، قریشی [۴،۵]، Yoeh [۶] و Arruda و Boyce [۷] اشاره کرد. اما این مدل‌ها به‌تنهایی قابلیت پیش‌بینی دقیق رفتار مواد لاستیکی را ندارند. بر این اساس، دسته دوم مدل‌هایی هستند که در آن‌ها از ترکیب مدل ابرکشسان و مدل گرانرو برای توصیف رفتار لاستیک‌ها استفاده شده است. این مدل‌ها، مدل‌های ابرگرانروکشسان (hyper-viscoelastic) نامیده می‌شوند. رفتار گرانرو می‌تواند با دو نوع مدل خطی که در آن وابستگی تنش به مقدار کرنش در زمان‌های مختلف وجود نداشته یا مدل‌های غیرخطی بیان شود که در آن اثر مقدار کرنش لحاظ شده است. همچنین، این دسته از مواد تغییرشکل دائمی نشان می‌دهند که برای توصیف این رفتار به‌طور کلی از مدل‌های مومسانی (plasticity) استفاده می‌شود. همچنین پدیده نرم‌شدگی تنش که حاصل شکست بازگشت‌ناپذیر پیوندهای ضعیف پلیمر-پرکننده و پرکننده-پرکننده به‌ویژه در آمیزه‌های پرشده با درصدهای زیاد پرکننده هستند، موجب می‌شود تا لاستیک در چرخه‌های مختلف بارگذاری رفت‌وبرگشتی اتلاف انرژی بیشتری نسبت به مقدار مورد انتظار به‌کمک مدل‌های ابرگرانروکشسان نشان دهد. این پدیده با نام اثر Mullins و Payne (بسته به نوع بارگذاری و کمیت اندازه‌گیری‌شده) خوانده می‌شوند [۸،۹]. یادآور می‌شود، اتلاف انرژی کم در تایر به‌طور مستقیم به جزء گرانرو آمیزه لاستیکی (به‌ویژه آمیزه رویه) برمی‌گردد. به‌عبارت دیگر، هر قدر که جزء گرانرو در رفتار ابرگرانروکشسان آمیزه کمتر ظاهر شود، در آن صورت انرژی اتلافی کمتر می‌شود و تایر مقاومت غلتشی کمتری دارد.

برخی پژوهشگران ترکیب مدل‌های ابرکشسان به همراه مدل گرانرو را برای درنظرگرفتن اثر زمان و نیز مدل نرم‌شدگی تنش را به روش نظری و تجربی مطالعه کرده‌اند. در پژوهشی که اخیراً قریشی و عباسی [۱۰] انجام دادند، از تلفیق مدل ابرکشسان به همراه مدل رئولوژی چارچوب موازی (parallel rheological framework, PRF) و مدل جدید برای نرم‌شدگی تنش در آمیزه رویه تایر سواری استفاده شد. از مدل Arruda-Boyce برای رفتار ابرکشسانی و برای رفتار گرانروکشسانی از مدل غیرخطی نمایی سفت‌شدگی کرنشی (power-law strain hardening) استفاده شد. پیش از آن نیز گروه

فعلی پژوهشگران در پژوهش‌های جداگانه‌ای رفتار آمیزه‌های رویه تایرهای سواری و باری با مدل‌های خطی و غیرخطی را بررسی کردند. قریشی [۱۱،۱۲] از ترکیب چند مدل ابرکشسان به همراه مدل گرانروکشسان سری Prony رفتار کششی آمیزه مصرفی در رویه تایر باری را بررسی کرد و نشان داد، صرف‌نظرکردن از رفتار گرانروکشسانی می‌تواند به بروز خطاهای زیاد هنگام پیش‌بینی رفتار مکانیکی منجر شود. در مقابل، استفاده از مدل ترکیبی به افزایش دقت و کاهش چشمگیر اختلاف بین داده‌های تجربی و مدل کمک فراوانی می‌کند. در پژوهش دیگری از همین گروه، قریشی و همکاران [۱۳] با استفاده از ترکیب مدل ابرکشسان Yeoh و مدل گرانروکشسان غیرخطی Bergstrom-Boyce اثر نوع و مقدار دوده را بر رفتار آمیزه لاستیکی بررسی کردند. در این پژوهش، رفتار نمونه زیر نیروهای کششی و فشاری تک‌جهتی مطالعه شد. پس از تعیین پارامترهای مدل، ارتباط آن‌ها با تغییر ساختار و سایر خواص دوده بررسی شد. نتایج نشان داد، اندازه ذرات و نوع ساختار دوده که با اعداد جذب سطحی ید و جذب دی‌بوتیل فتالات توصیف می‌شود، با پارامترهای اول و دوم مدل Bergstrom-Boyce هم‌خوانی بسیار خوبی دارند. همچنین تأیید شد، روش به‌کار گرفته‌شده در این پژوهش برای پیش‌بینی مقدار اتلاف آمیزه لاستیکی قابل استفاده است. در پژوهشی Hurtado و همکاران [۱۴] کارایی مدل PRF را در مطالعه رفتار گرانروکشسان غیرخطی الاستومرهای پرشده بررسی کردند. آن‌ها، رفتار آسایش از تنش گرمانرم PC-ABS و پاسخ چرخشی تک‌محوری ترکیبی لاستیک پرشده را مطالعه کردند. پس از تعیین پارامترهای مدل، برای صحت‌سنجی مدل به‌کار رفته، نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی و نتایج حاصل از مدل‌سازی مقایسه و انطباق بسیار خوبی بین نتایج حاصل از دو روش دیده شد.

با توجه به اینکه نوع کائوچوی مصرفی SBR (امولسیونی یا محلولی) به‌عنوان اصلی‌ترین جزء آمیزه‌کاری در رویه تایر اثر ویژه‌ای بر عملکرد گرانروکشسانی و اتلاف انرژی آن دارد. بنابراین در پژوهش حاضر نقش هر یک از این دو نوع کائوچو بر رفتار ابرگرانروکشسان آمیزه رویه تایر سواری از دیدگاه مدل‌سازی بررسی شد. افزون بر این، نقش سیلیکا به‌عنوان پرکننده تقویت‌کننده که با برقراری پیوند شیمیایی با زنجیر پلیمر از اتلاف انرژی می‌کاهد، نیز در این مدل‌سازی مطالعه شد. این موارد به‌عنوان نوآوری‌های پژوهش حاضر بوده که تاکنون به شکل ارائه‌شده در این مقاله مطالعه نشده است. شایان ذکر است، گروه پژوهشی حاضر پژوهش مشابهی را درباره رفتار انتقال گرمای این نوع آمیزه‌ها انجام دادند که نتایج آن پیش‌تر [۱۵] چاپ شده است.

تجربی

مواد

از دو نوع کائوچوی SBR امولسیونی و محلولی به همراه کائوچوی BR و پرکننده‌های دوده و سیلیکا استفاده شد. مشخصات تمام مواد اولیه استفاده‌شده در این پژوهش در جدول ۱ آمده است.

فرمول‌بندی و آمیزه‌سازی

آمیزه‌های طراحی‌شده در این پژوهش بر پایه ترکیب مرسوم آمیزه استفاده‌شده در رویه تایر سواری بود. دو دسته سه‌تایی از آمیزه‌ها (در مجموع شش آمیزه) تهیه شد. در مجموعه اول از کائوچوی SBR امولسیونی و در مجموعه دوم از کائوچوی SBR محلولی استفاده شد. از آنجا که SBR محلولی حدود ۲۷ phr روغن دارد، بنابراین روغن از اجزای این آمیزه حذف شد. از سوی دیگر، برای اینکه مقدار روغن به ۳۰ phr برسد که در آمیزه‌های دارای SBR امولسیونی استفاده شد، مقدار کائوچوی BR در این آمیزه‌ها از ۲۵ phr به ۲۷ phr افزایش‌یافت. در همه آمیزه‌ها مجموع مقدار دو پرکننده (دوده و سیلیکا) برابر ۸۰ phr درنظر گرفته شد. همچنین، در هر مجموعه به‌تدریج ۲۰ و ۴۰ phr دوده با سیلیکا جایگزین شد. در جدول ۲ کدگذاری و مقدار هر جزء در آمیزه آمده است. با توجه به اینکه سرعت پخت در اثر افزایش مقدار سیلیکا کاهش می‌یابد، بنابراین سامانه پخت و مقدار شتاب‌دهنده به‌گونه‌ای طراحی شد تا تمام آمیزه‌ها در زمان تقریباً یکسان به پخت کامل برسند. همچنین رعایت این نکته سبب می‌شود تا همه آمیزه‌ها مقدار شبکه‌ای‌شدن نسبتاً یکسانی داشته باشند که این نکته از مساوی‌بودن نسبی اختلاف بین بیشینه و کمینه گشتاور از آزمون پخت‌سنجی مشخص می‌شود [۱۵]. بدین ترتیب به درنظرگرفتن اثر مقدار شبکه‌ای‌شدن در آثار گرانروکشسانی نیازی نیست.

دستگاه‌ها و روش‌ها

اختلاط آمیزه‌ها با استفاده از مخلوط‌کن دوغلتکی مدل Schwa-benthan 200 L انجام شد. پخت آمیزه‌ها در قالب‌های مربوط در پرس ۱۰۰ تنی مدل Bucher ساخت سوئیس انجام شد. برای انجام آزمون‌های کششی چرخه‌ای نمونه‌ها طبق شکل ۱ تهیه شدند. برای انجام آزمون کشش نمونه‌ای دمبلی‌شکل طبق استاندارد ASTM D412-C و نمونه‌ای دیگر برای انجام مدل‌سازی به شکل نواری با عرض ۲ cm تهیه شد [۱۲]. تمام نمونه‌ها با استفاده از دستگاه کشش عمومی ساخت شرکت Hiva با دو سرعت ثابت ۱۰۰ و

جدول ۱- مشخصات مواد اصلی.

Table 1. Compounding ingredients.

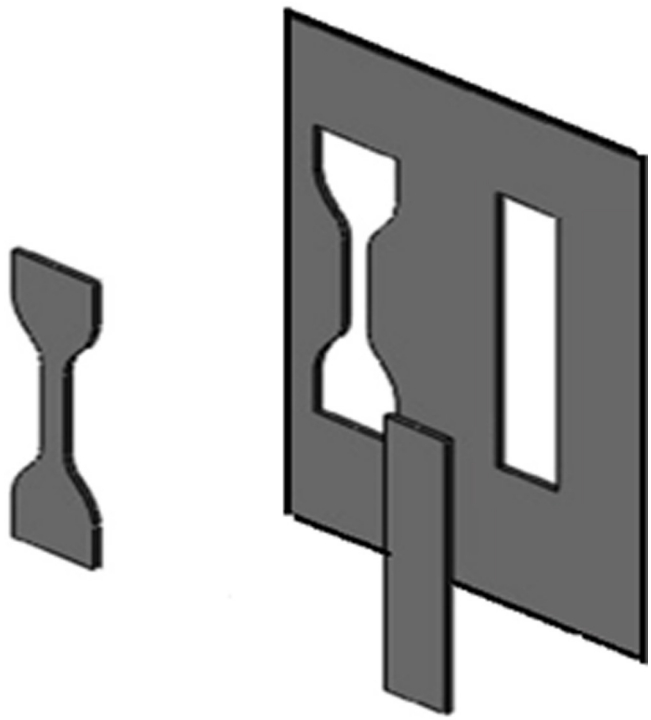
Ingredient	Chemical/Trade name	Supplier
S-SBR	Solution styrene butadiene rubber 6360 SL	Kumho, South Korea
E-SBR	Emulsion styrene butadiene rubber 1500	Bandar Imam, Iran
BR	Butadiene rubber 1220	Arak Petrochemcal Co., Iran
Oil	Aromatic oil	Behran, Iran
Black filler	Carbon black (N-330, N-550)	Iran Carbon Co.
Silica	Coupsil 8113	Degussa
Sulfur	Sulfur	Tesdak, Iran
CBS (Accelerator)	N-Cyclohexyl-2-benzothiazole sulfenamide	Bayer
DPG (Accelerator)	Diphenyl guanidine	Bayer
6PPD	N-(1,3-dimthylbutyl)-Ń-phenylenediamine (Dusantox)	Duslo, Slovakia
Activator	Stearic acid (St. Acid)	Rhein Chemie
Activator	Zinc oxide (ZnO)	Pars Oxide, Iran

۵۰۰ mm/min در چرخه رفت‌وبرگشتی بررسی شدند. به‌منظور صحت‌سنجی پارامترهای حاصل از مدل، آزمون کشش در دو سرعت مختلف انجام شد. آزمون‌های کشش در چرخه رفت‌وبرگشتی انجام شدند تا با بررسی مسیر برگشت اثر پدیده نرم‌شدگی تنش ارزیابی شود. همچنین، از دستگاه سوانگاری ژل تراوا، مدل Agilent سری ۱۱۰۰ با ستون PL-gel mixed برای تعیین وزن مولکولی کائوچوی SBR امولسیونی و محلولی استفاده شد. بدین منظور، ابتدا پلیمر مدنظر با غلظت بسیار کم در حلال تتراهیدروفوران حل و محلول حاصل صاف شد. صاف‌کردن برای جداسازی بخش‌های حل‌نشده انجام شد. سپس، محلول صاف‌شده به ستون دستگاه سوانگاری

جدول ۲- فرمول‌بندی آمیزه‌ها (قسمت به ازای صد واحد کائوچو).

Table 2. Compounds formulation.

Ingredient	Compound code (phr)					
	SSBS0	SSBS20	SSBS40	ESBS0	ESBS20	ESBS40
S-SBR	100	100	100	-	-	-
E-SBR	-	-	-	75	75	75
BR	27	27	27	25	25	25
Oil	0	0	0	30	30	30
ZnO	4	4	4	4	4	4
St. Acid	2	2	2	2	2	2
6PPD	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
CB (N-330)	55	41	27	55	41	27
CB (N-550)	25	19	13	25	19	13
Silica	-	20	40	-	20	40
Sulfur	2	2	2	2	2	2
CBS	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
DPG	-	0.35	0.75	-	0.35	0.75



شکل ۱- نمونه‌ای دمبل مطابق ASTM D412 و نوار ۲ cm بریده‌شده از ورق لاستیکی پخت شده.

Fig. 1. ASTM D412 and rubber strip test samples cut from cured rubber sheet.

تزریق شد. این ستون پیش‌تر به‌وسیله پلیمرهای دارای وزن‌های مولکولی استاندارد کالیبره شده بود [۱۵]. در جدول ۳ مشخصات اندازه‌گیری وزن مولکولی و توزیع آن برای کائوچوهای مصرفی در این پژوهش آمده است. همان‌طور که انتظار می‌رود، کائوچوی SBR محلولی دارای وزن مولکولی بیشتر و توزیع باریک‌تری نسبت به نوع امولسیونی است. برای اندازه‌گیری مقدار تراکم‌پذیری آمیزه‌های ساخته‌شده از آزمون تراکم حجمی استفاده شد. در این آزمون، نمونه استوانه‌ای توپر درون فضای استوانه‌ای توخالی قرار داده شد که از سه جهت محصورشده بود و با میله فولادی فشرده و تغییرات نیرو برحسب فشردگی ثبت شد. این داده با برازش غیرخطی به پارامتر

جدول۳- وزن مولکولی و MWD برای SBR محلولی و امولسیونی.

Table 3. Molecular weight and MWD of solution and emulsion SBR.

Rubber type of SBR	Molecular weight		
	M_n	M_w	PDI
Emulsion	156000	465000	2.98
Solution	319000	807000	2.53

مقدار تراکم‌پذیری (یا نسبت پوآسون) تبدیل شد [۵].

مدل‌سازی

برای مدل‌کردن رفتار آمیزه لاستیکی از مدل ترکیبی سه‌گانه ابرکشسان، گرانروکشسان غیرخطی و مدل نرم‌شدگی تنش استفاده شد که در ادامه هر یک به‌طور کامل بحث شدند.

مدل ابرکشسان

برای بیان بخش رفتار کشسانی یا مستقل از زمان آمیزه‌های لاستیکی از مدل ابرکشسان استفاده شد. در این مدل‌ها، معادله بین چگالی انرژی کرنشی و ناورداهای تانسور تغییرشکل (I_1،I_2و I_3) یا سه نسبت اصلی کشیدگی (λ_1، λ_2 و λ_3) نوشته می‌شود. بدین منظور در این پژوهش، پس از بررسی عملکرد مدل‌های مختلف از مدل ابرکشسان Ogden استفاده شد. این مدل در حالت کلی به شکل معادله (۱) داده شده است [۱۶]:

$$W=\sum_{i=1}^{n}\frac{2\mu_i}{\alpha_i^2}\left(\overline{\lambda}_1^{\alpha_i}+\overline{\lambda}_2^{\alpha_i}+\overline{\lambda}_3^{\alpha_i}-3\right)+\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{D_i}\left(J^{el}-1\right)^{2i} \quad (۱)$$

که

$$\overline{\lambda}_i=J^{-\frac{1}{s}}\lambda_i \quad (۲)$$

در این معادله، n تعداد جملات، α_i و μ_i پارامترهای بخش انحرافی (deviatoric)، D_i پارامتر بخش تغییر حجمی و J^{el} نسبت حجمی کشسان بوده که با معادله (۳) داده شده است:

$$J_{el}=\frac{J}{J^{th}} \quad (۳)$$

که J ژاکوبین تانسور گرادیان تغییرشکل و J^{th} نسبت تغییر حجم ناشی از تغییرات دما بوده که برای تغییرشکل هم‌دما $J = J^{el}$ است. پارامترهای مدل با برازش غیرخطی روی داده‌های حاصل از آزمون کشش و تغییر حجم به‌دست می‌آید.

مدل گرانروکشسان

مهم‌ترین چالش در پیش‌بینی صحیح رفتار وابسته به زمان مواد لاستیکی، غیرخطی‌بودن رفتار گرانروکشسان آن‌ها به‌ویژه در لاستیک‌های پرشده با مقادیر زیادی پرکننده همانند آمیزه‌های رویه تایر است. بدین منظور از مدل رئولوژی چارچوب موازی (PRF)

استفاده شد. این مدل در حقیقت از تعدادی مدل گرانروکشسان غیرخطی تشکیل‌شده که به‌طور موازی همراه با مدل کاملاً کشسان در یک چارچوب قرارگرفته‌اند (شکل ۲). این مدل می‌تواند برای پیش‌بینی رفتار پیچیده موادی استفاده شود که تحت کرنش‌های زیاد قرارگرفته و با مدل‌های خطی قابل پیش‌بینی دقیق نیستند. بخش کشسان مدل که در شکل با شماره صفر در سمت چپ نشان داده‌شده به‌کمک یکی از مدل‌های ابرکشسان بیان می‌شود. در اینجا همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد از مدل Ogden بدین منظور استفاده شد. اما برای سایر بخش‌ها (از ۱ تا N) از مدل گرانرو غیرخطی استفاده شد. بدین ترتیب که در این مدل غیرخطی سرعت کرنش خزشی معادل، (equivalent creep strain rate) $\dot{\bar{\varepsilon}}^{cr}$ برحسب کرنش خزشی معادل، (equivalent creep strain) $\bar{\varepsilon}^{cr}$ و تنش کیرشهف معادل انحرافی، (deviatoric equivalent Kirchhoff stress) q به‌کمک معادله پدیده‌نگر بیان می‌شود. در این پژوهش، پس از بررسی مدل‌های مختلف، از مدل Bergstrom-Boyce [۱۷] استفاده شد که به شکل معادله (۴) داده شده است:

$$\dot{\bar{\varepsilon}}^{cr} = A(\lambda^{cr} - 1 + E)^c q^m \qquad (۴)$$

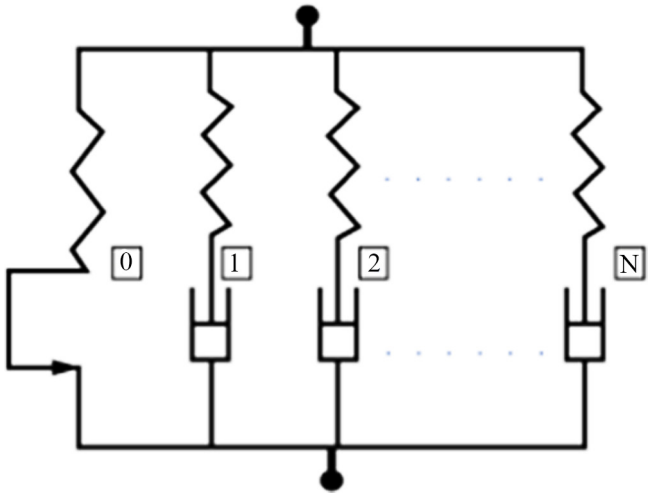
که

$$\lambda^{cr} = \sqrt{I_1^{cr}/3} \qquad (۵)$$

در این معادله، A، c، m و E پارامترهای ماده هستند. m مقداری مثبت و بزرگ‌تر از ۱ بوده و نشانگر وابستگی تنش مؤثر به سرعت کرنش خزشی مؤثر است. m مقداری بین ۱- و ۰ بوده که نشانگر وابستگی کرنش خزشی به سرعت کرنش خزشی مؤثر است. همچنین، مقدار E در تمام حالت‌ها برابر با مقدار پیش‌فرض نرم‌افزار یعنی ۰/۰۱ درنظر گرفته شد. این کمیت در حقیقت نوعی تنظیم‌کننده در معادله برای مقادیر کم تغییرشکل است. پارامتر A نیز بیانگر جزء گرانرو است و مقدار آن می‌تواند بین صفر (برای حالت تمام کشسان) و عدد مثبت بزرگ‌تر از صفر باشد. بیشتربودن این کمیت حاکی از بیشتربودن سهم گرانروی در رفتار مکانیکی است. مقدار چگالی انرژی کرنشی در مدل PRF به‌صورت جمع چگالی انرژی کرنشی هر یک از اجزای شبکه نشان داده‌شده در شکل ۲ به صورت معادله (۶) بیان می‌شود:

$$W_T = \sum_{i=0}^{N} s_i W_i \qquad (۶)$$

در این معادله، W_T چگالی انرژی کرنشی کل سامانه، W_i چگالی



شکل ۲- طرحی از مدل چارچوب رئولوژی موازی ((PRF [۱۳].
Fig. 2. A schematic diagram of parallel rheological framework (PRF) model [13].

انرژی کرنشی هر جزء و s_i سهم چگالی انرژی هر جزء است، به نحوی که:

$$\sum_{i=0}^{N} s_i W_i = 1 \qquad (۷)$$

براین اساس باید برای هر جزء گرانروکشسان مقدار s_i تعیین شده باشد که در نهایت، اختلاف جمع آن‌ها تا مقدار ۱ بیانگر سهم جزء ابرکشسان است. برای بیان کامل رفتار مکانیکی لاستیک‌ها با این مدل لازم است تا پارامترهای معادله بالا (یعنی A، c، m و E) به همراه پارامتر s_i برای هر جزء گرانروکشسان تعیین شوند.

مدل نرم‌شدگی تنش

آمیزه‌های لاستیکی پرشده با مقادیر زیادی پرکننده از خود پدیده نرم‌شدگی تنش نشان دادند که ناشی از شکست ساختار شبکه پرکننده-پرکننده و تا حدی پلیمر-پرکننده است. برای بیان ریاضی این مسئله از مدل ارائه‌شده توسط Ogden و Roxburgh [۱۸] استفاده شد. در این مدل، تابع چگالی انرژی کرنشی با معادله (۸) داده شده است:

$$W(F,\eta) = \eta W_0(F) + \Phi(\eta) \qquad (۸)$$

در این معادله $W(F,\eta)$ و $W_0(F)$ تابع چگالی انرژی کرنشی جدید و اولیه و $\Phi(\eta)$ تابع شکست شبکه است که به کاهش نمودار تنش-کرنش در چرخه بازگشت یا چرخه‌های بعدی بارگذاری منجر

می‌شود. η نیز پارامتری عددی است که با نام متغیر شکست شبکه نامیده می‌شود. برای نخستین مرحله بارگذاری تابع و متغیر یادشده به شکل معادله (۹) بیان می‌شود:

$$\Phi(\eta)=0 \quad , \quad \eta=1 \qquad (۹)$$

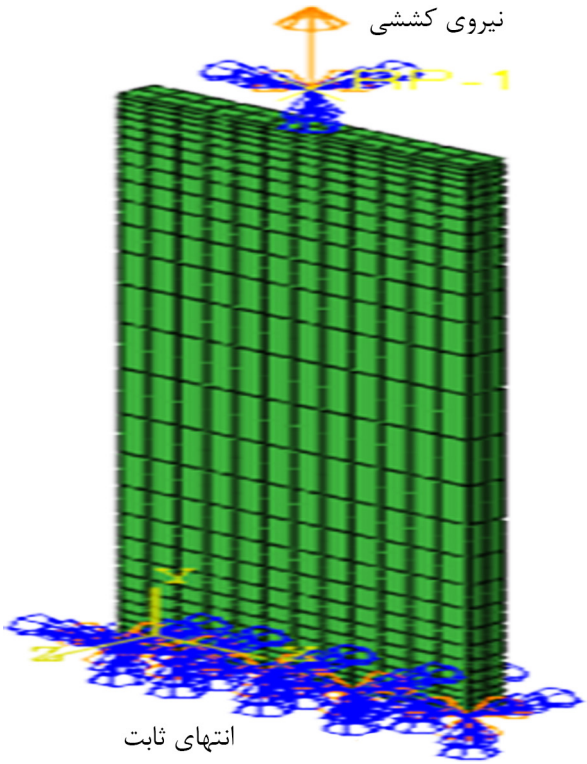
اما، در مراحل بعدی مقدار η کمتر از ۱ می‌شود. در این پژوهش، برای η از معادله ارائه‌شده توسط Bose و همکاران [۱۹] استفاده شد که به شکل معادله (۱۰) داده شده است:

$$\eta=1-\frac{1}{r}\mathrm{erf}\left(\frac{\overline{w}^{max}-\overline{w}_0}{\alpha+\beta\overline{w}^{max}}\right) \qquad (۱۰)$$

در این معادله، $\overline{w}_0$ مقدار چگالی انرژی کرنشی بخش انحرافی مدل در نخستین مرحله بارگذاری و $\overline{w}^{max}$ مقدار بیشینه $\overline{w}_0$ است. همچنین، r، α و β نیز پارامترهای مواد هستند.

مدل اجزای محدود

تعیین پارامترهای مدل ترکیبی انتخابی برای آمیزه‌های لاستیک مطالعه‌شده کار آسانی نبوده و نیازمند به‌کارگیری روش‌های عددی است. بدین منظور از روشی استفاده شد که پیش‌تر در مقالات گروه پژوهشی حاضر معرفی شده بود [۱۰،۱۲،۱۳]. در این روش، ابتدا رفتار کششی نمونه نواری‌شکل با ابعاد ۱۱×۲ cm در چرخه رفت‌وبرگشتی مدل شد. بدین منظور، ابتدا مدل اجزای محدود نمونه یادشده در نرم‌افزار Abaqus/Standard [۲۰] ساخته شد (شکل ۳). سپس، پارامترهای مدل ابرکشسان Ogden (معادله ۱) با واردکردن داده‌های تنش کرنش به‌دست‌آمده از آزمون کشش (استاندارد



شکل ۳- مدل اجزای محدود نمونه نوار لاستیکی زیر کشش.
Fig. 3. Finite element model of the rubber strip under tensile.

ASTM D412) و تغییرات حجمی اندازه‌گیری‌شده حاصل از آزمون حجمی در بخش ارزیابی مواد نرم‌افزار نامبرده به‌کمک برازش غیرخطی تعیین شدند. این پارامترها در جدول ۴ برای ۶ آمیزه مطالعه‌شده، داده شدند. گفتنی است، چون سرعت آزمون کشش مطابق استاندارد ۵۰۰ mm/min انتخاب شده بود. بنابراین با فرض زیادبودن سرعت، پارامترهای به‌دست‌آمده در حالت آنی (instantaneous) درنظر

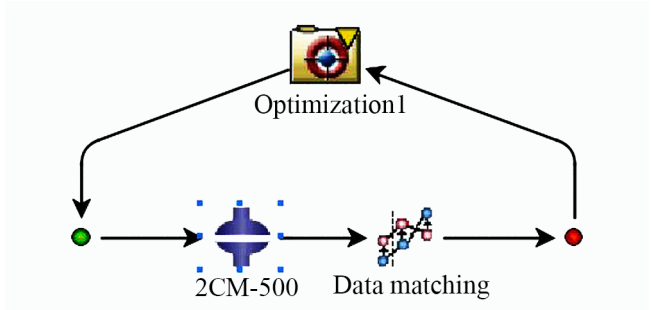
جدول ۴- پارامترهای مدل ابرکشسان Ogden (معادله ۱) حاصل از برازش غیرخطی.
Table 4. Parameters of Ogden hyperelastic model (Eq. 1)

Compound code	Parameters								
	μ_1	μ_2	μ_3	α_1	α_2	α_3	D_1	D_2	D_3
	(MPa)						(MPa^{-1})		
SSBS0	-93.46	35.75	61.80	-1.39	-0.26	-2.68	0.25	-1.85E-02	3.45E-06
SSBS20	-70.21	29.38	44.30	-0.14	-0.76	-1.22	0.20	6.9E-04	-1.19E-06
SSBS40	-49.31	19.72	32.11	-2.01	-0.95	-3.17	0.17	7.92E-04	-1.74E-05
ESBS0	-33.49	15.58	20.65	-2.00	-0.86	-3.2	0.23	3.32E-04	-7.45E-07
ESBS20	-30.90	14.3	17.72	-2.6	-0.12	-2.75	0.18	-1.89E-04	2.18E-07
ESBS40	-22.11	9.90	15	-1.14	-0.15	-2.25	0.14	2.06E-03	2.82E-06

گرفته شدند. به دنبال آن تحلیل اجزای محدود گرانروکشسان نمونه یادشده با استفاده از مدل ابرکشسان Ogden و گرانروکشسان Bergstrom-Boyce در دو حالت بدون درنظر گرفتن اثر نرم‌شدگی تنش و با درنظرگرفتن آن انجام شد. در هر مرحله برای تعیین پارامترهای دو مدل گرانروکشسان و نرم‌شدگی تنش (معادلات ۴، ۶ و ۱۰) از روش بهینه‌سازی Nelder-Mead [۲۱] استفاده شد. این موضوع با کمک نرم‌افزار Isight [۲۲] انجام شد. بدین ترتیب که حلقه بهینه‌سازی در نرم‌افزار طراحی و سپس دو جزء مربوط به نرم‌افزار Abaqus و انطباق داده‌ها به آن افزوده شد. شکل ۴ الگوریتم طراحی‌شده در نرم‌افزار Isight را نشان می‌دهد. در این الگوریتم ابتدا محاسبات اجزای محدود با نرم‌افزار Abaqus بر اساس مقادیر اولیه حدس زده‌شده برای پارامترهای مدل انجام شد. سپس، در جزء انطباق داده‌ها مقدار اختلاف آن‌ها با داده‌های تجربی به‌دست‌آمده از آزمون متناظر با شبیه‌سازی انجام‌شده بر اساس جمع مربع خطاها تعیین شد. به دنبال آن در جزء بهینه‌سازی که در رأس الگوریتم قرار دارد، این اختلاف تحلیل شد. مقادیر جدید پارامترها که بر اساس روش Nelder-Mead تعیین شدند، به جزء نرم‌افزار Abaqus واردشده و مجدداً محاسبات اجزای محدود انجام شد. مطابق آنچه در این الگوریتم طراحی‌شده، این چرخه تا جایی که مقدار خطا به حداقل برسد ادامه یافت که در این حالت مقادیر پارامترهای مدل تعیین شدند.

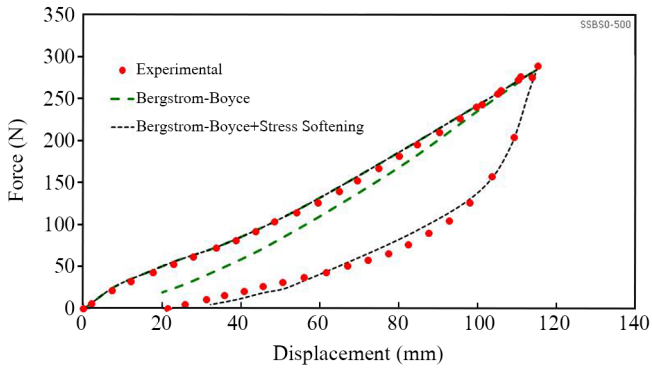
نتایج و بحث

نتایج حاصل از پیش‌بینی رفتار گرانروکشسان غیرخطی در آزمون کششی رفت‌وبرگشتی در سرعت ۵۰۰ mm/min در دوحالت با و بدون اثر نرم‌شدگی تنش در شکل‌های ۵ تا ۱۰ نشان داده شده است. شکل‌های ۵ تا ۷ نمودارها را برای نمونه‌های ساخته‌شده بر



شکل ۴- الگوریتم استفاده‌شده در نرم‌افزار Isight.

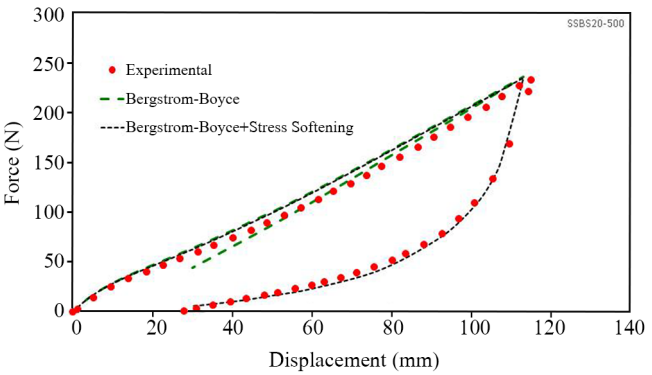
Fig. 4. Developed optimization loop in Isight code.



شکل ۵- نیرو برحسب افزایش طول در نمونه با عرض ۲ cm در سرعت کشش ۵۰۰ mm/min برای آمیزه SSBS0.

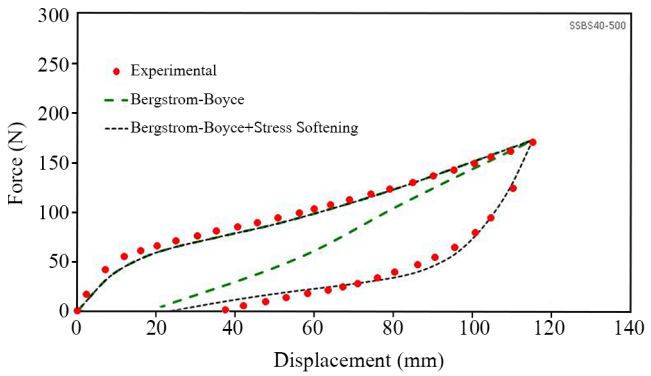
Fig. 5. Force-displacement of the 2 cm sample at 500 mm/min extension rate for SSBS0 compound.

پایه کائوچوی SBR محلولی و شکل‌های ۸ تا ۱۰ همین تغییرات را برای آمیزه‌های ساخته‌شده بر پایه کائوچوی SBR امولسیونی نشان می‌دهد. در این نمودارها نیروی محاسبه‌شده در برابر تغییر طول به همراه داده‌های تجربی متناظر با یکدیگر مقایسه شدند. همان‌طور که در نمودارها مشاهده می‌شود، در مسیر رفت یا بارگذاری بین داده‌های حاصل از آزمون تجربی کشش و داده‌های پیش‌بینی‌شده توسط مدل گرانروکشسان غیرخطی Bergstrom-Boyce انطباق خوبی وجود دارد. این انطباق به‌ویژه در آمیزه‌هایی که فقط دارای پرکننده دوده هستند (آمیزه‌های SSBS0 و ESBS0) بیشتر است که با افزودن سیلیکا به آمیزه‌ها (آمیزه‌های SSBS20 و ESBS20) به دلیل تشدید رفتار غیرخطی و پیچیدگی مسئله کمی اختلاف وجود دارد. این اختلاف با افزایش مقدار سیلیکا در آمیزه‌های SSBS40 و



شکل ۶- نیرو برحسب افزایش طول در نمونه با عرض ۲ cm در سرعت کشش ۵۰۰ mm/min برای آمیزه SSBS20.

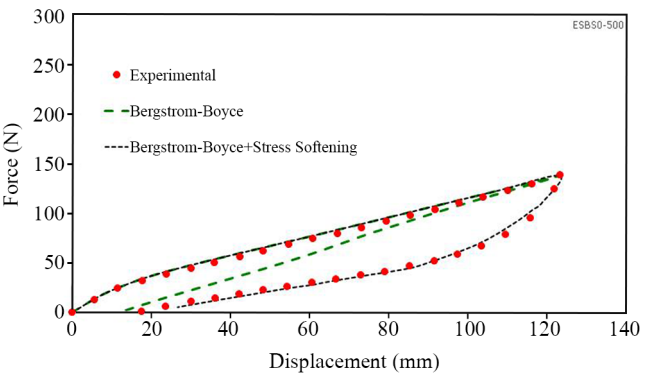
Fig. 6. Force-displacement of the 2 cm sample at 500 mm/min extension rate for SSBS20 compound.



شکل ۷- نیرو برحسب افزایش طول در نمونه با عرض cm ۲ در سرعت کشش mm/min ۵۰۰ برای آمیزه SSBS40.

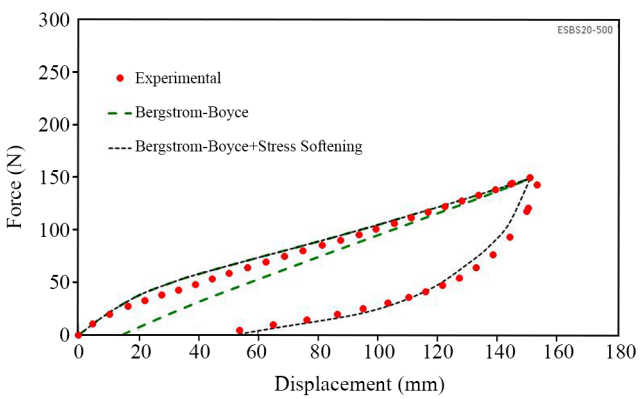
Fig. 7. Force-displacement of the 2 cm sample at 500 mm/min extension rate for SSBS40 compound.

ESBS40 بیشتر شده است، اما به‌طورکلی پیش‌بینی رفتار در مسیر رفت به‌کمک مدل Bergstrom-Boyce قابل‌قبول است. علت این موضوع نیز به تفاوت در سازوکار تقویت‌شدن لاستیک با دوده و سیلیکا و نحوه پاسخ آمیزه به نیروی اعمال‌شده به‌ویژه از دیدگاه میکرومکانیک برمی‌گردد [۲۳]. نحوه تقویت‌شدن لاستیک با دوده به‌طور عمده به دلیل برقراری پیوندهای فیزیکی بین زنجیرهای پلیمر با سطح‌فعال دوده بوده که دارای گروه‌های شیمیایی متعددی همچون فنول، کربوکسیل، کوئینن، لاکتون و سایر گروه‌ها هستند. از سوی دیگر سیلیکای به‌کاررفته از نوع اصلاح‌شده با TESPT بود که قابلیت برقراری پیوند شیمیایی با زنجیر پلیمری را دارد. بنابراین سازوکاری متفاوت از دوده دارد، ضمن آنکه در آمیزه‌های دارای سیلیکا بخشی از تقویت‌کنندگی بر عهده دوده است، بنابراین تقویت دوگانه لاستیک



شکل ۸- نیرو برحسب افزایش طول در نمونه با عرض cm ۲ در سرعت کشش mm/min ۵۰۰ برای آمیزه ESBS0.

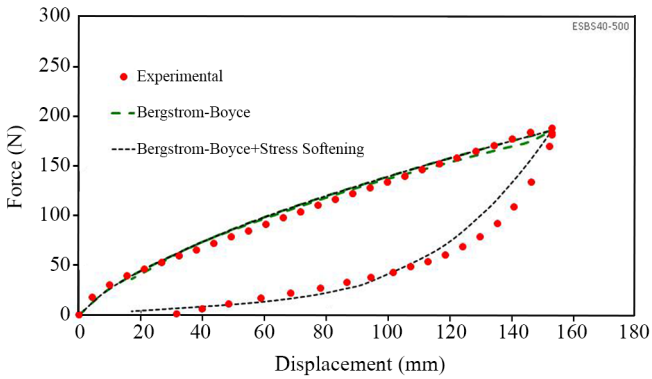
Fig. 8. Force-displacement of the 2 cm sample at 500 mm/min extension rate for ESBS0 compound.



شکل ۹- نیرو برحسب افزایش طول در نمونه با عرض cm ۲ در سرعت کشش mm/min ۵۰۰ برای آمیزه ESBS20

Fig. 9. Force-displacement of the 2 cm sample at 500 mm/min extension rate for ESBS20 compound.

با دوده و سیلیکا بر پیچیدگی رفتار می‌افزاید. همچنین، پژوهش‌های مختلف نشان دادند، به دلیل برقراری پیوند شیمیایی بین زنجیر پلیمر و سطح سیلیکا لایه بسیار نازکی از پلیمر با ضخامت حدود nm ۲ روی سطح پرکننده تشکیل‌شده که به‌دلیل نبود تحرک کافی حالت شیشه‌ای پیدا می‌کند [۲۴]. این لایه پلیمر برخلاف ضخامت کم آن به‌دلیل رفتار غیرکشسانی که هنگام اعمال تنش نشان می‌دهد، قابلیت تحمل بارهای زیاد را ندارد و دچار تسلیم می‌شود که می‌تواند سازوکار اتلاف را تا حد زیادی تحت تأثیر قرار دهد. اما همان‌طور که در این نمودارها دیده می‌شود، در مسیر برگشت یا باربرداری (unloading) اگر از اثر نرم‌شدگی تنش صرف‌نظر شود، بین داده‌های حاصل از آزمون تجربی و مدل غیرخطی Bergstrom-Boyce اختلاف زیادی



شکل ۱۰- نیرو برحسب افزایش طول در نمونه با عرض cm ۲ در سرعت کشش mm/min ۵۰۰ برای آمیزه ESBS40.

Fig. 10. Force-displacment of the 2 cm sample at 500 mm/min extension rate for ESBS40 compound.

جدول ۵- پارامترهای مدل گرانروکشسان غیرخطی Bergstrom-Boyce (معادله ۴).

Table 5. Parameters of nonlinear Bergstrom-Boyce viscolastic model (Eq. 4).

Compound code	Parameters			
	s	A ($MPa^{-m}s^{-1}$)	m	c
SSBS0	0.3	0.22	6	-1
SSBS20	0.23	0.32	5	-1
SSBS40	0.15	0.49	4	-1
ESBS0	0.57	0.11	7	-1
ESBS20	0.44	0.18	6	-1
ESBS40	0.33	0.27	5	-1

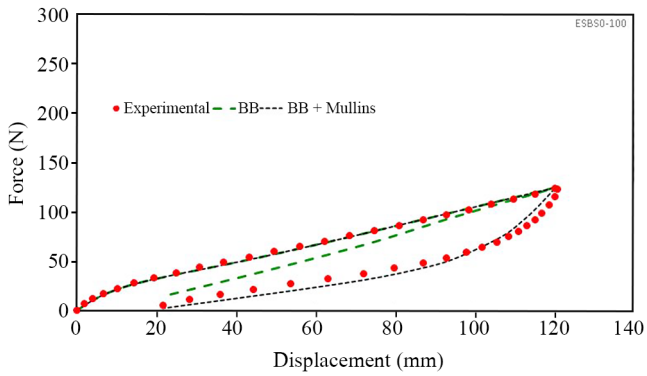
وجود دارد. در مسیر رفت نیروی وارد بر قطعه باعث شکست پیوندهای ضعیف بین پرکننده و زنجیرهای لاستیکی و نیز بخشی از ساختار شبکه‌ای پرکننده-پرکننده می‌شود. بنابراین، از سفتی نمونه لاستیکی کاسته شده و بدین ترتیب در مسیر برگشت به نیروی کمتری نیاز است. اگر این اثر در مدل وارد شود (معادله ۱۰) انطباق خوبی بین داده‌های نتایج حاصل از مدل و آزمون تجربی در مسیر برگشت حاصل می‌شود.

از جنبه‌های مهم این پژوهش بررسی اثر نوع کائوچوی SBR (محلولی و امولسیونی) بر رفتار گرانروکشسانی از دیدگاه مدل ارائه شده است. در جدول ۵ مقادیر پارامترهای معادله Bergstrom-Boyce (معادله ۴) برای آمیزه‌های بررسی‌شده در این پژوهش آمده است. همان‌طور که در معادله (۷) دیده می‌شود، افزایش پارامتر s موجب افزایش انرژی تلف‌شده می‌شود. مقادیر محاسبه‌شده s برای نمونه‌های مطالعه‌شده نشان می‌دهد، در هر دو حالت کائوچوی محلولی و امولسیونی مقدار این کمیت با افزایش مقدار سیلیکا کاهش می‌یابد. این نکته به‌خوبی بیانگر اثر کاهندگی افزودن سیلیکا بر مقدار اتلاف انرژی به دلیل برقرار پیوندهای شیمیایی بین پلیمر و پرکننده است که پیش‌تر نیز بدان اشاره شد. از سوی دیگر، در مقایسه بین دو کائوچوی محلولی و امولسیونی دیده می‌شود، در مقدار مشخصی از مقدار و نوع پرکننده (مثلاً SSBS0 با ESBS0 یا SSBS20 با ESBS20) نیز مقدار s برای آمیزه دارای کائوچوی نوع محلولی کمتر از مقدار به‌دست‌آمده برای کائوچوی نوع امولسیونی است. این نکته نیز به زیادبودن وزن مولکولی و توزیع باریک‌ترکائوچوی SBR محلولی (جدول ۳) برمی‌گردد. در اینجا به دلیل کمتربودن تعداد نقاط انتهایی و در پی نوسانات کمتر که یکی از عوامل اتلاف هستند، مقدار اتلاف انرژی نسبت به کائوچوی SBR امولسیونی کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، ساختار سیلیکا برخلاف دوده که تجمعی و خوشه‌ای بوده به شکل متخلخل است. از این‌رو، نفوذ زنجیرهای کائوچوی SBR محلولی به داخل خلل‌وفرج پرکننده سیلیکا به دلیل خطی‌بودن بسیار آسان‌تر از زنجیرهای پلیمر SBR امولسیونی انجام می‌شود که دارای شاخه‌های جانبی بیشتری هستند. در پی آن جدایی پلیمر از پرکننده کمتر و اتلاف کمتری در نمونه‌های ساخته‌شده از کائوچوی نوع محلولی نسبت امولسیونی رخ می‌دهد [۱]. افزون بر این، کائوچوی SBR محلولی دارای گروه‌های آویزان ۲،۱- وینیل بیشتری نسبت به نوع امولسیونی است و با توجه به اینکه سیلیکا به برقراری پیوند با این نوع گروه‌ها در مقایسه با پیوند دوگانه زنجیر اصلی بیشتر تمایل دارد. بنابراین، مقدار تقویت‌شدگی شیمیایی در آمیزه‌های ساخته‌شده از این نوع کائوچو بیشتر می‌شود. همان‌طور که از داده‌های جدول ۵ مشخص است، افزودن ۲۰ و ۴۰ phr سیلیکا به آمیزه‌های ساخته‌شده بر پایه کائوچوی SBR محلولی به ترتیب موجب کاهش ۲۵ و ٪۳۵ پارامتر s (کاهش اتلاف انرژی) می‌شود. در حالی که این کاهش برای آمیزه‌های ساخته‌شده بر پایه کائوچوی SBR امولسیونی فقط ٪۲۵ است. از سوی دیگر، با مقایسه بین مقادیر

جدول ۶- پارامترهای مدل نرم‌شدگی تنش (معادله ۱۰).

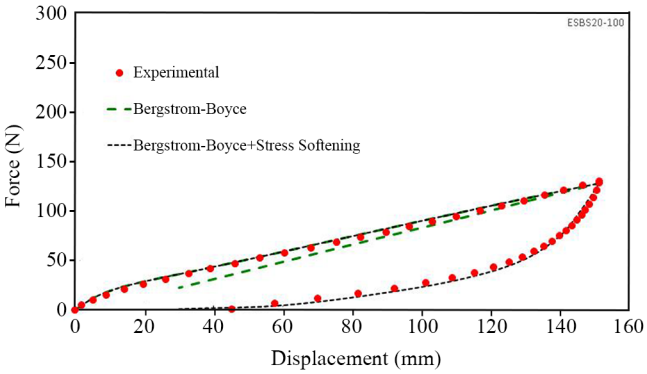
Table 6. Parameters of stress softening model (Eq. 10).

Compound code	Parameters		
	g	a (MPa)	b
SSBS0	2.1	0.12	0.08
SSBS20	2.7	0.52	0.11
SSBS40	3.2	0.6	0.16
ESBS0	1.08	0.08	0.01
ESBS20	1.5	0.22	0.07
ESBS40	1.9	0.3	0.1



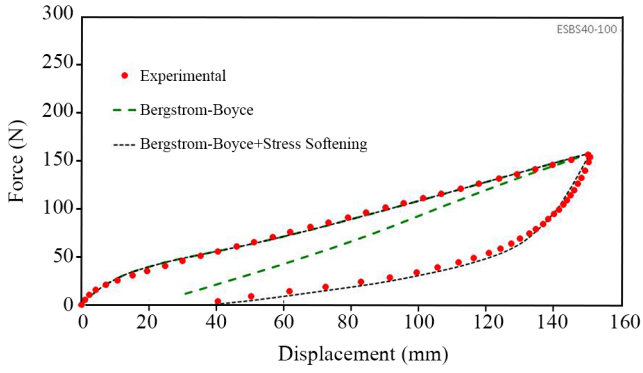
شکل ۱۴- نیرو برحسب افزایش طول در نمونه با عرض ۲ cm در سرعت کشش ۱۰۰ mm/min برای آمیزه ESBS0.

Fig. 14. Force-displacement of the 2 cm sample at 100 mm/min extension rate for ESBS0 compound.



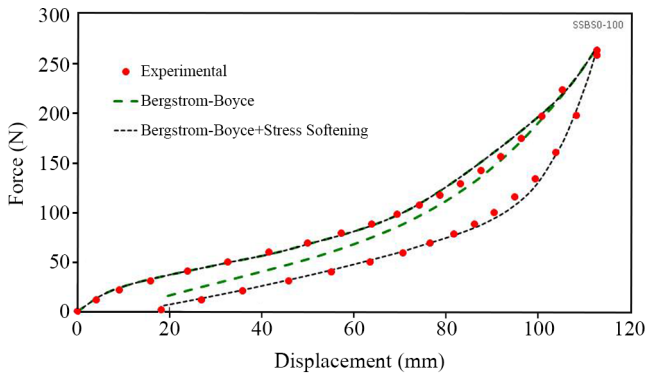
شکل ۱۵- نیرو برحسب افزایش طول در نمونه با عرض ۲ cm در سرعت کشش ۱۰۰ mm/min برای آمیزه ESBS20.

Fig. 15. Force-displacement of the 2 cm sample at 100 mm/min extension rate for ESBS20 compound.



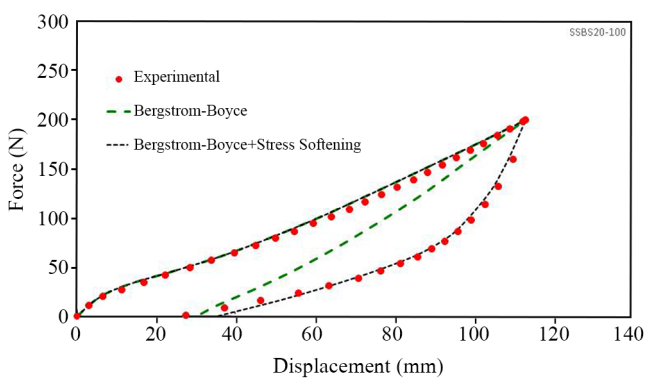
شکل ۱۶- نیرو برحسب افزایش طول در نمونه با عرض ۲ cm در سرعت کشش ۱۰۰ mm/min برای آمیزه ESBS40.

Fig. 16. Force-displacement of the 2 cm sample at 100 mm/min extension rate for ESBS40 compound.



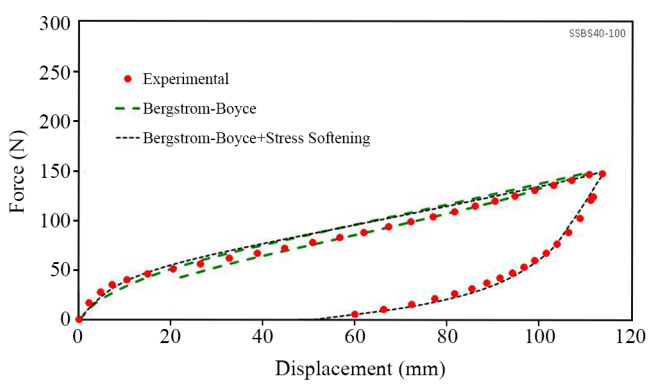
شکل ۱۱- نیرو برحسب افزایش طول در نمونه با عرض ۲ cm در سرعت کشش ۱۰۰ mm/min برای آمیزه SSBS0.

Fig. 11. Force-displacement of the 2 cm sample at 100 mm/min extension rate for SSBS0 compound.



شکل ۱۲- نیرو برحسب افزایش طول در نمونه با عرض ۲ cm در سرعت کشش ۱۰۰ mm/min برای آمیزه SSBS20.

Fig. 12. Force-displacment of the 2 cm sample at 100 mm/min extension rate for SSBS20 compound.



شکل ۱۳- نیرو برحسب افزایش طول در نمونه با عرض ۲ cm در سرعت کشش ۱۰۰ mm/min برای آمیزه SSBS40.

Fig. 13. Force-displacement of the 2 cm sample at 100 mm/min extension rate for SSBS40 compound.

یکسان پرکننده دیده می‌شود، کاهش اتلاف انرژی با افزودن مقادیر یکسان سیلیکا در آمیزه‌های ساخته‌شده بر پایه کائوچوی SBR محلولی حدود ٪۵۰ بیشتر از آمیزه‌های پایه امولسیونی است. بنابراین از این دیدگاه هم می‌توان نتیجه گرفت، افزودن سیلیکا موجب کاهش مقدار اتلاف انرژی شده و نیز اثرگذاری کائوچوی SBR محلولی بیشتر از نوع امولسیونی است. برای دو پارامتر اصلی دیگر یعنی A و m دیده می‌شود، مقدار A با افزایش درصد سیلیکا در هر دو آمیزه دارای کائوچوی محلولی و امولسیونی افزایش‌یافته درحالی‌که مقدار m کاهش می‌یابد. این دو کمیت روی مقدار وابستگی سرعت کرنش خزشی معادل به تنش کیرشهف معادل انحرافی و ناوردای اول تانسور تغییرشکل (معادله‌های ۴ و ۵) مؤثرند. انتظار می‌رود، با افزایش سیلیکا و نیز تغییر کائوچو از نوع امولسیونی به محلولی به‌دلیل تشکیل پیوندهای شیمیایی از مقدار وابستگی کم شود تا در نهایت اتلاف انرژی کمتری به‌دست آید. با توجه به اینکه پارامتر A به‌صورت ضریب و پارامتر m به شکل نمایی ظاهرشده است. بنابراین به‌راحتی دیده می‌شود، برای مقدار ثابت از تنش (q) سرعت کرنش خزشی معادل $\dot{\varepsilon}^{cr}$ در آمیزه‌های دارای کائوچوی SBR محلولی کمتر از مقدار مشابه در آمیزه‌های دارای SBR امولسیونی و برای نوع مشخصی کائوچو با مقادیر مختلف سیلیکا نیز کمتر است. افزون بر این، با توجه به اینکه بارگذاری نمونه‌ها از نوع تغییرشکل است، بنابراین برای تمام نمونه‌ها کمیت C که وابستگی سرعت کرنش خزشی معادل به مقدار تغییرشکل (ناوردای اول تانسور تغییرشکل) را نشان می‌دهد، یکسان محاسبه شد (c=-۱).

جدول ۶ پارامترهای مدل نرم‌شدگی تنش (معادله ۱۰) را برای نمونه‌های مطالعه‌شده نشان می‌دهد. همان‌طور که از این معادله می‌توان دریافت، با افزایش r و β به‌طور هم‌زمان یا جداگانه مقدار شکست شبکه و کاهش نیرو کم می‌شود. این نکته به‌خوبی برای آمیزه‌های دارای SBR محلولی و مقادیر بیشتر سیلیکا دیده می‌شود که تأییدکننده نتایج پیشین است. همچنین، کاهش کمتر نیرو در نمونه‌های یادشده به‌خوبی در منحنی برگشت در شکل‌های ۵ تا ۱۰ دیده می‌شود. پارامتر α نیز در این معادله بیانگر آن است که چه مقدار از شکست شبکه در مقادیر کم کرنش روی می‌دهد. دیده می‌شود، با افزایش سیلیکا و تغییر نوع کائوچو از امولسیونی به محلولی از کاهش خواص و شکست شبکه در کرنش‌های کم کاسته می‌شود. این نتیجه تأییدکننده آن است که مقدار اتلاف در چنین حالت‌هایی کمتر می‌شود. برای صحت‌سنجی و بررسی تکرارپذیری پارامترهای به‌دست‌آمده از مدل‌ها، رفتار نمونه‌ها در چرخه رفت‌وبرگشتی آزمون کشش با سرعت mm/min ۱۰۰ نیز مدل‌سازی شد. نتایج به‌دست‌آمده از این مدل‌سازی‌ها در شکل‌های ۱۱ تا ۱۶ نشان داده شده است. با توجه به اینکه نتایج داده‌های حاصل از آزمون تجربی و داده‌های به‌دست‌آمده در این سرعت کشش نیز از مدل انطباق خوبی با یکدیگر دارند، بنابراین دقت و صحت پارامترهای به‌دست‌آمده دوباره تأیید می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مدل ریاضی ترکیبی متشکل از مدل ابرکشسان به همراه مدل گرانروکشسان غیرخطی رئولوژی چارچوب موازی و نرم‌شدگی تنش پیشنهاد شد. این مدل برای پیش‌بینی رفتار مکانیکی آمیزه‌های لاستیکی استفاده‌شده در رویه تایرهای سواری به‌کار گرفته شد که بر پایه آمیخته کائوچوی BR با SBR محلولی و امولسیونی در مقادیر مختلف پرکننده‌های دوده و سیلیکا ساخته شدند. پارامترهای مدل به‌کمک الگوریتم عددی پیشنهادی تعیین شدند که بر پایه شبیه‌سازی اجزای محدود و بهینه‌سازی بر پایه روش Nelder-Mead بود. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده با داده‌های تجربی حاصل از آزمون کششی رفت‌وبرگشتی روی نمونه نواری‌شکل و تفسیر و تحلیل پارامترها نشان داد، این مدل به همراه روش پیشنهادی می‌تواند برای پیش‌بینی رفتار اتلافی این آمیزه‌ها به‌کار گرفته شود.

قدردانی

از شورای قطب‌های علمی کشور برای تأمین بخشی از هزینه‌های اجرای این پژوهش که با اعطای اعتبار پژوهشی انجام شد، تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

1. Heinrich G. and Vilgis T., Why Silica Technology Needs S-SBR in High Performance Tires?: The Physics of Confined Polymers in Filled Rubbers, *KGK. Kautschuk, Gummi, Kunststoffe*, **61**, 368-376, 2008.
2. Gent A.N., *Engineering with Rubber: How to Design Rubber Components*, 3rd ed., Hanser, Munich, Chapt. 9, 2012.
3. Bergstrom J.S., *Mechanics of Solid Polymers: Theory and Computational Modeling*, Elsevier Science, London, Chapt. 5,

2015.

4. Ghoreishy M.H.R., An Experimental and Numerical Verification of Different Hyperelastic Material Models for Rubbers under Tension and Compression Loads, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **22**, 273-284, 2009.
5. Ghoreishy M.H.R., Computer Simulations of Passenger Car Radial Tires Using the Finite Element Method, Pfeffer M.D. and Bachmeier E. (Eds.) *Computer Simulations: Advances in Research and Applications*, Nova Science, New York, 1-62, 2018.
6. Yeoh O.H., Some Forms of the Strain Energy Function for Rubber, *Rubber Chem. Technol.*, **66**, 754-771, 1993.
7. Arruda E.M. and Boyce M.C., A Three-Dimensional Constitutive Model for the Large Stretch Behavior of Rubber Elastic Materials, *J. Mechanic. Phys. Solid.*, **41**, 389-412, 1993.
8. Harwood J., Mullins L., and Payne A., Stress Softening in Rubbers: A Review, *J. IRI*, **1**, 17-27, 1967.
9. Mullins L., Softening of Rubber by Deformation, *Rubber Chem. Technol.*,**42**, 339-362, 1969.
10. Ghoreishy M.H.R. and Abbassi-Sourki F., Development of a New Combined Numerical/Experimental Approach for the Modeling of the Nonlinear Hyper-Viscoelastic Behavior of Highly Carbon Black Filled Rubber Compound, *Polym. Test.,* **70**, 135-143, 2018.
11. Ghoreishy M.H.R., Alimardani M., Zafar Mehrabian R., and Taghvaei Gangali S., Modeling the Hyperviscoelastic Behavior of a Tire Tread Compound Reinforced by Silica and Carbon Black, *J. Appl. Polym. Sci.*, **128**, 1725-1731, 2013.
12. Ghoreishy M.H.R., Determination of the Parameters of the Prony Series in Hyper-Viscoelastic Material Models Using the Finite Element Method, *Mater. Design*, **35**, 791-797, 2012.
13. Ghoreishy M.H.R., Firouzbakht M., and Naderi G., Parameter Determination and Experimental Verification of Bergstrom-Boyce Hysteresis Model for Rubber Compounds Reinforced by Carbon Black Blends, *Mater. Design*, **53**, 457-465, 2014.
14. Hurtado J.A., Lapczyk I., and Govindarajan S.M., Parallel Rheological Framework to Model Non-Linear Viscoelasticity, Permanent Set, and Mullins Effect in Elastomers, Gil-Negrete N. and Alonso A. (Eds.), *Proceedings of 8th European Conference on Constitutive Models for Rubbers*, San Sebastian, Spain, 95-100, 2013.
15. Ghoreishy M.H.R. and Abbassi-Sourki F., The Molecular Structure of SBR and Filler Type Effects on Thermal Diffusivity of SBR/BR Compounds Used in Tire Tread, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian),* **30**, 139-149, 2017.
16. Ogden R.W., Large Deformation Isotropic Elasticity-on the Correlation of Theory and Experiment for Incompressible Rubberlike Solids, *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences,* The Royal Society, **326**, 565-584, 1972.
17. Bergström J. and Boyce M., Constitutive Modeling of the Large Strain Time-Dependent Behavior of Elastomers, *J. Mechanic. Phys. Solid.*, **46**, 931-954, 1998.
18. Ogden R.W. and Roxburgh D., A Pseudo-Elastic Model for the Mullins Effect in Filled Rubber, *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences,* **455**, 2861-2877, 1988.
19. Bose K., Hurtado J.A., Snyman M.F., Mars W., and Chen J.Q., Modelling of Stress Softening in Filled Elastomers, Busfield J. and Muhr A. (Eds.), *Proceedings of the 3rd European Conference on the Constitutive Models for Rubber*, Swets and Zeitlinger B.V., Lisse, The Netherlands, 223-230, 2003.
20. Abaqus Analysis User's Guide, Simulia Inc., 2016.
21. Rao S.S., *Engineering Optimization Theory and Practice*, 4th ed., John Wiley and Sons, Hoboken, New Jersey, Chapt. 6, 2009.
22. Isight, Dassault Systemes Simulia Corp., 2017.
23. Wang M.J., Effect of Polymer-Filler and Filler-Filler Interactions on Dynamic Properties of Filled Vulcanizates, *Rubber Chem. Technol.*, **71**, 520-589, 1998.
24. Heinrich G., Klüppel M., and Vilgis T.A., Reinforcement of Elastomers, *Curr. Opin. Solid State Materi. Sci.*, **6**, 195-203, 2002.