

Effect of Carbon Black Blends on the Mechanical Properties of a Tread Compound for Passenger Radial Tires

Mir Hamid Reza Ghoreishy*, Mohsen Firouzbakht, and Ghasem Naderi

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

Received 11 September 2012, accepted 17 January 2013

ABSTRACT

This study is devoted to the study of carbon black blends in passenger tire tread compounds with respect to their mechanical, dynamical and thermal properties. A reference compound based on SBR/BR and 60 phr carbon black as reinforcing filler was initially designed. Ten samples based on this compound were prepared using four different types of carbon black. The mechanical, dynamical and thermal tests were carried out on appropriate samples made from these compounds to determine tensile strength, elongation-at-break, abrasion resistance, hardness, resilience, $\tan \delta$ and heat build-up. The results indicated that the compound containing N550 carbon black has the lowest abrasion resistance and temperature rise. On the other hand, the compound containing N220 carbon black showed the highest temperature rise, energy dissipation and abrasion resistance due to high structure and iodine adsorption number. To achieve improvement in mechanical and dynamical properties, mixtures of carbon blacks were used and the best results (low rolling resistance, high abrasion resistance and high traction) were obtained. We have shown in our previous research works that the viscoelastic behavior of cured compounds can be accurately described by the experimental data of tensile deformation vs. force of rubber strips and its corresponding finite element models. Therefore, a new method for calculating the energy dissipation was proposed which was based on the finite element modeling of the tension in an in-house designed rubber sample. The results obtained by employing this technique were in very good agreement with the experimentally measured dynamical data.

Keywords:

SBR/BR compound,
carbon black,
blending,
viscoelastic properties,
finite element

(*)To whom correspondence should be addressed.

E-mail: m.h.r.ghoreishy@ippi.ac.ir

اثر آمیختن دوده‌های مختلف بر خواص مکانیکی آمیزه رویه تایر رادیال سواری

میرحمید رضا قریشی*، محسن فیروزبخت، قاسم نادری

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

دریافت: ۹۱/۶/۲۱، پذیرش: ۹۱/۱۰/۲۸

چکیده

در این پژوهش، اثر استفاده از دوده‌ها به دو شکل تک و مخلوط بر خواص مکانیکی، دینامیکی و گرمایی آمیزه لاستیکی رویه تایر سواری رادیال بررسی شد. بدین منظور، ابتدا یک فرمول‌بندی بر پایه دو کائوچوی مصنوعی SBR و BR و ۶۰ قسمت وزنی دوده به همراه سایر اجزای آمیزه‌کاری در نظر گرفته شد. سپس ۱۰ آمیزه بر پایه آمیزه مینا، با دوده‌های مختلف تهیه و آزمون‌های لازم پس از پخت روی آنها انجام شد. این آزمون‌ها شامل آزمون‌های مکانیکی (استحکام کششی، درصد ازدیاد طول، سایش، سختی و جهنگی)، آزمون‌های دینامیکی شامل DMTA در حالت کششی و همچنین آزمون گرمایی بودند. نتایج به دست آمده حاکی از این است که آمیزه حاوی دوده N550 کمترین مقاومت سایشی و افزایش دما را نشان می‌دهد. در حالی که آمیزه حاوی دوده N220 به دلیل ساختار پیچیده‌ترین گرماندوژی را دارد. برای رسیدن به حالت توازن از نظر خواص مکانیکی و دینامیکی از مخلوط دوده‌ها بهره گرفته شد که بهبود در مقاومت غلتشی، قدرت چنگ‌زنی و مقاومت سایشی را به همراه داشت. همچنین، در پژوهش‌های پیشین نشان داده شده بود که می‌توان با استفاده از داده‌های آزمون کشش روی نمونه‌های نواری شکل رفتار ابرکشسان گراندرو آمیزه‌های لاستیک پخت شده را مطالعه کرد. بنابراین در کار حاضر، روش جدید سنجش مقدار اتلاف انرژی ناشی از تغییر شکل (اختلاف انرژی بین حالت کاملاً کشسان و حالت واقعی) هر آمیزه به کمک روش اجزای محدود و نرم‌افزار ABAQUS/Standard ارائه و نشان داده شد که نتایج حاصل مؤید صحت نتایج به دست آمده از آزمون‌های دینامیکی و گرماندوژی است.

واژه‌های کلیدی

آمیزه لاستیکی SBR/BR،
دوده،
آمیزه‌سازی،
خواص گراندروکشسانی،
اجزای محدود

مقدمه

ایجاد حرکت در خودرو با انتقال نیروی قوای محرکه به سطح جاده، همراه با راحتی حرکت، نرمی، دوام و ایمنی زیاد از مواردی است که تایر باید به آنها پاسخ گوید. تایر از جمله مهم‌ترین اجزای خودروست که نقش بسیار مهمی را در عملکرد آن ایفا می‌کند. از طرف دیگر، تایرها به دلیل وجود مواد با خواص فیزیکی و مکانیکی متفاوت و متناقض همانند لاستیک با قابلیت بروز تغییر شکل‌های بزرگ و سفتی کم در برابر یاف و سیم فولادی با استحکام زیاد و تغییر شکل‌های کم و نیز ساختار و طراحی منحصر به فرد، به گونه‌ای عمل می‌کنند که بهبود یک یا چند خاصیت در آن معمولاً به کاهش سایر ویژگی‌ها منجر می‌شود.

برای تغییر در خواص عملکرد هر تایر همانند سایر محصولات مهندسی معمولاً از دو روش تغییر در خواص فیزیکی و مکانیکی اجزای تشکیل‌دهنده و طراحی هندسی و جانمایی استفاده می‌شود. در این میان، تغییر در فرمول‌بندی آمیزه‌های لاستیکی مصرفی در رویه تایر بیشترین توجه را در بین مهندسان و طراحان تایر به خود جلب کرده است به نوعی که اولین قدم پس از طراحی اولیه تایر و تعیین جانمایی به بهینه‌سازی فرمول‌بندی اختصاص دارد. برای تأمین ویژگی‌های مورد نیاز و نیز دستیابی به ساختاری یک‌پارچه، تایر از آمیزه‌های لاستیکی مختلفی تشکیل می‌شود که بیشترین سهم مربوط به آمیزه رویه تایر است. از سوی دیگر، رویه تایر در تماس مستقیم با سطح جاده است و به نوعی رابط میان تایر و زمین به‌شمار می‌آید. بسیاری از خواص تایر نیز به وسیله رویه و آمیزه آن تأمین می‌شود. بنابراین، بیشترین حجم فعالیت‌های پژوهشی انجام شده در حوزه طراحی آمیزه‌های رویه است.

دست‌یابی به خواص بهینه سه‌گانه مقاومت غلتشی کم، کشانش یا چنگ‌زنی (traction) زیاد و فرسایش (wear) کم را می‌توان جزء اصلی‌ترین و کلیدی‌ترین بخش بهینه‌سازی خواص آمیزه رویه تایر به‌شمار آورد. از آنجا که این سه خاصیت همواره به نوعی رفتار می‌کنند که بهبود در یکی منجر به افت سایر خواص می‌شود، بنابراین بهینه‌سازی هم‌زمان این سه پارامتر چالش‌برانگیزترین بخش طراحی آمیزه رویه تایر برای رسیدن به سایر خواص فیزیکی و مکانیکی را تشکیل می‌دهد.

از حدود دو دهه پیش، استفاده از سیلیکا و سازگارکننده‌های سیلانی در فرمول‌بندی آمیزه رویه در کنار پرکننده‌های کلاسیک و دوده به عنوان یکی از راهکارهای مهم در دست‌یابی به خواص بهینه در میان سه پارامتر یاد شده به‌شمار رفته است. امروزه بسیاری از آمیزه‌های لاستیکی رویه تایرهای سواری را بر مبنای این نوع

پرکننده‌ها (سیلیکا، سیلان و دوده) طراحی می‌کنند. اما، در این میان قیمت زیاد سیلیکا و سیلان و نیز نیاز به تجهیزات گران‌قیمت در مقایسه با فرمول‌بندی‌های مبتنی بر دوده، استفاده از آنها را به‌ویژه در صنعت تایر کشورمان با دشواری‌های زیادی روبه‌رو کرده است. بر این اساس در پژوهش حاضر، پدیده تقویت آمیزه لاستیکی رویه تایر رادیال به کمک آمیخته دوده‌ها با رویکردی جدید مطالعه شده است. مطالعات زیادی در راستای اثر تقویت‌کنندگی دوده بر لاستیک‌ها انجام شده است [۶-۱]. سازوکار تقویت‌کنندگی دوده بر لاستیک‌ها متأثر از عوامل مختلف است. Hess و Klamp [۷] خواص دینامیکی رویه تایر سواری را با تغییر در مقادیر و نوع دوده بررسی کردند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد، با افزایش مساحت سطح دوده مقاومت غلتشی و قدرت چنگ‌زنی یا کشانش افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، افزایش ساختار دوده قدرت چنگ‌زنی را کاهش می‌دهد، درحالی‌که اثر قابل توجهی بر مقاومت غلتشی ندارد. همچنین، دوده با توزیع اندازه خوشه پهن‌تر مقاومت غلتشی کمتری نشان داد. Hong و همکاران [۸] با بررسی اثر اندازه و ساختار دوده بر آمیزه‌های لاستیکی SBR، BR و NR نشان دادند که سرعت سایش با افزایش مساحت سطح و بهبود ساختار دوده کاهش می‌یابد. همچنین در پژوهشی دیگر، سلطانی و عباسی اثر انواع دوده را روی خواص گرمایی آمیزه پخت شده و پخت نشده [۹] مطالعه کردند. نتیجه این مطالعه افزایش چگالی کلوخه‌شدن بر اثر افزایش مساحت سطح و ساختار دوده و نیز افزایش گرماندوزی (heat build up) در نمونه بود.

Neogi و Bhowmick [۱۰، ۱۱] اثر دوده‌های مختلف را بر خواص مکانیکی آمیزه لاستیکی پخت شده SBR و NR بررسی کردند. از نتایج این پژوهش مشخص شد، استحکام کششی و مدول آمیزه با افزایش مساحت سطح و ساختار دوده زیاد می‌شود. در حالی که ازدیاد طول تا شکست آمیزه با پیچیده‌تر شدن ساختار کاهش می‌یابد. در کار مشابهی نیز Kandemirli و همکاران [۱۲] اثر دوده‌های مختلف را در آمیزه SBR/BR بررسی کردند که نتایج حاکی از افزایش استحکام کششی و مدول با کاهش اندازه دوده در مقدار برابر دوده در آمیزه‌های مختلف است. در پژوهشی دیگر، Bijarimi و همکاران [۱۳] نشان دادند که با وجود ساختارهای متفاوت در دوده‌های هم‌اندازه نمی‌توان انتظار داشت، خواص فیزیکی تغییر چشم‌گیری داشته باشد. Donnet و Custodero [۱۴] مبحث تقویت الاستومرها با پرکننده‌ها و بررسی سازوکارهای پیشنهادی را به‌طور مفصل مطالعه کردند که در ادامه در بخش نتایج و بحث در این باره به‌ویژه مدل لغزش مولکولی Dannenberg بحث می‌شود.

در پژوهش حاضر، نقش و اثر چهار دوده مختلف شامل N220،

دوده N220 با اندازه کوچک‌تر و تقویت‌کنندگی زیاد، N375 با اندازه تقریباً برابر و ساختار پیچیده‌تر و از دوده N550 با خواص دینامیکی گرمایی بهتر برای اختلاط، استفاده شد.

سایر مواد استفاده شده در این کار عبارت‌اند از: گوگرد به عنوان عامل ایجاد اتصال عرضی و N-سیکلوهاگزیل-۲-بنزوتیازول سولفونامید (CBS) و ترامتیل تیورام دی‌سولفید (TMTD) به عنوان شتاب‌دهنده همگی محصول Bayer آلمان، روغن آروماتیک ۲۵۰ محصول نفت بهران، موم پارافین تهیه شده از Sasol wax، 6PPD به عنوان ضدآکسنده و ضدآوزون محصول Duslo اسلوواکی، روی آکسید به عنوان فعال‌کننده تهیه شده از پارس آکسید و استتاریک اسید به عنوان فعال‌کننده محصول Rheinchemie.

دستگاه‌ها و روش‌ها

ده فرمول‌بندی آمیزه لاستیکی که در آنها از مقادیر مختلف دوده استفاده شده بود، طراحی شد که در جدول ۲ آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در چهار نمونه اول (S1 تا S4) یک دوده و در ۶ نمونه باقی‌مانده (B1 تا B6) از آمیخته دو نوع دوده استفاده شده است. برای ساخت آمیزه‌های مزبور غلتک آزمایشگاهی به کار گرفته شد. بدین ترتیب که ابتدا کائوچوی استیرن بوتادی‌ان به مدت ۲ min در دمای ۴۰°C برای افت نسبی گرانیوی غلتک‌کاری شد. سپس، کائوچوی بوتادی‌ان برای اختلاط اضافه و به مدت ۳ min غلتک‌کاری شد. در ادامه فعال‌کننده‌های سامانه پخت، عوامل ضدآکسنده و ضدآوزون به‌طور هم‌زمان اضافه و به مدت ۴ min غلتک‌کاری انجام شد. مخلوط دوده و روغن نیز در مدت ۱۰ min به آمیزه اضافه شد. در نهایت، سامانه پخت افزوده و به مدت ۵ min غلتک‌کاری انجام شد. شایان ذکر است، دمای آمیزه نهایی پس از غلتک‌کاری در حدود ۵۷ تا ۶۰°C بود. خواص رئومتر آمیزه‌ها به کمک رئومتر Zwick آلمان طبق استاندارد ASTM 2084 در دمای ۱۶۰°C معین شد. یادآور می‌شود، برای طراحی این فرمول‌بندی و تعیین مقدار اجزای آمیزه‌کاری از تجربیات پیشین استفاده شد.

برای سنجش خواص کششی نمونه‌های ساخته شده، آزمون کشش روی آمیزه‌های مزبور به کمک دستگاه کشش ساخت شرکت هیوا انجام شد. بدین منظور، ابتدا یک صفحه لاستیکی با ضخامت ۲ mm در پرس فشاری پخت شد. سپس، نمونه دمبلی شکل مربوط به آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTM D412-C و یک نوار لاستیکی با طول ۱۱ cm و عرض ۱ cm (برای مدل‌سازی) مطابق مرجع [۱۵] تهیه شد (شکل ۱). نمونه‌ها به‌طور جداگانه بین دو فک دستگاه کشش هیوا قرار داده شده و با سرعت ۵۰۰ mm/min کشیده شدند.

N375، N330 و N550 و نیز آمیخته‌های آنها بر خواص فیزیکی و مکانیکی یک آمیزه لاستیکی بر پایه SBR/BR بررسی شد. این آمیزه می‌تواند برای رویه تایرهای رادیال سواری با کارایی زیاد استفاده شود. تأکید اصلی این کار بر مقدار گرماندوزی و پدیده اتلاف انرژی است که با هدف ایجاد ارتباط با مقدار مقاومت غلتشی در تایر انجام شده است.

در این پژوهش برای نخستین بار، از روش جدیدی استفاده شد که تلفیقی از مقایسه داده‌های تجربی به‌دست آمده از آزمون کشش برای یک نمونه لاستیکی نواری شکل و تحلیل اجزای محدود نمونه مزبور است، تا مقدار اتلاف انرژی که همان اختلاف بین سطوح زیر منحنی در حالت پیش‌بینی شده با مدل و داده‌های تجربی است، در نمونه لاستیکی بررسی شود [۱۷-۱۵]. با استفاده از مقایسه بین انرژی‌های اتلافی محاسبه شده از این روش در نمونه‌های ساخته شده و نیز نتایج آزمون‌های کلاسیک انجام شده می‌توان بهترین آمیخته دوده‌ای را که کمترین مقدار گرمایی همراه با بیشترین مقاومت سایشی و بیشترین مقدار چنگ‌زنی ایجاد می‌کند، مشخص کرد.

تجربی

مواد

لاستیک‌های خام استفاده شده در این پژوهش، کائوچوی استیرن بوتادی‌ان (SBR 1502 پتروشیمی بندر امام) و کائوچوی بوتادی‌ان (BR 1220 پتروشیمی اراک) بود. همچنین، چهار نوع دوده از شرکت کربن ایران با مساحت سطح و ساختارهای متفاوت استفاده شد که مشخصات آنها در جدول ۱ آمده است. دوده N330 از دوده‌های مهم مورد مصرف در صنایع تایرسازی است که به دلیل ضعف در رفتار دینامیکی گرمایی، از جمله گرماندوزی زیاد می‌توان از یک دوده برای اصلاح خواص دینامیکی گرمایی آن با حفظ نسبی خواص مکانیکی استفاده کرد. بنابراین، با محوریت قراردادان دوده N330 از جدول ۱- مشخصات دوده‌های استفاده شده.

نوع دوده				خواص
N550	N375	N330	N220	
۴۵	۹۰	۸۲	۱۲۱	جذب سطحی ید (mg/g)
۱۲۰	۱۱۴	۱۰۲	۱۱۴	جذب دی‌بوتیل فتالات (mL/۱۰۰g)

جدول ۲- فرمول‌بندی آمیزه‌های ساخته شده (قسمت به ازای صد قسمت کائوچو).

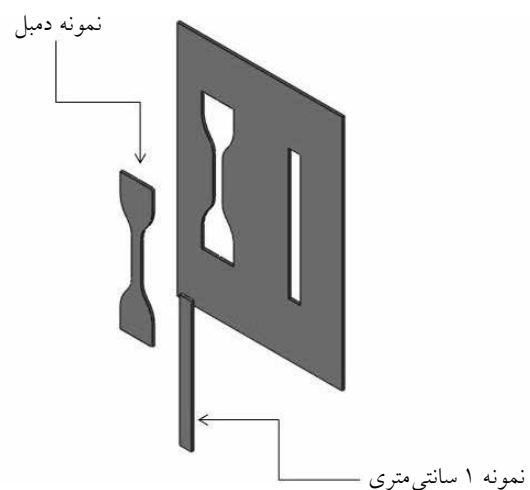
آمیزه										اجزای آمیزه‌کاری
B6	B5	B4	B3	B2	B1	S4	S3	S2	S1	
۷۰	۷۰	۷۰	۷۰	۷۰	۷۰	۷۰	۷۰	۷۰	۷۰	SBR
۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	BR
۴۰	۳۰	-	-	-	-	-	-	-	۶۰	دوده N220
-	-	-	-	۴۰	۳۰	-	-	۶۰	-	دوده N330
-	-	۴۰	۳۰	-	-	-	۶۰	-	-	دوده N375
۲۰	۳۰	۲۰	۳۰	۲۰	۳۰	۶۰	-	-	-	دوده N550
۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	روغن آروماتیک
۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	موم پارافینی
۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	6PPD
۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	روی اکسید
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	استئاریک اسید
۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	CBS
۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	TMTD
۱/۸	۱/۸	۱/۸	۱/۸	۱/۸	۱/۸	۱/۸	۱/۸	۱/۸	۱/۸	گوگرد

مشخص شد. خواص دینامیکی نمونه‌ها به وسیله آزمون DMTA با دستگاه Tritec 2000 ساخت کشور انگلستان و آزمون گرماندوزی نمونه‌ها نیز با استفاده از دستگاه انعطاف‌سنج گودریچ طبق استاندارد ASTM D623 انجام شد.

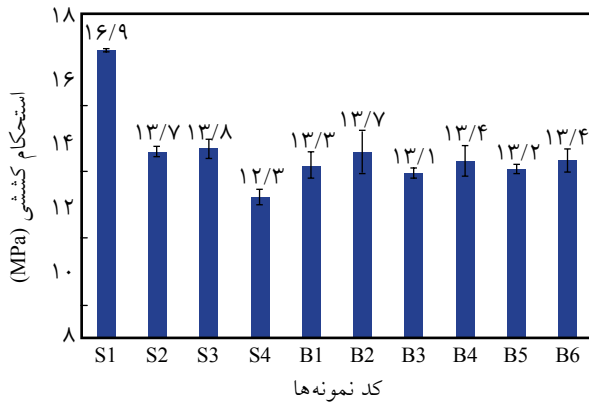
مدل‌سازی گرماندوزی و اتلاف انرژی در لاستیک

پیش از نتایج و بحث لازم است، روش مدل‌سازی استفاده شده در این پژوهش شرح داده شود. همان‌طور که در مقدمه اشاره شد، مهم‌ترین جنبه نوآوری این کار ارائه روشی جدید برای سنجش مقدار گرماندوزی آمیزه‌های لاستیکی است. این روش بر مبنای تلفیق روش شبیه‌سازی کشش یک نمونه لاستیکی به کمک روش اجزای محدود که پیش‌تر برای سنجش رفتار گرانتروکشسان آمیزه‌های لاستیکی به کار برده شده بود [۱۷-۱۵] و پردازش داده‌های تجربی به‌طور هم‌زمان قرار دارد. با توجه به اینکه در مراجع یاد شده جزئیات کار به تفصیل شرح داده شده است، بنابراین از تکرار آنها در اینجا خودداری شده و تنها نکات مهم یادآوری می‌شود. ویژگی مهم این روش در مقایسه با سایر روش‌ها و به‌ویژه اندازه‌گیری‌های تجربی در این است که در اینجا می‌توان اثر تغییر شکل و کرنش بزرگ را به راحتی مشاهده و مطالعه کرد، در حالی که در آزمون‌های تجربی، مطالعات به‌طور عمده

سختی نمونه‌ها به کمک سختی‌سنج در مقیاس Shore A ساخت شرکت Zwick آلمان روی نمونه‌هایی به شکل قرص مطابق با استاندارد ASTM D2240 معین شد. مقدار جهندگی طبق استاندارد ASTM D1054 با دستگاه Resilience Tester Frank ساخت کشور آلمان مشخص شد. برای اندازه‌گیری مقاومت سایشی، نمونه‌های قرصی شکل مطابق با استاندارد ASTM D5963 ساخته شده و مقادیر آن با استفاده از دستگاه Frank Abrasion Tester ساخت آلمان



شکل ۱- صفحه لاستیکی پخت‌شده مورد استفاده در آزمون کشش.



شکل ۳- استحکام کششی نمونه‌ها.



شکل ۲- شبکه اجزای محدود چهاروجهی نمونه ۱ cm.

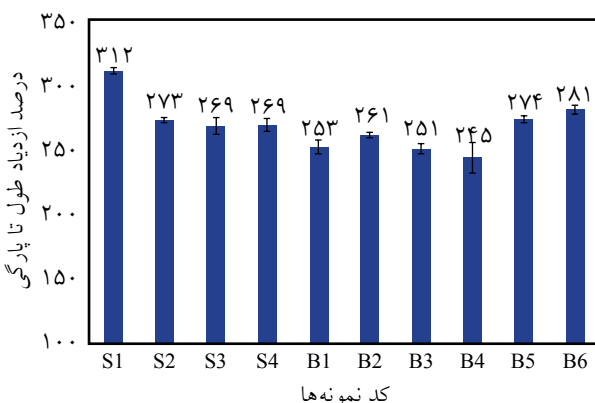
مدول در ۲۰۰ درصد کرنش در شکل‌های ۳ تا ۵ آمده است. در میان آمیزه‌های حاوی یک نوع دوده (یعنی S1 تا S4) همان‌طور که انتظار می‌رود، نمونه حاوی دوده N220 (نمونه S1) بیشترین استحکام کششی (شکل ۳) و درصد ازدیاد طول (شکل ۴) را نشان داد. کاملاً واضح است، دوده ریزتر به دلیل داشتن مساحت سطح بیشتر و تشکیل برهم‌کنش‌های دوده و پلیمر بیشتر و همچنین فاصله کمتر بین خوشه‌ها استحکام کششی بیشتر را سبب می‌شود [۲۱]. از سوی دیگر، دوده N220 نه تنها دارای ابعاد ریز است، بلکه ساختار آن نیز نسبتاً پیچیده است (جدول ۱). بنابراین، آمیزه S1 نسبت به سه آمیزه دیگر (S2، S3، S4) استحکام کششی بسیار بیشتری نشان می‌دهد. با اختلاط دوده‌ها (آمیزه‌های B1 تا B6) نتایج به‌دست آمده از آزمون کشش نشان می‌دهد، تقریباً همه نمونه‌ها در یک محدوده نسبتاً کوچک دارای استحکام کششی یکسان هستند که کمترین مقدار مربوط به آمیزه B3 (13/1 MPa) است و بیشترین به آمیزه B2 (13/7 MPa) اختصاص دارد. اگرچه در این ۶ آمیزه از آمیخته دو دوده با اندازه ذرات متفاوت و ساختارهای مختلف استفاده شده است، اما اثر کاهش یک دوده در برابر اثر افزایشی دوده دیگر به نوعی قرار

در تغییر شکل‌های کوچک انجام می‌شود. مراحل کار بدین ترتیب است که ابتدا نمونه لاستیکی به ضخامت ۲ mm، پهنای ۱ cm و طول ۱۱ cm تهیه می‌شود (شکل ۱). سپس، این نمونه تحت آزمون کشش قرار گرفته و مقادیر نیرو بر حسب ازدیاد طول ثبت می‌شود. سرعت کشش نیز برابر ۵۰۰ mm/min تنظیم می‌شود. این فرایند کشش با روش اجزای محدود و به کمک نرم‌افزار ABAQUS/Standard [۱۸] شبیه‌سازی می‌شود. شکل ۲ شبکه اجزای محدود ایجاد شده را برای شبیه‌سازی مزبور نشان می‌دهد که در آن از اجزای چهاروجهی ۱۰-گره‌ای مرتبه دوم که در آن رفتار مکانیکی ابرکشسان در نظر گرفته شده، استفاده شده است. همچنین، از روش شبکه‌بندی انطباقی (adaptive meshing) نیز برای ایجاد یک شبکه اجزای محدود با دقت و همگرایی زیاد استفاده شد. مدل اجزای محدود همراه با رفتار ابرکشسان Marlow [۱۹،۲۰] (بدون در نظر گرفتن اثر گرانش کشسانی) تحلیل و نمودار نیرو بر حسب تغییر مکان (ازدیاد طول) آن به‌دست آمد که در بخش نتایج و بحث بررسی شد.

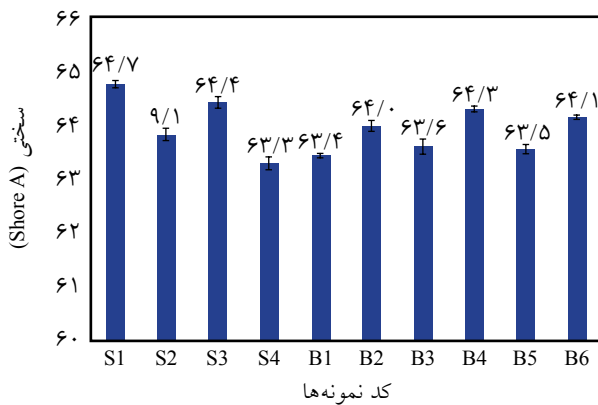
نتایج و بحث

استحکام کششی

نتایج آزمون کشش شامل استحکام کششی، ازدیاد طول تا پارگی و



شکل ۴- درصد ازدیاد طول تا پارگی نمونه‌ها.



شکل ۶- سختی نمونه‌ها.

که ساختار و مساحت سطح بیشتر دارند، زیاده‌تر باشد. بر این اساس طبق انتظار، بیشترین سختی به نمونه S1 و کمترین آن به نمونه S4 مربوط شد که در شکل ۶ مشاهده می‌شود. سختی آمیزه‌های B1 تا B6 به دلیل برهم کنش‌های متفاوت بین دوده‌ها در محدوده کوچکی متغیر است که در بین آمیزه‌های حاوی دو نوع دوده بیشترین سختی به نمونه B4 و کمترین سختی به نمونه B1 اختصاص یافته است.

مقاومت سایشی

به‌طور کلی، سایش یک نمونه الاستومری بر مبنای مقدار اتلاف انرژی آن است. با افزایش اتلاف در نمونه الاستومری، مقاومت به رشد ترک افزایش یافته و مقدار سایش در نمونه کاهش می‌یابد. از طرفی، باعث افزایش ضریب اصطکاک شده که موجب افزایش مقدار سایش می‌شود. به‌طور کلی یک اتلاف انرژی بهینه وجود دارد که در آن مقاومت سایشی به بیشترین مقدار رسیده و سپس کاهش می‌یابد. با توجه به اثر اندازه و ساختار دوده بر مقدار اتلاف انرژی و مقاومت سایشی [۲۲، ۲۳] انتظار می‌رود، آمیزه حاوی دوده N220 (نمونه S1) به دلیل داشتن مساحت سطح و ساختار پیچیده، بیشترین مقاومت سایشی را داشته باشد که به دلیل دارا بودن بیشترین مقدار دوده N220 در مقایسه با سایر نمونه‌های حاوی دو نوع دوده و به‌ویژه B5 است که در آن از دوده N220 ولی به مقدار کمتر استفاده شده است. نتایج داده شده در شکل ۷ نیز این نکته را تأیید می‌کند. کمترین مقدار سایش در میان آمیزه‌های حاوی دو نوع دوده نیز به نمونه B6 مربوط شد. یادآور می‌شود، به دلیل اینکه چگالی آمیزه‌ها تقریباً یکسان بود، مقدار درصد سایش گزارش شده وزنی است.

گرماندوزی و جهندگی

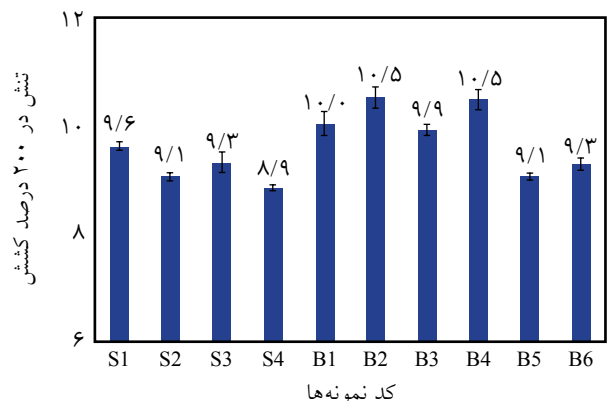
نتایج حاصل از آزمون‌های گرماندوزی و جهندگی آمیزه‌های تهیه شده با ۶۰ قسمت وزنی دوده‌های مختلف در شکل ۸ نشان

گرفته است که تقریباً تمام استحکام‌های کششی در محدوده استحکام کششی به‌دست آمده از دوده‌های با اندازه و ساختار متوسط که در آمیزه‌های S2 و S3 استفاده شده بود، قرار می‌گیرد. بنابراین، هر دوده در آمیخته اثر خود را روی خواص نشان می‌دهد. درباره درصد ازدیاد طول تا پارگی نیز کم و بیش همین وضعیت وجود دارد. بدین معنی که هر دوده اثر خود را به‌طور مجزا روی این ویژگی نشان داده و اعمال کرده است.

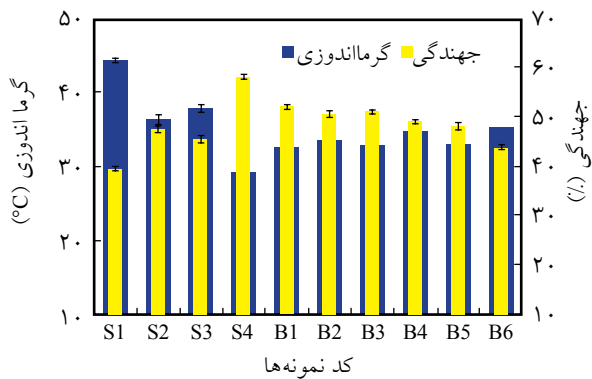
با توجه به شکل ۵ می‌توان عنوان کرد، در مقایسه نمونه‌های حاوی یک نوع دوده بیشترین مقدار مدول در ۲۰۰ درصد ازدیاد طول مربوط به دوده‌ای است که بزرگ‌ترین عدد جذب دی‌بوتیل فتالات (یعنی پیچیده‌ترین ساختار) و جذب سطحی ید (بیشترین مساحت سطح) را دارد (نمونه S1). به‌طور کلی، اثر افزایش مساحت سطح فعال بیشتر از اثر پیچیدگی ساختار است. البته باید این نکته را در نظر داشت، با افزایش سطح فعال دوده مدول نمونه به مقدار حداکثر رسیده و سپس کاهش می‌یابد. اما، با پیچیده شدن ساختار روند افزایشی مدول حفظ می‌شود. مشاهده می‌شود، نمونه S4 با وجود داشتن ساختار پیچیده دوده موجود در آن (N550) مدول کمتری نسبت به سایر آمیزه‌ها دارد که به اندازه درشت ذرات دوده مربوط می‌شود. با بررسی کمی مقادیر آمیزه‌های حاوی اختلاط دوده‌ها (B1 تا B6) می‌توان به اثر مهم برهم‌کنش‌های دوده‌ها با یکدیگر و نیز برهم‌کنش با پلیمر [۲، ۴، ۵] روی مدول پی برد. در این میان، مدول نسبتاً کم نمونه‌های B5 و به‌ویژه B6 را می‌توان احتمالاً به برهم‌کنش ضعیف دوده‌های N220 و N550 نسبت داد.

سختی آمیزه‌ها

نتایج آزمون سختی در شکل ۶ حاکی از این است که با توجه به ثابت بودن مقدار دوده در آمیزه‌ها انتظار می‌رود، سختی آمیزه‌هایی



شکل ۵- تنش در ۲۰۰٪ کشش (مدول ۲۰۰٪).

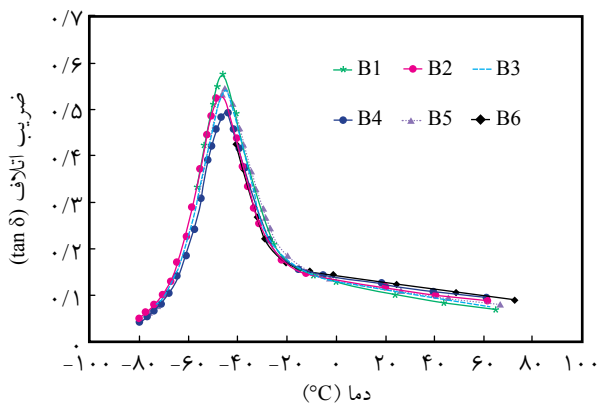


شکل ۸- گرماندوژی و جهندگی نمونه‌ها.

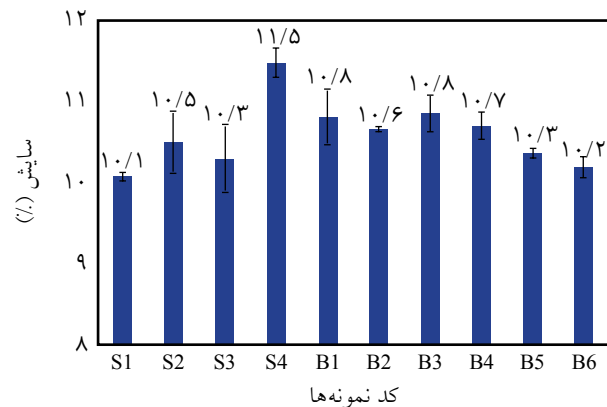
بررسی گرماندوژی و جهندگی آمیزه‌ها در شکل ۸ نیز نشان می‌دهد، نمونه B1 به دلیل داشتن دوده‌هایی با مساحت سطح کمتر نسبت به سایر آمیزه‌ها کمترین گرماندوژی و بیشترین جهندگی را نسبت به آمیزه‌های حاوی دو نوع دوده مختلف دارد.

رفتار دینامیکی - مکانیکی - گرمایی آمیزه‌ها

نتایج آزمون DMTA روی آمیزه‌های S1 تا B6 در محدوده دمایی 70°C تا 7°C و بسامد ۱ Hz در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. شکل ۹ تغییرات ضریب اتلاف نمونه‌های حاوی یک نوع دوده و شکل ۱۰ نمونه‌های حاوی دو نوع دوده را نشان می‌دهد. برای مطالعه بهتر، مقادیر ضریب اتلاف انرژی یا $\tan \delta$ به شکل بزرگ‌نمایی شده در محدوده دمایی 50°C تا 70°C برای سنجش مقاومت غلتشی [۲۶] در شکل ۱۱ و در محدوده دمایی 10°C تا 10°C برای سنجش قدرت چنگ‌زنی یا کشانش در سطوح خیس در شکل ۱۲ نشان داده شده‌اند. همانند نتایج آزمون گرماندوژی، شکست برهم‌کنش‌های دوده-دوده و دوده-پلیمر برای دوده‌های با مساحت سطح بزرگ‌تر و ساختار پیچیده‌تر، بیشتر و در نتیجه اتلاف انرژی به شکل گرما بیشتر خواهد



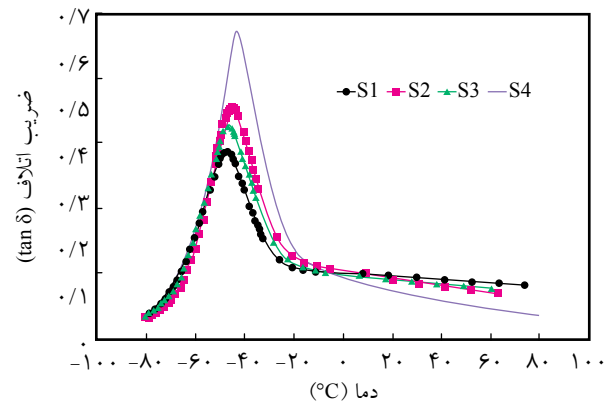
شکل ۱۰- نمودار تغییرات ضریب اتلاف نمونه‌های B1 تا B6 بر حسب دما.



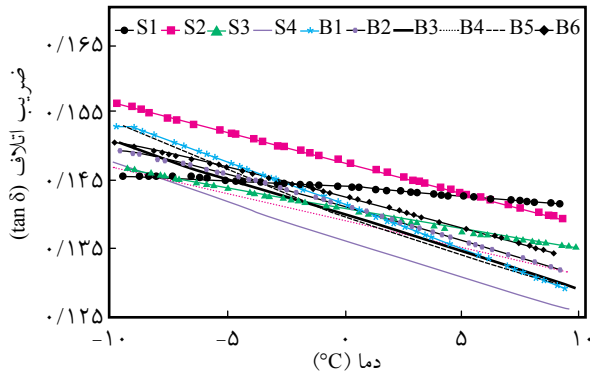
شکل ۷- درصد ساییش نمونه‌ها (عدد کمتر نشان‌دهنده مقاومت ساییشی بیشتر است).

می‌دهد، نمونه S4 کمترین گرماندوژی و بیشترین جهندگی را دارد. سازوکارهای زیادی برای عملکرد اتلاف انرژی به وسیله دوده‌ها گزارش شده است، که می‌توان به اتلاف انرژی ناشی از شکست کلوخه‌ها، جریان گرانبه موضعی زیاد و سرخوردگی زنجیرهای پلیمر روی سطح پرکننده [۱۴،۲۴،۲۵] اشاره کرد. بنابراین، مقدار دوده و شکل‌شناسی آن نقش مهمی در مقدار اتلاف گرمایی ایفا می‌کند. هر چه دوده ریزتر (مساحت سطح بیشتر) و ساختار آن بزرگ‌تر باشد، برهم‌کنش‌های پرکننده-پرکننده و پرکننده-پلیمر بیشتر شده، فاصله بین خوشه‌ها کمتر می‌شود (افزایش احتمال تشکیل شبکه پرکننده). همچنین، مقدار سرخوردگی زنجیرهای لاستیک روی سطح پرکننده افزایش می‌یابد و در نتیجه در اثر تنش‌های وارد شده انرژی بیشتری به شکل گرما اتلاف می‌شود.

مقدار جهندگی به مقدار کشسانی و قابلیت ذخیره انرژی نمونه‌ها وابسته است که در نقطه مقابل گرماندوژی قرار دارد. بدین ترتیب، دوده N220 بیشترین گرماندوژی و کمترین مقدار جهندگی را دارد.



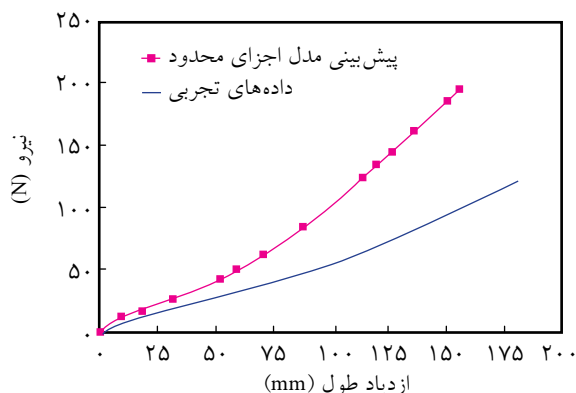
شکل ۹- نمودار تغییرات ضریب اتلاف نمونه‌های S1 تا S4 بر حسب دما.



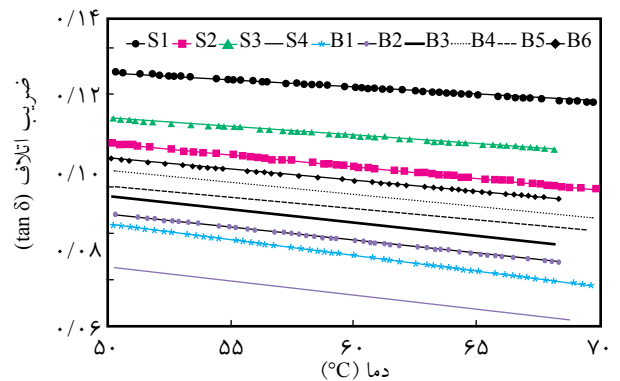
شکل ۱۲- نمودار تغییرات ضریب اتلاف در محدوده 10°C تا 10°C بر حسب دما (محدوده دمایی سنجش قدرت چنگ‌زنی تاپر).

دلیل بروز پدیده گرانش‌کشسانی است که همراه با رفتار ابرکشسانی در نمونه لاستیکی رخ می‌دهد [۱۷-۱۵]. بنابراین، در نمودار پیش‌بینی شده به کمک روش اجزای محدود به دلیل در نظر نگرفتن رفتار گرانش‌کشسانی نیروی بیشتری محاسبه شده است. اما نکته اصلی این است که اختلاف یاد شده را می‌توان به مقدار اتلاف انرژی مرتبط دانست. بدین ترتیب که اختلاف مساحت سطح زیر منحنی تغییرات نیرو بر حسب ازدیاد طول پیش‌بینی شده به وسیله مدل اجزای محدود ابرکشسان و نمودار نیرو بر حسب ازدیاد طول به دست آمده از داده‌های تجربی بیانگر انرژی اتلافی یا به عبارت بهتر گرماندوژی در نمونه لاستیکی مورد مطالعه است. این اختلاف برای آمیزه‌های مورد مطالعه در کار پژوهشی حاضر به دست آمد که نتایج مربوط در شکل ۱۵ نشان داده شده‌اند.

همان‌طور که در شکل ۱۵ مشاهده شد، بیشترین انرژی اتلافی مربوط به نمونه S1 و کمترین انرژی اتلافی مربوط به نمونه S4 است. واضح است که نمونه S1 به دلیل داشتن دوده N220 که تقریباً بیشترین مساحت سطح و ساختار را دارد، بیشترین برهم‌کنش دوده - دوده و



شکل ۱۴- نمودار تغییرات نیرو بر حسب ازدیاد طول در نمونه ۱ cm در دو حالت تجربی و مدل اجزای محدود ابرکشسان برای آمیزه S4.

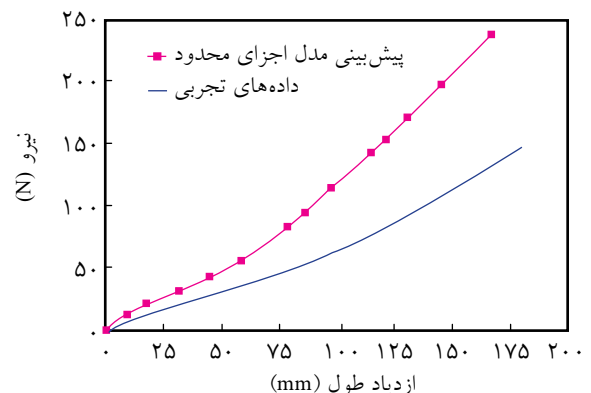


شکل ۱۱- نمودار تغییرات ضریب اتلاف در محدوده 50°C تا 70°C (محدوده دمایی سنجش مقاومت غلتشی).

بود. بنابراین، هر چه ضریب اتلاف انرژی در شکل ۱۱ بیشتر باشد، مقدار اتلاف انرژی یا مقاومت غلتشی نیز بیشتر است. آمیزه حاوی دوده N220 به دلیل دارا بودن بزرگ‌ترین ساختار و کوچک‌ترین اندازه ذرات بیشترین مقاومت غلتشی را دارد که در طرف مقابل آن آمیزه دارای دوده N550 قرار دارد. در آمیزه‌های حاوی دو نوع دوده نیز مشاهده شده است که نمونه B1 کمترین ضریب اتلاف انرژی یا مقاومت غلتشی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۲ دیده می‌شود، هر چه مقدار ضریب اتلاف بیشتر باشد، قابلیت چنگ‌زنی و کشانش در سطوح خیس و یخ‌زده بیشتر می‌شود. نتایج نشان می‌دهد، نمونه S2 بیشترین قابلیت چنگ‌زنی یعنی بیشترین ایمنی را دارد.

انرژی اتلافی محاسبه شده آمیزه‌ها به کمک مدل‌سازی

همان‌طور که قبلاً گفته شد، با رسم هم‌زمان نمودار نیرو بر حسب ازدیاد طول حاصل از مدل‌سازی و داده‌های تجربی (که در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ به‌طور نمونه برای آمیزه‌های S1 و S4 رسم شده‌اند) مشاهده می‌شود که بین این دو دسته داده اختلاف وجود دارد. این اختلاف به



شکل ۱۳- نمودار تغییرات نیرو بر حسب ازدیاد طول در نمونه ۱ cm در دو حالت تجربی و مدل اجزای محدود ابرکشسان برای آمیزه S1.

الاستومر و پرکننده به‌ویژه در کرنش‌های مختلف در نظر گرفته شود. این موضوع را می‌توان به کمک نظریه‌های مولکولی دنبال کرد. از مهم‌ترین نظریه‌های مولکولی در این زمینه مدل لغزش مولکولی **Dannenberg** [۱۴] است که در آن اتلاف انرژی و مقدار پسماند (*hysteresis*) حاصل از برهم‌کنش پرکننده - پلیمر در کرنش‌های کم و زیاد بررسی شده‌اند. به‌طور اختصار چنین فرض می‌شود، با افزایش کرنش، زنجیره‌های الاستومری که پلی بین دو ذره پرکننده‌اند، کشیده می‌شوند. بدیهی است که این کشش در زنجیر لاستیکی بین دو ذره به دلیل پدیده توسعه کرنش (*strain amplification*) بزرگ‌تر از تغییر شکل ماکروسکوپی است.

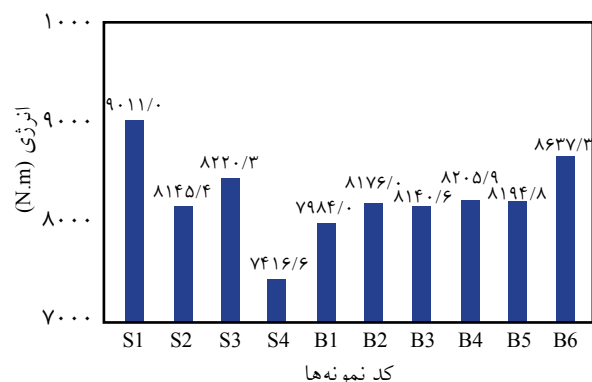
در کرنش‌های خیلی کم انرژی تغییر شکل ماکروسکوپی در زنجیره‌های کشیده شده ذخیره می‌شود که کاملاً با کاهش کرنش برگشت‌پذیر است. در این حالت، مدول اتلاف بسیار کم و تقریباً ثابت بوده و بنابراین اتلاف انرژی بسیار کم است. در کرنش‌های زیاد مقدار انرژی کشسان ذخیره شده حاصل از کشش در سرعت زیاد بر انرژی جذب سطحی زنجیرها غلبه کرده و زنجیره‌های لاستیکی به شکل فزاینده از سطح دوده جدا می‌شوند. این جدایی زنجیرها از سطح منجر به بزرگ‌تر شدن پل لاستیکی بین دو ذره می‌شود. به دلیل وابستگی معکوس مدول ذخیره با طول پل لاستیکی و نیز تبدیل بخشی از انرژی کشسان ذخیره شده اولیه در زنجیره‌های تغییر شکل یافته به تحرک‌های مولکولی، باعث می‌شود تا اتلاف مکانیکی رخ دهد و مدول اتلاف نیز افزایش می‌یابد. از طرفی، دفع زنجیره‌های لاستیکی از سطح دوده به دلیل توزیع پهن فواصل بین کلوخه‌ها و نیز توزیع پهن قطعه‌های لاستیکی بین دو ذره به تدریج انجام می‌گیرد.

مقدار مدول اتلاف و ذخیره به واسطه تغییر در فواصل ایجاد شده بین کلوخه‌ها و مقدار جذب سطحی زنجیرها روی سطح دوده متغیر است. بدین شکل که با کاهش فاصله متوسط بین کلوخه‌ها افزایش پسماند انرژی حاصل می‌شود. بدیهی است، پیچیده‌تر شدن ساختار، افزایش مساحت سطح (کاهش اندازه کلوخه‌ها) و نیز افزایش بارگذاری پرکننده فواصل بین کلوخه‌ها را کاهش داده که بیشترین اتلاف انرژی و در نتیجه حداکثر گرماندوزی را موجب می‌شود. بررسی اثر کرنش‌های کم و زیاد در کار فعلی به دو روش آزمون‌های گرمایی و دینامیکی گرمایی در کرنش‌های کم و روش ابداعی در این پژوهش در کرنش‌های زیاد میسر شد. بدیهی است، برای اعتبارافزایی روش فعلی انجام آزمون‌ها و شبیه‌سازی در سایر مدهای تغییر شکل به‌ویژه برشی کاملاً ضروری است که در پژوهش‌های بعدی بررسی می‌شود.

دوده - پلیمر را نیز دارد. این مسئله باعث می‌شود، مقدار سرخوردگی زنجیره‌های لاستیک روی سطح پرکننده افزایش یافته و در نتیجه در اثر نیروی اعمال شده در آزمون کشش روی نمونه لاستیکی انرژی بیشتری به شکل گرما اتلاف شود. حال هرچه نیروی کشش نمونه لاستیکی بیشتر باشد، انرژی تلف شده بیشتر بوده و گرمای بیشتری نیز در نمونه آزاد می‌شود. از طرفی در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، در آمیزه‌های حاوی دو نوع دوده بیشترین انرژی اتلافی به نمونه B6 و کمترین مقدار به نمونه B1 مربوط است.

با مقایسه شکل‌های ۸ و ۱۵ می‌توان مشاهده کرد، دقیقاً ارتباطی منطقی بین داده‌های آزمون گرماندوزی، جهندگی، دینامیکی و داده‌های حاصل از مدل‌سازی (مقدار اتلاف انرژی) برقرار است. بدیهی است، نمونه‌ای که بیشترین انحراف را از حالت کاملاً کشسان خود دارد، بیشترین مقدار اتلاف انرژی را نیز دارد و طبیعتاً گرمای بیشتری تولید می‌کند. از طرفی، هرچه نمونه کشسان‌تر و مقدار جهندگی آن بیشتر باشد، اتلاف انرژی در آن کمتر است [۱۴]. بر این اساس در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، آمیزه‌های حاوی یک نوع دوده S1، S2، S3 و S4 به ترتیب بیشترین (S1) تا کمترین (S4) مقدار اتلاف انرژی را دارند که همین روند در آزمون گرماندوزی در شکل ۸ و نیز در آزمون دینامیکی در شکل ۱۱ مشاهده شد. در آمیزه‌های حاوی دو نوع دوده نیز B1، B2، B3، B4، B5 و B6 به ترتیب بیشترین (B6) تا کمترین (B1) مقدار اتلاف انرژی یا گرماندوزی را نشان دادند. مقدار جهندگی نمونه‌ها (شکل ۸) نیز با مقدار اتلاف انرژی روند معکوس نشان می‌دهد. یعنی نمونه‌ای که بیشترین اتلاف انرژی را دارد، کمترین جهندگی (S1) و نمونه‌ای که کمترین اتلاف انرژی (S4) را داشته بیشترین جهندگی را نشان می‌دهد.

نکته مهم این است که در پدیده اتلاف انرژی و گرمایی لاستیک‌های تقویت‌شده با پرکننده‌هایی از نوع دوده، سازوکارهای تقویت و اتلاف بسیار پیچیده بوده و لازم است تا اثر برهم‌کنش



شکل ۱۵- نمودار مقدار انرژی تلف شده برای آمیزه‌های S1 تا B6.

نتیجه گیری

N330 و N550 مقادیر زیاد مقاومت سایشی، مقاومت غلتشی کم، استحکام کششی زیاد و کشانش یا چنگ زنی مناسب را نشان داد. همچنین، مقدار گرماندوژی یا انرژی اتلاف آمیزه‌ها به کمک روش جدیدی به دست آمد که تلفیقی از مقایسه داده‌های تجربی و تحلیل اجزای محدود به کمک نرم‌افزار ABAQUS/Standard است که تأییدی بر نتایج آنها بود. بدین ترتیب این روش می‌تواند به عنوان روشی ارزان و کارا، جایگزین بسیار مناسبی برای سنجش عملکرد اتلاف انرژی آمیزه‌های لاستیکی به جای روش‌های مشکل و گران اندازه‌گیری رفتار دینامیکی شود که در کرنش‌های زیاد استفاده می‌شود.

در این پژوهش، اثر آمیختن دوده‌های مختلف روی خواص مکانیکی، دینامیکی و گرمایی آمیزه تایر رادیال سواری کارآمد بررسی شده است. نتایج آزمون‌های ایستا نظیر کشش، سختی و جهندگی همراه با آزمون‌های پویا همانند گرماندوژی حاکی از آن است که آمیزه‌های حاوی دو نوع دوده نه تنها می‌توانند تعادلی در خواص دینامیکی، مکانیکی و گرمایی برقرار کنند، بلکه موجب بهبود خواص کلیدی بدون افت خواص دیگر می‌شوند. آمیزه حاوی دو نوع دوده به‌ویژه

مراجع

- Blow C.M., Polymer/Particulate Filler Interaction-The Bound Rubber Phenomena, *Polymer*, **14**, 309-323, 1973.
- Frohlich J., Niedermeier W., and Luginsland H.D., The Effect of Filler-Filler and Filler-Elastomer Interaction on Rubber Reinforcement, *Composites: Part A*, **36**, 449-460, 2005.
- Boonstra B.B., Role of Particulate Fillers in Elastomer Reinforcement: A Review, *Polymer*, **20**, 691-704, 1979.
- Wang M.J., Effect of Filler-Elastomer Interaction on Tire Tread Performance, Part I. Hysteresis of Filled Vulcanizates, *Kautschuk Gummi Kunststoffe*, **60**, 438-443, 2007.
- Wang M.J., Effect of Filler-Elastomer Interaction on Tire Tread Performance, Part II. Effects on Wet Friction of Filled Vulcanizates, *Kautschuk Gummi Kunststoffe*, **61**, 33-42, 2008.
- Wang M.J., Effect of Filler-Elastomer Interaction on Tire Tread Performance, Part III. Effects on Abrasion, *Kautschuk Gummi Kunststoffe*, **61**, 159-165, 2008.
- Hess W.M. and Klamp W.K., The Effects of Carbon Black and other Compounding Variables on Tire Rolling Resistance and Traction, *Rubber Chem. Technol.*, **56**, 390-417, 1983.
- Hong C.K., Kim H., Ryu E., Nah C., and Huh Y., Effects of Particle Size and Structure of Carbon Blacks on the Abrasion of Filled Elastomer Compounds, *J. Mater. Sci.*, **42**, 8391-8399, 2007.
- Soltani S. and Abbasi Sourki F., Effect of Carbon Black Type on Viscous Heating, Heat Build-up, and Relaxation Behaviour of SBR Compounds, *Iran Polym. J.*, **14**, 745-751, 2005.
- Neogi C., Bhowmick A.K., and Basu S.P., Threshold Tensile Strength and Modulus of Carbon-Black-Filled Rubber Vulcanizates, *J. Mater. Sci.*, **25**, 3524-3530, 1990.
- Neogi C., Bhowmick A.K., and Basu S.P., Threshold Tear Strength of Carbon Black Filled Rubber Vulcanizates, *J. Appl. Polym. Sci.*, **41**, 917-928, 1990.
- Kandemirli F., Demirhan E., and Kandemirli M., Behavior of Furnace Black Types in Cis Polybutadiene Rubber (CBR) Compounds and Changes in the Rheological Properties of SBR-1502/CBR-1203 Types of Rubber Compounds, *Polym. Test.*, **21**, 367-371, 2002.
- Bijarimi M., Zulkaffi H., and Beg M.D.H., Mechanical Properties of Industrial Tyre Rubber Compounds, *J. Appl. Sci.* **10**, 1345-1348, 2010.
- Donnet J.B. and Custodero E., Reinforcement of Elastomers by Particulate Fillers, *Science and Technology of Rubber*, Mark J.E., Erman B., and Eirich F.R. (Eds.), 3rd ed., Elsevier Academic, London, Chapt. **8**, 367-400, 2005.
- Ghoreishy M.H.R., Simulating Mechanical Behavior a Tread Rubber Compound by a Hyperelastic/Hysteresis Model, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (In Persian)*, **24**, 369-377, 2011.
- Ghoreishy M.H.R., Determination of the Parameters of the Prony Series in Hyper-viscoelastic Material Models Using the Finite Element Method, *J. Mater Design*, **35**, 791-797, 2012.
- Ghoreishy M.H.R., Alimardani M., Mehrabian R.Z., and Taghvaei Gangali S., Modeling the Hyperviscoelastic Behavior of a Tire Tread Compound Reinforced by Silica and Carbon Black, *J. Appl. Polym. Sci.*, **128**, 1725-1731, 2013.
- ABAQUS, Version 6.10, 2010.
- Marlow R.S., A General First-Invariant Hyperelastic Constitu-

- tive Model, Busfield J.J.C. and Muhr A.H. (Eds.), *Constitutive Models for Rubber III*, Lisse, Swets and Zeitlinge, 157-160, 2003.
20. Ghoreishy M.H.R., An Experimental and Numerical Verification of Different Hyperelastic Material Models for Rubbers under Tension and Compression Loads, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (In Persian)*, **22**, 273-284, 2009.
21. Gent A.N. and Pulford C.T.R., Micromechanics of Fracture in Elastomers, *J. Mater. Sci.*, **19**, 3612-3619, 1984.
22. Ban L.L., Hess W.M., and Papazian L., New Studies of Carbon-Rubber Gel, *Rubber Chem. Technol.*, **47**, 858-894, 1974.
23. Veith A.G. and Chirico V.E., A Quantitative Study of the Carbon Black Reinforcement System for Tire Tread Compounds, *Rubber Chem. Technol.*, **52**, 748-763, 1979.
24. Ulmer J.D., Hess W.M., and Chirico V.E., The Effects of Carbon Black on Rubber Hysteresis, *Rubber Chem. Technol.*, **47**, 729-757, 1974.
25. Dannenberg E.M., The Effects of Surface Chemical Interactions on the Properties of Filler-Reinforced Rubbers, *Rubber Chem. Technol.*, **48**, 410-444, 1975.
26. Saito Y., New Polymer Development for Low Rolling Resistance Tires, *Kautschuk Gummi Kunststoffe*, **39**, 30-32, 1986.