

## Nanocarbon Black's Effect on Tribological Properties of a Hybrid Filler Tire Tread Compound Containing Modified Silica

Mohammad Sadegh Soleymani, Mehdi Razzaghi Kashani\*, Elmira Vafakish

Department of Polymer Engineering, Faculty of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University,  
P.O. Box: 14115-114, Tehran, Iran

Received: 26 December 2023, accepted: 30 September 2024

### ABSTRACT

**Hypothesis:** The use of nanocarbon black as the secondary filler in the hybrid filler system improves the tribological properties of tire tread compounds, such as abrasion resistance and coefficient of friction (COF), due to improvements in dispersion of modified silica as the primary filler. This improvement in the dispersion of primary filler is attributed to the barrier effect of secondary filler in flocculation of primary filler.

**Methods:** A hybrid-filler system, modified silica as the primary filler with a fixed concentration and nanocarbon black with small concentrations as the secondary filler, were used to prepare tire tread compounds. The concentration of nanocarbon black was kept below its percolation threshold based on previous studies. Vulcanization rheometry, scanning electron microscopy, dynamic-mechanical analysis in time, strain, and temperature sweeps were carried out to find the optimum amount of nanocarbon black. Tribological properties, including COF and abrasion resistance, were measured for the above hybrid filler compounds.

**Findings:** The results showed that improvement in the dispersion of modified silica was achieved by addition of 0.75 part per hundred rubbers as the optimum amount of nanocarbon black in a hybrid-filler system, and reduction in the nonlinear viscoelastic behavior or the Payne effect in rubber compounds confirmed the morphological synergy in the optimum hybrid filler compound. Tribological tests including COF and abrasion resistance of vulcanized rubber compounds showed an improvement in the compound with optimal amount of nanocarbon black. The measurement of storage modulus in strain sweep showed reduced flocculation of modified silica after mixing in the presence of nanocarbon black. Tribological studies, including COF and abrasion resistance, showed improvement for the vulcanized compound with the optimum amount of nanocarbon black. Comparing the results with the reference compound, abrasion resistance was increased 30% and COF on wet concrete was improved 10% for the optimum compound.

#### Keywords:

hybrid filler,  
tire tread compound,  
nanocarbon black,  
modified silica,  
tribological properties

(\*To whom correspondence should be addressed.

E-mail: mehdi.razzaghi@modares.ac.ir

#### Please cite this article using:

Soleymani M.S., Razzaghi Kashani M., Vafakish E., Nanocarbon Black's Effect on Tribological Properties of a Hybrid Filler Tire Tread Compound Containing Modified Silica, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **37**, 141-151, 2024.

# اثر نانودوده بر خواص تریبولوژیکی آمیزه هیبریدی رویه تاینر دارای سیلیکای اصلاح شده

محمدصادق سلیمانی، مهدی رزاقی کاشانی\*، المیرا وفاکیش

تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی شیمی، گروه مهندسی پلیمر، صندوق پستی ۱۴۱۱۵-۱۱۴

دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۵، پذیرش: ۱۴۰۳/۷/۹

## چکیده

**فرضیه:** استفاده از نانوذرات دوده به عنوان پرکننده دوم در سامانه پرکننده‌های هیبریدی، با بهبود پراکنش ذرات سیلیکای اصلاح شده به عنوان پرکننده اول، موجب بهبود در برخی خواص تریبولوژیکی، شامل مقاومت در برابر سایش و ضریب اصطکاک آمیزه لاستیکی رویه تاینر می‌شود. این بهبود در پراکنش ذرات پرکننده اول به دلیل ممانعت ذرات پرکننده دوم از بازکلوخگی پرکننده اول است.

**روش‌ها:** در این پژوهش، از پرکننده‌های هیبریدی تقویت کننده، سیلیکای اصلاح شده به عنوان پرکننده اول به مقدار ثابت و دوده با ذرات نانومتری به عنوان پرکننده دوم به مقدارهای متغیر در تهیه آمیزه رویه تاینر سواری استفاده شد و مقدار نانودوده براساس تجربه‌های پیشین کمتر از آستانه تداخل نگه داشته شد. آزمون‌های ولکانش، میکروسکوپی الکترونی پویشی و آزمون‌های دینامیکی-مکانیکی در روبش زمان، کرنش و دما برای تعیین مقدار بهینه نانودوده به کار گرفته شدند. خواص تریبولوژیکی شامل ضریب اصطکاک و مقاومت سایشی در ترکیبات دارای پرکننده‌های هیبریدی اندازه‌گیری شد. **یافته‌ها:** نتایج نشان داد، پراکنش سیلیکای اصلاح شده با افزودن مقدار بهینه ۰/۷۵ قسمت وزنی نانوذرات دوده در سامانه هیبریدی با بهبود همراه بوده و کاهش رفتار گران‌روکشسان غیرخطی یا پدیده Payne در آمیزه دارای مقدار بهینه از پرکننده دوم نیز وجود هم‌افزایی شکل‌شناختی را تأیید می‌کند. همچنین، آزمون اندازه‌گیری مدول ذخیره با روبش زمان، کاهش بازکلوخگی سیلیکای اصلاح شده پس از اختلاط در مجاورت نانوذرات دوده را نشان داد. نتایج آزمون‌های تریبولوژیکی شامل ضریب اصطکاک و مقاومت سایشی آمیزه لاستیکی ولکانیده نیز بهبود در نمونه را با مقدار بهینه نانوذرات دوده نشان داد. مقایسه نتایج این آزمون‌ها با نمونه مرجع، حدود ۳۰٪ بهبود مقاومت سایشی و حدود ۱۰٪ بهبود اصطکاک در سطح بتن خیس را در نمونه بهینه مشخص کرد.

## واژه‌های کلیدی

پرکننده هیبریدی،  
آمیزه رویه تاینر سواری،  
نانودوده،  
سیلیکای اصلاح شده،  
خواص تریبولوژیکی

\* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:  
mehdi.razzaghi@modares.ac.ir

## مقدمه

پرکننده‌های تقویت‌کننده نقش مهمی در عملکرد آمیزه‌های لاستیکی دارند و معمولاً در مقادیر بسیار بیشتر از آستانه تداخل (percolation threshold) استفاده می‌شوند. با وجود این، پراکندگی پرکننده‌های تقویت‌کننده در ماتریس لاستیک ناپایدار است و بازکلوخگی با اثرگذاری نامناسب مانند ویژگی‌های گران‌روکشسان غیرخطی با نام اثر Payne ایجاد می‌کند که بر ویژگی‌های عملکردی تأیر مانند مقاومت سایشی و چنگ‌زنی روی سطوح خشک و مرطوب اثرگذار است. رفتگی (wear) مکانیکی تأیرها متأثر از اصطکاک بین لاستیک رویه تایلر و جاده به‌منظور انتقال نیرو و سازوکار رشد ترک خستگی در لاستیک رویه تایلر برای جداشدن ذرات است. هرچقدر اتلاف دینامیکی-مکانیکی در لاستیک بیشتر باشد، مقاومت آن در برابر رشد ترک بیشتر است. بخش عمده اتلاف در لاستیک‌های بسیار پر شده به مقدار شبکه پرکننده وابسته است. پرکننده افزون بر اتلاف در فصل مشترک لاستیک-ذره، از راه تغییر مسیر ترک در حال رشد از حالت مستقیم نیز از رشد ترک‌ها جلوگیری می‌کند [۱]. انبوهه‌ها (aggregates) و کلوخه‌های (agglomerates) پرکننده در اثر افزایش تغییر شکل در لاستیک و لکانیده قابلیت شکست و اتلاف انرژی دارند. در نتیجه، رفتار گران‌روکشسان غیرخطی رویه تایلر، در کرنش‌های زیاد در اثر شبکه پرکننده تقویتی و اتلاف در اثر شکست آن در کرنش‌های زیاد ایجاد می‌شود. با افزایش مقدار اتلاف انرژی، مقاومت غلتشی و مقاومت سایشی نیز افزایش می‌یابد [۲]. مقدار پراکندگی پرکننده‌ها حین اختلاط و بازکلوخگی یا تجمع دوباره آن‌ها هنگام ذخیره‌سازی آمیزه و به‌ویژه حین ولکانش، بر شبکه پرکننده و در نهایت بر خواص نهایی آمیزه‌های لاستیکی اثرگذار است. معمولاً بهبود یک عملکرد به کاهش دیگری منجر می‌شود. به‌عنوان مثال، اتلاف دینامیکی موجب افزایش مقاومت غلتشی اما کاهش مقاومت رفتگی تأیر می‌شود که مرتبط با تعامل بین رفتار کشسان و اتلافی آمیزه با به‌کارگیری پرکننده تقویتی است. برای کاهش مقاومت غلتشی باید درباره بهینه‌سازی ساختار شبکه پرکننده که ناشی از برهم‌کنش پرکننده-پرکننده و پلیمر-پرکننده است، مطالعه و بررسی کرد. پراکنش بهتر ذرات پرکننده و در نتیجه کوچک‌تر بودن ابعاد کلوخه‌ها موجب کاهش اتلاف در آمیزه می‌شود. امروزه، راه‌های متنوعی از جمله، استفاده از پرکننده سیلیکای اصلاح‌شده با سیلان دوامالی در طراحی آمیزه رویه تایلر سبز، استفاده از الاستومرهای نوترکیب و به‌کارگیری پرکننده‌های دوگانه برای برقراری توافق نسبی بین این رفتار مطرح شده است. آمیزه رویه تایلر دارای سیلیکا، چنگ‌زنی روی سطح خیس را بهبود می‌دهد. اما به‌طور کلی، مقدار رفتگی بیشتری

نسبت به آمیزه‌های دارای دوده دارد [۳-۵].

افزودن پرکننده دوم در مقادیر کم که بتواند مقدار بازکلوخگی یا انباشتگی پرکننده اول را کاهش دهد و پراکندگی حاصل از اختلاط را حفظ کند، برای طراحی آمیزه لاستیکی حائز اهمیت است. اگر پرکننده دوم این هم‌افزایی شکل‌شناسی را در آمیزه ایجاد کند، از این روش، می‌توان برای بهبود خواص دینامیکی و مکانیکی، کاهش اتلاف یا بهبود خواص الکتریکی یا خواص مدنظر در آمیزه‌های مصرفی در تایلر سازی بهره برد [۶،۷]. هنگام استفاده از دو پرکننده دو حالت ممکن است، رخ دهد؛ در حالت اول خواص اندازه‌گیری‌شده از آمیزه متناسب با مقدار هر یک از پرکننده‌ها تغییر کرده و هر یک نقش خود را در تعیین خواص آمیزه ایفا می‌کنند که به آن پرکننده دوگانه گفته می‌شود. در حالت دوم که اهمیت بسیاری دارد، به زمانی مربوط است که با افزودن پرکننده دوم خواص به‌صورت خطی تغییر نکند و در مقادیری از پرکننده دوم، هم‌افزایی در خواص آمیزه مشاهده شود که به آن پرکننده‌های هیبریدی گفته می‌شود. اخیراً موضوع هم‌افزایی در رفتار نهایی مکانیکی با مصرف دو پرکننده، در این حالت مطرح شده است [۸-۱۰]. در این حالت انتظار می‌رود، تا با افزودن مقدار کمی از پرکننده دوم با خواص سطحی یا هندسی متفاوت نسبت به پرکننده اول، یک اثر هم‌افزایی بین دو پرکننده و بهبود در خواص نهایی آمیزه را مشاهده کرد.

عمده مطالعات انجام‌شده در این حوزه به‌صورت جایگزینی پرکننده دوم به‌جای پرکننده اول است. با توجه به تغییر مقدار هر دو پرکننده، اثر پرکننده دوم به‌صورت مجزا قابل بررسی و تحلیل نیست. به‌عبارتی روشن نیست، پدیده‌های مشاهده‌شده به‌دلیل افزودن پرکننده دوم یا کاهش هم‌زمان پرکننده اول است. نوآوری این پژوهش در استفاده پرکننده دوم در آمیزه لاستیکی با ثابت‌بودن سایر اجزای آمیزه است. به‌عنوان مثال، جایگزینی سیلیکا به‌جای دوده افزایش زمان ولکانش و مقدار لاستیک ساییده‌شده و بهبود خواص دینامیکی را نشان می‌دهد [۱۱]. این نوع سامانه پرکننده در یک مقدار مشخص کاهش مقاومت غلتشی و افزایش چنگ‌زنی به سطح جاده را نشان می‌دهد [۸]. جایگزینی نانودوده به‌جای سیلیکا در سامانه پرکننده نیز کاهش زمان ولکانش و کمینه پدیده Payne را در نسبت خاصی از دو پرکننده نشان می‌دهد [۹]. البته در این پژوهش، دوده نانومتری جایگزین سیلیکای اصلاحی شده است و مشخص نیست، تغییرات مشاهده‌شده در ریزساختار و خواص نهایی لاستیک به‌دلیل کاهش پرکننده اول سیلیکا یا افزایش پرکننده دوم دوده بوده است. در رویکرد دیگری که در پژوهش‌های پیشین نویسندگان مقاله حاضر به‌کار گرفتند، پرکننده اول ثابت در نظر گرفته شده و پرکننده دوم در مقادیر کم افزوده شده و

به طور کلی شامل TDAE، روی اکسید (ZnO)، استتاریک اسید (StAcid)، N-(۳،۱-دی متیل بوتیل)-N-فنیل-p-فنیلن دی آمین (6PPD)، Mewax، گوگرد، دی فنیل گانیدین (DPG) و N-سیکلو هگزیل-۲-بنزوتیازول سولفنامید (CBS) بود.

## دستگاهها و روشها

### ساخت نمونهها

ابتدا، سیلیکا به کمک سیلان TESPT با روش محلولی اصلاح شد. بدین منظور، ابتدا سیلیکا در محیط اتانول به کمک فرایند فراصوت دهی پخش و سپس سیلان دو عاملی و آب (به عنوان کاتالیزگر فرایند) به آن افزوده شده و با همزن مغناطیسی مخلوط شدند. پس از آن مخلوط آماده شده برای تکمیل واکنش درون آن قرار داده شد و در نهایت به منظور جداسازی سیلانهای واکنش نکرده از فرایند مرکزگریزی بهره گرفته شد. سپس، آمیزه سازی با روش اختلاط مذاب انجام شد. آمیزه اصلی SSBR/Nd-BR و سیلیکای اصلاح شده با مخلوط کن داخلی Brabender-W50ETH به مدت ۱۴ min با سرعت پیچ ۵۵ rpm و دمای شروع اختلاط ۸۰ °C آماده شد. در نهایت، مواد پختی و افزودنیها در آمیزه نهایی روی غلتک Brabender-PM2000 با نسبت سرعت غلتک ۱/۱۵ به ۱ به مدت ۱۰ min با دمای ۵۰ °C افزوده شد. دوده با استفاده از غلتک در مقادیری که در جدول ۱ آمده به ترکیب اضافه شد. با توجه به محرمانه بودن فرمول بندی، مقادیر مواد افزودنی آمیزه در جدول درج نشده است.

### شناسایی

برای بررسی کیفی اصلاح سطح، آزمون طیف سنجی زیرقرمز تبدیل جدول ۱- مواد اولیه اصلی و مقادیر استفاده شده در آمیزهها (مقادیر به phr است).

Table 1. Main raw materials and amounts used in compounds (amounts are in phr).

Sample code	carbon black N115	modified silica	BR	SSBR (oil extended)
Ref.	0			
Hyb.0.25	0.25			
Hyb.0.5	0.5			
Hyb.0.75	0.75	75	20	110
Hyb.1	1			
Hyb.2	2			

اثر آن بررسی شده است. افزودن مقادیر کم سیلیکا حین ثابت نگه داشتن دوده یک مقدار کمینه مدول و لاستیک ساییده شده در روند افزایشی پرکننده دوم را نشان می دهد که به تفاوت در شیمی و انرژی سطحی دو پرکننده نسبت داده شد [۶]. در استفاده از سایر پرکنندهها نیز این پدیده ممکن است، رخ دهد. به عنوان مثال، با افزودن گرافن اکسید کاهش یافته به عنوان نانوذره در آمیزه پر شده با سیلیکا در مقدار مشخصی کمینه مدول ذخیره و لاستیک ساییده شده اتفاق می افتد [۷]. به طور کلی، استفاده از سامانه های پرکننده هیبریدی بهبود در پراکندگی پرکننده، عملکرد مکانیکی و تریبولوژیکی و ویژگی های ولکانش را نشان داده است.

در این پژوهش، اثر افزودن مقادیر کم دوده با ذرات نانومتری به ترکیب آمیزه رویه تایر دارای سیلیکای اصلاح شده به عنوان پرکننده هیبریدی بررسی شد. اثر نانودوده بر ریزساختار، مشخصه های ولکانش، رفتار گران روکشسان خطی و غیرخطی و به ویژه خواص تریبولوژیکی شامل ضریب اصطکاک آمیزه (مرتبط با عملکرد چنگ زنی تایر روی سطوح خشک و خیس) و مقاومت سایشی آمیزهها بررسی شد. ویژگی اصلی این مقاله که آن را از سایر مقالات مرتبط متمایز می کند، استفاده از آزمون های آزمایشگاهی تریبولوژیکی ضریب اصطکاک و سایش و اندازه گیری مستقیم خواص مرتبط با عملکرد تایر در کنار آزمون های دینامیکی-مکانیکی است. در نهایت، در مقدار مشخصی از دوده نانومتری که به عنوان مقدار بهینه معرفی می شود، در خواص نام برده هم افزایی پدیدهها مشاهده شده و در اکثر موارد نتایج بهتری حاصل شده است.

## تجربی

### مواد

لاستیک استیرن بوتادیان محلولی (SSBR)، با گران روی مونی (ML 1+4) ۴۸ در ۱۰۰ °C (Europrene® SOL R 72612) از شرکت Versalis تهیه شد. این الاستومر شامل ۳۰ phr روغن TDAE است. لاستیک پلی بوتادیان Nd-BR60 از شرکت Versalis خریداری شد. سیلیکای بی شکل رسوبی (SiO<sub>2</sub>)، 7000GR با مساحت سطح ۱۷۵ m<sup>2</sup>/g از شرکت Evonik Degussa AG، آلمان خریداری شد. بیس (تری اتوکسی سیلیل پروپیل) تتراسولفید (TESPT) از شرکت Taizhou، چین تهیه شد. نانودوده (CB)، N115 با مساحت سطح ۱۳۰ m<sup>2</sup>/g از شرکت Cabot چین تهیه شد. سایر اجزای استفاده شده در آمیزه مطابق دستورکار دریافت شده از گروه صنعتی بارز بوده و

رفتار گران‌روکشسان غیرخطی آمیزه‌های پخت‌شده نیز با دستگاه اندازه‌گیری خواص فرایندی لاستیک MDR3000، مطالعه شد. مرحله پخت آمیزه‌ها در کرنش کم انجام شد. سپس، دمای نمونه‌ها تا  $60^{\circ}\text{C}$  کاهش یافت که دمای کاربری تاپر نیز است. در مرحله آخر در دمای ثابت  $60^{\circ}\text{C}$  و بسامد  $10\text{ Hz}$  در روبش کرنش خواص دینامیکی مکانیکی آمیزه‌های پخت‌شده اندازه‌گیری شد.

خواص گران‌روکشسان خطی با آزمون دینامیکی-مکانیکی-گرمایی (DMTA) به کمک دستگاه Netzsch DMA242 با روبش دما بررسی شد. این آزمون در بسامد  $1\text{ Hz}$ ، محدوده دمایی  $100^{\circ}\text{C}$  تا  $100^{\circ}\text{C}$ ، کرنش  $0.3\%$  و در حالت کشش ساده انجام شد. برای بررسی و تطابق این آزمون با نتایج ضریب اصطکاک، از نتایج خروجی ضریب اتلاف در محدوده دمایی  $5^{\circ}\text{C}$  تا  $0^{\circ}\text{C}$  استفاده شد [۱۳]. سایش آمیزه‌ها با دستگاه سایش Akron مدل GotechGT-7012-A براساس استاندارد BS 903-A9 اندازه‌گیری شد. این آزمون با سازوکار غلظتی چرخ لغزنده به سازوکار لغزش در جاپای تاپر نزدیک‌تر است و از این راه اندازه‌گیری سایش آمیزه‌های رویه تاپر به رفتگی در تاپر مرتبط‌تر خواهند بود. بدین منظور چرخ‌های لاستیکی از آمیزه‌ها تهیه شد. روش آزمون نیز با وزنه  $2$  پوندی، سرعت  $74\text{ rpm}$ ، زاویه  $15^{\circ}$  و  $2000$  دور بوده است. این آزمون طی سه مرحله انجام شد: مرحله اول آماده‌سازی نمونه بود که پس از سایش با شرایط بیان‌شده چرخ لاستیکی تمیز و وزن شد. در مرحله دوم و سوم نیز با همان شرایط آزمون انجام شد و دو مرتبه چرخ‌ها توزین شدند. اختلاف وزن ایجادشده مقدار سایش در هر نمونه را نشان می‌دهد.

برای بررسی مقدار اصطکاک روی سطح خیس و خشک از دستگاه طراحی شده در گروه مهندسی پلیمر دانشگاه تربیت مدرس استفاده شد [۱۳]. بدین صورت که نمونه حلقه‌ای شکل را درون دستگاه قرار داده و پس از قرارگرفتن روی سطح بتنی و اعمال بار عمودی  $30\text{ kg}$  یا فشار  $0.45\text{ MPa}$  و سرعت زاویه‌ای  $300\text{ rpm}$  یا  $2.9\text{ m/s}$ ، نیروی افقی واردشده بر سطح بتنی با نیروسنج دستگاه ثبت شده و با نیروی افقی بر نیروی عمودی اعمالی، ضریب اصطکاک محاسبه و منحنی ضریب اصطکاک برحسب زمان اندازه‌گیری رسم شد. از این منحنی، متوسط ضریب اصطکاک در ابتدای ناحیه اصطکاک پایا محاسبه و گزارش شد. برای اندازه‌گیری ضریب اصطکاک روی سطح خشک بتن، نمونه‌ها را در سطح خشک مورد آزمون قرار داده و برای اندازه‌گیری ضریب اصطکاک روی سطح خیس بتن در هر مرتبه بین سطح نمونه و سطح بتن از محلول آب دارای  $2\%$  ماده شوینده استفاده شد. علت استفاده از مقدار کم ماده شوینده، کاهش کشش سطحی آب و تشکیل فیلم نازک و یکنواختی از آب روی سطح بتن بود.

فوریه (FTIR) با طیف‌سنج PerkinElmer-10.03.06 روی سیلیکای اصلاح‌شده در محدوده عدد موجی  $4000-400\text{ cm}^{-1}$  انجام شد و برای بررسی کمی مقدار اصلاح سطحی انجام‌شده روی ذرات سیلیکا، به مدت  $4\text{ h}$  سیلیکای اصلاح‌شده را در کوره با دمای  $700^{\circ}\text{C}$  گذاشته و وزن آن پیش و پس از کوره‌گذاری به کمک ترازوی با دقت چهار رقم اعشار اندازه‌گیری شد. با توجه به شست‌وشوی کامل سیلیکای اصلاح‌شده، این کاهش وزن به مقدار سیلان واکنش داده نسبت داده شد.

به منظور بررسی شکل‌شناسی آمیزه‌ها و نیز مقدار و نحوه اختلاط، آزمون میکروسکوپی الکترونی پویشی (SEM) با میکروسکوپ TESCAN (MIRA 3 LMU) در مقیاس مناسب برای بررسی پدیده‌های پخش پرکننده در ماتریس لاستیکی و ارزیابی نحوه اثر پرکننده دوم بر پراکنش پرکننده اول انجام شد.

روند و مشخصات ولکانش لاستیک با رئومتر دیسک نوسانی مدل GT-7070-S2 ساخت شرکت Gotech بررسی شد. این آزمون در دمای  $160^{\circ}\text{C}$ ، زاویه نوسان  $1^{\circ}$ ± فشار  $0.46\text{ MPa}$  به مدت  $2\text{ h}$  برای هر نمونه انجام شد. با توجه به اینکه زمان بهینه ولکانش در ابتدا مشخص نبوده است، زمان طولانی در نظر گرفته شد و تا لحظه‌ای که زمان بهینه پخت نشان داده‌شده با دستگاه ثابت نشود، آزمون ادامه یافت. مشخصات و داده‌های مربوط به ولکانش از این آزمون استخراج و برای ولکانش ورقه‌های لاستیکی با ضخامت  $1/5\text{ mm}$  تحت پرس گرم در دمای  $160^{\circ}\text{C}$  به کار گرفته شد. چگالی آمیزه‌های ولکانیده با روش ارشمیدس مطابق استاندارد ASTM D792 اندازه‌گیری شد [۱۲]. بدین منظور جرم نمونه‌ها در هوا و سپس جرم نمونه‌ها درون آب اندازه‌گیری و با استفاده از روابط مقدار چگالی محاسبه شد.

بررسی پدیده بازکلوخگی خوشه‌های پرکننده و رفتار گران‌روکشسان غیرخطی پیش از ولکانش به کمک رئومتر با دای متحرک MDR 3000 (Moving Die Rheometer) ساخت شرکت Monotec آلمان برای اندازه‌گیری خواص فرایندی لاستیک، طی چهار مرحله در دماهای متفاوت و دامنه کرنشی متفاوت با بسامد  $1\text{ Hz}$  انجام شد. بررسی پدیده بازکلوخگی پرکننده در آمیزه‌های لاستیکی با روبش زمان-مدول ذخیره در کرنش  $0.1\%$  و رفتار گران‌روکشسان غیرخطی یا پدیده Payne با روبش کرنش-مدول‌های ذخیره و اتلاف انجام شد. در حالت اول، در کرنش بسیار کم مدول ذخیره به مدت  $60\text{ min}$  در دمای  $100^{\circ}\text{C}$  اندازه‌گیری شده و بدین ترتیب مقدار شبکه ایجادشده در اثر بازکلوخگی پرکننده طی این زمان اندازه‌گیری و بررسی شد. در حالت دوم، شکست شبکه پرکننده، حاصل از مرحله قبل، با روبش کرنش از  $0.1\%$  تا  $100\%$  انجام شد.

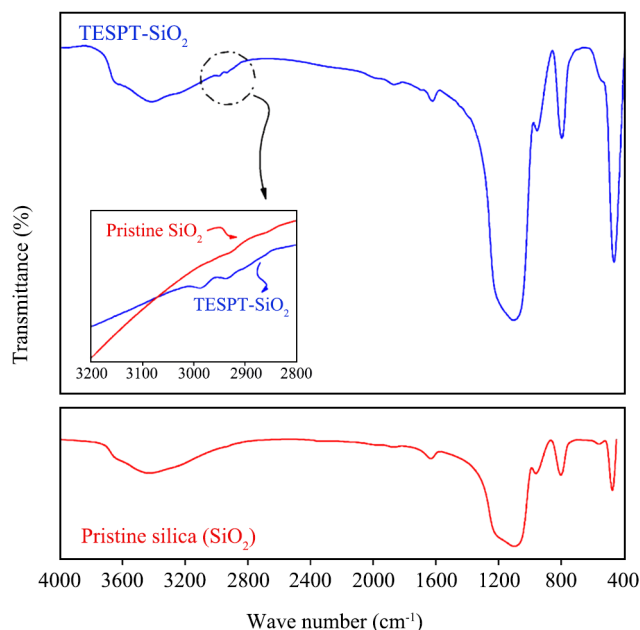
سه پیوند متیل در TESPT، شدت این پیک کوچک است [۱۴]. وجود این پیک معرف جذب شیمیایی سیلان بر سطح سیلیکاست. گفتنی است، سیلان واکنش نکرده قبلاً طی چند مرحله شست و شوی سیلیکای اصلاح شده به کمک حلال تولوئن خارج شده بود و وجود این قله مؤید جذب شیمیایی سیلان است. ارزیابی کمی مقدار سیلان پیوندخورده روی سطح سیلیکای اصلاح شده با سوزاندن سیلان در دمای  $700^{\circ}\text{C}$  به مدت ۳ h در کوره انجام شد. نتایج آزمون کوره برای مقدار سیلان پیوندخورده روی سطح سیلیکا ۲/۳۸٪ محاسبه شد.

#### شکل‌شناسی نمونه‌ها با میکروسکوپ الکترونی پویشی

در تصویر شکل ۲ که با بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰۰ تصویربرداری شده پراکنش ذرات پرکننده نشان داده شده است. از این تصاویر به نظر می‌رسد، با افزودن نانودوده به‌عنوان پرکننده دوم ابتدا در مقادیر کمتر نمونه ۴ که دارای ۰/۷۵ phr دوده نانومتری است، تا حدودی باعث بهبود و کوچک‌تر شدن کلوخه‌های سیلیکا به‌عنوان پرکننده اول شده است. اما، در مقادیر بیش از ۰/۷۵ قسمت نانودوده، به دلیل اینکه نانودوده نیز به آستانه تداخل خود نزدیک می‌شود، بهبودی در ریزساختار سیلیکا دیده نمی‌شود. به‌طور کلی، این آزمون تشخیص تغییرات در ریزساختار سیلیکا با افزودن دوده را با دقت زیادی نشان نمی‌دهد. به همین دلیل از آزمون‌های دینامیکی-مکانیکی نیز بدین‌منظور بهره گرفته شد.

#### بررسی ولکانش لاستیک با آزمون رئومتری دیسک نوسانی

افزودن پرکننده دوم دوده نانومتری در مقادیر کم بر روند ولکانش اثر گذاشته و زمان ولکانش را دستخوش تغییر کرده است. تغییر مشخصات ولکانش در جدول ۲ آمده است. شاخص سرعت



شکل ۱- طیف‌های FTIR سیلیکای اصلاح شده و خالص.

Fig. 1. FTIR spectra of modified and pure silica.

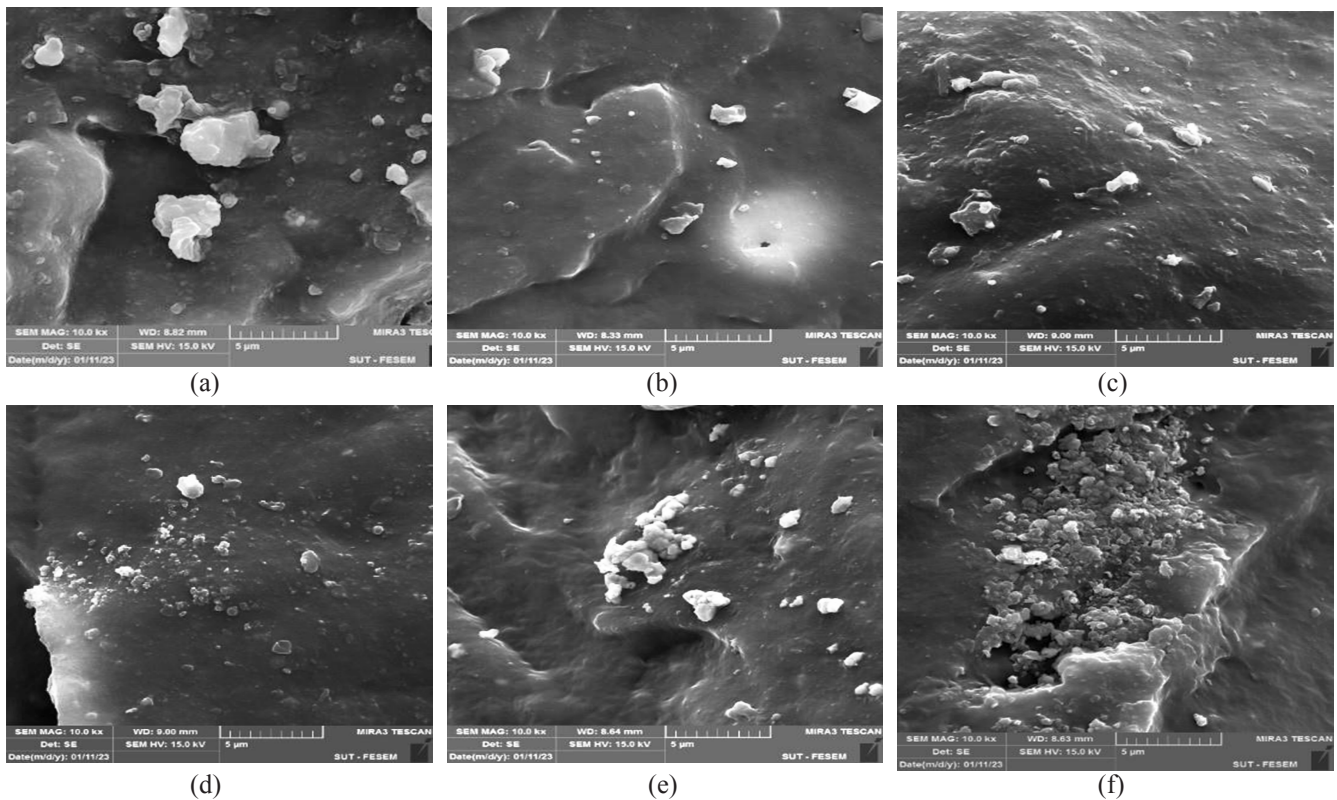
در طیف زیرقرمز تبدیل فوریه برای بررسی اصلاح سطح سیلیکا همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، محدوده عدد موجی  $1099\text{ cm}^{-1}$  که مشخصه جذب کششی پیوند Si-O-Si بوده، به‌خوبی قابل تشخیص است. جذب در محدوده  $1650\text{ cm}^{-1}$  -  $1550\text{ cm}^{-1}$  و  $3430\text{ cm}^{-1}$  مربوط به پیوند هیدروکسیل سیلیکا، به‌وضوح قابل مشاهده است. ریزامواج مربوط به محدوده  $2800\text{ cm}^{-1}$  -  $3000\text{ cm}^{-1}$  به پیوند  $\text{CH}_2$  نسبت داده شد است که در سیلیکای خالص مشاهده نشد و در سیلیکای اصلاح شده به دلیل وجود سیلان ظاهر شده است. شدت این پیک بستگی به تعداد پیوندهای متیل در سیلان دارد. با توجه به وجود

جدول ۲- داده‌های ولکانش برای آمیزه‌ها به‌دست‌آمده از آزمون رئومتری.

Table 2. Vulcanization data for compounds obtained from rheometry test.

No.	Second fille (phr)	MH-ML	MH (dN.m)	ML (dN.m)	CRI	tc90 (min)	ts2 (min)
1	0	32.59	55.13	22.54	2.26	44.18	2.8
2	0.25	33.43	57.30	23.87	2.56	41.71	2.71
3	0.5	33.66	57.72	24.04	2.97	36.46	2.81
4	0.75	33.71	57.95	24.24	3.76	29.35	2.76
5	1	31.31	55.19	23.88	3.08	35.18	2.8
6	2	31.84	55.78	23.94	2.92	37.01	2.78



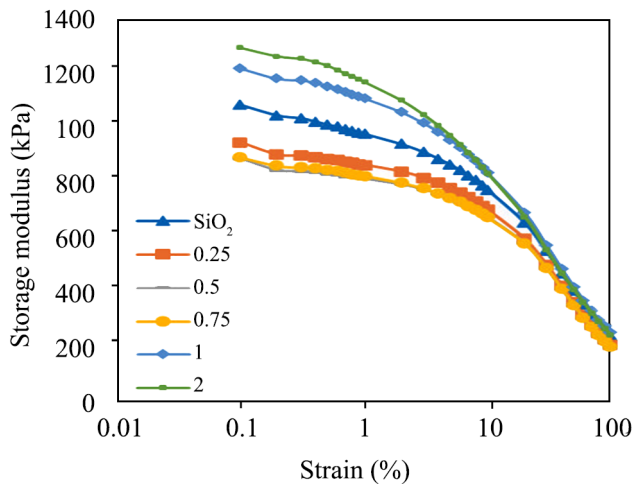


شکل ۲- تصاویر SEM از سطح شکست نمونه‌ها با بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰۰ برابر: (a) بدون نانوذرات دوده، (b) ۰/۲۵ phr، (c) ۰/۵ phr، (d) ۰/۷۵ phr، (e) ۱ phr و (f) ۲ phr نانودوده.

Fig. 2. SEM images of samples with 10,000x magnification (a) without nanocarbon black, (b) 0.25 phr, (c) 0.5 phr, (d) 0.75 phr, (e) 1 phr, and (f) 2 phr nanocarbon black.

**آزمون دینامیکی- مکانیکی آمیزه‌های ولکانیده با روبش زمان و کرنش**  
 برای بررسی پدیده بازکلوخگی یا انباشتگی پرکننده سیلیکا پس از اختلاط و اثر افزودن نانودوده در مقادیر مختلف، از افزایش مدول ذخیره با روبش زمان در کرنش ۰/۲۸٪ استفاده شد. بدین منظور، ابتدا نمونه‌ها تحت کرنش زیاد قرار گرفتند تا شبکه پرکننده شکسته شده و روند بازتشکیل این شبکه مطالعه شود. نتایج مقدار بازکلوخگی پرکننده سیلیکا و اثر نانودوده بر آن در شکل ۳ نشان داده شده است. افزایش مدول ذخیره با زمان معرف بازکلوخگی پرکننده است [۹].  
 برای اینکه بتوان مقایسه‌ای درست از سینتیک یا سرعت و مقدار شبکه‌ای شدن پرکننده‌ها در آمیزه‌های مختلف داشت، داده‌های خروجی را ابتدا باید به مدول ذخیره در زمان صفر نرمال کرده و سپس در نموداری که در شکل ۴ آمده است، به‌طور مشخص آن‌ها را با یکدیگر مقایسه کرد. برخلاف تجارب پیشین [۶،۷]، آمیزه دارای سیلیکای اصلاح شده و بدون نانودوده مقدار بازکلوخگی کمی دارد که به دلیل اصلاح سطحی سیلیکا با سیلان دو عاملی است. اضافه کردن پرکننده دوم نانودوده، مقدار انباشتگی پرکننده‌ها را افزایش می‌دهد. اما ۰/۷۵

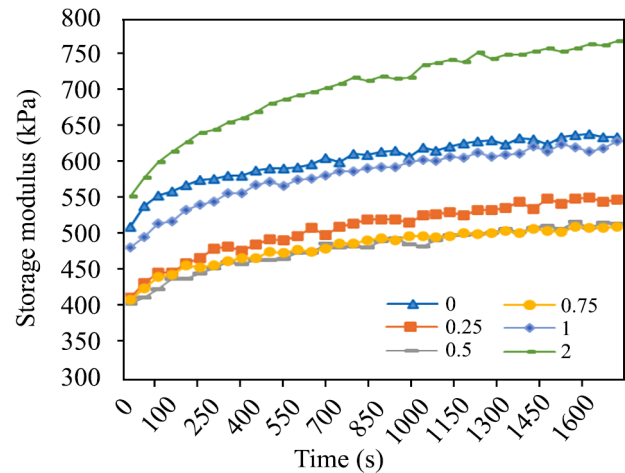
ولکانش (CRI) که با استفاده از سرعت بهینه پخت محاسبه می‌شود، ابتدا با افزایش پرکننده دوم تا مقدار ۰/۷۵ phr افزایش یافته و پس از آن با کاهش همراه بوده است. سرعت ولکانش بیشینه در آمیزه دارای ۰/۷۵ phr نانودوده را می‌توان به کاهش شبکه پرکننده و توزیع بهتر سیلیکا در این آمیزه نسبت داد [۱۵،۱۶]. زمان برشتگی آمیزه‌ها (ts2) تغییر محسوسی نداشته و حدود ۲ min ثابت مانده است. این مسئله به دلیل نقش غالب سطح سیلیکا بر شتاب‌دهندگی در مراحل اولیه سازوکار ولکانش لاستیک‌هاست. زمان بهینه ولکانش (tc90) نمونه‌ها نسبتاً طولانی است. این مسئله به دلیل مقدار زیاد بارگذاری سیلیکا در آمیزه‌ها (۷۵ phr) و اثر منفی شبکه پرکننده تقویتی سیلیکا بر کاهش سرعت ولکانش آمیزه‌های لاستیکی تفسیر می‌شود. در ضمن، تفاوت گشتاور بیشینه (MH) و گشتاور کمینه (ML) که معرف چگالی اتصال‌های عرضی است، نیز با افزایش پرکننده دوم نانودوده تا ۰/۷۵ phr افزایش می‌یابد که به هم‌افزایی شکل‌شناسی پرکننده‌ها در این آمیزه و کاهش شبکه پرکننده سیلیکا و در نتیجه افزایش اتصال‌های عرضی شیمیایی مربوط است [۹].



شکل ۵- مدول ذخیره با روبش کرنش در نمونه‌ها پیش از ولکانش.  
Fig. 5 Storage modulus with strain amplitude in samples before vulcanization.

یا ممانعت از بازکلوخگی ذرات سیلیکا پس از اختلاط باعث این پدیده شده است. افزایش دوباره مقدار انباشتگی پس از ۰/۷۵ قسمت نانودوده تحت تأثیر بازکلوخگی یا انباشتگی خود ذرات دوده نانومتری در درصد‌های وزنی بیشتر است. آمیزه دارای ۰/۷۵ phr و آمیزه بدون نانودوده کمترین سرعت رشد شبکه را در بین نمونه‌هایی نشان دادند که روی آن‌ها آزمون انجام شد. بنابراین، نمونه دارای ۰/۷۵ قسمت نانودوده و نمونه خالص بدون دوده، شبکه پرکننده یکنواخت‌تری دارند که اثر این موضوع در سایر آزمون‌های انجام‌شده نیز بررسی و مطالعه شده است.

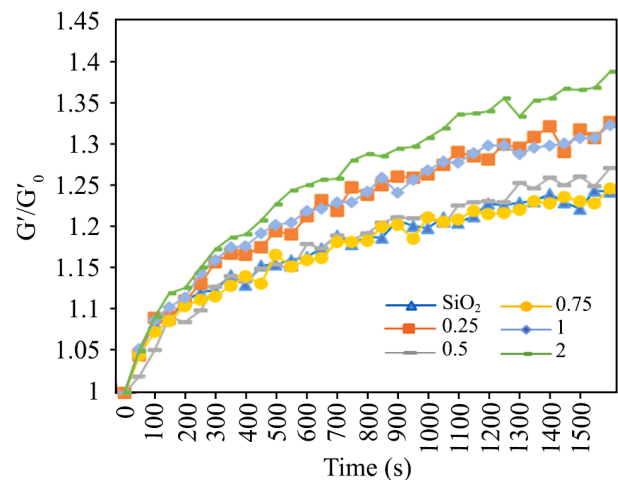
نتایج مدول ذخیره با روبش کرنش در شکل ۵ آمده است. اختلاف مدول ذخیره در کرنش کم و کرنش‌های زیاد مرتبط با شدت پدیده Payne و نشان‌دهنده مقدار اتلاف در آمیزه است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، مدول ذخیره در کرنش زیاد ( $G'_{\infty} @ \gamma = 100$ ) در تمام نمونه‌ها تقریباً برابر است، بنابراین کاهش مدول در کرنش کم ( $G'_0 @ \gamma = 0/1$ ) به‌عنوان مشخصه پدیده Payne در نظر گرفته شد. بر این اساس، در نمونه‌های دارای ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ قسمت دوده نسبت به نمونه مرجع که بدون دوده مورد آزمون قرار گرفته است، کاهش پدیده Payne مشاهده می‌شود. این پدیده را می‌توان به هم‌افزایی شکل‌شناسی حاصل از جلوگیری دوده از بازکلوخگی سیلیکا به دلیل تفاوت در خواص سطحی و اندازه ذرات نسبت داد. در مقادیر بیشتر از دوده نیز به‌واسطه تشکیل شبکه از هر دو پرکننده مقدار مدول ذخیره افزایش یافته و حتی مقادیری بیشتر از نمونه مرجع را به خود اختصاص داده است. از آنجا که کاهش اثر Payne



شکل ۳- مدول ذخیره با روبش زمان پس از شکست شبکه پرکننده (اعداد نشان داده‌شده روی شکل قسمت دوده به‌ازای صد قسمت لاستیک در آمیزه‌ها را نشان می‌دهد).

Fig. 3. Storage modulus with time amplitude after filler network failure.

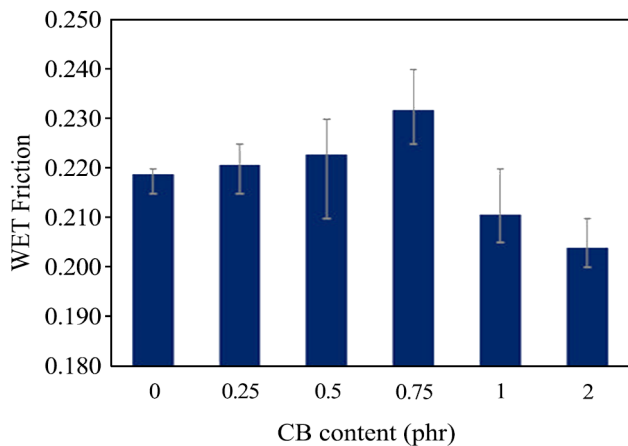
قسمت نانودوده توانسته است، مقدار بازکلوخگی پرکننده‌ها را کاهش داده و به مقدار سیلیکای اصلاح‌شده بازگردد. کمک‌کردن مقدار بهینه نانودوده به پخش سیلیکای اصلاح‌شده در مرحله اختلاط



شکل ۴- نسبت مدول ذخیره به مدول ذخیره اولیه با روبش زمان در نمونه‌های مختلف پیش از ولکانش (اعداد روی شکل قسمت دوده به‌ازای صد قسمت لاستیک در آمیزه‌ها را نشان می‌دهد).

Fig. 4. The ratio of the storage modulus to the initial storage modulus with time amplitude in different samples before vulcanization (numbers represent part of carbon black per hundreds of rubber in the compound).





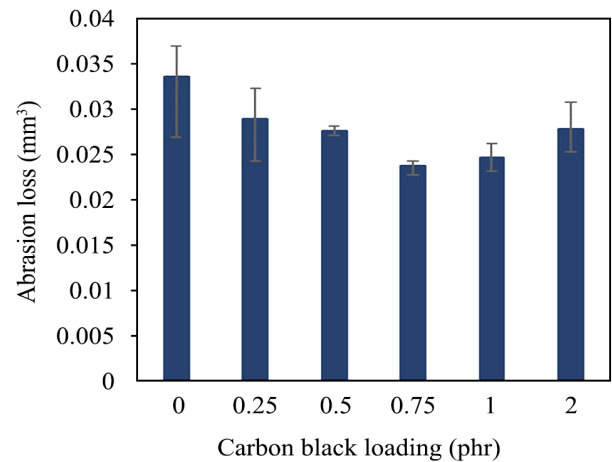
شکل ۸- ضریب اصطکاک نمونه‌ها روی سطح مرطوب.

Fig. 8. Friction coefficient of samples on wet surface.

مقدار لاستیک ساییده شده، به عبارت دیگر مقاومت سایشی بیشتر و در مقادیر دیگر نانودوده مقاومت سایشی کمتری دارند. این پدیده را می‌توان به بهبود پراکنش و کاهش اندازه کلوخه‌های پرکننده و کاهش ریزترک‌ها نسبت داد.

#### ضریب اصطکاک آمیزه‌های ولکانیده روی سطوح خشک و خیس

ضریب اصطکاک روی سطح خشک، مطابق روندی که در شکل ۷ دیده می‌شود، ابتدا روندی صعودی دارد و در آمیزه دارای مقدار ۰/۷۵ phr، به مقدار حداکثری می‌رسد و پس از آن دوباره به سمت مقادیر کمتر کاهش پیدا می‌کند. در بررسی ضریب اصطکاک سطح خیس نیز با توجه به داده‌های به دست آمده از دستگاه که در شکل ۸ رسم شده است، ابتدا افزایش مشاهده می‌شود. در این آزمون نیز در مقدار ۰/۷۵ phr دوده نانومتری مقدار بیشینه نسبت به سایر آمیزه‌ها نشان می‌دهد. با توجه به مطالبی که در مقدمه درباره مقدار اصطکاک و رفتار گران‌روکشسان آمیزه‌ها به‌ویژه بخش اتلافی آن بررسی شد، می‌توان نتایج این آزمون را با نتایج خروجی از آزمون‌های دینامیکی-مکانیکی بررسی کرد. بدین منظور آزمون تحلیل دینامیکی-مکانیکی-گرمایی روی نمونه‌های ولکانیده انجام شد تا در تفسیر رفتار تریبولوژیکی نمونه‌ها استفاده شود. این آزمون که در کرنش‌های کوچک (۰/۳٪) در حالت کشش روی نمونه‌های ولکانیده انجام شد، معرف رفتار گران‌روکشسان خطی است. نتایج خروجی از این آزمون، در دماهای مختلف با توجه به اصل برهم‌نهی دما-زمان با آزمون‌های مربوط به عملکرد آمیزه رویه تایر قابل بررسی و تحلیل است. به عنوان مثال، ضریب اتلاف در دمای حدود ۶۰ °C با مقاومت غلتشی در بحث آمیزه تایر متناظر است [۱۷]. ضریب اتلاف در دمای حدود ۵ °C نیز متناسب



شکل ۶- مقدار لاستیک ساییده شده در آزمون سایش.

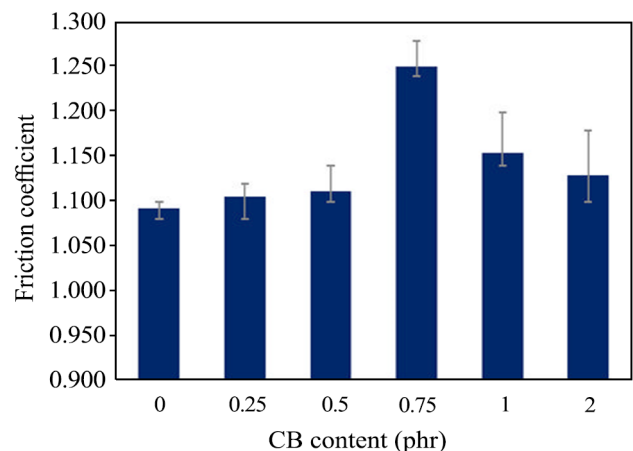
Fig. 6. Abraded volume in abrasion test for the compounds.

در رفتار گران‌روکشسان غیرخطی را به کاهش مقاومت غلتشی نسبت می‌دهند، می‌توان پیش‌بینی کرد، افزودن نانودوده ممکن است، موجب کاهش مقاومت غلتشی آمیزه رویه تایر شود.

#### خواص تریبولوژیکی آمیزه‌های ولکانیده

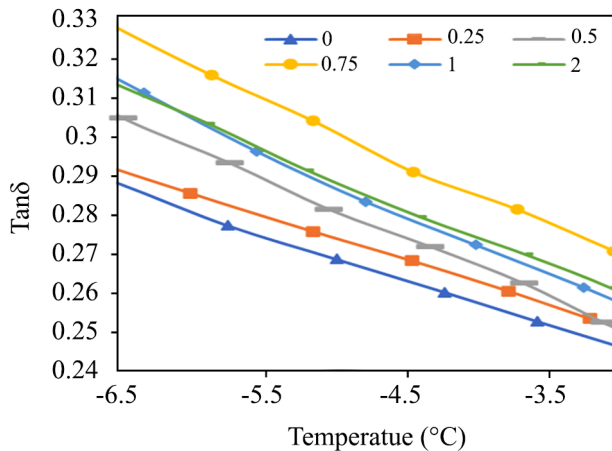
##### مقاومت سایشی

نتایج آزمون سایش Akron در شکل ۶ آمده است. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، با افزایش مقادیر نانودوده به عنوان پرکننده دوم مقاومت سایشی با بهبود همراه بوده است و در مقدار ۰/۷۵ phr نانودوده بهینه مقدار لاستیک ساییده شده را نشان داده و پس از آن با افزایش مقدار نانودوده، مقاومت سایشی کاهش یافته است. به‌طور کلی این آزمون نشان داد، آمیزه بهینه معرفی شده، کمترین



شکل ۷- ضریب اصطکاک نمونه‌ها روی سطح خشک.

Fig. 7. Friction coefficient of samples on dry surface.

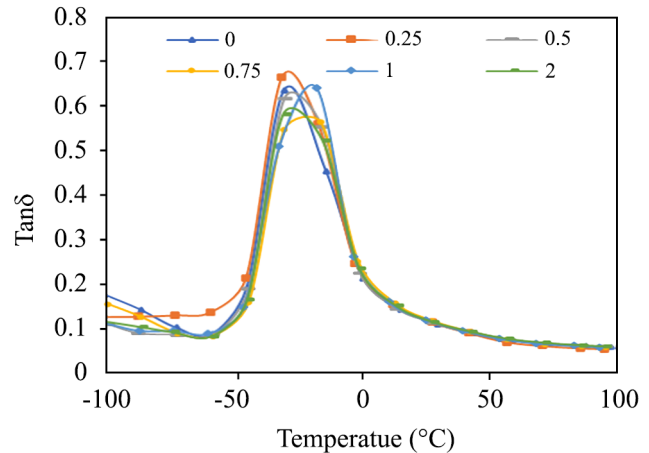


شکل ۱۰- نمودار ضریب اتلاف نمونه‌ها در محدوده دمایی  $6^{\circ}\text{C}$  تا  $3^{\circ}\text{C}$  - آزمون دینامیکی - مکانیکی با روبش دما (اعداد روی شکل قسمت دوده به‌ازای صد قسمت لاستیک در آمیزه‌ها را نشان می‌دهد).  
Fig. 10. The  $\tan\delta$  of the samples in the temperature range of  $-3^{\circ}\text{C}$  to  $-6^{\circ}\text{C}$  dynamic-mechanical test with temperature amplitude (numbers represent part of carbon black per hundred of rubber in the compound).

می‌شود و از سوی دیگر از انرژی لازم برای رشد ترک و سایش خستگی می‌کاهد.

### نتیجه‌گیری

استفاده از پرکننده دوم نانودوده، بر پراکنش پرکننده اول سیلیکای اصلاح شده اثر گذاشته و در مقدار بهینه  $0.75$  قسمت نانودوده پراکنش و جلوگیری از بازکلوخگی را بهبود بخشیده و باعث شده است، اندازه خوشه‌ها و کلوخه‌های ذرات پرکننده اول در این آمیزه کاهش یابد. صحت این موضوع در آزمون تصویربرداری میکروسکوپی از آمیزه‌ها و آزمون دینامیکی-مکانیکی با روبش زمان و کرنش نشان داده شد. اثر این هم‌افزایی شکل‌شناسی نانودوده در بهبود پراکنش و بازکلوخگی سیلیکای اصلاح شده است که به کاهش پدیده Payne در آزمون دینامیکی-مکانیکی با روبش کرنش منجر شد و در نتایج آزمون‌های تریبولوژیکی یعنی افزایش مقاومت سایشی در حالت غلظتی (ساینده Akron) و افزایش ضریب اصطکاک نمونه بهینه روی سطوح خشک و خیس بتنی نیز مشاهده شد. برای اثبات مشاهدات رفتار تریبولوژیکی، بررسی ضریب اتلاف در الگوی گران‌روکشسان خطی در دمای حدود  $5^{\circ}\text{C}$  - نشان داد که افزایش



شکل ۹- ضریب اتلاف در روبش دما در آزمون دینامیکی - مکانیکی در کرنش کم (اعداد روی شکل قسمت دوده به‌ازای صد قسمت لاستیک در آمیزه‌ها را نشان می‌دهد).  
Fig. 9. The  $\tan\delta$  in temperature amplitude in dynamic-mechanical test at low strain (numbers represent part of carbon black per hundred of rubber in the compound).

با مباحث تریبولوژیکی مانند چنگ‌زنی تایر بر سطوح خیس جاده و سایش تایر تفسیر می‌شود [۱۸]. تصویر کلی از نتایج ضریب اتلاف در محدوده دمایی آزموده شده، در شکل ۹ آمده است. همان‌طور که در بخش‌های پیشین بررسی شد، مدول ذخیره آمیزه ولکانیده در مقدار  $0.75$  phr نسبت به سایر آمیزه‌ها مقدار کمتری دارد. بنابراین، در مقابل نیروی برابر تغییر شکل بیشتری از خود نشان می‌دهد و در این آزمون نیز پس از بارگذاری برابر، تغییر شکل بیشتری نشان می‌دهد و سطح تماس بیشتری ایجاد می‌کند. در نتیجه، افزایش سطح مقطع با اعمال نیروی ثابت یکی از علت‌های افزایش ضریب اصطکاک در این آمیزه است.

نتایج ضریب اتلاف در حدود دمای  $5^{\circ}\text{C}$  - در شکل ۱۰ آمده است و مشاهده می‌شود، افزایش نانودوده به‌عنوان پرکننده باعث افزایش ضریب اتلاف در این محدوده دمایی شده است. آمیزه‌ها در این محدوده به‌ترتیب آمیزه بدون دوده و آمیزه دارای نانودوده در مقادیر  $0.25$ ،  $0.5$ ،  $1$ ،  $2$  و در نهایت آمیزه دارای  $0.75$  قسمت دوده نانومتری مقادیر ضریب بیشتری را به خود اختصاص داده‌اند. این افزایش را می‌توان به جابه‌جایی منحنی ضریب اتلاف به دماهای بیشتر بر اثر افزایش نانودوده مربوط دانست. در مقایسه این موضوع مشاهده می‌شود، روندی که در این آزمون حاصل شده است، در آزمون سایش و آزمون اصطکاک نیز مشاهده شد که صحت آن را تأیید می‌کند. افزایش اتلاف دینامیکی-مکانیکی در کرنش‌های کم، از یک سو باعث افزایش ضریب اصطکاک به‌عنوان پدیده اتلافی در لاستیک

خود را در بهبود رفتار تریبولوژیکی، یعنی بهبود مقاومت سایشی و افزایش ضریب اصطکاک آمیزه رویه تایر روی سطوح خشک و خیس بتنی نشان داد.

### قدردانی

از حمایت‌های گروه صنعتی بارز در فراهم کردن مواد اولیه و فرمول‌بندی آمیزه رویه لاستیک تشکر و قدردانی می‌شود.

### مراجع

- Alimardani M., Razzaghi-Kashani M., and Ghoreishy M.H.R., Prediction of Mechanical and Fracture Properties of Rubber Composites by Microstructural Modeling of Polymer-Filler Interfacial Effects, *Mater. Design*, **115**, 348-354, 2017.
- Vilgis T.A., Heinrich G., and Klueppel M., *Reinforcement of Polymer Nanocomposites: Theory, Experiments and Applications*, Cambridge University, 101-193, 2009.
- Ramier J., Chazeau L., Stelandre L., and Guy L., Payne Effect in Silica-Filled Styrene-Butadiene Rubber: Influence of Surface Treatment, *J. Polym. Sci., Part B: Polym. Phys.*, **45**, 286-298, 2007.
- Maier P.G. and Goritz D., Molecular Interpretation of the Payne Effect, *Kautschuk Gummi Kunststoffe*, **49**, 18-21, 1996.
- Payne A.R., The Dynamic Properties of Carbon Black-Loaded Natural Rubber Vulcanizates, *J. Appl. Polym. Sci.*, **6**, 57-63, 1962.
- Amrollahi A., Razzaghi-Kashani M., Hosseini S.M., and Habibi N., Carbon Black/Silica Hybrid Filler Networking and Its Synergistic Effects on the Performance of Styrene-Butadiene Rubber Composites, *Polym. J.*, **54**, 931-942, 2022.
- Kalat M.N. and Razzaghi-Kashani M., The Role of Reduced Graphene Oxide as a Secondary Filler in Improving the Performance of Silica-Filled Styrene-Butadiene Rubber Compounds, *Polym. J.*, **54**, 355-365, 2022.
- Veiga V.D., Rossignol T.M., Crespo J.S., and Carli L.N., Tire Tread Compounds with Reduced Rolling Resistance and Improved Wet Grip, *J. Appl. Polym. Sci.*, **134**, 39, 2017.
- Sattayanurak S., Sahakaro K., Kaewsakul W., Dierkes W.K., Reuvekamp L.A.E.M., Blume A., and Noordermeer J.W.M., Synergistic Effect by High Specific Surface Area Carbon Black as Secondary Filler in Silica Reinforced Natural Rubber Tire Tread Compounds, *Polym. Test.*, **81**, 2020.
- Sattayanurak S., Sahakaro K., Kaewsakul W., Dierkes W.K., Reuvekamp L.A.E.M., Blume A., and Noordermeer J.W.M., Enhancing Performance of Silica-Reinforced Natural Rubber Tire Tread Compounds by Applying Organoclay as Secondary Filler, *Rubber Chem. Technol.*, **94**, 121-144, 2021.
- Senthilvel K., Vishvanathperumal S., Prabu B., and John Baruch L., Studies on the Morphology, Cure Characteristics and Mechanical Properties of Acrylonitrile Butadiene Rubber with Hybrid Filler (Carbon Black/Silica) Composite, *Polym. Polym. Compos.*, **24**, 473-480, 2016.
- Standard Test Methods for Density and Specific Gravity of Plastics by Displacement, Annual Book of ASTM Standard, D792-20, 2020.
- Razzaghi Kashani M., Behazin E., and Fakhar A., Construction and Evaluation of a New Tribometer for Polymers, *Polym. Test.*, **30**, 271-276, 2011.
- Hosseini S.M., Torbati-Fard N., Kiyani H., and Razzaghi-Kashani M., Comparative Role of Interface in Reinforcing Mechanisms of Nanosilica Modified by Silanes and Liquid Rubber in SBR Composites, *J. Polym. Res.*, **23**, 1-10, 2016.
- Torbati-Fard N., Hosseini S.M., and Razzaghi-Kashani M., Effect of the Silica-Rubber Interface on the Mechanical, Viscoelastic, and Tribological Behaviors of Filled Styrene-Butadiene Rubber Vulcanizates, *Polym. J.*, **52**, 1223-1234, 2020.
- Hosseini S.M. and Razzaghi-Kashani M., Vulcanization Kinetics of Nano-silica Filled Styrene Butadiene Rubber, *Polymer*, **55**, 6426-6434, 2014.
- Rodgers B., *Rubber Compounding: Chemistry and Applications*, 2nd ed., CRC, 33-82, 2016.
- Taban N., Wirasate S., and Suchiva K., Abrasion Behavior of Layered Silicate Reinforced Natural Rubber, *Wear*, **269**, 394-404, 2010.