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

Iran. J. Polym. Sci. Technol.
(Persian),
Vol. 29, No. 2, 139-155
June-July 2016
ISSN: 1016-3255
Online ISSN: 2008-0883

A Theoretical and Experimental Study on Mechanical Behavior of Steel-Rubber Long Fiber Composites Using Finite Element Method and Analytical Models

Mir Hamid Reza Ghoreishy*, Ghasem Naderi, and Mehdi Rafei

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

Received: 4 May 2015, accepted: 28 December 2015

ABSTRACT

A comprehensive study is launched to compare different simulation techniques for the mechanical behavior of steel cord/rubber composites. A brief literature review is first performed and then various developed computational methods are examined. Uncured pre-shaped steel cord/rubber specimens, collected from a tire factory, were cured with different cord angles. These test samples were tested under tensile and shear modes. In order to check the validity and accuracy of the different computational techniques, the samples were analyzed using both analytical and numerical procedures which were based on the finite element method. The results showed that the accuracy and convergence of the computational methods are highly dependent on the selected numerical approach, the angle between cord and direction of applied load and also the hyperelastic or hyperviscoelastic model used to describe the mechanical behavior of the rubbery part. None of these models could predict nonlinear behavior of the cord/rubber composites in shear mode. Therefore, developing new constitutive models for this purpose is necessary.

Keywords:
tire,
rubber-cord composite,
finite element,
simulation,
mechanical behavior

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

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

مجله علوم و تکنولوژی پلیمر،
سال بیست و نهم، شماره ۲،
صفحه ۱۵۵-۱۳۹، ۱۳۹۵
ISSN: 1016-3255
Online ISSN: 2008-0883

بررسی تجربی و نظری رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های الیاف بلند لاستیک-فولاد با استفاده از روش اجزای محدود و مدل‌های تحلیلی

میرحمیدرضا قریشی*، قاسم نادری، مهدی رافعی

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

دریافت: ۱۳۹۴/۲/۱۴، پذیرش: ۱۳۹۴/۱۰/۷

چکیده

این کار پژوهشی اختصاص به مقایسه عملکردی میان روش‌های مختلف شبیه‌سازی کامپوزیت‌های الیاف بلند لاستیک- فولاد داشته که بخش بسیار مهمی از ساختار تایرهای رادیال را تشکیل می‌دهند. ابتدا مطالعات پیشین انجام شده در زمینه شبیه‌سازی رفتار این نوع کامپوزیت‌ها بررسی و سپس روش‌های مختلف شبیه‌سازی و نقاط قوت و ضعف هر یک بیان شد. در بخش تجربی نمونه‌های کامپوزیت‌لاستیک با سیم‌های فولادی به همراه نمونه‌های جداگانه ماتریس لاستیکی برای بارگذاری در دو حالت کششی و برشی ساخته‌شده و در آزمون‌های مربوط قرار گرفتند. برای ارزیابی دقت و کارایی این روش‌ها آزمون‌های کشش و برش انجام گرفته به روش‌های مختلف تحلیلی و عددی به‌کمک روش اجزای محدود و با استفاده از مدل‌های ابرکشسان و ابرگرانروکشسان شبیه‌سازی شدند. نتایج حاصل نشان داد، در هر دو حالت کششی و برشی مقدار دقت پیش‌بینی‌ها و نیز هم‌گرایی مدل اجزای محدود بسیار به روش محاسباتی، زاویه آرایش‌یافتگی الیاف نسبت به جهت اعمال نیرو و همچنین مدل ابرکشسان یا ابرگرانروکشسان انتخابی وابسته است. در عین حال در هیچ یک از این حالت‌ها، شبیه‌سازی، نه‌تنها قابلیت پیش‌بینی دقیق رفتار غیرخطی نمونه‌ها تحت اعمال نیروهای برشی را ندارد، بلکه افزایش دقت مدل‌سازی با درنظر گرفتن مدل گرانروکشسان برای رفتار لاستیک نیز موجب بهبود نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نزدیک‌شدن آن به داده‌های تجربی نمی‌شود. بنابراین، در بهره‌گیری از این مدل‌ها که در نرم‌افزارهای تجاری نیز وجود دارند و فراوان استفاده می‌شوند، باید نهایت دقت را داشت و خطاهای موجود را در نتایج شبیه‌سازی و طراحی‌های پس از آن درنظر گرفت.

واژه‌های کلیدی

تایر،
کامپوزیت لاستیک-الیاف،
اجزای محدود،
شبیه‌سازی،
رفتار مکانیکی

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

مقدمه

تایر از مهم‌ترین و پیچیده‌ترین اجزای خودرو بوده و از این‌رو شبیه‌سازی و پیش‌بینی رفتار آن زیر بارهای ایستا و پویا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به دلیل ساختار کامپوزیتی، پوسته‌ای و نیز ناهمگنی و ناهمسوگردی بسیار زیاد، پیش‌بینی رفتار تایر در شرایط سرویس با پیچیدگی‌های بسیاری همراه است. از این‌رو، با وجود پیشرفت‌های فراوانی که در زمینه شبیه‌سازی تایر و ارائه مدل‌های پیشرفته تاکنون انجام شده است، اما همچنان نتایج شبیه‌سازی با داده‌های اندازه‌گیری شده تجربی اختلاف‌های معنی‌داری وجود دارد. البته مقادیر عددی این اختلاف‌ها به نوع تحلیل، بارگذاری و نیز مقدار ساده‌سازی‌های انجام‌شده، وابسته است. برای نمونه، مقایسه نتایج شبیه‌سازی تایر در حالت‌های ایستا و پویا (نیرو برحسب جابه‌جایی) نشان می‌دهد، در حالتی که غالب بارهای وارد شده به شکل برشی است، اختلاف نتایج حاصل از شبیه‌سازی و داده‌های اندازه‌گیری شده تجربی زیاد است. به نحوی‌که در اکثر موارد مقدار نیروی پیش‌بینی شده در تغییر شکل ثابت، کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده است [۱]. بخش مهمی از ساختار تایر را کامپوزیت‌های لاستیک با الیاف بلند تشکیل می‌دهند و این کامپوزیت‌ها از مهم‌ترین اجزای سازنده تایر هستند. از این‌رو، درنظرگرفتن درست مشخصه‌های موادی در آن‌ها اثر بسزایی روی دقت نتایج حاصل از شبیه‌سازی تایر دارد و یکی از دلایل اصلی اختلاف بین داده‌های حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی در بررسی تایر را می‌توان به ناکارآمدبودن مدل‌های ارائه شده برای پیش‌بینی رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های لاستیک-الیاف به‌ویژه برای حالت برشی نسبت داد.

در طول دهه‌های گذشته، تلاش‌های بسیاری برای توصیف رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های لاستیک-الیاف به‌طور تحلیلی انجام شده است. حاصل این تلاش‌ها، ارائه روش‌های مختلف برای نحوه درنظرگرفتن خواص مکانیکی کامپوزیت‌های لاستیک-الیاف در شبیه‌سازی رفتار تایر به روش اجزای محدود بوده که در ادامه تشریح شده است. عمده تلاش پژوهشگران در سال‌های اخیر، روی بررسی اثر پارامترهای مختلف نظیر سرعت اعمال کرنش [۲]، ساختار الیاف [۳] و دما [۶-۴] روی رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های لاستیک-الیاف متمرکز شده است. بررسی روش‌های مختلف ارزیابی خواص کامپوزیت‌های لاستیک-الیاف نیز از دیگر زمینه‌های مورد علاقه پژوهشگران در سال‌های اخیر بوده است [۱۰-۷]. با وجود این، هنوز جنبه‌های ناشناخته‌ای از رفتار این کامپوزیت‌ها وجود دارد که پژوهشگران در حال تلاش برای شناخت آن و درنتیجه افزایش تطابق نتایج حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های تجربی هستند.

بررسی‌های گروه پژوهشی حاضر نشان داد، با وجود انجام مطالعات گسترده در زمینه کامپوزیت‌های لاستیک-الیاف، مطالعه جامعی درباره مقایسه روش‌های مختلف مدل‌سازی رفتار مکانیکی این کامپوزیت‌ها شامل استفاده از نظریه‌های کلاسیک کامپوزیت‌ها، استفاده از نظریه اجزای میله‌ای تک‌جهتی و استفاده نظریه اجزای حجمی معادل با یکدیگر انجام نشده است. بررسی اثر استفاده از مدل‌های موادی مختلف در هر مورد روی دقت نتایج حاصل از شبیه‌سازی نیز از موارد دیگری است که به‌طور کامل بررسی نشده است. همچنین میزان دقت مدل‌های موادی موجود در پیش‌بینی هم‌زمان رفتار برشی و کششی تاکنون ارزیابی نشده است. در مقاله حاضر، ابتدا مطالعات پیشین به‌طور مختصر مرور شد. در زمینه شبیه‌سازی رفتار کامپوزیت‌های لاستیک-الیاف انجام شده و طی آن شیوه‌های مختلف تعریف، به‌کارگیری و شبیه‌سازی خواص کامپوزیت‌های لاستیک-الیاف در شبیه‌سازی تایر بحث و بررسی شد. در ادامه آزمون‌های کششی و برشی قابل انجام روی کامپوزیت‌های لاستیک-الیاف به روش‌های مختلف شبیه‌سازی شده و با داده‌های تجربی به‌دست‌آمده از رفتار کششی و برشی نمونه‌های کامپوزیتی استفاده شده در تسمه تایرهای رادیال سواری مقایسه شد تا کارآیی روش‌های موجود و نیز نقش و اهمیت روش شبیه‌سازی در مقدار تطابق نتایج حاصل با داده‌های تجربی ارزیابی شود.

پیشینه پژوهش

پژوهشگران تایر از سال‌ها پیش بر اهمیت کامپوزیت‌های لاستیک-الیاف آگاه بوده و تلاش کرده‌اند تا رفتار این کامپوزیت‌ها را به روش محاسباتی بیان کنند. همان‌طور که Clark [۱۱] بیان کرده است، دلایلی وجود دارد که پیش‌بینی رفتار کامپوزیت‌های لاستیک-الیاف را با دشواری همراه می‌سازد. این دلایل عبارت‌اند از:

- اختلاف بسیار زیاد بین سفتی الیاف و لاستیک که از مرتبه‌ای حدود 10^3 تا 10^4 است.
- الیاف استفاده شده در تایر مجموعه‌ای به‌هم تابیده از تعداد بسیار زیادی رشته‌های باریک هستند که این مسئله خواص این الیاف را بسیار متمایزتر از خواص تک‌رشته‌ها می‌کند.
- توزیع نایکنواخت الیاف در ماتریس لاستیکی به‌گونه‌ای که کامپوزیت را می‌توان به نواحی تقویت شده با الیاف و نواحی فاقد تقویت‌شدگی دسته‌بندی کرد.
- به دلیل پدیده کمانش موضعی (local buckling) که در تک‌رشته‌های الیاف [۱۲] زیر بار روی می‌دهد، سفتی سامانه لاستیک-الیاف زیر تنش‌های کششی و فشاری متفاوت از

یکدیگر خواهد بود.

بنابراین، سفتی این کامپوزیت‌ها باید با یک مدول دوخطی (bilinear) تعریف شود. مجموعه این دشواری‌ها، به همراه برخی مباحث بحث‌برانگیز دیگر نظیر چسبندگی الیاف به ماتریس [۱۳]، آثار انتهایی الیاف [۱۴]، ساختار ساندویچی این سامانه‌ها [۱۵]، کرنش برشی میان‌لایه‌ای [۱۶،۱۷] و پاسخ گرانروکشسان [۱۸] این سامانه‌ها، شبیه‌سازی اجزای محدود کامپوزیت‌های لاستیک-الیاف را بسیار پیچیده کرده است.

در اولین کارهایی که روی مدل‌سازی خواص کامپوزیت‌های لاستیک-الیاف انجام شده Walter و Patel عبارت‌های ریاضی مختلف، شامل معادلات Gough-Tangorra، Halpin-Tsai و Akasaka-Hirano [۱۹] را برای بیان خواص کشسان کامپوزیت‌های تک‌لایه و چندلایه بررسی کردند. آن‌ها نتایج تجربی را با این سه مدل میکرومکانیکی مقایسه کرده و درنهایت چنین نتیجه‌گیری کرده‌اند که هیچ‌یک از نظریه‌های مزبور در پیش‌بینی پاسخ سامانه به نیروهای اعمالی در محدوده مورد بررسی ارجحیتی بر دیگری ندارد. اما رابطه Gough-Tangorra مناسب‌تر است، زیرا معادله Halpin-Tsai مشتمل بر خواصی از الیاف نظیر مدول برشی و ضریب پواسون است که به‌سادگی قابل‌اندازه‌گیری نیستند و معادله Akasaka-Hirano از تمام برهم‌کنش‌های لاستیک با الیاف صرف‌نظر می‌کند. بررسی قابلیت کاربرد معادله‌های میکرومکانیک کشسان خطی بررسی شده در پژوهش Walter و Patel [۱۹] برای تحلیل اجزای محدود تایر رادیال [۲۰] گام بعدی در شبیه‌سازی کامپوزیت‌های لاستیک-الیاف بود. این بررسی نشان داد، استفاده از معادله‌های یادشده برای بررسی سامانه‌های لاستیک-الیاف به دلیل نسبت حجمی کم الیاف و ماهیت انعطاف‌پذیر سامانه لاستیک-الیاف، مناسب نیست. تلاش برای بهبود دقت پیش‌بینی‌ها به استفاده از نظریه شبکه کشسان و ارائه شیوه جدیدی برپایه انرژی، برای پیش‌بینی خواص سفتی کامپوزیت‌های لاستیک-الیاف منجر شد [۱۱]. در این روش، سامانه به‌شکل شبکه‌ای به‌هم پیوسته از اجزای کشسان درنظر گرفته می‌شود. انرژی کلی سامانه که ناشی از برهم‌کنش اجزا با یکدیگر است، با استفاده از روش برازش محاسبه و سپس خواص کشسانی شامل مدول در جهت‌های مختلف و ضریب پواسون با استفاده از تابع انرژی محاسبه می‌شوند. استفاده از نظریه شبکه کشسان به بهبود دقت پیش‌بینی رفتار ساختارهای مورب (bias) در کامپوزیتهای لاستیک-الیاف منجر شد، ولی باز هم با نتایج تجربی فاصله داشت.

اساساً رفتار کامپوزیت‌های لاستیک-الیاف غیرخطی است و می‌توان آن را به پاسخ غیرخطی لاستیک و الیاف به نیروهای اعمالی و هم‌چنین اثر کمانش موضعی در الیاف نسبت داد. کمانش موضعی به اختلاف شایان توجهی در خواص سفتی سامانه‌های کامپوزیتی در پاسخ به نیروهای کششی و فشاری منجر می‌شود. Clark [۱۲] روشی را پیشنهاد و بررسی کرد که در آن، استوانه‌ای با استفاده از کامپوزیت لاستیک-الیاف در دو حالت ساخته می‌شود. حالت اول به گونه‌ای که آرایش‌یافتگی الیاف فقط در راستای طولی استوانه باشد. حالت دوم به‌گونه‌ای که آرایش‌یافتگی الیاف فقط عمود بر راستای طولی استوانه باشد. مسدودکردن دو انتها و بادکردن استوانه‌های ساخته شده موجب می‌شود تا بتوان تغییرات تنش-کرنش کامپوزیت را در دو جهت طولی و عرضی محاسبه و درنتیجه خواص کشسانی، نظیر مدول در جهت‌های مختلف و ضریب پواسون را محاسبه کرد. با استفاده از روش Clark به‌خوبی می‌توان رفتار غیرخطی را برای لوله استوانه‌ای‌شکل پیش‌بینی کرد. ولی هیچ بررسی و قضاوتی درباره مقدار دقت آن در پیش‌بینی رفتار کامپوزیت در شکل‌ها و حالت‌های دیگر، نظیر نمونه‌های مستطیلی یا دمبل‌شکل مرسوم وجود ندارد. درنظرگرفتن آثار موضعی-کلی (local-global) ناشی از تابیدن الیاف با تغییرشکل‌های کوچک و بزرگ با استفاده از مفهوم جزء حجمی معادل (representative volume element, RVE) [۲۱] و نیز بررسی آثار انتهایی و طول الیاف بر قابلیت تحمل بار کامپوزیت‌ها [۱۴] از دیگر مواردی است که مورد توجه پژوهشگران بوده است. Walter [۲۲] مقاله مروری کاملی را در زمینه کامپوزیتهای لاستیک-الیاف منتشر و در این مقاله پایه و اساس مکانیک کامپوزیت‌های لاستیک-الیاف را که تا آن زمان وجود داشت، به‌طور کامل تشریح کرده است. در بخش دیگری از این مقاله، چگونگی و نحوه استفاده از خواص این مواد کامپوزیتی در پیش‌بینی رفتار و کارایی تایر بحث شده است. این مقاله مروری با اصلاح و افزودن پیشرفت‌های اخیر به‌عنوان یک فصل کتاب تایرهای بادی [۲۳] مجدداً در سال ۲۰۰۶ چاپ شده است.

بررسی تجربی خواص سفتی کامپوزیت‌های لاستیک-الیاف تک‌لایه و چندلایه و مقایسه آن با نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داده است که استفاده از خواص مکانیکی تک‌لایه‌های کامپوزیتی به‌عنوان ورودی نرم‌افزار نتایج بسیار دقیق‌تری نسبت به استفاده از داده‌های محاسبه شده به‌وسیله معادله‌هایی نظیر معادله Halpin-Tsai ارائه می‌دهد [۲۴]. با بهبود شکل کلی مدل‌سازی‌های ارائه شده، پژوهشگران تلاش کردند تا با درنظرگرفتن مواردی نظیر کرنش میان‌لایه‌ای و اثر عوامل مختلف روی آن [۱۶،۱۷]، محاسبه و درنظرگرفتن خواص گرانروکشسان لاستیک و الیاف [۱۸] بر دقت نتایج حاصل از شبیه‌سازی بیفزایند.

در اوایل دهه ۹۰ میلادی Helnwein و همکاران [۲۵] روش محاسباتی جایگزینی را برای مدل‌سازی کامپوزیت‌های لاستیک-الیاف ارائه کردند. آن‌ها مفهومی با نام اجزای میله‌ای (rebar elements)

را که پیش از این برای بررسی بتن تقویت شده با الیاف استفاده شده بود، برای بررسی و تعیین خواص کامپوزیت‌های لاستیک-الیاف فرمول کرده و استفاده کردند. اجزای میله‌ای شامل یک یا چندلایه از الیاف تقویت‌کننده با جهت آرایش‌یافتگی دلخواه روی اجزای سه‌بعدی لاستیک مربوط هستند. با استفاده از این شیوه هریک از اجزای تشکیل‌دهنده کامپوزیت را می‌توان به‌طور مجزا نشان داد. در این سامانه خواص لاستیک و الیاف تقویت‌کننده به‌شکل مجرا درنظر گرفته شد و محاسبه خواص معادل کامپوزیت با استفاده از روابط ساختاری پیش از شبیه‌سازی لازم نیست. این روش، باب جدیدی را در پیش‌بینی رفتار تایر و محاسبات اجزای محدود مربوط به آن گشود [۲۶،۲۷]. در حال حاضر، در اغلب شبیه‌سازی‌های رفتار تایر از این مفهوم برای مدل‌سازی بدنه اصلی و تسمه استفاده می‌شود. استفاده از مفهوم اجزای میله‌ای نیز دارای محدودیت‌های ویژه آن است که در بخش مدل‌سازی به آن‌ها اشاره می‌شود. به همین منظور تلاش‌ها برای یافتن مدل‌هایی ادامه یافت که بتواند رفتار کامپوزیت‌های لاستیک-الیاف را با ساختارهای مختلف را شبیه‌سازی کند. حاصل این تلاش‌ها توسعه نظریه‌های ابرکشسان ناهمگن بود [۳۱-۲۸]. در سال‌های اخیر معادله‌های ساختاری جدید برپایه نامتغیرها برای پیش‌بینی رفتار کامپوزیت‌های لاستیک-الیاف توسعه یافته است [۳۲]. در این معادله‌ها که همگی برپایه نظریه ابرکشسان ناهمگن بنا شده‌اند، تلاش شده تا موارد مهمی نظیر ناهمگنی و ناهمسوگردی کامپوزیت، برهم‌کنش‌های ناشی از برش میان‌لایه‌ای و خواص گرانروکشسان درنظر گرفته شود. مقایسه مدل‌های ارائه شده با داده‌های تجربی بیانگر دقت زیاد این مدل‌ها در پیش‌بینی رفتار است. نکته شایان توجه درباره این مدل‌ها، پیچیدگی زیاد و نیز درجه هم‌گرایی کم آن‌هاست که استفاده از آن‌ها را در بررسی ساختارهای پیچیده، نظیر تایر با دشواری همراه می‌سازد. افزون بر این، تعیین ثابت‌های موادی در این مدل‌ها کاری دشوار است و به طراحی و استانداردسازی روش‌های آزمون خاص نیاز دارد که هنوز در مراحل ابتدایی است. بنابراین، بررسی ساختارهای پیچیده همانند تایر هنوز با استفاده از روش‌های پیشین انجام می‌شود.

هر یک از روش‌های بیان شده برای شبیه‌سازی اجزای محدود، ساختارهای کامپوزیتی لاستیک-الیاف دارای مزایا و محدودیت‌های خاص خود هستند. نکته شایان توجه در مدل‌های ارائه شده این است که مطالعه جامعی درباره مقایسه کارایی آن‌ها در شبیه‌سازی رفتار کامپوزیت‌های لاستیک-الیاف وجود ندارد. در این پژوهش تلاش شد، روش‌های مختلف شبیه‌سازی شامل استفاده از نظریه‌های کلاسیک کامپوزیت‌ها، استفاده از نظریه اجزای میله‌ای تک‌جهتی و استفاده از نظریه اجزای حجمی معادل با یکدیگر مقایسه شده و مقدار دقت و کارآیی آن‌ها در پیش‌بینی نتایج بررسی شود. همچنین، اثر استفاده از مدل‌های مکانیکی مختلف روی دقت نتایج حاصل بررسی شد. در پایان نیز برای ارزیابی صحت و دقت روش‌ها و مدل‌های استفاده شده، نتایج حاصل از شبیه‌سازی در دو حالت کشش و برش ساده با داده‌های تجربی مقایسه شد.

تجربی

مواد

کامپوزیت تک‌لایه لاستیک و الیاف فولادی به شکل پخت‌نشده از خط تولید تایر یکی از کارخانه‌های تولید تایر داخلی برداشت شد که برای ساخت تسمه تایر رادیال سواری سیمی استفاده می‌شود. در ساخت این کامپوزیت از الیاف فولادی روکش شده با برنج با قطر ۰/۳ mm و ساختار ۱×۲ (دو رشته سیم به هم تابیده که قطر هرکدام ۰/۳ mm است) استفاده شد. فاصله مرکز به مرکز الیاف در ورقه کامپوزیتی تولیدی برابر ۱ mm بود. آمیزه لاستیکی استفاده شده در ساخت کامپوزیت نیز برپایه لاستیک طبیعی پرشده با ۵۵ phr دوده با ساختار N300 بود.

دستگاه‌ها و روش‌ها

نمونه‌سازی

برای انجام آزمون‌های کشش تک‌جهتی، دو تک‌لایه از این کامپوزیت در چهار حالت و با زاویه‌های ۰، ۲۲± و ۶۸± و ۹۰° روی هم قرار داده شد و در دمای ۱۶۵°C در قالبی با ابعاد ۲ mm×۲۰۰×۲۰۰ و زیر فشار پرس به‌مدت ۱۲ min پخت شد. علت انتخاب زاویه‌های ۲۲± و ۶۸°± این است که تسمه تایرها در خط تولید نیز با همین زاویه‌ها بریده و ساخته می‌شوند. سپس، نمونه‌هایی مستطیل‌شکل با عرض‌های ۱، ۲ و ۳ cm مطابق با شکل ۱-الف از درون آن برش داده شد. برای برش نمونه‌ها از دستگاه برش با آب استفاده شد تا از ایجاد نقایص احتمالی ساختار نمونه‌ها جلوگیری شود. برای آزمون برش، چهار تک‌لایه از ساختار کامپوزیتی لاستیک-الیاف مزبور روی هم قرار داده و با شرایط قبلی به‌مدت ۱۵ min پخت شد. سپس، نمونه‌هایی با ابعاد ۴ mm×۲۰×۲۵ از درون ورقه پخت شده با استفاده از دستگاه برش با آب برش داده شد. نمایی از نمونه‌های آماده شده در شکل ۱-ب نشان داده شده است.

برای ارزیابی نتایج حاصل از شبیه‌سازی، آزمون‌های کشش و

(الف) (ب)

شکل ۱- نحوه نمونه‌سازی برای: (الف) آزمون کشش و (ب) آزمون برش.

برش روی نمونه‌های ساخته شده به روش پیش‌گفته انجام شد. این آزمون‌ها هردو با استفاده از دستگاه آزمون کشش سنتام انجام شد. آزمون کشش روی نمونه‌های کامپوزیتی ۱، ۲ و ۳ cm مطابق با شکل۱ و با سرعت ۵ mm/min انجام شد. بررسی مقاله‌های منتشر شده در زمینه کامپوزیت‌های لاستیک-الیاف [۳۳] نشان می‌دهد، هنگامی‌که زاویه الیاف در راستای جهت اعمال نیرو یا نزدیک به آن باشد، طول نمونه روی خواص اندازه‌گیری شده مؤثر است و نسبت طول به عرض نمونه باید زیاد باشد. از طرف دیگر، با افزایش طول نمونه امکان مقایسه دقیق تغییرات خواص کامپوزیت نسبت به آمیزه لاستیک به‌تنهایی از بین می‌رود. بنابراین، در پژوهش حاضر از طول نمونه‌های ۱، ۲ و ۳ cm استفاده شده در آزمون کششی برای زمانی که زاویه الیاف نسبت به جهت اعمال نیرو ۰ و ۲۲^{o} بود، برابر ۱۳۰ mm و برای زمانی که زاویه الیاف نسبت به جهت اعمال نیرو ۶۸ و ۹۰^{o} بود، برابر ۸۰ mm انتخاب شد. با انتخاب طول نمونه‌ها به این شکل برای حالت‌هایی که اثر الیاف برجسته‌تر است، طول بلندتر موجب افزایش دقت اندازه‌گیری شده و در حالتی که اثر وجود الیاف کمتر است، امکان مقایسه رفتار با آمیزه لاستیکی به‌تنهایی فراهم می‌شود. برای انجام آزمون برش به فک‌های ویژه‌ای نیاز بود که این فک‌ها مطابق با استاندارد ISO DIN 1827 ساخته شد. شکل۲ نحوه قرارگیری نمونه‌ها در فک ویژه طراحی شده و نحوه انجام آزمون را نشان می‌دهد. برای انجام آزمون برش فک‌های میانی به دستگاه متصل می‌شوند. با شروع آزمون و فاصله‌گرفتن فک‌های میانی از یکدیگر نمونه زیر برش ساده قرار می‌گیرد، زیرا فک‌های بیرونی در جای خود ثابت باقی‌مانده و مانع از حرکت نمونه‌های لاستیکی محصور بین دو فک می‌شوند. سرعت حرکت فک بالا در آزمون برش برابر ۱ mm/min تنظیم شد.

خواص مواد

از آنجا که هدف از پژوهش حاضر بررسی دقت نتایج حاصل از شبیه‌سازی در پیش‌بینی رفتار کامپوزیت‌های الیاف بلند لاستیک-سیم فولادی مصرفی در تایر است، بنابراین از نمونه‌های تسمه سیمی تولید شده در کارخانه تایرسازی برای اندازه‌گیری نتایج تجربی استفاده شد. بنابراین، مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های تجربی فقط

شکل ۲- نمایی از نحوه انجام آزمون برش. چهار نمونه محصور شده در میان فک‌های میانی و بیرونی.

در زوایای ۲۲ و ۶۸° الیاف نسبت به امتداد نیروی اعمالی انجام شد.

خواص مکانیکی الیاف فولادی استفاده شده در ساخت این کامپوزیت‌ها به شکل کشسان خطی فرض شده و ضریب کشسانی آن براساس استاندارد ASTM C1557 بررسی و معین شد. رفتار مکانیکی لاستیک در این پژوهش با دو مدل ابرکشسان و ابرگرانروکشسان درنظر گرفته شد. برای تعیین ثابت‌های این مدل‌ها از نتایج آزمون‌های کشش تک‌جهتی، برش ساده و تغییرات حجمی استفاده شد. همچنین برای دست‌یابی به نتایج دقیق و قابل اعتماد در شبیه‌سازی، آزمون‌های کشش تک‌جهتی و برشی ساده به‌طور چرخه‌ای انجام شد. سپس از نتایج چرخه سوم برای تعیین ثابت‌های مدل استفاده شد. ثابت‌های مدل‌های ابرکشسان استفاده شده از برازش هم‌زمان این مدل‌ها روی نتایج آزمون‌های مختلف پیش‌گفته استخراج شد.

از آنجا که آزمون‌های انجام شده روی آمیزه لاستیکی با سرعت کرنش‌های متفاوت از آزمون‌های انجام شده روی نمونه‌های کامپوزیتی بود، برای بررسی نقش و مقدار اثر، بخش گرانروکشسان در پاسخ نمونه از مدل گرانروکشسان خطی (سری Prony) در کنار مدل‌های ابرکشسان نیز استفاده شد تا بتوان با درنظرگرفتن رفتار گرانروکشسان، اثر سرعت کشش روی نتایج حاصل از شبیه‌سازی را بررسی و مقایسه کرد. برای تعیین مقادیر پارامترهای سری Prony با استفاده از روش پیشنهادی توسط قریشی [۳۴] از داده‌های آزمون کشش نمونه‌های ۱، ۲ و ۳ cm استفاده شد. همان‌طور که عنوان شد، آزمون حجمی نیز روی آمیزه لاستیکی انجام شد. از نتایج این آزمون در تعیین ثابت‌های مدل‌های ابرکشسان و ابرگرانروکشسان استفاده شد تا دقت محاسبات با تعیین دقیق نسبت پواسون افزایش یابد. به دلیل اینکه شبیه‌سازی و آزمون‌های تجربی در حالت‌های مختلف روی نمونه‌های متفاوتی انجام شد، تمام نتایج به شکل نمودارهای تنش-کرنش نشان داده شده تا بتوان شرایط مختلف را با یکدیگر

طرح ۱- روش‌های مختلف ممکن برای شبیه‌سازی انواع کامپوزیت‌ها.

جزء حجمی معادل با زاویه الیاف °۲۲ — جزء حجمی معادل با زاویه الیاف °۰

شکل ۳- نمایی از اجزای حجمی معادل انتخاب شده برای شبیه‌سازی رفتار کامپوزیت لاستیک-الیاف با ابعاد mm ۲×۱/۵×۴/۷.

مقایسه کرد. بدین منظور از مفهوم تنش و درصد کرنش مهندسی استفاده شد.

مدل‌سازی

در این مطالعه تلاش شد تا از انواع روش‌های مختلف برای شبیه‌سازی استفاده‌شده و نتایج با هم مقایسه شوند. طرح ۱ نحوه تقسیم‌بندی و انواع روش‌های موجود برای شبیه‌سازی کامپوزیت‌های لاستیک-الیاف را نشان می‌دهد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های لاستیک الیاف را به سه روش کلی می‌توان شبیه‌سازی کرد که در ادامه توضیح مختصری درباره هر یک از این روش‌ها ارائه می‌شود.

حالت اول: شبیه‌سازی با استفاده از اجزای حجمی معادل

در شبیه‌سازی با استفاده از اجزای حجمی معادل، بخش کوچکی از ساختار که دارای خواصی معادل با کل ساختار است، به‌عنوان نماینده کل انتخاب شده و بررسی روی این بخش انجام می‌شود. مزیت این روش کوچک‌سازی سامانه و درنتیجه کاهش زمان شبیه‌سازی و افزایش دقت آن است. در این حالت، الیاف و بستر لاستیکی هرکدام به‌طور مجزا از یکدیگر درنظر گرفته شده و سامانه به‌طور دقیق مشابه با آنچه در واقعیت وجود دارد، ولی در ابعاد کوچک شبیه‌سازی می‌شود. هنگام استفاده از اجزای حجمی معادل به دو نکته اساسی باید توجه کرد. جزء حجمی معادل باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که با توجه به نوع و آرایش‌یافتگی الیاف بتوان خواص و رفتار آن را معادل خواص و رفتار سامانه کلی درنظر گرفت. نکته دوم، نحوه انتخاب شرایط مرزی است. شرایط مرزی باید به‌گونه‌ای انتخاب شوند که نحوه تغییرات اجزای حجمی معادل متناسب با نحوه تغییرات آن در

شکل۴- شبکه اجزای محدود ایجاد شده برای شبیه‌سازی اجزای محدود برای حالت: (الف) شبیه‌سازی آزمون برش ساده، (ب) شبیه‌سازی آزمون کشش تک‌جهتی، (ج) جزء حجمی معادل با زاویه °۲۲ و (د) جزء حجمی معادل با زاویه ۰ درجه.

سامانه کلی باشد [۳۵،۳۶].

در پژوهش حاضر بخش کوچکی از نوار کامپوزیتی بررسی شده با ابعاد ۲×۱/۵×۴/۷ mm به‌عنوان جزء حجمی معادل انتخاب شد. بستر لاستیکی با استفاده از نظریه‌های ابرکشسان مختلف و الیاف تقویت‌کننده با استفاده از نظریه کشسان خطی توصیف شدند. فرض شد، الیاف و بستر لاستیکی دارای چسبندگی کافی باشند به نحوی که از سرخوردگی احتمالی الیاف صرف‌نظر شود. شکل ۳ اجزای حجمی معادل انتخاب شده برای شبیه‌سازی رفتار کامپوزیت لاستیک-الیاف در زاویه‌های آرایش‌یافتگی الیاف ۰ و °۲۲ نسبت به جهت اعمال نیرو را نشان می‌دهد.

حالت دوم: شبیه‌سازی با استفاده از خواص معادل کامپوزیت‌ها

روش دوم شبیه‌سازی در پژوهش حاضر استفاده از خواص معادل کامپوزیت بود. برای محاسبه خواص معادل کامپوزیت، معادلات مختلفی وجود دارد. همان‌طور که در بخش پیشینه پژوهش بیان شد، استفاده از معادله‌های Gough-Tangorra به دلیل سهولت کاربرد و

دقت نسبی بر سایر معادلات ارجحیت دارد [۱۹]. عبارت‌های ارائه شده توسط Gough-Tangorra برای محاسبه خواص مکانیکی در معادله‌های (۱) تا (۴) آمده است:

$$E_1 = E_c V_c \quad (۱)$$

$$E_2 = \frac{4E_r V_r [E_c V_c + E_r V_r]}{3E_c V_c + 4E_r V_r} \quad (۲)$$

$$G_{12} = G_r (1 - V_c) \quad (۳)$$

$$\theta_{12} = 0.5 \quad (۴)$$

در این معادله‌ها، E_1 مدول کامپوزیت در راستای الیاف، E_2 مدول کامپوزیت در جهت عرضی، E_r مدول لاستیک، E_c مدول الیاف، V_r جزء حجمی لاستیک، V_c جزء حجمی الیاف، G_{12} مدول برشی کامپوزیت و ν_{12} ضریب پواسون کامپوزیت است.

در ساختار ساندویچی دولایه کامپوزیت لاستیک-الیاف برای محاسبه و درنظرگرفتن خواص معادل کامپوزیت روش‌های مختلفی وجود دارد. در روش اول، می‌توان خواص معادل یک کامپوزیت دولایه را که جهت آرایش‌یافتگی الیاف در آن نسبت به جهت اعمال نیرو $\pm\alpha$ است، با استفاده از نظریه‌های کلاسیک کامپوزیت‌ها نظیر Gough-Tangorra محاسبه کرد. جدول ۱ خواص مکانیکی کامپوزیت بررسی شده در این پژوهش را نشان می‌دهد که با استفاده از این روش محاسبه شده‌اند. در روش دوم، می‌توان ساختار را دولایه درنظر گرفت. یعنی خواص معادل یک تک‌لایه کامپوزیتی را که جهت آرایش‌یافتگی الیاف در آن نسبت به جهت اعمال نیرو α است، با استفاده از نظریه‌های کلاسیک کامپوزیت‌ها محاسبه و سپس ساختار ساندویچی را با اتصال دو تک‌لایه به یکدیگر ایجاد کرد. در روش سوم، می‌توان ساختار را پنج‌لایه و لایه‌های لاستیکی بالا، پایین و بین دولایه کامپوزیتی را نیز جدا از این لایه‌ها درنظر گرفت. استفاده از نظریه‌های کلاسیک و خواص معادل برای بررسی خواص کامپوزیت‌های لاستیک-الیاف دارای محدودیت‌هایی است که مهم‌ترین این محدودیت‌ها عدم امکان پیش‌بینی رفتار غیرخطی کامپوزیت‌های لاستیک-الیاف است.

جدول ۱- خواص مکانیکی کامپوزیت لاستیک-سیم فولادی محاسبه شده با استفاده از نظریه Gough-Tangorra.

ردیف	زاویه الیاف (درجه)	E_x (MPa)	E_y (MPa)	G_{xy} (MPa)	υ_{xy}
۱	±۰	۲۳۵۰۰	۱۶	۴	۰/۰۵
۲	±۲۲	۵۰۶	۱۴	۴/۸۶	۵/۹۴
۳	±۶۸	۱۴	۵۰۶	۴/۸۶	۰/۱۶
۴	±۹۰	۱۶	۲۳۵۰۰	۴	-

حالت سوم: شبیه‌سازی با استفاده از اجزای میله‌ای

روش سوم شبیه‌سازی در پژوهش حاضر استفاده از اجزای میله‌ای تک‌بعدی جانشانی‌شده در اجزای سه‌بعدی است. در این حالت نیز خواص لاستیک و الیاف به‌طور مستقل، در مدل توسعه یافته به این منظور گنجانده می‌شوند. در این روش، برخی امکانات قابل‌توجه در اختیار است. از جمله اینکه می‌توان خواص لاستیک و الیاف را مانند روش استفاده از اجزای حجمی معادل به‌طور مجزا درنظر گرفت. مزیت عمده دیگر استفاده از اجزای میله‌ای، امکان اختصاص‌دادن خواص گرانروکشسان خطی یا در برخی مواقع خواص گرانروکشسان غیرخطی به لاستیک و الیاف به‌طور مجزاست. این قابلیت احتمال امکان تطابق نتایج حاصل از مدل با داده‌های تجربی را افزایش می‌دهد [۲۳].

از محدودیت‌های نظریه اجزای میله‌ای می‌توان به عدم درنظرگرفتن تنش‌های بین‌لایه‌ای میان الیاف و لاستیک و نیز سختی ناشی از کرنش‌های زیاد در محل اتصال اشاره کرد که از اتصال ماتریس لاستیکی و فاز تقویت‌کننده ناشی می‌شود. یکی دیگر از محدودیت‌های استفاده از اجزای میله‌ای تک‌بعدی در این است که این اجزا فقط می‌توانند سفتی در جهت الیاف را درنظر گیرند و قابلیت درنظرگرفتن سفتی را در جهت عمود بر الیاف ندارند. این محدودیت را می‌توان به یکی از دو روش زیر برطرف کرد. روش اول، شامل درنظرگرفتن دولایه اجزای میله‌ای است. یکی در جهت الیاف برای بیان سفتی طولی و دیگری با زاویه ۹۰° برای بیان سفتی عرضی است. روش دوم، افزایش خواص همگن لاستیک در اجزای جامد (solid elements) میزبان اجزای میله‌ای است [۲۳]. محدودیت و عدم دقت در پیش‌بینی رفتار برشی را همانطور که در این پژوهش بررسی شده، می‌توان به‌عنوان سومین محدودیت اجزای میله‌ای جانشانی شده در اجزای حجمی نامید.

مدل‌های موادی استفاده شده برای آمیزه لاستیکی

دو حالت از شبیه‌سازی‌های بررسی شده در این پژوهش، یعنی استفاده از اجزای حجمی معادل و نیز اجزای میله‌ای افزوده شده به اجزای سه‌بعدی، به توصیف رفتار ماتریس لاستیکی با مدل‌های موادی مربوط نیاز دارد. از سؤالات مطرح این است که در مدل‌سازی رفتار کامپوزیت‌های

جدول۲- مدل‌های ابرکشسان استفاده شده برای برازش داده‌های تجربی و تعیین ثابت‌های مدل.

نام معادله	عبارت معادله	مرجع
Marlow	$U(I)=\int_0^{\lambda_T(I)-1}T(\varepsilon)d\varepsilon$	۳۷
مدل Yeoh	$U=\sum_{i=1}^{3}C_{i0}(I_1-3)^i+\sum_{i=1}^{3}\frac{1}{D_i}(J_{el}-1)^{2i}$	۳۸
مدل چندجمله‌ای درجه دوم	$U=\sum_{i+j=1}^{2}C_{ij}(I_1-3)^i(I_2-3)^j+\sum_{i=1}^{2}\frac{1}{D_i}(J_{el}-1)^{2i}$	۳۹
مدل Ogden	$U=\sum_{i=1}^{N}\frac{2\mu i}{\alpha_i^2}(\lambda_1^{\alpha_i}+\lambda_2^{\alpha_i}+\lambda_3^{\alpha_i}-3)+\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{D_i}(J^{el}-1)^{2i}$	۳۸

لاستیک-الیاف افزون بر مدل ریاضی ابرکشسان انتخابی که از میان مدل‌های موجود انجام می‌شود، درنظرگرفتن یا صرف‌نظرکردن از رفتار گرانروکشسان چه اثری بر نتایج حاصل از شبیه‌سازی دارد. برای پاسخ به این سؤال همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، در این پژوهش از دو رویکرد برای برازش داده‌های تجربی و تعیین ثابت‌های مدل‌ها استفاده شد. رویکرد اول، برازش نتایج حاصل از آزمون‌های انجام شده با فرض رفتار ابرکشسان به تنهایی و رویکرد دوم، برازش داده‌های حاصل از این آزمون‌ها با فرض رفتار ابرگرانروکشسان و استفاده از مدل‌های ابرکشسان به همراه سری Prony برای درنظرگرفتن بخش گرانروکشسان رفتار است. در جدول ۲ مدل‌های ابرکشسان استفاده شده در این پژوهش آمده است.

برای درنظرگرفتن رفتار گرانروکشسان خطی با استفاده از سری Prony ضرایب آسایش از تنش با توجه به نوع معادله استفاده شده یا در ثوابت تابع انرژی کرنشی یا به‌طور مستقیم در خود تابع انرژی کرنشی اعمال می‌شود. برای مدل‌های Yeoh و چندجمله‌ای ثابت‌های تابع انرژی کرنشی به شکل معادله (۵) تعریف می‌شوند [۴۰]:

$$C_{ij}^R(t)=C_{ij}^0\left(1-\sum_{k=1}^{N}\overline{g}_k^P\left(1-e^{-\frac{t}{\tau_k}}\right)\right) \quad (۵)$$

برای مدل Ogden تعریف ثابت‌های معادله انرژی کرنشی به شکل معادله (۶) است:

$$\mu_i^R(t)=\mu_i^0\left(1-\sum_{k=1}^{N}\overline{g}_k^P\left(1-e^{-\frac{t}{\tau_k}}\right)\right) \quad (۶)$$

برازش داده‌های تجربی برای تعیین ثابت‌های مدل‌های ابرکشسان استفاده شده با استفاده از نرم‌افزارهای Abaqus و Marc انجام شد و برای تعیین ثابت‌های سری Prony و تعیین رفتار گرانروکشسان از روش پیشنهادی

جدول ۳- مقادیر عددی ضرایب مدل‌های ابرگرانروکشسان مختلف استفاده شده.

مدل Ogden		مدل چندجمله‌ای		مدل Yeoh	
μ_1	۱۱۸۲۸۴۲	C_{10}	۱۲۵۹۴۵۶	C_{10}	۲۴۱۴۰۵۷
α_1	۲/۵۰۳	C_{01}	۹۶۵۵	C_{20}	۲۲۲۱۳۱
μ_2	۱۱۲۱۶۹۸	C_{20}	۱۱۴۲۹	C_{30}	-۶۲۲/۰۰۶
α_2	۳/۲۹۷	C_{11}	۸۴۹۷	–	–
μ_3	۱۱۵۴۰۰۲	C_{02}	۱۰۵۷۴	–	–
α_3	۲/۱۹۷	–	–	–	–
۷×۱۰$^{-۸}$		۴×۱۰$^{-۸}$		D_1	۸×۱۰$^{-۸}$
۲×۱۰$^{-۸}$		۱×۱۰$^{-۸}$		D_2	۲×۱۰$^{-۸}$
۲×۱۰$^{-۸}$		–		D_3	۲×۱۰$^{-۸}$
۰/۲۷		۰/۰۰۰۱۴		g_1	۰/۴۷۹
۰		۰		k_1	۰
۰/۱۳۸		۰/۰۱۰۵		τ_1	۰/۵۴۱
۰/۰۷۵		۰/۰۰۲۶		g_2	۰/۰۴۳
۰		۰		k_2	۰
۰/۰۱۲		۰/۰۲۳		τ_2	۰/۰۷۱
۰/۱۷۱		۰/۰۸۷		g_3	۰/۰۲۴
۰		۰		k_3	۰
۰/۰۰۰۰۸۶		۰/۰۷۶		τ_3	۰/۰۰۲

قریشی [۳۴] استفاده شد. جدول ۳ مقادیر عددی ضرایب معادله‌های ابرگرانروکشسان مختلف استفاده شده را نشان می‌دهد.

در شبیه‌سازی رفتار کامپوزیت در حالت کششی و با استفاده از نظریه اجزای میله‌ای، از مدل‌های Marlow، Yeoh، چندجمله‌ای درجه ۲ و Ogden برای توصیف رفتار لاستیک در کامپوزیت لاستیک-الیاف استفاده شد تا مقدار اثر دقت مدل ابرکشسان یا ابرگرانروکشسان استفاده شده، در مقدار دقت نتایج حاصل از شبیه‌سازی رفتار کامپوزیت‌ها بررسی شود.

در شبیه‌سازی به روش اجزای حجمی معادل در پژوهش حاضر، خواص لاستیک با استفاده از مدل Marlow توصیف شد. زیرا در این روش، لاستیک و الیاف کاملاً مستقل از یکدیگر درنظر گرفته می‌شوند و بهترین برازش داده‌های تجربی مربوط به این مدل است.

برای ارزیابی دقت هریک از روش‌های نام‌برده در پیش‌بینی رفتار مکانیکی کامپوزیت‌ها، کامپوزیت لاستیک-سیم فولادی زیر تنش‌های کششی تک‌جهتی و برشی مطابق با آزمون‌های انجام شده، شبیه‌سازی شد. رفتار کششی کامپوزیت دولایه لاستیک-سیم فولادی در زاویه‌های ۰، ۲۲±، ۶۸± و °۹۰ نسبت به جهت اعمال نیرو شبیه‌سازی شد. برای بررسی رفتار برشی نیز کامپوزیتی چهارلایه مدل شد که از قرارگیری تک‌لایه‌های کامپوزیتی با زاویه‌های مختلف روی یکدیگر ایجاد شده بود. برای حل معادله‌های مربوط به روش اجزای محدود از نرم‌افزار Abaqus [۴۰] استفاده شد.

مدل ایجاد شده برای بررسی رفتار کششی برای نمونه cm ۲ مطابق با شکل ۱ درمجموع مشتمل بر ۱۲۰۰ جزء شش‌وجهی ۲۰ گره‌ای (در مجموع ۷۴۲۲ گره) و مدل ایجاد شده برای بررسی رفتار برشی مطابق با شکل ۲ در مجموع مشتمل بر ۳۵۶۱ جزء شش‌وجهی ۲۰ گره‌ای (در مجموع ۲۳۹۰۹ گره) بود. این نوع و تعداد اجزا پس از تحلیل‌های اولیه معین شده و حد بهینه‌ای هستند که دست‌یابی به جوابی پایدار، همگرا و دقیق را در زمانی کوتاه ممکن می‌سازند. شبیه‌سازی‌ها با و بدون درنظرگرفتن خواص گرانروکشسان انجام شد تا بتوان مقدار اثر رفتار گرانروکشسان در دقت پیش‌بینی‌های انجام گرفته را نیز مطالعه کرد. شکل ۴ شبکه اجزای محدود تشکیل شده برای انجام شبیه‌سازی را در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

برای نمونه‌های کامپوزیتی ابتدا آزمون کششی تک‌جهتی روی نمونه‌های ۱، ۲ و cm ۳ مطابق با شکل ۱ انجام شد. همچنین، آزمون‌های انجام شده با استفاده از اجزای میله‌ای شبیه‌سازی شد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی نشان داد، در نمونه‌های ۱ و cm ۳ اختلاف معناداری میان نتایج حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های تجربی وجود دارد. بررسی بیشتر نمونه cm ۳ پس از آزمون کشش نشان داد، به دلیل تخریب و سرخوردگی نمونه درون فک دستگاه نتایج این آزمون قابل‌اعتماد نیست. برای نمونه cm ۱ نیز به دلیل عرض کم نمونه آثار انتهایی غالب بوده که موجب بروز خطا در اندازه‌گیری تجربی می‌شود. بنابراین از نتایج این دو نمونه صرف‌نظر و ادامه کار فقط با بررسی نمونه cm ۲ انجام شد.

ابتدا تمام مدل‌سازی‌ها با فرض رفتار ابرکشسان برای آمیزه لاستیکی انجام شد. شکل ۵ مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی به سه روش مختلف برای کامپوزیتی با آرایش‌یافتگی الیاف در جهت اعمال نیرو (جهت طولی) را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در کرنش‌های کم پیش‌بینی‌های انجام شده به‌کمک نظریه کلاسیک کامپوزیت‌ها و اجزای میله‌ای منطبق بر یکدیگر است. ولی با افزایش مقدار کرنش، پیش‌بینی این دو مدل از یکدیگر فاصله می‌گیرد. علت موضوع آن است که نظریه کامپوزیت‌ها فقط قابلیت پیش‌بینی رفتار به‌شکل خطی را دارد. مدل‌سازی با استفاده از اجزای حجمی معادل حتی در کرنش‌های کم نیز مقادیر بیشتری را برای تنش پیش‌بینی می‌کند. از آنجا که در این حالت الیاف نقش اصلی را در تحمل بار بازی می‌کنند، تغییر نوع مدل ابرکشسان استفاده شده اثر بسیار ناچیزی در نتایج حاصل از شبیه‌سازی دارد. شکل ۶ نتایج حاصل از شبیه‌سازی به روش‌های مزبور را در حالتی نشان می‌دهد که زاویه آرایش‌یافتگی الیاف نسبت به جهت اعمال نیرو °۹۰ (جهت عرضی) است. در این حالت با غالب‌شدن رفتار لاستیک در

شکل۵- تغییرات تنش-کرنش حاصل از شبیه‌سازی آزمون کشش نمونه cm ۲ با آرایش‌یافتگی الیاف در جهت اعمال نیرو.

شکل ۶- تغییرات تنش-کرنش حاصل از شبیه‌سازی آزمون کشش نمونه ۲ cm با آرایش‌یافتگی الیاف عمود بر جهت اعمال نیرو.

خواص کلی کامپوزیت روند پیش‌بینی خواص کامپوزیت تا حدودی از روند برازش رفتار ابرکشسان آمیزه لاستیکی پیروی می‌کند. در این حالت، نتایج حاصل از شبیه‌سازی به روش‌های استفاده از جزء حجمی معادل و جزء میله‌ای همراه با مدل ابرکشسان Marlow از تطابق بسیاری برخوردارند. در این حالت، نظریه کامپوزیت‌ها نتایجی مشابه با استفاده از جزء میله‌ای به همراه نظریه ابرکشسان Yeoh ارائه می‌دهد. نکته جالب در این نمودار ناتوانی نظریه جزء میله‌ای به همراه نظریه ابرکشسان چندجمله‌ای در پیش‌بینی رفتار است، اگر در شرایط مشابه با سایر شبیه‌سازی‌ها به دلیل غیرخطی‌شدن رفتار این بررسی پیشرفتی نداشته و در کرنش‌های کم متوقف شد. دلیل این ناپایداری را می‌توان به وجود ناوردای دوم در معادله ابرکشسان چندجمله‌ای نسبت داد که در ترکیب با جزء میله‌ای موجب پیچیدگی معادله‌ها و در نتیجه ناپایدارشدن پاسخ حاصل، می‌شود. به دلیل جدایش لاستیک و الیاف در آزمون تجربی داده‌های اندازه‌گیری شده دقت کافی نداشتند. بنابراین، از مقایسه نتایج با آن خودداری شد.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی رفتار نمونه در حالت کشش و زمانی که زاویه آرایش‌یافتگی الیاف نسبت به جهت اعمال نیرو ۶۸°± است در شکل ۷ و همین نتایج برای زاویه ۲۲°± آرایش‌یافتگی الیاف نسبت به جهت اعمال نیرو در شکل ۸ آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، استفاده از جزء میله‌ای به همراه مدل ابرکشسان Marlow بهترین پیش‌بینی از نتایج تجربی را ارائه می‌دهد. مدل Marlow مدلی انتگرالی است که قابلیت پیش‌بینی رفتار ابرکشسان لاستیک‌ها با دقت بسیار زیاد را دارد. ولی وقتی که در کنار سایر نظریه‌ها نظیر از جزء میله‌ای تک‌بعدی افزوده شده به اجزای سه‌بعدی استفاده می‌شود، موجب، افزایش قابل‌توجه زمان تجزیه و تحلیل و نیز کاهش هم‌گرایی می‌شود. این مشکل با کاهش زاویه الیاف نسبت به جهت اعمال نیرو افزایش می‌یابد. در شکل ۸ ملاحظه می‌شود، زمانی که زاویه الیاف نسبت به جهت اعمال نیرو برابر ۲۲° است. حل مسئله بسیار ناپایدار بوده و تنها تا کرنش ۱٪ پیش رفته است. نزدیک‌شدن زاویه الیاف به جهت اعمال نیرو موجب افزایش فاصله بین پیش‌بینی‌های حاصل از نظریه جزء حجمی معادل و استفاده از اجزای میله‌ای می‌شود. در مجموعه شکل‌های ۷ و ۸ ملاحظه می‌شود، مدل ابرکشسان چندجمله‌ای درجه ۲ قابلیت پیش‌بینی رفتار کامپوزیت‌های لاستیک-الیاف را ندارد. دقت مدل Yeoh نیز در پیش‌بینی رفتار کامپوزیت‌ها مشابه با دقت آن در پیش‌بینی رفتار آمیزه لاستیکی به‌تنهایی است.

نظریه‌های کلاسیک کامپوزیت‌ها تنها قابلیت پیش‌بینی خطی رفتار را دارد. استفاده از این مدل نتایج دقیقی ارائه نمی‌دهد، ولی نتایجی نزدیک به پیش‌بینی جزء میله‌ای زمانی ارائه می‌دهد که به همراه مدل Yeoh استفاده شوند.

دقت استفاده از نظریه کلاسیک کامپوزیت‌ها را می‌توان با جداکردن بخش‌های لاستیکی بالا، پایین و وسط کامپوزیت به‌عنوان لایه‌های مجزا از بخش‌های تقویت شده با الیاف (پنج‌لایه درنظرگرفتن ساختار) افزایش داد. با پنج لایه درنظرگرفتن ساختار و نسبت‌دادن خواص ابرکشسان به سه لایه لاستیکی بالا، پایین و وسط، رفتار غیرخطی کامپوزیت را به‌خوبی می‌توان پیش‌بینی کرد. در این حالت، نتایج حاصل از پیش‌بینی با نظریه‌های کلاسیک کامپوزیت‌ها نزدیک به نتایج حاصل از پیش‌بینی با جزء میله‌ای تک‌بعدی جانشانی شده در اجزای سه‌بعدی خواهد شد. مشکل اصلی استفاده از این سامانه هم‌گرایی بسیار کم آن به‌ویژه هنگامی است که زاویه الیاف نزدیک

شکل ۷- تغییرات تنش-کرنش حاصل از شبیه‌سازی آزمون کشش نمونه ۲ cm با آرایش‌یافتگی الیاف در زاویه ۶۸°± نسبت به جهت اعمال نیرو و مقایسه آن با داده‌های تجربی.

شکل ۸- تغییرات تنش-کرنش حاصل از شبیه‌سازی آزمون کشش نمونه ۲ cm با آرایش‌یافتگی الیاف در زاویه ±۲۲° نسبت به جهت اعمال نیرو و مقایسه آن با داده‌های تجربی.

به جهت اعمال نیرو است. اگرچه استفاده از روش جزء میله‌ای جانشانی شده در اجزای سه‌بعدی در مقایسه با سایر روش‌ها، بهترین نتایج را ارائه می‌دهد، ولی باز هم قابلیت پیش‌بینی دقیق رفتار در کامپوزیت‌های لاستیک-الیاف را ندارد و نیز استفاده از مدل‌های ابرکشسان مختلف نتایج متفاوتی را به‌دست می‌دهد.

آزمون کششی کامپوزیت‌های لاستیک-الیاف با سرعت ۵ mm/min انجام شد. این سرعت متفاوت از سرعت آزمون‌های انجام شده برای تعیین ثابت‌های مدل‌های ابرکشسان استفاده شده در ارزیابی رفتار کامپوزیت بود. از این‌رو، مدل‌سازی رفتار کامپوزیت لاستیک-الیاف در زاویه‌های ±۲۲ و ±۶۸° با درنظرگرفتن خواص گرانروکشسان نیز انجام شد تا اثر اختلاف در سرعت کشش‌ها بر نتایج حاصل از شبیه‌سازی نیز بررسی شود. نتایج حاصل از این مدل‌سازی‌ها و مقایسه آن‌ها با داده‌های تجربی در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده است. در این شکل‌ها ملاحظه می‌شود، با درنظرگرفتن رفتار گرانروکشسان و استفاده از معادله‌های ابرگرانروکشسان، مقادیر پیش‌بینی شده به‌کمک مدل دارای وابستگی بسیار کمتری به نوع مدل انتخابی بوده و نتایج مدل‌های مختلف از هم‌گرایی قابل قبولی با یکدیگر برخوردار هستند. درحالی که نتایج حاصل از شبیه‌سازی با مدل‌های ابرکشسان بسیار به نوع مدل وابسته است. نکته مهم اختلاف معنادار و شایان توجه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های تجربی اندازه‌گیری شده است. این نتایج بیانگر این واقعیت است که اگرچه استفاده از اجزای میله‌ای جانشانی شده در بستر لاستیکی در میان گزینه‌های موجود کنونی بهترین نتایج را به‌دست می‌دهد، ولی حتی با افزایش دقت مدل‌سازی و

شکل ۹- مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی آزمون کشش نمونه ۲ cm با آرایش‌یافتگی الیاف در زاویه ±۶۸° نسبت به جهت اعمال نیرو با و بدون درنظرگرفتن رفتار گرانروکشسان.

درنظرگرفتن رفتار گرانروکشسان نیز نتایج حاصل از شبیه‌سازی دارای اختلاف معناداری با داده‌های تجربی بوده و این مدل‌ها قابلیت پیش‌بینی دقیق رفتار کامپوزیت‌های لاستیک-الیاف را ندارند.

به‌دلیل اینکه بخش عمده‌ای از تغییرشکل‌های انجام شده در تایر در حالت برشی انجام شد، بررسی دقت مدل‌های مختلف در پیش‌بینی رفتار برشی کامپوزیت‌های لاستیک-الیاف از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بنابراین، شبیه‌سازی و آزمون تجربی در حالت برشی نیز انجام شد. شکل ۱۱ نتایج حاصل از آزمون برش روی آمیزه لاستیکی استفاده شده در تسمه تایر و نیز کامپوزیت‌های

شکل ۱۰- مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی آزمون کشش نمونه ۲ cm با آرایش‌یافتگی الیاف در زاویه ±۲۲° نسبت به جهت اعمال نیرو با و بدون درنظرگرفتن رفتار گرانروکشسان.

لاستیک-سیم فولادی را نشان می‌دهد. اگر قابل پیش‌بینی بوده و در این نتایج نیز دیده می‌شود، وجود الیاف تقویت‌کننده اثر چشمگیری روی خواص برشی کامپوزیت ندارد. وجود الیاف یا تغییر زاویه آن‌ها نسبت به جهت اعمال نیرو به تغییرات اندکی در منحنی تغییرات نیرو برحسب جابه‌جایی منجر می‌شود.

برای بررسی دقت مدل‌سازی در پیش‌بینی رفتار برشی، آزمون برش انجام شده روی نمونه‌های کامپوزیتی دقیقاً مشابه با شرایط آزمون و با استفاده از نظریه اجزای میله‌ای جانشانی شده در اجزای سه‌بعدی شبیه‌سازی شد. از معادلات Yeoh و چندجمله‌ای درجه ۲ برای ارزیابی آزمون برشی با استفاده شبیه‌سازی استفاده شد. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی و مقایسه آن با داده‌های تجربی در شکل ۱۲ آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نتایج پیش‌بینی شده با استفاده از مدل‌های Yeoh و چندجمله‌ای درجه ۲ از هم‌گرایی قابل قبولی با یکدیگر برخوردار هستند. ولی این مدل‌ها قابلیت پیش‌بینی روند غیرخطی تغییرات را در کرنش‌های کم ندارند. حتی مدلی برپایه ناوردای اول مانند Yeoh که برای پیش‌بینی دقیق رفتار برشی ایجاد شده‌اند، نیز قابلیت پیش‌بینی دقیق رفتار برشی آمیزه‌های صنعتی استفاده شده در بخش‌های مختلف تایر را ندارد. دلیل این موضوع را می‌توان به پیچیدگی زیاد آمیزه‌های لاستیکی صنعتی و وجود افزودنی‌های متنوع و به‌ویژه دوده با درصدهای زیاد در این آمیزه‌ها نسبت داد. پیچیدگی رفتار مکانیکی ابرکشسان این آمیزه‌ها موجب شده تا مدل‌های مکانیکی ابرکشسان پدیده‌نگر (مانند مدل Yeo) یا مدل‌های مکانیکی جزئی‌نگر (مانند مدل Arruda-Boyce) که برپایه آمیزه‌های ساده لاستیکی (فاقد افزودنی‌های متنوع و دوده با مقادیر زیاد) توسعه یافته‌اند، نتوانند رفتار مکانیکی را به‌طور دقیق پیش‌بینی کند.

آزمون برشی با سرعت ۱ mm/min انجام شد که این سرعت

شکل۱۱- تغییرات تنش-کرنش حاصل از آزمون برش نمونه ۲۵×۲۰×۴ mm.

شکل۱۲- مقایسه تغییرات تنش-کرنش حاصل از آزمون برش کامپوزیت لاستیک-الیاف استفاده شده در تسمه با نتایج شبیه‌سازی حاصل از مدل‌های ابرکشسان مختلف.

متفاوت از سرعت آزمون‌های استفاده شده در تعیین ثابت‌های معادلات ابرکشسان است. از این‌رو، مدل‌سازی رفتار کامپوزیت لاستیک-الیاف در حالت برشی نیز با درنظرگرفتن خواص گرانروکشسان برای مدل‌های Yeoh و چندجمله‌ای انجام شد تا خطای احتمالی ناشی از رفتار گرانروکشسان در بررسی حاضر حذف شود. نتایج حاصل از این مدل‌سازی و مقایسه آن‌ها با داده‌های تجربی نیز در شکل ۱۳ آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، درنظرگرفتن رفتار گرانروکشسان نیز کمکی به بهبود تطابق نتایج با داده‌های تجربی نکرده و حتی موجب اختلاف بیشتر نتایج حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های تجربی می‌شود.

مجموعه نتایج بیان شده نشان می‌دهد، اگرچه استفاده از جزء میله‌ای جانشانی شده در جزء حجمی بهترین پیش‌بینی را در بین روش‌های موجود دارد. ولی حتی با استفاده از این روش نیز اختلاف نتایج حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های تجربی به‌ویژه درحالت برشی زیاد است و استفاده از مدل‌های ابرگرانروکشسان برای درنظرگرفتن رفتار گرانروکشسان نیز به افزایش دقت در قابلیت پیش‌بینی این مدل‌ها منجر نمی‌شود. در پاره‌ای موارد، اختلاف نتایج حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های تجربی بیشتر نیز می‌شود. از این‌رو، هنگام استفاده از این مدل‌ها که در نرم‌افزارهای تجاری نیز گنجانده شده‌اند، باید دقت لازم را معطوف داشت و خطاهای موجود را در طراحی‌های مبتنی بر این شبیه‌سازی‌ها درنظر گرفت. یادآور می‌شود، هنگام استفاده از جزء میله‌ای برای تعریف خواص الیاف، سطح مقطع الیاف کروی و یکنواخت درنظر گرفته می‌شود. این درحالی است که در حالت

شکل۱۳- مقایسه تغییرات تنش-کرنش حاصل از آزمون برش کامپوزیت لاستیک-الیاف استفاده شده در تسمه با نتایج شبیه‌سازی حاصل از مدل‌های ابرگرانروکشسان مختلف.

واقعی الیاف استفاده شده، مجموعه‌ای به‌هم تنیده از تارهاست که این موضوع می‌تواند به‌عنوان یکی از منابع خطا درنظر گرفته شود.

همچنین، در کامپوزیت‌های الیاف بلند غالباً به‌واسطه مدول کشسانی بسیار بیشتر، الیاف را کنترل‌کننده اصلی رفتار می‌دانند و اثر نحوه درنظرگرفتن رفتار مکانیکی بستر در پاسخ کلی کامپوزیت به بارهای اعمالی را ناچیز برمی‌شمرند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داده که این مسئله برای کامپوزیت‌های الیاف‌بلند لاستیک-سیم فولادی که رفتار الیاف با استفاده از جزء میله‌ای و رفتار لاستیک با استفاده از مدل‌های ابرکشسان بیان می‌شود، صادق نیست. مدل ابرکشسان استفاده شده در تعریف رفتار لاستیک اثر بسیار معناداری روی نتایج حاصل و دقت آن دارد. بنابراین، انتخاب صحیح و مناسب مدل ابرکشسان بسیار حائز اهمیت است. این وابستگی بسیار زیاد نتایج به مدل ابرکشسان انتخابی، مؤید این واقعیت است که مدل‌سازی با استفاده از جزء میله‌ای جانشانی شده در جزء حجمی روش مناسبی برای پیش‌بینی رفتار کامپوزیت‌های لاستیک-الیاف نبوده و هنگام استفاده از آن در طراحی باید دقت لازم را داشت.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ابتدا مطالعات پیشین انجام شده در زمینه پیش‌بینی رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های لاستیک-الیاف تشریح شد. سپس، دقت روش‌های مختلف شبیه‌سازی شامل استفاده از نظریه‌های کلاسیک کامپوزیت‌ها، استفاده از نظریه جزء میله‌ای تک‌جهتی و استفاده نظریه جزء حجمی معادل در پیش‌بینی رفتار برشی و کششی کامپوزیت لاستیک-سیم فولادی بررسی شد. نتایج حاصل نشان داد، در بررسی رفتار کششی کامپوزیت‌های لاستیک-الیاف بلند، استفاده از روش‌های مختلف شبیه‌سازی نتایج متفاوتی را ارائه می‌دهد. مقایسه نتایج با داده‌های تجربی حاصل از آزمون کششی انجام شده روی نمونه با عرض ۲ cm نشان داد، اگرچه استفاده از نظریه جزء میله‌ای تک‌جهتی به همراه مدل‌های ابرکشسان بهترین نتایج را از میان روش‌های مقایسه شده ارائه می‌دهد. ولی هیچ‌یک از این روش‌ها، قابلیت پیش‌بینی دقیق رفتار کامپوزیت‌های لاستیک-الیاف را ندارند. حتی افزایش دقت مدل‌سازی و درنظرگرفتن رفتار گرانروکشسان نیز به بهبود تطابق نتایج حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های تجربی به یکدیگر کمکی نکرد. در ادامه آزمون برشی ساده برای آمیزه لاستیکی و نیز کامپوزیت لاستیک-الیاف شبیه‌سازی شد. مقایسه نتایج به‌دست آمده با داده‌های تجربی نشان داد، در این حالت نیز حتی با درنظرگرفتن رفتار گرانروکشسان، هیچ یک از مدل‌های موجود قابلیت پیش‌بینی دقیق رفتار کامپوزیت‌های لاستیک-الیاف تولید شده با آمیزه‌های لاستیکی صنعتی را ندارد و هنگام استفاده از این مدل‌ها در طراحی باید دقت لازم را مبذول داشته و این خطاها را درنظر گرفت.

مراجع

1. Ghoreishy M.H.R. and Naderi G., Experimental Verification of the Predicted Stiffnesses for a Statically Loaded Tire in FEA, *Tire Technol. Int.*, **2014**, 52-56, 2014.
2. Eiamnipon N., Nimduma P., Renard J., and Kolitawong C., Experimental Investigation on High Strain Rate Tensile Behaviors of Steel Cord–Rubber Composite, *Compos. Struct.*, **99**, 1-7, 2013.
3. Xie Z., Chai1 D., Chen S., and Wan Z., Effect of Cord Construction on the Properties of Rubber Composites, *Appl. Mechanic. Mater.*, **328**, 906-910, 2013.
4. Golbakhshi H. and Namjoo M., Investigating Temperature Effects on Mechanical Behavior of Rubber Compounds

Embedded in Composite Structure of Pneumatic Tires, *Int. J. Adv. Design Manufact. Technol*., **7**, 19-25, 2014.

5. Choi S.S. and Kim O.B., Influence of Rubber and Fabric Cord on Deformation of a Fabric Cord-Inserted Rubber Composite by Thermal Aging, *J. Indust. Eng. Chem*., **19**, 650-654, 2013.
6. Brown L.W. and Smith L.M., A Simple Transversely Isotropic Hyperelastic Constitutive Model Suitable for Finite Element Analysis of Fiber Reinforced Elastomers, *J. Eng. Mater. Technol*., **133**, 2011.
7. Choi S.S. and Kim O.B., Influence of Specimen Directions on Recovery Behaviors from Circular Deformation of Polyester Cord-Inserted Rubber Composites, *J. Indust. Eng. Chem*., **20**, 202-207, 2014.
8. Carbone M.G.P., Parthenios J., Tsoukleri G., Cotugno S., Mensitieri G., and Galiotis C., Assessing Micromechanical Behavior of PET Cords in Rubber Matrix Composites by Laser Raman Microscopy, *Compos. Sci. Technol*., **85**, 104-110, 2013.
9. Ren J. and Zhong J., The Accurate Prediction Method of Tension Modulus for Nylon Cord/Rubber Composite Material, *Appl. Mechanic. Mater*., **575**, 115-120, 2014.
10. Grebenyuk S.N., The Shear Modulus of a Composite Material with a Transversely Isotropic Matrix and a Fiber, *J. Appl. Mathemat. Mechanic*., **78**, 187-191, 2014.
11. Clark S.K., Theory of the Elastic Net Applied to Cord-Rubber Composites, *Rubber Chem. Technol*., **56**, 372-389, 1983.
12. Clark S.K. and Doge R.N., Nonlinear Cord-Rubber Composites, *Tire Sci. Technol*., **18**, 191-200, 1990.
13. Prevorsek D.C. and Sharma R.K., Role of Adhesion in Viscoelastic Properties of Rubber-Tire Cord Composites, *Rubber Chem. Technol*., **54**, 72-90, 1981.
14. Padovan J., End Effects in Twisted Cord-Rubber Composites, *Tire Sci. Technol*., **24**, 321-338, 1996.
15. Breidenbach R.F. and Lake G.J., Mechanics of Fracture in Two-Ply Laminates, *Rubber Chem. Technol*., **52**, 96-109, 1979.
16. Lou A.Y. and Walter J.D., Interlaminar Shear Strain Measurements in Cord-Rubber Composites, *Rubber Chem. Technol*., **52**, 792-804, 1979.
17. DeEskinazi J. and Cembrola R.J., A Parametric Study on Interlaminar Shear Strains in Cord-Rubber Composites, *Rubber Chem. Technol*, **57**, 168-183, 1984.
18. Tabaddor F., Clark S.K., and Dodge R.N., Viscoelastic Loss Characteristics of Cord-Rubber Composites, *Tire Sci. Technol*., **14**, 75-101, 1986.
19. Walter J.D. and Patel H.P., Approximate Expressions for the Elastic Constants of Cord-Rubber Composites, *Rubber Chem. Technol.*, **52**, 710-724, 1979.
20. Patel H.P., Turner J.L., and Walter J.D., Radial Tire Cord-Rubber Composites, *Rubber Chem. Technol.*, **49**, 1095-1110, 1976.
21. Padovan J., Large Deformation Micropolar Theory for Cord Rubber Composites, *Rubber Chem. Technol.*, **68**, 77-96, 1995.
22. Walter J., Cord-rubber Tire Composites: Theory and Application, *Rubber Chem. Technol.*, **51**, 524-576, 1978.
23. Gent A.N. and Walter J.D., *Pneumatic Tires*, USA, NHTSA, 2006.
24. Parhizgar S., Determination of Stiffness Properties of Multi-Ply Cord-Rubber Composites, *Tire Sci. Technol*., **17**, 201-216, 1989.
25. Helnwein P., Liu C.H., Meschke G., and Mang H.A., A New 3-D Finite Element Model for Cord-Reinforced Rubber Composites Application to Analysis of Automobile Tires, *Finite Elements in Analysis and Design*, **14**, 1-16, 1993.
26. Mesehke G. and Helnwein P., Large-strain 3D-Analysis of Fibre-Reinforced Composites Using Rebar Elements: Hyperelastic Formulations for Cords, *Comput. Mechanic*. **13**, 241-254, 1994.
27. Sprenger W. and Wagner W., On the formulation of geometrically nonlinear 3D-Rebar-elementsusing the enhanced assumed strain method, *Eng. Struct*., **21**, 209-218, 1999.
28. Holzapfel G.A. and Gasser T.C, A Viscoelastic Model for Fiber-Reinforced Composites at Finitr Strains: Continuum Basis, Computational Aspects and Applications, *Comput. Method. Appl. Eng*., **190**, 4379-4403, 2001.
29. Horgan C.O. and Saccomandi G., A New Constitutive Theory for Fiber-Reinforced Incompressible Nonlinearly Elastic Solids, *J. Mechanic. Phys. Solid.,* **53**, 1985-2015, 2005.
30. Merodio J., On Constitutive Equations for Fiber-Reinforced Nonlinearly Viscoelastic Solids, *Mechanic. Res. Commun*., **33**, 764-770, 2006.
31. Gasser T.C., Ogden R.W., and Holzapfel G.A., Hyperelastic Modelling of Arterial Layers with Distributed Collagen Fiber Orientations, *J. Royal Soc. Interface*, **3**, 15-35, 2006.
32. Peng X., Guo G., and Zhao N., An Anisotropic Hyperelastic Constitutive Model with Shear Interactionfor Cord–Rubber Composites, *Compos. Sci. Technol*., **78**, 69-74, 2013.
33. Cembrola R.J. and Dudek T.J., Cord Rubber Material Properties, *Rubber Chem. Technol*., **58**, 830-856, 1985.
34. 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.

35. Sun C.T. and Vaidya R.S., Prediction of Composite Properties from a Representative Volume Element, *Compos. Sci. Technol*., **56**, 171-179, 1995.
36. Ghoreishy M.H.R., Naderi G., and Mansour M., Numerical Modeling and Experimental Study of Elastic-Plastic Behavior of Carbon Nanotubes Reinforced Nanocompsites of PA6/NBR Using a Microfinite Element Model, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian),* **27**, 409-421, 2015.
37. Marlow R.S., *Constitutive Models for Rubber III*, Busfield and Muhr (Eds.), Swets and Zeitlinger, Lisse, 2003.
38. Yeoh O.H., Some Forms of the Strain Energy Function for Rubber, *Rubber Chem. Technol.*, **66**, 754-771, 1993.
39. Rivlin R.S. and Saunders D.W., Large Elastic Deformations of Isotropic Materials VII. Experiments on the Deformation of Rubber, *Phil. Trans. R. Soc.,* A, **243**, 251-288, 1951.
40. Abaqus 6.13 documentation, Abaqus Analysis User Manual.