Journal of Urban Management & Environmental Engineering

Journal homepage: https://jumee.kgut.ac.ir
Vol.1, No.3; 2023.pp: 1-13

Research paper

(Received July 14, 2023 Accepted Aug. 27, 2023)

The Impact of Adding Nanosilica to Tire Formulation on Rolling Resistance and Air Pollution

Hajir Kourki[1], Farzaneh Khosrojerdi[1], Mohammad Ali Bagherzadeh[2*]

[1] *Department of Polymer Engineering, Faculty of Chemistry and Chemical Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.*
[2] *Department of Electrical and Computer Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.*

Abstract

Air pollution is recognized as one of the fundamental challenges in the field of environmental engineering. This study examines the impact of vehicle tires on air pollution and explores methods to reduce it. A significant portion of the energy generated by the vehicle engine is lost through tire rolling resistance. Consequently, reducing tire rolling resistance leads to decreased fuel consumption and, consequently, reduced air pollution. Modifying the formulation of tire tread compounds can be an effective approach to reducing tire rolling resistance. One proposed method for modifying the formulation is the addition of nanoparticles as fillers. In this research, the impact of adding varying amounts of nanosilica to the tire tread compound formulation, which is the main factor contributing to vehicular energy dissipation, has been investigated. The results indicate that the addition of nanosilica increases tire rolling resistance. Furthermore, the influence of tire thickness on its lifespan and rolling resistance has been examined, demonstrating an increase in rolling resistance over time. Additionally, necessary changes in the production process conditions and their impact on the mechanical properties and performance of the produced materials have also been investigated. Rheological analysis reveals that the addition of nanosilica leads to increased viscosity. Moreover, the examination of mechanical properties shows an increase in the modulus values of both 100% and 300% materials with the addition of nanosilica.

Keywords: Tire; Rolling resistance; Nanosilica; Mechanical properties; Rheological properties; Fuel consumption.

*Corresponding Author: Mohammad Ali Bagherzadeh
Email: ma.bagherzadeh@kgut.ac.ir
Phone: +983431623388

Doi: 10.48306/jumee.2023.406864.1013

نشریه علمی مدیریت شهری و مهندسی محیط زیست

آدرس نشریه:https://jumee.kgut.ac.ir

سال اول/شماره سوم/پاییز ۱۴۰۲/صفحه ۱-۱۳

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:۱۴۰۲/۴/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۶/۵ تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۷/۱

تأثیر افزودن نانوسیلیکا به فرمولاسیون تایر بر مقاومت غلتشی و آلودگی هوا

هژیر کورکی[۱]، فرزانه خسروجردی[۲]، محمدعلی باقرزاده کوهبنانی[*]

۱- استادیار، دانشکده شیمی و مهندسی شیمی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

۲- دانشجو، دانشکده شیمی و مهندسی شیمی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

چکیده

آلودگی هوا به عنوان یکی از چالش‌های اساسی در حوزه‌ی محیط زیست شناخته شده است. این مطالعه تأثیر تایر وسایل نقلیه بر آلودگی هوا و روش‌های کاهش آن را بررسی می‌کند. قسمت بزرگی از انرژی تولید شده توسط موتور خودرو از طریق مقاومت غلتشی تایرها تلف می‌شود. در نتیجه کاهش مقاومت غلتشی تایرها باعث کاهش مصرف سوخت و به تبع آن کاهش آلودگی هوا می‌شود. برای کاهش مقاومت غلتشی تایرها، تغییر فرمولاسیون آمیزه‌های سازنده‌ی رویه‌ی تایر می‌تواند مؤثر باشد. یک روش مطرح برای تغییر فرمولاسیون آمیزه‌ها، افزودن نانوذرات به عنوان پرکننده است. در این پژوهش، تأثیر افزودن مقادیر مختلف نانوسیلیکا به فرمولاسیون آمیزه‌ی رویه‌ی تایر بر مقاومت غلتشی تایرها که عامل اصلی اتلاف انرژی جنبشی خودروها است، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که افزودن نانوسیلیکا منجر به افزایش مقاومت غلتشی تایرها می‌شود. همچنین، تأثیر ضخامت تایر بر عمر آن و مقاومت غلتشی آن مورد بررسی قرار گرفته است، که نشان می‌دهد مقاومت غلتشی با گذر زمان افزایش می‌یابد. همچنین، تغییرات لازم در شرایط فرآیند تولید و تأثیر آن بر خواص مکانیکی و کارایی مواد تولیدی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بررسی رئولوژیکی نشان می‌دهد که افزودن نانوسیلیکا منجر به افزایش گرانروی شده است. همچنین، بررسی خواص مکانیکی نشان می‌دهد که مدول‌های صد درصد و سیصد درصد مواد با افزایش نانوسیلیکا افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: تایر؛ مقاومت غلتشی؛ نانوسیلیکا؛ خواص مکانیکی؛ خواص رئولوژیکی؛ مصرف سوخت.

[*] نویسنده مسئول: محمدعلی باقرزاده کوهبنانی

ایمیل:*ma.bagherzadeh@kgut.ac.ir*

شماره تماس:۰۳۴-۳۱۶۲۳۳۸۸

Doi: 10.48306/jumee.2023.406864.1013

۱-مقدمه

تایر قسمتی از وسیله نقلیه است که مستقیماً با سطح جاده در تماس است و با جذب بی‌نظمی‌های جاده، راحتی سفر را برای سرنشینان ایجاد می‌کند. استفاده از تایر برای انتقال نیروهای رانندگی مانند کشش، شتاب، پیچ و ترمز در مانور خودرو لازم است[۱] . به دلیل اثربخشی و قابلیت اطمینان بالای تایرهای هوای فشرده در فعالیت‌های مختلف رانندگی، این تایرها در بیش از ۱۰۰ سال گذشته به عنوان گزینه اصلی استفاده در چرخ خودروها مطرح بوده است. انتخاب تایر مناسب نه تنها نقش زیادی بر آسایش سرنشینان خودرو دارد، بلکه تأثیر به سزایی در کاهش مصرف سوخت خواهد داشت.

بر اساس نتایج ارائه شده[۲]، بیشترین میزان اتلاف سوخت در بخش کشاورزی ایالات متحده، که تقریبا ۵۷۵ میلیون لیتر در سال گزارش شده‌است، به دلیل تایرهای نامناسب ماشین آلات کشاورزی است. یک تایر خوب مقاومت غلتشی پایین، اتلاف هیسترزیس کم، مقاومت سایشی بالا، مقاومت حرارتی بالا، چسبندگی خوب و عمر آج زیاد دارد. در میان این ویژگی‌ها، مقاومت غلتشی تأثیر عمده ای از فرسودگی تایر و سطح جاده دارد. لازم به ذکر است که حدود ۲۰ درصد سوخت مصرفی خودرو برای غلبه بر مقاومت غلتشی بین سطح جاده و تایر تلف می‌شود[۳]. بنابراین مقاومت غلتشی تایر یکی از عوامل قابل توجه در کاهش مصرف سوخت خودرو است که علاوه بر صرفه‌جویی در هزینه‌ی سوخت، با کاهش انتشار دی اکسید کربن، نقش مهمی در حفاظت از محیط زیست به همراه دارد [۴]. به طور سنتی، مقاومت در برابر غلتش به عنوان یک نیروی مقاومتی طولی در برابر چرخش تایر دیده می‌شود، که به دلیل تغییر شکل تایر در هنگام چرخش اتفاق می‌افتد. این مفهوم منحصر به شرایط چرخش آزاد حالت مداوم است. در حالی که برای درک بهتر از مقاومت غلتشی، بایستی آن را به صورت از دست دادن انرژی مکانیکی از تایر و تبدیل به گرما در نظر گرفت، که این موضوع به دلیل غلتش تایرها در مسافت معین اتفاق می‌افتد[۲]. در حقیقت، مقاومت غلتشی پدیده‌ای است که مربوط به غلتیدن تایرها روی سطح جاده است. هنگامی‌که یک تایر بر سطح جاده می‌غلتد، باعث تغییر شکل تاج تایر، کناره تایر، قسمت پشتی و مهره می‌شود. این فرآیند که منجر به تولید انرژی گرمایی می‌شود، مقاومت غلتشی تایر نامیده می‌شود.

مقاومت غلتشی تایر، انرژی مکانیکی است که هنگام حرکت تایر در یک واحد فاصله روی سطح جاده، مصرف می‌شود. مقاومت غلتشی به طور قابل توجهی به اتلاف انرژی کل کمک می‌کند و به طور مستقیم بر بازده سوخت یک وسیله نقلیه موتوری تأثیر می‌گذارد. اتلاف انرژی ناشی از غلتیدن لاستیک‌ها نه تنها بر اقتصاد سوخت وسایل نقلیه تاثیر می‌گذارد بلکه بر عملکرد لاستیک‌ها از طریق افزایش دمای لاستیک‌های تحت تغییر شکل چرخشی به دلیل هدایت حرارتی نسبتا ضعیف ترکیبات لاستیکی تاثیر می‌گذارد. تغییر در درجه حرارت تایر بر خصوصیات ویسکوالاستیک ترکیباتی تاثیرگذار است که می‌توانند عملکرد هندسی(هندلینگ) و کشش لاستیک‌ها را تحت تأثیر قرار دهند. افزایش درجه حرارت لاستیک‌ها هم‌چنین بر مقاومت ترکیبات لاستیکی تاثیر می‌گذارد، که تاثیر قابل توجهی بر روی سایش و دوام و پارگی بلوک آج تایر خواهد داشت. جمع گرما در اجزای تایر نیز بر میزان پیری ترکیبات آن تاثیر می‌گذارد، که بسته به نوع لاستیک‌های مورد استفاده در ترکیبات تایر منجر به تجزیه (نرم شدن) یا پیوندهای عرضی (سخت شدن) بیشتر مولکول‌های آن می‌شود. تخریب ترکیبات لاستیکی از طریق پیری حرارتی ممکن است منجر به کاهش طول عمر و خدمات تایرها شود[۵]. علل مقاومت غلتشی اصطکاک تایر با هوا، اصطکاک تایر با زمین، و انرژی اتلاف شده‌است که ناشی از تغییر شکل پلیمر تایر می‌باشد. اتلاف انرژی ناشی از تغییر شکل تایر با بیش از ۹۰ درصد غالب‌ترین عامل مقاومت غلتشی است. تایر به شکل گرد است، اما پچ تماسی بین تایر و جاده به دلیل فشرده شدن آن در برابر سطح جاده، یک سطح تخت ایجاد می‌کند. تایر به طور قابل توجهی در سطح جاده تغییر شکل می‌دهد. این تغییر شکل تولید گرما می‌کند و باعث اتلاف انرژی جنبشی خودرو می‌شود[۶].

پاسخ این سوال که اصلا چرا باید مقاومت غلتشی را مطالعه نمود یا راهکاری برای کاهش آن پیدا کرد در محیط زیست نهفته است چراکه با افزایش وسایل نقلیه در کشورها گاز دی‌اکسیدکربن تولیدی ناشی از سوخت خودرو به شدت رو به افزایش است و باعث گرم شدن کره زمین می‌شود. یکی از عوامل افزایش مصرف سوخت در خودرو مقامت غلتشی تایر است. یعنی اگر مقاومت غلتشی تایر کاهش یابد مصرف سوخت خودرو کاهش پیدا خواهد کرد و درنتیجه به حفظ محیط زیست کمک خواهد شد. با افزایش سازمان‌های حفاظت از محیط زیست و توجه به مصرف سوخت وسایل نقیله، یک فضای رقابتی بین شرکت‌ها برای تولید تایر کم مصرف ایجاد شده است. زیرا این تایر علاوه بر حفظ محیط زیست باعث صرفه جویی در هزینه سوخت هم می‌شود.

آژانس بین المللی انرژی در سال ۲۰۰۸ اعلام کرد حرکت به سمت لاستیک‌هایی با مقاومت غلتشی پایین، موثرترین روش برای کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن در بخش حمل و نقل است. هم‌چنین اجرای اجباری استاندارد انتشار گازهای گلخانه‌ای آژانس حفاظت از محیط زیست آمریکا در مدل سال ۲۰۱۴ و استاندارد ملی مصرف سوخت سازمان ایمنی ترافیک بزرگراه در سال‌های مدل ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷ برای کامیون‌های مبتنی بر موتورهای بنزینی و دیزلی، به ترتیب، تولیدکنندگان کامیون را مجبور کرده است تا به دنبال فناوری‌هایی برای بهبود اقتصاد سوخت و کاهش انتشار گازهای گلخانه ای از خودرو باشند[۵]. درنتیجه مقاومت غلتشی دارای اهمیت بسیاری می‌باشد و به شدت مورد توجه تولیدکنندگان تایر قرارگرفته است.

مقاومت غلتشی را همچنین می‌توان نیرویی مخالف توصیف کرد که بر روی چرخ غلتان اعمال می‌شود. این نیرو یکی از منابع عمده اتلاف انرژی در تایر است[۲]. بیشتر این اتلاف انرژی ناشی از رفتار ویسکوالاستیک مواد لاستیکی است. از آنجا که لاستیک ترکیبی از رفتار ویسکوز و الاستیک را به نمایش می‌گذارد، اتلاف انرژی مکانیکی مرتبط با هر چرخه تغییر شکل و بازیابی به عنوان تلفات هیسترزیس شناخته می‌شود. آج تایر به تنهایی عامل تقریبا نیمی از اتلاف انرژی هیسترزیس است که به نوبه خود ۸۰ تا ۹۵ درصد اتلاف مقاومت غلتشی را شامل می‌شود [۷]. با توجه به عملکرد تایر مقاومت غلتشی آن تحت تاثیر برهم‌کنش با سطح جاده، ساخت تایر[۴]، ساییدگی تایر[۵]، بار خودرو[۸]، فشار تایر[۹]، سرعت دوران تایر[۱۰] و دمای تایر است.[۱۱]

یکی از مهم‌ترین چالش‌های روز در صنعت لاستیک، تعیین رابطه بین دوام، ایمنی و اقتصاد برای کاربرد لاستیک است. مقاومت در برابر سایش به دوام تایر کمک می‌کند، چنگ زنی به جاده در شرایط خیس به ایمنی و مقاومت غلتشی به صرفه‌جویی در مصرف سوخت کمک می‌کند. آج تایر یکی از مهم ترین قسمت‌های تایر است که تماس مستقیم با جاده داشته و بیشترین تغییر شکل را نسبت به سایر قسمت‌های لاستیک دارد. بنابراین لازم است طراحی آج تایرها به نحوی انجام شود که با بهبود مقاومت در برابر سایش، برهم‌کنش با سطوح خیس و مقاومت غلتشی، این ویژگی‌ها حاصل شود. نکته‌ای که باید در نظر داشت این است که ویژگی‌های ذکر شده در تضاد با یکدیگر هستند. به عنوان مثال، اگرچه کاهش مقاومت غلتشی لاستیک آج موثرترین ابزار برای کاهش اتلاف انرژی تایر به حساب می‌آید، ولی کاهش مقاومت غلتشی لاستیک آج اغلب منجر به کاهش عملکرد چسبندگی لاستیک به جاده می‌شود. از این رو بایستی یک مصالحه[۳]بین کاهش اتلاف و میزان چسبندگی لاستیک انجام داد. از طرفی خاصیت اصطکاکی لاستیک آج از اهمیت قابل توجهی برای عملکرد لاستیک در هنگام ترمز گرفتن، رانندگی و دور زدن برخوردار است. توانایی دستیابی به یک مصالحه بین عملکرد ترمزگیری در جاده‌های خیس و مقاومت غلتشی کم، از مزیت تجاری قابل توجهی در رقابت بین تولیدکنندگان مختلف تایر برخوردار است [۱۲]. دو ویژگی مصرف سوخت و فرسودگی تایر به دلیل اثرات نامطلوب زیست محیطی و هزینه‌های اقتصادی برای مصرف‌کننده، اهمیت فزاینده‌ای پیدا کرده است[۱۳].

در دهه‌های گذشته، علاقه فزاینده‌ای به کامپوزیت‌های پلیمری، به ویژه با معرفی نانوکامپوزیت‌ها، وجود داشته است. مفهوم نانوکامپوزیت برای ترموپلاستیک‌ها، الاستومرها، و ترموست‌ها تعریف می‌شود. امروزه، مقدار زیادی از نانوذرات مختلف مانند نانولوله کربنی، نانو سیلیکا، و نانورس موجود است که اغلب در زمینه‌های پلیمری به عنوان عوامل تقویت‌کننده استفاده می‌شوند. افزودن نانوذرات به مواد الاستومری یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای بهبود خواص زمینه‌ی میزبان است. با توجه به گستردگی استفاده از نانوکامپوزیت‌ها در آج تایر، بررسی تأثیر این مواد بر مقاومت غلتشی و قدرت چنگ زنی در شرایط خیس از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

افزودن پرکننده‌هایی مانند نانوسیلیکا یا نانوذرات دوده به یک زمینه پلیمری، منجر به یک ماده نانوکامپوزیت با رفتار بهبود یافته می‌شود که در عین حال، رفتار پیچیده‌ای به‌شدت متفاوت با مواد پلیمری خالص [۱۴] بروز می‌دهد. منشا چنین رفتاری به تعامل بین پلیمر- پرکننده[۱۵, ۱۶] و پرکننده-پرکننده[۱۷-۱۹] مرتبط است. در مقایسه با دوده، سیلیکا اضافه شده در ترکیب لاستیک باعث اتلاف انرژی کمتری در هنگام تغییر شکل می‌شود اگرچه مقاومت سایشی کمتری دارد. تقویت از طریق ادغام نانوذرات (پرکننده‌ها) در یک زمینه پلیمری، یک روش صنعتی رایج است که خواص مکانیکی مواد کامپوزیتی را تا حد زیادی بهبود می دهد[۲۰, ۲۱]. دوده و سیلیکا به عنوان پرکننده‌های اصلی تقویت‌کننده استفاده شده است که باعث افزایش کارایی لاستیک ها می شود. از آنجایی که هر کدام از این پرکننده‌ها دارای مزایای خاص خود است، استفاده از مخلوط سیلیکا و دوده (با نسبت مناسب) می‌تواند خواص مکانیکی و دینامیکی و رفتار پخت لاستیک‌ها را افزایش دهد.

---

[۳]- Trade off

اگرچه دوده خواص تقویتی برجسته‌ای در بستر لاستیکی نشان می‌دهد اما برهم‌کنش سطحی ضعیف و لغزش زنجیرهای لاستیک روی سطح دوده، کارایی آن را در تقویت کاهش می‌دهد. برای مقابله با چنین پدیده‌ای، از سیلیکا، که واکنش‌پذیری سطحی بالایی در ارتباط با عامل جفت‌کننده سیلان دارد، استفاده می‌شود. به این ترتیب، می‌توان از پیوندهای شیمیایی قوی در مرز لاستیک و سیلیکا اطمینان حاصل کرد. استفاده از سیلیکا و اصلاح سطحی آن منجر به افزایش کارایی در اختلاط، پخت و تقویت ترکیبات لاستیکی می‌شود. بنابراین به دلیل کارایی بالای ترکیب هیبریدی سیلیکا و دوده، استفاده همزمان این ذرات به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است[۲۲].

اخیرا دانشمندان و مهندسان مطالعات گسترده‌ای بر استفاده از نانوسیلیکا به عنوان جایگزین دوده انجام داده اند. در یکی از این تحقیقات لینقان کونگ و همکاران[۲۳] اثر میزان نانوسیلیکا و اصلاح سطحی آن بر رفتار مخلوط لاستیک های استایرن-بوتادی‌ان و بوتادی‌ان بررسی نموده‌اند. آنها یافتند با افزودن نانوسیلیکا تا ۷۰ قسمت در صد قسمت لاستیک استحکام مکانیکی آن تا هزار درصد و کرنش نقطه‌ی شکست آن تا چهارصد درصد افزایش می‌یابد. همچنین یافته‌های آنها نشان از آن دارد که با اصلاح سطحی نانوذرات خواص مکانیکی نانوکامپوزیت حاصل تا ۳۰ درصد افزایش می‌یابد. در تحقیق دیگری توسط ننگ یی و همکاران[۲۴] آنها یافتند که اصلاح سطحی نانوسیلیکا سبب بهبود پخش آن در بستر لاستیکی می گردد. آنها بهبود پخش نانوسیلیکا را با آزمون میکروسکوپ الکترونی عبوری بررسی کردند. تحقیقات آنها نشان داد که با بهبود پخش نانوذرات خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها افزایش می‌یابد. اما نکته اصلی این تحقیقات عدم بررسی مصرف انرژی در آمیزه‌های ارائه شده است که موضوع اصلی این تحقیق قرار گرفته است.

در این پژوهش فرمولاسیون استفاده شده در گروه صنعتی بارز برای آج تایر به عنوان مبنا در نظر گرفته شده و خواص سامانه آج تایر با افزودن مقادیر متفاوت نانوذره‌های سیلیکا در شرایط اختلاط یکسان بررسی شده است. پایه تایر از لاستیک‌های استایرن بوتادی‌ان محلولی و بوتادی‌ان استفاده شده است. نانو ذرات مورد استفاده، نانو ذرات سیلیکا و نانوذرات دوده هستند. برای این منظور نانوذرات سیلیکا در ۴ مقدار متفاوت به ترکیبات لاستیک افزوده شده است. آمیزه‌های ساخته شده تحت آزمون‌های متفاوت گذاشته شد تا خواص فیزیکی و مکانیکی و ریزساختار مربوط به آمیزه‌ها بررسی شود. همچنین در این مقاله با توجه به اهمیت مقاومت غلتشی یکی از عوامل موثر بر آن یعنی اثر ضخامت بر مقاومت غلتشی که معادل میزان ساییدگی تایر است، مورد مطالعه قرار گرفت و آزمون مقاومت غلتشی برای نشان دادن میزان نانوسیلیکا و اثر ضخامت انجام شد و نتایج ارائه شده است.

۲-مواد و روش‌ها

در این بخش، مواد مورد استفاده و مشخصات آن‌ها به همراه دستگاه‌های استفاده شده معرفی می‌گردد. علاوه بر این روش تهیه نمونه‌ها و آزمون‌های مورد نیاز به تفصیل شرح داده می‌شود.

۲-۱- مواد

۲-۱-۱- لاستیک استایرن بوتادی‌ان محلولی

لاستیک استایرن بوتادی‌ان محلولی، پرکاربردترین لاستیک مصنوعی در صنعت تایرسازی است و کوپلیمری از استایرن و بوتادی‌ان است. گرید مورد استفاده در این پژوهش از روش محلولی تهیه شده است که نسبت به استایرن بوتادی‌ان امولسیونی دارای ساختار خطی‌تری است و باعث نفوذ بهتر درون توده‌های سیلیکا می‌شود و عملکرد آمیزه را بهبود می‌بخشد. از دیگر خواص این لاستیک می‌توان به قابلیت کنترل وزن مولکولی و وجود شاخه‌های جانبی کوتاه اشاره کرد. دمای انتقال شیشه آن ۳۴- درجه سانتی‌گراد است. درصد باند استایرن ۲۰/۵ درصد و مقدار وینیل ۵۵/۵ درصد است. وزن مخصوص آن ۰/۹۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب است.

۲-۱-۲- لاستیک بوتادی‌ان

لاستیک بوتادی‌ان لاستیکی غیرقطبی و مصنوعی است که اغلب درترکیب با استایرن بوتادی‌ان استفاده می‌شود. لاستیک بوتادی‌ان مورد استفاده در این پژوهش محصول شرکت یوسوپلان کره‌جنوبی بوده و از نوع NdBR-40 است. این لاستیک دارای سیس بسیار

بالایی بوده و دارای بیش از ۹۷ درصد، محتوای cis-۱،۴ است. از ویژگی‌های آن می‌توان به مقاومت در برابر سایش عالی، حرارت‌زایی خوب و انعطاف‌پذیری بالا اشاره کرد، که از ویژگی‌های مورد نیاز برای تایر است. استفاده از این ماده باعث کاهش مقاومت غلتشی تایر می‌شود، ولی در مقابل خاصیت چسبندگی را نیزکاهش می‌دهد. بنابراین لازم است تا اعتدال در مصرف این لاستیک رعایت شود. لاستیک بوتادی‌ان استفاده شده در دمای انتقال شیشه ۱۰۰- درجه سانتی‌گراد دارد و درصد کشیدگی آن ۵۲۰ می‌باشد.

۲-۱-۳- دوده

دوده ذره‌ای کربنی با ساختار مولکولی بی‌شکل است. اغلب دوده صنعتی که در دنیا استفاده می‌شود، از روش کوره‌ای و به صورت گرانول شده تولید می‌شود. دوده اثر تقویت‌کنندگی بسیار خوبی به تایر می‌دهد که باعث افزایش مقاومت سایشی، استحکام کششی و طول عمر تایر می‌شود. انتخاب نوع مناسب از دوده صنعتی اثر به‌سزایی در کیفیت آمیزه لاستیک تولید شده و به تبع آن، ایجاد خواص مورد انتظار از محصول نهایی خواهد داشت. در این پژوهش از این دوده N550 استفاده شده است. مشخصات فنی دوده‌ی استفاده شده در جدول ۱ ارایه شده است.

جدول ۱: مشخصات فنی دوده مورد استفاده

N550	
360	چگالی[٤](کیلوگرم بر متر مکعب)
43	عدد یدی[٥]
57	قدرت رنگ

۲-۱-٤- نانوسیلیکا

نانوسیلیکا با حفره‌های نانویی بر سطح خود، به صورت یک نانوساختار کاملا خالص سنتز می‌شود. این ماده کاربردهای فراوانی به عنوان تقویت‌کننده، غلظت‌دهنده و پرکننده در صنایع مختلفی نظیر تایرسازی، رنگ و پوشش و خودروسازی دارد. استفاده از نانوذرات سیلیکا موجب افزایش طول عمر تایر، کاهش مصرف سوخت و فرمان‌پذیری بهتر خودرو می‌شود. نانوسلیکا مورد استفاده در این پژوهش با نام ULTRASIL 7000 GR به عنوان تقویت کننده در لاستیک استفاده می‌شود. این نانو سیلیکا به راحتی پراکنده می‌شود و اثر تقویت‌کنندگی بسیار زیادی دارد. سطح ویژه در دسترس این نانوذره برابر با ۱۶۷ مترمربع بر گرم است و متوسط قطر این ذرات ۱۰۰ نانومتر است.

۲-۱-۵- سیلان

سیلان با نام تجاری Si69 و نام شیمیایی Bis(triethoxysilylpropyl)tetrasulfide به منظور کاهش مقاومت غلتشی و بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی در پخت آمیزه مورد استفاده قرار می‌گیرد.Si69 می‌تواند به طور قابل توجهی باعث بهبود استحکام کششی، مقاومت کششی و مقاومت سایشی شود. علاوه بر این، می‌تواند با کاهش دادن گرانروی، فرآیند تولید لاستیک را بهبود بخشد.

۲-۲- تهیه نمونه‌ها

نمونه‌های استفاده شده در این پژوهش با همکاری آزمایشگاه کنترل کیفیت گروه صنعتی بارز و بر اساس فرمولاسیون استفاده شده در محصولات این شرکت تهیه شده است. به منظور تهیه این نمونه‌ها، مواد مطابق با ترکیب‌بندی مورد نظر وزن شده و برای اختلاط در داخل مخلوط کن مدل Mixtron BB2 ساخت شرکت کوبلکو ژاپن ریخته شدند و به مدت ۱۵۰ ثانیه عمل اختلاط انجام شد. دمای مخلوط حاصل درهنگام تخلیه برابر با ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد ثبت شده است. مواد تخلیه شده از مخلوط کن اول در مخلوط‌کن دو غلتکه

[٤]Density

[٥]Iodine Number

ثانویه قرار داده شد تا آمیزه ورقه‌ای شکل بدست آید. این دستگاه شامل دوغلتک است که در جهت‌های مخالف یکدیگر می‌چرخند و فاصله بین این دو غلتک باعث ورقه‌ای شدن آمیزه می‌شود.

آمیزه ورقی شکل حاصل، به مدت ۲۴ ساعت در هوای آزاد خنک شد. پس از آن ۸۰۰ گرم از این آمیزه بر روی ترازو جدا شده و با مواد لازم، مانند سیلان و گوگرد، مجدداً برای پخت به مدت ۲۴۰ ثانیه داخل مخلوط کن ریخته شد. دمای این مخلوط درهنگام تخلیه ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بود که مانند مرحله قبل برای ورقی شکل شدن در مخلوط کن دو غلتکه گذاشته شد و سپس ۲۴ ساعت درهوای آزاد قرارگرفت. پس از آن برای هر آزمون، با در دست داشتن قالب مورد نیاز آزمون، مقداری از آمیزه برای قالب‌گیری درون دستگاه پرس گرم مدل SH PFLP۴۰۰/۳۰ ساخت شرکت جب بی تی انگلستان گذاشته شد و به مدت ۲۰ دقیقه و در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد پخته شد. با استفاده از این روش، ۱۲ آمیزه مطابق جدول ۲ به ازای مقادیر متفاوت از نانوسیلیکا (۰، ۱، ۳ و ۵ (phr)) و دوده N550 و با ثابت در نظر گرفتن دیگر مواد مطابق فرمولاسیون آج تایر سواری گروه صنعتی بارز تهیه شد. نوع دوده مورد استفاده و میزان نانو سیلیکا در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲: مشخصات آمیزه‌های تهیه شده در این پژوهش

نام آمیزه	نوع دوده	مقدارنانوسیلیکا(phr)
T994-5-0	N550	۰
T994-5-1	N550	۱
T994-5-3	N550	۳
T994-5-5	N550	۵

۲-۳- آزمون‌ها

۲-۳-۱- آزمون کشش

این آزمون یکی از متداول ترین آزمون‌هایی است که برای تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های لاستیکی در آزمایشگاه‌ها استفاده می‌شود. اگر آمیزه تحت کشش قرار گیرد، یا تغییر شکل مکانیکی داشته باشد، این تغییر شکل را کرنش اعمال شده به ماده می‌نامند. چندین حالت شامل کشش ، فشار ، برش و پیچش برای بیان کرنش وجود دارد که رایج‌ترین حالت مورد کاربرد در آزمایشگاه لاستیک، کشش است. در این آزمون یک قطعه از آمیزه تا جایی کشیده می‌شود که پاره شود. یک قطعه لاستیکی تا قبل از پارگی ممکن است تا ۹۰۰ درصد نیز ازدیاد طول از خود نشان دهد.

دمای آزمایشگاه در هنگام آزمایش ۲۳ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۲۰ تا ۵۰ درصد بوده است. آزمون از روش BQMD-178 و استاندارد مرجع DIN 53504 با دو بار تکرار انجام شد. آزمون مذکور در گروه صنعتی بارز انجام شد.

۲-۳-۲- آزمون رئومتری

علم اندازه‌گیری خواص جریانی پلیمرها را رئولوژی می‌گویند. از آنجا که قالب‌گیری تایر مستلزم جریان یافتن پلیمرها است و هم‌چنین تاثیرگذاری رفتار رئولوژیکی بر خواص مکانیکی تایر، اندازه‌گیری خواص رئولوژیکی آمیزه‌ها بسیار مهم است. رئومتر دستگاهی است که با ایجاد جریان همراه با اعمال تنش یا کرنش کنترل شده به ماده، تنش یا کرنش پاسخ را اندازه‌گیری می‌کند.

در این پژوهش برای آزمون رئومتری از دستگاه رئومتر ALPHA 2000 MDR / Rotorless sealed و Options D با روش آزمون BQMD-4685 و استاندارد ASTM D5289 گروه صنعتی بارز کرمان استفاده شده است. نمونه‌ها در مدت زمان ۵ دقیقه و در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد با دامنه کرنش ۰/۵ درصد و بسامد ۱/۷ هرتز در دستگاه قرار داده شد.

۳-۳-۲- آزمون مقاومت غلتشی

برای این آزمون نیاز به دستگاهی بود تا بتواند مقاومت غلتشی آمیزه را اندازه‌گیری کند. به همین منظور طراحی این دستگاه را انجام داده که شامل یک صفحه به اندازه ۱۲ سانتی‌متر در ۵۰ سانتی‌متر بوده برای قرار گرفتن آمیزه بر روی آن و میله‌هایی به طول ۴۰ سانتی‌متر برای نصب دستگاه به میز، یک غلتک برای حرکت روی آمیزه و نوارهایی که وزنه را به غلتک وصل کنند.

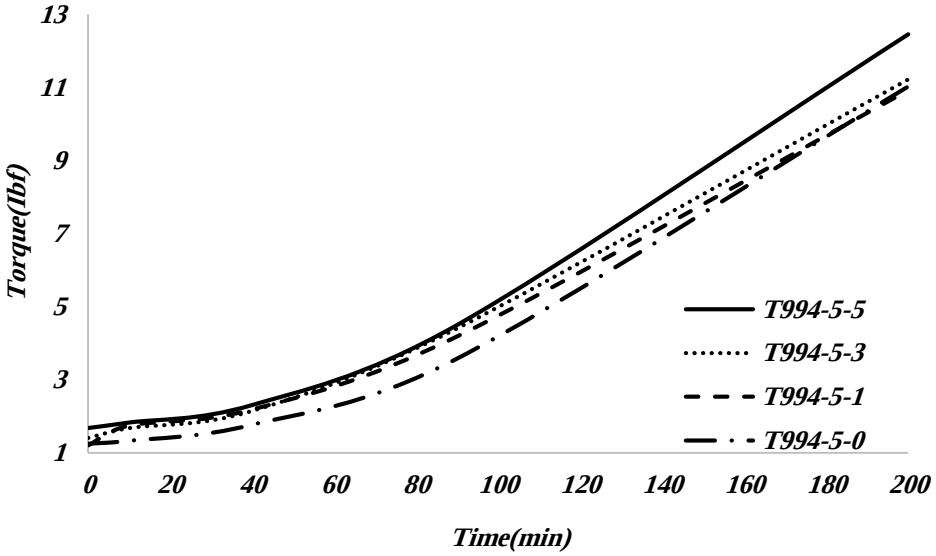
برای این دستگاه قالب‌های آهنی با ضخامت های ۱ تا ۵ میلی‌متر با اندازه ۲۰در۲۰برش داده شده که درون آن یک مستطیل به ضخامت ۱۰ در ۱۵ خالی شده‌است که آمیزه درون آن قرار گرفته و دو ورق آهنی به ضخامت ۵ میلی‌متر در اندازه ۲۰ در۲۰ در زیر و روی آن قرار داده شد و درون دستگاه پرس گرم به مدت سه دقیقه و دمای ۱۶۰درجه گذاشته شد و آمیزه آماده شده که به شکل یک مستطیل ۱۰ در ۱۵ بوده برای سرد شدن در هوای آزاد گذاشته شد. در این قسمت با دوده N550، آمیزه‌هایی با مقدار سیلیکای ۰، ۱ ، ۳ و ۵ قسمت در پنج ضخامت مختلف به آزمون گذاشته شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- رئولوژی آمیزه‌ها

خواص رئولوژیکی به وزن مولکولی، ساختار پلیمر، دما، سرعت برش و میزان افزودنی‌ها وابسته است. گرانروی خاصیتی از ماده است که ماده به سبب آن در مقابل تغییر شکل پیوسته از خود مقاومت نشان می‌دهد، هر چه گرانروی سیال بیشتر باشد، سیال در مقابل نیروی وارده مقاومت بیشتری نشان می‌دهد و سخت‌تر حرکت می‌کند. در این پژوهش رفتار رئولوژیکی آمیزه‌ها، به ازای مقادیر مختلف از نانوسیلیکا اندازه‌گیری شده‌است تا تاثیر میزان نانوسلیکا بر گرانروی بررسی شود.

برای بررسی تاثیر میزان نانوسیلیکا بر گرانروی آمیزه‌ها، در بخش دوم آزمون رئومتری، اثر میزان نانوسیلیکا به عنوان پرکننده هیبریدی بر گرانروی بررسی شد. برای این منظور چهار آمیزه به ازای چهار مقدار متفاوت ۰، ۱، ۳ و ۵ (phr) از نانوسیلیکا و نانودوده N550 تهیه شده و آزمون رئومتری بر روی آن‌ها انجام شد. نتایج حاصل از انجام آزمون رئومتری بر روی هر یک از این آمیزه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: اثر میزان نانوسیلیکا بر گرانروی آمیزه‌ها

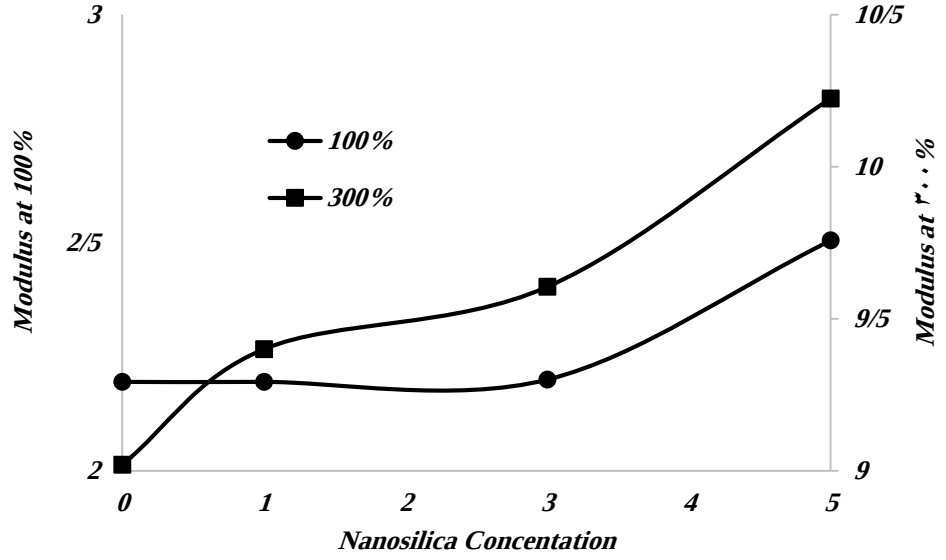
حضور مقدار کمی از نانوسیلیکا در کنار نانودوده می تواند موجب هم‌افزایی شده و تاثیر به سزایی بر خواص نانوکامپوزیت حاصل داشته باشد. با توجه به اینکه سیلیکا و دوده هر دو قطبیت سطحی بالایی دارند، موجب برهم‌کنش بیشتر آنها می‌شود. حضور مقدار کم از نانوسیلیکا در مقایسه با نانودوده در سامانه، می‌تواند به پخش و خرد شدن بیشتر دوده کمک نماید. همچنین با تغییر در سینتیک

واکنش پخت و برهم‌کنش بین زنجیرهای پلیمر با سایر اجزای آمیزه، موجب تغییر در خواص نانوکامپوزیت می‌شود. به همین علت است که با افزودن مقادیر بیشتر نانوسیلیکا، گرانروی بیشتر می‌شود. همانگونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت نانوسیلیکا، گرانروی آمیزه افزایش می‌یابد و آمیزه T994-5-5 (آمیزه دارای ۵ قسمت سیلیکا) بیشترین گرانروی را دارد. این رفتار در مطالعات دیگر محققان نیز قابل مشاهده است [۲۵].

۳-۲- آزمون کشش

آزمون کشش با ساخت یک قطعه آزمون به شکل دمبل با ضخامت حدود ۲ میلی‌متر آغاز می‌شود. قطعه آزمون در دستگاه آزمون کششی قرار گرفته و کشیده می‌شود. نیروی مورد نیاز جهت ازدیاد طول در زمان کشش اندازه‌گیری می‌شود. از میزان تنش به دست آمده قبل از شکست نمونه می‌توان مدول را محاسبه نمود.

آنچه در آزمون کشش در مقایسه با آزمون رئومتری می‌توان گفت، درصد اعمال کرنش است. در آزمون رئومتری، کرنش اعمالی بسیار کم است و طی اعمال کرنش، ماده در ناحیه خطی خواص می‌ماند. در ناحیه‌ی خطی مواد، خواص آن‌ها مستقل از کرنش اعمالی هستند. با افزون درصد بسیار زیاد از ماده‌ی تقویت‌کننده با مقیاس نانومتری به لاستیک، احتمال تشکیل شبکه‌ی سه‌بعدی از آنها بسیار بالا است[۲۶]. از آنجا که تماس ذرات مقیاس نانو با یکدیگر از نوع فیزیکی است، شبکه ذرات افزودنی بسیار شکننده بوده و شکننده بودن این شبکه‌ی ذرات، رفتار غیرخطی به سامانه‌ی نانوکامپوزیتی القا می‌کند[۲۷]. به‌عبارت دیگر، طول ناحیه‌ای که رفتار نانوکامپوزیت در آن رابطه خطی با کرنش دارد، کوتاه می‌گردد. در نهایت می‌توان گفت که از آنجا که کرنش اعمالی در آزمون رئومتری بسیار کم بود، احتمال اینکه آمیزه در آن آزمون رفتار خطی داشته باشد بسیار بالا است. در حالی که کرنش اعمالی در آزمون کشش، سبب تغییر شکل شبکه ذرات در راستای اعمال کرنش می‌شود. بنابراین می‌توان گفت در آزمون رئومتری، خواص شبکه‌ی پرکننده عامل اصلی کنترل‌کننده می‌باشد.



شکل ۲: مدول در کشش‌های ۱۰۰ و ۳۰۰ درصد برای نانودوده‌های مختلف در میزان های متفاوت از نانوسیلیکا

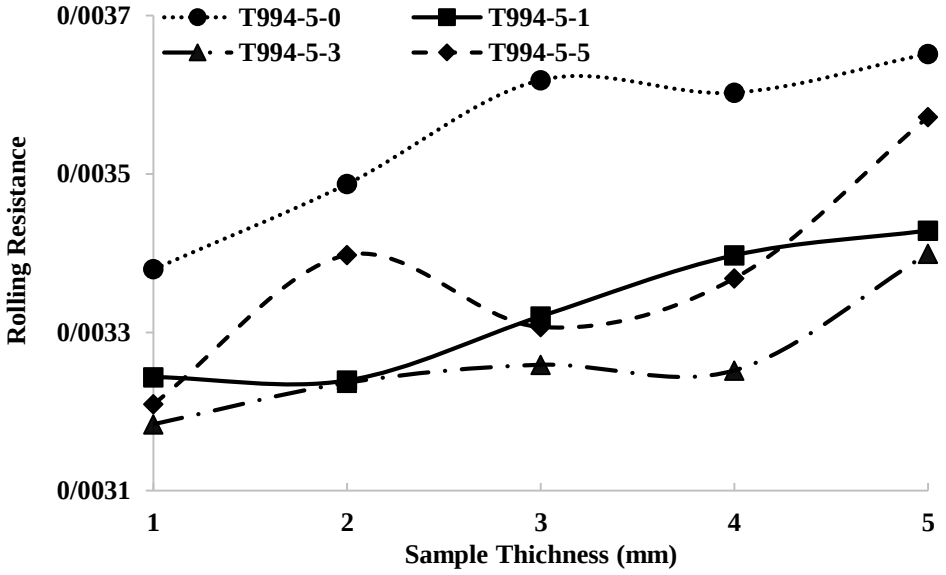
همانطور که از این نمودارها مشخص است، با افزودن میزان نانوسیلیکا، مدول ۱۰۰ درصد و ۳۰۰ درصد افزایش می‌یابد. در کرنش‌های بالا ساختار پیوسته از ذرات نانو وجود ندارد. بنابراین خواص سامانه تابع برهم‌کنش بین زنجیرهای پلیمری و سطح نانوذرات و حرکت زنجیرهای پلیمری در بین خودشان است. افزودن مقدار نانوسیلیکا در این کسر حجمی، تاثیر فراوانی بر ریزساختار سامانه نخواهد داشت؛ اما سطح دردسترس برای جذب زنجیرهای پلیمری را افزایش می‌دهد و از آنجا که جذب زنجیرهای پلیمرها بر سطح نانوسیلیکا حرکت آنها را کندتر می‌کند[۲۸]، دارای خواص متفاوتی هستند. بنابراین با افزودن مقدار کمی نانوسیلیکا، علاوه بر بهبود خواص رئولوژیکی برای ناحیه‌ی خطی که در شکل ۱ بررسی شده است، خواص مکانیکی برای ناحیه‌ی غیرخطی نیز افزایش می‌یابد.

۳-۳- آزمون مقاومت غلتشی

طبقه بندی لاستیکها با توجه به مقاومت‌های غلتشی پیش فرض این است که مقاومت غلتشی را می‌توان به طور دقیق اندازه‌گیری کرد. مقاومت غلتشی ناشی از تغییر شکل تایر هنگام غلتیدن روی سطح است [۲۹]. دو نوع جاده‌ای و آزمایشگاهی برای اندازه گیری وجود دارد. در روش جاده‌ای سازندگان لاستیک از امکانات چرخ و جاده برای اندازه‌گیری‌ها، طبق استاندارد استفاده می‌کنند. در روش آزمایشگاهی، اندازه گیری بر روی درام های فولادی انجام می‌شود. با این حال، بدیهی است که سطح فولادی برای شرایط جاده واقعی معرف نیست، بنابراین اندازه‌گیری‌ها تحت تأثیر سطح مسیر نامناسب قرار می‌گیرند. در دو روش موجود می‌بایست تایر نهایی ساخته شود. به همین علت در این پژوهش دستگاهی آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری مقاومت غلتشی آمیزه ساخته شده‌است. با توجه به اهمیت مقاومت غلتشی، آمیزه‌هایی با ترکیب‌بندی متفاوت به آزمون گذاشته شد که دو عامل اثرگذار؛ مقدارسیلیکا و ضخامت آمیزه بررسی شده‌اند.

در میان پرکننده‌هایی که برای تقویت لاستیک‌ها استفاده می‌شود، دوده و سیلیکا به مهم‌ترین افزودنی‌هایی تبدیل شده‌اند که می‌توانند به محصولات لاستیکی خواص بسیار مطلوبی مانند مدول، استحکام کششی، مقاومت سایشی و مقاومت غلتشی اعطا کنند. در مقایسه با دوده، سیلیکا تمایل زیادی به کلوخه شدن به دلیل گروه‌های سیلانول نشان می‌دهد که منجر به فرآیندپذیری ضعیف می‌شود. از این رو، فقط به عنوان بخش کوچکی از پرکننده در کاربردهای لاستیکی، به ویژه در آج تایر استفاده می‌شود.

در اینجا علاوه بر آمیزه‌ای که فقط دارای پرکننده دوده می‌باشد، سیلیکا در یک، سه و پنج قسمت به آمیزه‌ها افزوده شده‌است. این دو پرکننده می‌توانند یک شبکه پرکننده مشترک تشکیل دهند زیرا دارای ویژگی‌های انرژی سطحی کاملا متفاوتی هستند [۳۰]. پس دو شبکه پرکننده سلیکا-سیلیکا و دوده-دوده و مخلوطی از دو کلوخه مختلف پرکننده به احتمال زیاد تشکیل می‌شود، شبکه اولیه با یک نوع پرکننده تا حدی خراب شده و یا توسط سایر پرکننده‌ها که با هم ترکیب شده‌اند دچار مشکل می‌شوند. این ساز و کار از عوامل موثر بر مقاومت غلتشی می‌باشد پس مهم است تا اثر میزان نانوسیلیکا به طور دقیق با دستگاه مقاومت غلتشی اندازه‌گیری شود که در شکل ۳ می‌توان مشاهده کرد.



شکل ۳: اثر میزان نانوسلیکا بر مقاومت غلتشی در ضخامت های مختلف از نمونه

آنچه مشخص است با افزایش ضخامت آمیزه زمان غلتش زیاد شده است این یعنی انرژی اتلافی کمتر شده است. در نتیجه مقاومت غلتشی کاهش یافته است. این یافته نشان از این دارد با گذر عمر تایر و سایش آن مصرف انرژی آن بیشتر می شود. همچنین در این

شکل مشاهده می‌شود که نمونه‌های دارای نانوسلیکا از نمونه‌ی که فاقد آن است زمان غلتش کمتری دارند یعنی غلتک زمان کمتری غلتش کرده‌است که نشان دهنده اتلاف بیشتر می‌باشد. این افزایش در مقاومت غلتشی با افزایش میزان سیلیکا می تواند نشان از افزایش مدول اتلافی در نمونه‌های حاوی نانوسیلیکا نسبت به مدول ذخیره‌ای باشد. بنابراین می‌توان گفت افزودن مقدار کمی از نانوسیلیکا سبب تقویت تایر شده اما مقاومت غلتشی آن را افزایش می‌دهد. افزایش مقاومت غلتشی با افزودن سیلیکا به دلیل افزایش مدول اتلافی است. این افزایش بیشتر مدول اتلافی نسبت به ذخیره‌ای می‌تواند به دلیل تغییر در ساختار شبکه پرکننده با حضور نانوسیلیکا باشد. این تغییر می‌تواند باعث تقویت ساختار یا ایجاد ساختار گسترده‌تر باشد.

۴- نتیجه گیری

با توجه به اهمیت محیط زیست و ضرورت کاهش انتشار گاز دی اکسید کربن، کاهش مقاومت غلتشی یکی از دغدغه‌های اصلی مهندسین و دانشمندان در صنعت تایر است. یکی از راه‌های کاهش مقاومت غلتشی، تغییر در فرمولاسیون آمیزه با استفاده از مواد پرکننده‌ی نانو و استفاده‌ی همزمان از انواع نانوذرات است. تغییر در فرمولاسیون آمیزه تاثیر به سزایی بر شرایط فرآیندی و خواص مکانیکی تایر نهایی دارد. در این تحقیق میزان نانوسیلیکا بر خواص رئولوژیکی آمیزه بررسی شد. نتایج رئولوژیکی آمیزه نشان از افزایش گرانروی با افزایش میزان نانوسیلیکا دارد. افزایش گرانروی به تشکیل ساختار مستحکم‌تر از نانوذرات با افزایش میزان نانوسیلیکا ربط داده‌شد.

علاوه بر این نقش نانوذرات بر خواص مکانیکی آمیزه‌ها مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. نتایج مطالعات خواص مکانیکی نشان از افزایش مدول صد و سیصد درصد با افزایش میزان نانوسیلیکا داشت. افزایش مدول با افزایش میزان نانوسیلیکا بیان‌گر افزایش سطح در دسترس زنجیرهای پلیمری برای جذب بر سطح نانوذرات است و می‌توان گفت که زنجیرهای پلیمری جذب شده دارای خواص مکانیکی بالاتری نسبت به پلیمرهای آزاد هستند.

اثر میزان نانوسیلیکا و ضخامت که بیانگر عمر تایر است بر مقاومت غلتشی مطالعه شده است. مشاهده شد با افزایش میزان نانوسیلیکا مقاومت غلتشی افزایش یافته است که این نشان از افزایش بیشتر مدول اتلافی نسبت به مدول ذخیره‌ای است. همچین می‌توان گفت با گذر عمر تایر مقاومت غلتشی افزایش یافته است که این نشان از افزایش میزان مصرف سوخت خودرو خواهد بود.

۵- مراجع

1. Khanger, R. and A. Bardhan, Challenges in Developing Low Rolling Resistance Tyre. 2015. 1.
2. Derafshpour, S., A. Mardani, and M. Valizadeh, Evolutionary algorithms application for improving the tire rolling resistance based on Wismer–Luth model. Neural Computing and Applications, 2019. 32(9): p. 5173-5183.
3. Steyn, W.J., et al., Vehicle Rolling Resistance as Affected by Tire and Road Conditions. Geo-China 2016: p. 129-136.
4. Ejsmont, J.A., et al., Analysis of Rolling Resistance of Tires with Run Flat Insert. Key Engineering Materials, 2013. 597: p. 165-170.
5. Zhang, P., M. Morris, and D. Doshi, Materials development for lowering rolling resistance of tires. Rubber Chemistry and Technology, 2016. 89.
6. Akutagawa, K., Technology for Reducing Tire Rolling Resistance. Tribology Online, 2017. 12(3): p. 99-102.
7. Veiga, V.D.A., et al., Tire tread compounds with reduced rolling resistance and improved wet grip. Journal of Applied Polymer Science, 2017. 134(39): p. 45334.
8. Nikiel, L., et al., Filler Dispersion, Network Density, and Tire Rolling Resistance. Rubber Chemistry and Technology, 2001. 74: p. 249-259.

9. Ashraf, M., et al., Effects of Size and Aggregation/Agglomeration of Nanoparticles on the Interfacial/Interphase Properties and Tensile Strength of Polymer Nanocomposites. Nanoscale Research Letters, 2018. 13.
10. Gbologah, F.E., H. Li, and M.O. Rodgers, Demonstrating an Empirical Tool to Predict Fleet-Wide Heavy-Duty Vehicle Fuel-Saving Benefits from Low Rolling Resistance Tires. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2019. 2673(4): p. 361-372.
11. Bhatt, P. and U.K. Vates. Low Rolling Resistance Tires for E-Rickshaws for Increasing Range and Capacity. in Advances in Engineering Design. 2019. Singapore: Springer Singapore.
12. Aldhufairi, H.S., K. Essa, and O. Olatunbosun, Multi-Chamber Tire Concept for Low Rolling-Resistance. SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems, 2019. 12.(۲)
13. Taryma, S., et al., Road Texture Influence on Tire Rolling Resistance. Key Engineering Materials, 2013. 597: p. 193-198.
14. Davris, T., et al., Filler Size Effects on Reinforcement in Elastomer-Based Nanocomposites: Experimental and Simulational Insights into Physical Mechanisms. Macromolecules, 2016. 49(18): p. 7077-7087.
15. N. A. Habib, A.S.J., F. L. Hassan and N. I. Intan, Crosslinking Density Characteristics of a Nanocomposite Elastomer. Conference Series, 2021.
16. Kourki, H., et al., Modeling the rheological properties of highly nano-filled polymers. Journal of Composite Materials, 2017. 51(19): p. 2813-2824.
17. Bashir, M.A., et al., Effect of Carbon Black on Curing Behavior, Mechanical Properties and Viscoelastic Behavior of Natural Sponge Rubber-Based Nano-Composites. Key Engineering Materials, 2012. 510-511: p. 532-539.
18. Kourki, H., M. Mortezaei, and M.H. Navid Famili, Prediction of the viscoelastic response of filler network in highly nanofilled polymer composites. Journal of Composite Materials, 2015. 49(30): p. 3799-3807.
19. Kourki, H., et al., Mixing challenges for SiO2/polystyrene nanocomposites. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2017. 31(5): p. 709-726.
20. Sarkawi, S., et al., A review on reinforcement of natural rubber by silica fillers for use in low-rolling resistance tyres. 2015. 18: p. 203-233.
21. Mahdizadeh Farsangi, S., H. Kourki, and H. Moradi Shahrbabaki, Application of rheology as a tool to estimate the mixing quality of elastomeric nanocomposites and comparing with small-angle X-ray scattering microstructural study. Journal of Elastomers & Plastics, 2023. 0(0): p. 00952443231177694.
22. Fernandes, M.R.S., Sousa, Ana Maria Furtado de and Furtado, Cristina Russi GuimarãesRice husk ash, as filler in tread compounds to improve rolling resistance. Polímeros, 2017: p. 55-61.
23. Kong, L., et al., In situ assembly of SiO2 nanodots/layered double hydroxide nanocomposite for the reinforcement of solution-polymerized butadiene styrene rubber/butadiene rubber. Composites Science and Technology, 2018. 158: p. 9-18.

24. Ye, N., et al., Performance enhancement of rubber composites using VOC-Free interfacial silica coupling agent. Composites Part B: Engineering, 2020. 202: p. 108301.
25. Lolage, M., et al., Synergistic effects of silica and nanoclay on curing characteristics, processing behaviour and mechanical properties of solution styrene butadiene rubber (SBR)–based tire tread compounds. Emergent Materials, 2022. 5(3): p. 957-966.
26. Kourki, H. and M.H.N. Famili, Particle sedimentation: effect of polymer concentration on particle–particle interaction. Powder Technology, 2012. 221: p. 137-143.
27. Kourki, H., M. Mortezaei, and M.H. Navid Famili, Filler networking in the highly nanofilled systems. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2014. 29(8): p. 1047-1063.
28. Kourki, H., et al., Highly nanofilled polystyrene composite: Thermal and dynamic behavior. Journal of Elastomers & Plastics, 2016. 48(5): p. 404-425.
29. Bösl, R. and K. Meier, Measurement of Rolling Resistance and Energy Efficiency of Car Tires. ATZautotechnology, 2011. 11(6): p. 34-37.
30. Hu, H., et al., Effect of filler network on dynamic viscoelastic properties of uncured polymethylvinylsiloxanes filled with silica and carbon black. Journal of Applied Polymer Science, 2006. 99(6): p. 3477-3482