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

Iran. J. Polym. Sci. Technol.
(Persian),
Vol. 31, No. 2, 111-127
June- July 2018
ISSN: 1016-3255
Online ISSN: 2008-0883
DOI: 10.22063/JIPST.2018.1570

Water Jet Rubber Powder in Passenger Tyre Tread Formulation

Mehdi Shiva[1*], Mahmood Ariane Jad[2]

1. Department of Chemical Engineering, Birjand University of Technology,
Postal Code: 9719866981, Birjand, Iran
2. Department of Technology and Research, Kavir Tyre Co., P.O. Box: 518, Birjand, Iran

Received: 6 June 2017, accepted: 7 May 2018

ABSTRACT

Hypothis: Rubber powder with a very fine particle size, rough surface and very low impurities can be prepared by water jet technology. The use of this powder as a suitable additive in tyre compounds is very important from economic and environmental viewpoints.

Methods: Morphology of the water jet powder was investigated using SEM. The rubber powder was added to a SBR/BR-based tyre tread formulation and the curing behavior and mechanical properties of the resultant product were determined. A full factorial experimental design was also conducted to study simultaneously the effects of rubber powder, sulfur and carbon black levels on the curing and mechanical properties of tyre tread formulation. Furthermore, the modification effect of Vestenamer additive and curing agent on the formulation properties was investigated. When using design of experiments, for each property the regression models with linear and binary interaction terms on the basis of three variables were successfully developed and statistically validated.

Findings: The rubber powder showed a lowering effect on tensile properties, which was attributed to reduced crosslink density due to the sulfur migration from the rubber matrix to the powder phase. A small, but statistically significant negative effect on the aging, abrasion and resilience properties of rubber compound was also observed, However, the tear resistance and de Mattia crack growth were improved with increasing rubber powder content, that could be attributed to the lesser effect of rubber powder on the compound modulus. It was shown that with some increase in the curing agent, sulfur and accelerator dosage, it was possible to compensate for the tensile properties to some extent and for the abrasion, resilience and aging properties completely, whereas others remained relatively unchanged. It was also shown that except for abrasion, the Vestenamer processing aid had little improving effect in the presence of rubber powder.

Keywords:
rubber powder,
compounding,
environment,
statistical analysis,
tyre tread

(*)To whom correspondence should be addressed.
E-mail: mehdishiva@birjandut.ac.ir

Please cite this article using:
Shiva M., Ariane Jad M., Water Jet Rubber Powder in Passenger Tyre Tread Formulation, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **31**, 111-127, 2018.

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

پودر لاستیک جت آبی در آمیزه رویه تایر سواری

مهدی شیوا[1*] ، محمود آریانژاد[2]

۱- بیرجند، دانشگاه صنعتی بیرجند، گروه مهندسی شیمی، کد پستی: ۹۷۱۹۸۶۶۹۸۱

۲- بیرجند، شرکت کویر تایر، واحد تکنولوژی، صندوق پستی: ۵۱۸

دریافت: ۱۳۹۶/۳/۱۶، پذیرش: ۱۳۹۷/۲/۱۷

مجله علوم و تکنولوژی پلیمر،
سال سی‌ویکم، شماره ۲،
صفحه ۱۲۷-۱۱۱، ۱۳۹۷
ISSN: 1016-3255
Online ISSN: 2008-0883
DOI: 10.22063/JIPST.2018.1570

چکیده

در این پژوهش، اثر استفاده از پودر لاستیک ریزدانه تهیه شده به روش جت آب در آمیزه رویه تایر رادیال سواری مطالعه شده است. آثار برهم‌کنشی پودر لاستیک با سایر اجزای فرمول‌بندی در قالب طرح آزمون آماری، افزودن کمک‌فراورش (Vestenamer)، همچنین اثر افزایش مقدار عوامل پخت آمیزه‌ها در مجاورت پودر لاستیک مطالعه شد. آمیزه‌های لاستیکی در مخلوط‌کن داخلی آزمایشگاهی تهیه و نتایج خواص رئومتری و فیزیکی به‌دست آمده تحلیل شد. در بخش طرح آزمون آماری مدل‌های رگرسیون شامل جمله‌های خطی و برهم‌کنش دوتایی برحسب سه متغیر مورد مطالعه برای هر خاصیت به‌طور موفقیت‌آمیز توسعه و اعتبارسنجی آماری شد. پودر لاستیک اثر کاهشی بر خواص کششی نشان داد که بخشی از آن به کاهش چگالی اتصالات عرضی به واسطه مهاجرت گوگرد از فاز لاستیک به فاز پودر لاستیک نسبت داده شد. کاهش جزئی اما معنی‌دار آماری در خواص و رفتار پیرسازی، جهندگی و سایش از دیگر ویژگی‌های استفاده از پودر لاستیک بود. اما، مقاومت پارگی و رشد ترک دی‌متیا با افزایش پودر بهبود معنی‌دار نشان داد که به اثر کاهشی پودر لاستیک بر مدول آمیزه ارتباط داده شد. نشان داده شد، با افزایش جزئی مقدار عوامل پخت، گوگرد و شتاب‌دهنده، می‌توان ضمن حفظ نسبی سایر خواص، کاهش خواص کششی را تا حدودی و کاهش سایش، جهندگی و پیرسازی را به‌طور کامل جبران کرد. همچنین نشان داده شد، در محدوده مطالعه شده کمک‌فراورش وستنامر اثر چندانی بر خواص به‌جز سایش در مجاورت پودر لاستیک ندارد.

واژه‌های کلیدی

پودر لاستیک،
آمیزه‌کاری،
محیط زیست،
تحلیل آماری،
رویه تایر

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:
mehdishiva@birjandut.ac.ir

مقدمه

دورریز محصولات لاستیکی، به‌ویژه تایر مستعمل مشکلات زیست‌محیطی بسیاری ایجاد کرده و تلاش‌های زیادی برای بازیافت و استفاده مجدد از آن‌ها با اهداف زیست‌محیطی و نیز ملاحظات اقتصادی انجام شده است. این مهم به یاری روش‌های مختلف گرمامکانیکی، سرمامکانیکی و شیمیایی انجام شده است [۱]. تولید پودر لاستیک از خردایش تایر، از روش‌های مهم برای استفاده مجدد از تایرهای فرسوده بوده و راهی مؤثر برای کاهش مشکلات زیست‌محیطی مرتبط با تایرهای دور ریخته فراهم می‌آورد. همچنین، در مقایسه با بسیاری از روش‌های بازیافت تایر از جمله پیرولیز، آلودگی زیست‌محیطی و هزینه سرمایه‌گذاری کمتری دارد. امروزه پودر حاصل از تایر فرسوده موسوم به GTR موارد کاربرد خوبی پیدا کرده است [۲]. GTR می‌تواند از خردایش مکانیکی در دمای محیط، شرایط مرطوب، دمای زیاد و نیز در شرایط سرمایشی تولید شود [۲].

به دلیل حجم زیاد تولید، اگر بتوان از پودر لاستیک به‌عنوان افزودنی در فرمول‌بندی‌بندی بخش‌های مختلف تایر استفاده کرد، قابلیت مصرف مناسبی برای آن فراهم می‌شود و می‌توان در راستای اهداف زیست‌محیطی گام بلندی برداشت. در استفاده از پودر لاستیک به‌عنوان افزودنی مفید به قطعه لاستیکی، به‌ویژه قطعه تایری، مسئله مهم ایجاد برهم‌کنش مناسب آن با بستر پلیمر است. این مهم با کاهش اندازه ذره پودر و ارتقای شکل‌شناسی یا اصلاح و عمل‌آوری پودر برای ایجاد سازگاری بیشتر با شبکه لاستیک انجام می‌شود [۳].

استفاده از پودر لاستیک تولید شده با روش آسیاب (خردایش) خشک در فرمول‌بندی‌بندهای لاستیکی مختلف گزارش شده است [۴]. پودر لاستیک با ابعاد مختلف با این روش قابل تولید است و برحسب نوع آسیاب و با صرف هزینه بیشتر می‌توان پودر لاستیک با ابعاد کمتر از ۲۰۰ μm نیز تولید کرد [۲]. در مقادیر کم غلظت، افزودن این پودر با ابعاد بیش از ۵۰۰ μm اثر منفی بر خواص فیزیکی آمیزه لاستیکی دارد. گزارش شده است، استحکام کششی آمیزه لاستیکی دارای ۱۰٪ پودر لاستیک (اندازه ۴۲۵ μm تا ۶۰۰ μm) باعث کاهش ۱۵٪ استحکام کششی می‌شود [۵]. احمدی نشان داد، استفاده از پودر لاستیک به مقدار ۱۰ و ۱۵ قسمت وزنی در آلیاژ NR/BR پرشده با دوده، کاهش استحکام کششی و جهندگی را به همراه دارد [۴]. همچنین نشان داده شد، هر چه اندازه پودر کوچک‌تر باشد، افت خواص حاصل از استفاده از آن در آمیزه لاستیکی کمتر است [۳] با استفاده از روش آسیاب مرطوب که شامل مجموعه عملیات مکانیکی-شیمیایی در فاز آبی (یا حلال مشابه) با استفاده از حلال‌ها و افزودنی‌های شیمیایی است، می‌توان به ابعاد پودر لاستیک کمتر از ۲۰ μm دست یافت [۶]. نشان داده شد، اگر این پودر به آمیزه رویه تایر سواری اضافه شود، حتی در مقادیر قابل توجه، کاهش در عملکرد تایر ایجاد نمی‌شود [۷]. با وجود این، فرایند تولید یادشده از لحاظ زیست‌محیطی به دلیل استفاده از انواع حلال و مواد شیمیایی چندان مناسب به‌نظر نمی‌رسد.

خردایش سرمایشی روش دیگری برای تولید پودر لاستیک است. در فرایند سرمایشی مکانیکی، پودر لاستیک از سرمایش تایر فرسوده در نیتروژن مایع تا دمای کمتر از دمای انتقال شیشه‌ای لاستیک و سپس ساییدن مواد شکننده حاصل در آسیاب چکشی تولید می‌شود. با خردایش سرمایشی در شرایط اقتصادی مناسب، ذرات پودر به کوچکی ۷۵ μm را می‌توان تولید کرد. ناخالصی الیاف و فلز در پودر سرمایشی کمتر است. با وجود این ، پودر حاصل از این روش در مقایسه با پودر با مش یکسان تولید شده به روش خردایش معمولی دارای مساحت سطح کمتری است. همچنین، این روش به دلیل استفاده از گاز نیتروژن هزینه بیشتری دارد [۱۰-۱۸].

فناوری جت آب رویکرد جدیدی برای تولید پودر لاستیک است [۱۱]. در این فناوری مواد لاستیک به‌وسیله نیروی برشی و کششی در اثر برخورد جت آب با فشار بسیار زیاد و فرسایش حاصل از جریان آب با سرعت زیاد به شکل پودر بسیار ریز با ابعاد ۵۰۰-۵۰ μm درمی‌آیند. خلوص زیاد و نبود فلزات مزیت مهم این نوع پودر است و پودر حاصل، نسبت سطح به حجم زیادی دارد.

تاکنون مقاله‌ای درباره استفاده از پودر لاستیک تولید شده با فناوری جت آب در قطعات تایر منتشر نشده است. به‌نظر می‌رسد، این پودر قابلیت خوبی برای استفاده در آمیزه‌های لاستیکی داشته باشد. در این مقاله، آثار استفاده از پودر لاستیک تولید شده به روش جت آب در آمیزه لاستیکی رویه تایر سواری ارائه شده است که مستلزم کنترل و برقراری موازنه میان محدوده گسترده‌ای از خواص رئومتری، مکانیکی و دینامیکی است. بخشی از این مطالعه به‌طور نظام‌مند در قالب طراحی آزمون انجام شده است.

تجربی

مواد

پودر لاستیک جت آبی مصرفی محصول شرکت Hunger Jet مجارستان، با ابعاد کمتر از ۱۰۰ μm بود. جنس این پودر با توجه به منبع تهیه آن که رویه تایرهای باری است بر پایه NR/BR/SBR دوده‌ای بود. سایر مواد استفاده شده در این مطالعه، شامل مواد معمول مصرفی در آمیزه رویه تایر سواری رادیال به‌شرح زیر بود:

کائوچوی سیس بوتادی‌ان از پتروشیمی اراک، کائوچوی SBR از پتروشیمی بندر امام، دوده، روغن آروماتیک، شتاب‌دهنده سولفونامیدی، گوگرد معمولی، محافظت‌کننده‌ها، روی اکسید و استئاریک اسید و کمک‌فراورش وستنامر (vestenamer®).

دستگاه‌ها

مخلوط‌کن (بنبوری) آزمایشگاهی لاستیک دولیتری مدل POMI-NI MIX32 ساخت ایتالیا، آسیاب دوغلتکی مدل E-R503X251 NICCM ساخت شرکت Bergamo ایتالیا، پرس پخت ۲۰ تن مدل H.R.M.TP2 SD-010 ساخت ژاپن، دستگاه کشش (دینامومتر) مدل 5-10K-S ساخت شرکت Hounsfield انگلستان، دستگاه سنجش سایش DIN مدل Zwick 6102-H04 ساخت آلمان، سختی‌سنج شور A مدل Zwick 3100 ساخت آلمان، رئومتر مدل BMDR ساخت شرکت آلفا، دستگاه اندازه‌گیری رشد ترک دی‌متیا ساخت شرکت Hounsfield انگلستان، دستگاه سنجش جهندگی مدل Dunlop tripsometer R2 ساخت شرکت Wallace انگلستان، دستگاه اندازه‌گیری چگالی آمیزه لاستیکی و میکروسکوپ SEM مدل KYKY-EM3900M ساخت چین به‌کار گرفته شد.

روش‌ها

فرمول‌بندی و روند مطالعه

فرمول‌بندی پایه استفاده شده آمیخته کائوچوی استیرن بوتادی‌ان و سیس بوتادی‌ان پرشده با دوده بود. مقدار دوده ۵۳ قسمت وزنی و مقدار کل روغن موجود در فرمول‌بندی معادل ۲۷ قسمت وزنی بود. روی اکسید، استئاریک اسید، شتاب‌دهنده و گوگرد و انواع محافظت‌کننده‌های ازنی و اکسیدانی، سایر افزودنی‌های فرمول‌بندی‌بندی با مقادیر معمول در فرمول‌بندی تایرهای رادیال سواری استفاده شدند (فرمول‌بندی A_1 جدول ۱).

ابتدا، به‌طور معمول اثرهای افزایش ۱۰ و ۱۵ قسمت وزنی پودر لاستیک به فرمول‌بندی اصلی بررسی شد (فرمول‌بندی A_2 و A_3 جدول ۱). افزودن مستقیم پودر به فرمول‌بندی (بدون جایگزینی با سایر اجزای فرمول‌بندی) رویکرد متداولی است که در اکثر مراجع از آن استفاده شده است [۷،۱۰].

با هدف مطالعه نقش کمک‌فراورش بر خواص آمیزه دارای پودر لاستیک، آمیزه A_4 با ۱۰ قسمت وزنی پودر لاستیک و یک قسمت وزنی وستنامر تهیه شد. همچنین، با هدف بررسی اثر افزایش مقدار عوامل پخت گوگردی بر خواص آمیزه دارای پودر لاستیک، نمونه اصلی A_2، A_3 و A_4 با افزایش ٪۵ مقدار گوگرد و شتاب‌دهنده نیز تهیه شد که در جدول ۱ با کدهای A_6،A_7، A_8 آمده است.

در بخش دیگر این مطالعه، از طراحی آزمون فاکتوریل کامل سه‌متغیری در دو سطح استفاده شد تا هم از نتایج اثر وجود پودر لاستیک به‌طور نظام‌مند اطمینان حاصل شود و اثرهای احتمالی برهم‌کنش آن با سایر عوامل فرمول‌بندی (گوگرد و دوده) نیز شناخته شوند. همچنین، قابلیت تغییر دو عامل گوگرد و دوده در برقراری موازنه خواص با وجود پودر لاستیک نیز بررسی شود. در این طراحی آزمون، پودر لاستیک به مقدار ۴ و ۸ قسمت وزنی به فرمول‌بندی اضافه و مقدار دوده از ۵۰ تا ۵۵ قسمت وزنی و مقدار گوگرد از ۱/۳تا ۱/۶ قسمت وزنی تغییر داده شد. سطوح متغیرها برای هر فرمول‌بندی بر اساس طراحی آزمون در جدول ۲ آمده است.

شرایط تهیه آمیزه لاستیکی، پخت (ولکانش) و ثبت خواص

تمام آمیزه‌های این مطالعه براساس فرمول‌بندی‌های جدول‌های ۱ و ۲ بدون عوامل پخت، گوگرد و شتاب‌دهنده در مخلوط‌کن آزمایشگاهی ۲ لیتری در شرایط یکسان تهیه شدند. آمیزه‌های حاصل در شرایط یکسان روی آسیاب دوغلتکی با افزودن عوامل پخت، نهایی شدند. برای بررسی زمان مناسب برای پخت آمیزه‌ها از آزمون رئومتری استفاده شد. سپس، آمیزه‌ها در پرس پخت ۲۰ تنی برای بررسی خواص فیزیکی مکانیکی ولکانیده شدند.

خواص اندازه‌گیری شده که در این مطالعه ارائه شده، به‌شرح زیر است: چگالی (g/cm^3، چگالی‌سنج)، زمان پخت بهینه (min)، زمان ایمنی (min)، گشتاور حداقل، حداکثر و اختلاف (dN.m) و سرعت پخت (dN.m/min، رئومتر MDR در دمای ۱۸۵°C به‌مدت ۶ min)، استحکام کششی و مدول ٪۳۰۰ (MPa) و ازدیاد طول تا پارگی (٪، دستگاه کشش)، مقاومت در برابر پارگی (kN/m، دستگاه کشش طبق استاندارد ASTM D624) مقاومت در برابر رشد ترک (آزمونگر دی‌متیا)، مقدار رشد ترک (گزارش شده در ۱۰ mm/۱۰۰۰cycle)، سایش (mm^3، دستگاه سایش DIN طبق استاندارد ISO 4649)، سختی (Shore A، سختی‌سنج Shore A طبق استاندارد ASTM D2240)، جهندگی (٪، دستگاه جهندگی‌سنج طبق استاندارد DIN 53512)، آزمون پیرسازی که برای انجام آن نمونه‌های کشش به‌مدت ۷۲ h در دمای ۱۰۰°C قرار گرفتند و سپس آزمون کشش نمونه‌های پیرسازی‌شده، درصد کاهش ازدیاد طول در مقایسه با حالت معمول (بدون پیرسازی) گزارش شده است. در نهایت، تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه پودر به‌وسیله میکروسکوپ SEM تهیه شد. برای این مهم، سطح نمونه‌های پودر لاستیک با لایه نازک طلا پوشانده شد و با پرتو الکترونی باریکی به قطر ۱۰۰ Å بمباران شد..

جدول ۱- فرمول‌بندی و نتایج استفاده از پودر لاستیک جت آب در آمیزه لاستیکی بر پایه SBR/BR.

فرمول‌بندی	کد آمیزه							
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
	شاهد	۱۰ RP	۱۵ RP	۱ V + ۱۰ RP	فرمول‌بندی بهینه DOE دارای گوگرد کمتر	۱۰ RP + ۵٪ عوامل پخت	۱۵ RP + ۵٪ عوامل پخت	۱۰ RP+۱ V + ۵٪ عوامل پخت
پودر لاستیک)	۰	۱۰	۱۵	۱۰	۶/۴	۱۰	۱۵	۱۰
اصلاح‌کننده (phr)	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱
گوگرد (phr)	۱/۴۶	۱/۴۶	۱/۴۶	۱/۴۶	۱/۳	۱/۵۴	۱/۵۴	۱/۵۴
شتابدهنده (phr)	۱/۳۲	۱/۳۲	۱/۳۲	۱/۳۲	۱/۳۲	۱/۳۹	۱/۳۹	۱/۳۹
خواص								
چگالی (g/cm^3)	۱/۱۲۶	۱/۱۲۶	۱/۱۳۰	۱/۱۲۵	۱/۱۳۵	۱/۱۲۶	۱/۱۳۱	۱/۱۲۵
گشتاور حداقل (dN.m)	۱/۰۴	۱/۱۲	۱/۳۴	۱/۱۹	۱/۱	۱/۲۹	۱/۳۷	۱/۲۲
گشتاور حداکثر (dN.m)	۷/۸۹	۶/۷۹	۶/۸۹	۶/۷۸	۶/۴	۷/۷۵	۷/۷۵	۷/۳
گشتاور اختلاف (dN.m)	۶/۸۵	۵/۶۷	۵/۵۵	۵/۵۹	۵/۳	۶/۴۶	۶/۳۸	۶/۰۸
زمان ایمنی (min)	۱/۲۱	۱/۱۵	۱/۱۷	۱/۲	۱/۵	۱/۰۵	۱/۱	۱/۱۵
زمان پخت بهینه (min)	۲/۵۰	۲/۱	۲/۱۳	۲/۲۴	۲/۷	۲/۰۱	۲/۰۳	۲/۱۳
سرعت پخت (dN.m/min)	۵/۷۴	۵/۳۸	۵/۲۶	۵/۰۷	۴/۲	۶/۶۵	۶/۵۲	۵/۹
استحکام کششی (MPa)	۱۷/۴	۱۵/۱	۱۵/۲۲	۱۴/۹۵	۱۴/۹	۱۵/۷	۱۷	۱۶/۲
ازدیاد طول (٪)	۴۹۷/۱	۴۷۷/۱	۴۶۵/۲۵	۴۸۰/۲۵	۴۹۴/۸	۴۳۱/۶	۴۱۰/۲۵	۴۲۸/۳
مدول ۳۰۰٪ (MPa)	۸/۸۹	۷/۷۵	۸/۱۸	۷/۶۲	۷/۶	۹/۶	۱۱/۱	۹/۹
مقاومت پارگی (kN/m)	۲۵/۲	۲۵/۷	۲۸/۷	۲۶/۴	۲۸/۵	۲۴/۳	۲۳/۵	۲۴
سختی (Shore A)	۶۰	۵۹	۶۰	۶۰	۵۸	۶۰	۶۰	۵۹
سایش (mm^3)	۸۸/۶	۹۳/۱	۹۲/۹	۹۱/۸	۹۱/۴	۸۸/۷	۹۴/۳	۸۸/۸
رشد ترک ۱۰ k (mm)	۱۲/۲	۷/۳	۷/۵	۷/۶	۷/۵	۱۳/۳	۱۲/۵	۱۲
جهندگی (٪)	۲۱/۷	۱۹/۰۰	۱۸/۶	۱۸/۶	۲۱/۷	۲۲/۷	۲۲/۷	۲۰/۶
کاهش ازدیاد طول در زمانمندی (٪)	۳۴/۷	۳۷/۱	۴۳	۳۹	۳۶/۶	۴۰	۳۱	۲۹

* اعداد نشانگر قسمت وزنی، RP پودر لاستیک و V وستنامر هستند.

تحلیل آماری و بهینه‌سازی

تحلیل آماری تنها روی داده‌های گردآوری شده براساس طراحی آزمون فاکتوریل انجام شد (جدول ۲). به‌کمک نرم‌افزار MINITAB یک معادله درجه اول شامل اثرهای اصلی و برهم‌کنش بر خواص اندازه‌گیری شده برازش شد. ضرایب معادله رگرسیون، انحراف استاندارد آن و اهمیت آماری اثر هر ضریب مشخص شد. همچنین به‌کمک تحلیل واریانس، اهمیت رگرسیون، جمله خطی و جمله برهم‌کنش تحلیل آماری شد. مدل خطی درجه اول شامل جمله‌های برهم‌کنش دوتایی به‌شرح زیر برای هر خاصیت توسعه داده شد:

$$Y = a_0 + a_1RP + a_2S + a_3N375 + a_4RP*S + a_5RP*N375 + a_6S*N375 \quad (۱)$$

در این معادله، Y متغیر پاسخ یا وابسته است که همان خاصیت قابل اندازه‌گیری آمیزه لاستیکی است: گشتاورهای حداقل، حداکثر و اختلاف، زمان‌های ایمنی و پخت بهینه، سرعت پخت، استحکام کششی، ازدیاد طول، مدول ۳۰۰، مقاومت پارگی، جهندگی، سختی، چگالی، سایش، رشد ترک و درصد کاهش ازدیاد طول پس از پیرسازی. همچنین در معادله (۱) متغیرهای مستقل شامل مقدار پودر لاستیک (RP)، مقدار گوگرد (S) و مقدار دوده (N375) هستند که

جدول ۲- سطوح متغیرهای طراحی آزمون و نتایج رئومتری MDR در دمای ۱۸۵°C و ۶ min.

شماره آمیزه	مقدار RP (phr)	مقدار دوده (phr) N375	مقدار گوگرد (phr)	چگلی (g/cm^3)	گشتاورحداقل (dN.m)	گشتاوراختلاف (dN.m)	زمان‌ایمنی (min)	زمان‌پخت بهینه(min)	سرعت‌پخت (dN.m/min)
۱	۴	۵۵	۱/۶	۱/۱۳۶	۱/۰۰	۶/۲	۱/۱۲	۲/۰۸	۶/۰۵
۲	۴	۵۵	۱/۳	۱/۱۴۰	۱/۰۰	۵	۱/۲۹	۲/۲۱	۴/۵۲
۳	۴	۵۰	۱/۳	۱/۱۲۶	۰/۷۹	۴/۸	۱/۳۲	۲/۲۹	۴/۱۵
۴	۴	۵۰	۱/۶	۱/۱۲۶	۰/۸۱	۵/۵	۱/۱۹	۲/۳۶	۴/۸۴
۵	۸	۵۵	۱/۳	۱/۱۳۵	۱/۱۵	۴/۹	۱/۲۳	۲/۱۶	۴/۳۵
۶	۸	۵۵	۱/۶	۱/۱۳۵	۱/۱۱	۵/۸	۱/۱	۲/۰۲	۵/۶۸
۷	۸	۵۰	۱/۶	۱/۱۲۶	۱/۰۰	۵/۴	۱/۱۸	۲/۱۲	۵/۲
۸	۸	۵۰	۱/۳	۱/۱۲۶	۰/۹۴	۴/۴	۱/۳۵	۲/۴	۳/۶۷

متغیرهای وابسته برحسب این سه متغیر در معادله (۱) بیان شده‌اند. ضرایب a_i در واقع ضرایب برازش (رگرسیون) مدل خطی هستند که از برازش مدل (۱) با داده‌های تجربی به روش رگرسیون خطی محاسبه شدند. ضریب a_1 تا a_3 ضریب اثرهای اصلی و ضریب a_4 تا a_6 ضرایب اثرهای برهم‌کنشی دوتایی هستند. معادله (۱) یک معادله رگرسیون خطی کامل شامل اثرهای اصلی و برهم‌کنشی است. افزون بر مدل مزبور، می‌توان با حذف ضرایب بی‌اهمیت از لحاظ آماری به مدل‌های کوتاه شده‌ای دست یافت. بنابراین، در این مطالعه با حذف مرحله‌ای جمله‌های برهم‌کنشی کم‌اهمیت از لحاظ آماری مدل‌های کوتاه شده و ساده‌تری نیز ارائه شده است.

همچنین، برای به‌تصویرکشیدن نحوه وابستگی خواص مختلف به متغیرهای فرمول‌بندی از منحنی‌های اثرهای اصلی استفاده شد. در نهایت، فرمول‌بندی بهینه با جفت‌کردن مدل ریاضی با الگوریتم بهینه‌سازی مناسب توسعه داده شد. در این قسمت، شرایط مناسب آمیزه بر اساس فرمول‌بندی مرجع به نرم‌افزار داده شد. نرم‌افزار با تغییر سطوح سه متغیر پودر لاستیک، گوگرد و دوده (در محدوده طرح آزمون) و از جفت‌کردن مدل‌های برازش موجود با الگوریتم بهینه‌سازی مناسب، شرایط بهینه آمیزه را محاسبه کرد. برای تکمیل مطالعه، در نهایت آمیزه بهینه بر اساس مقادیر پیشنهادی نرم‌افزار، مجدداً در بنبوری آزمایشگاهی تهیه و ثبت خواص شد (آمیزه A_5).

نتایج و بحث

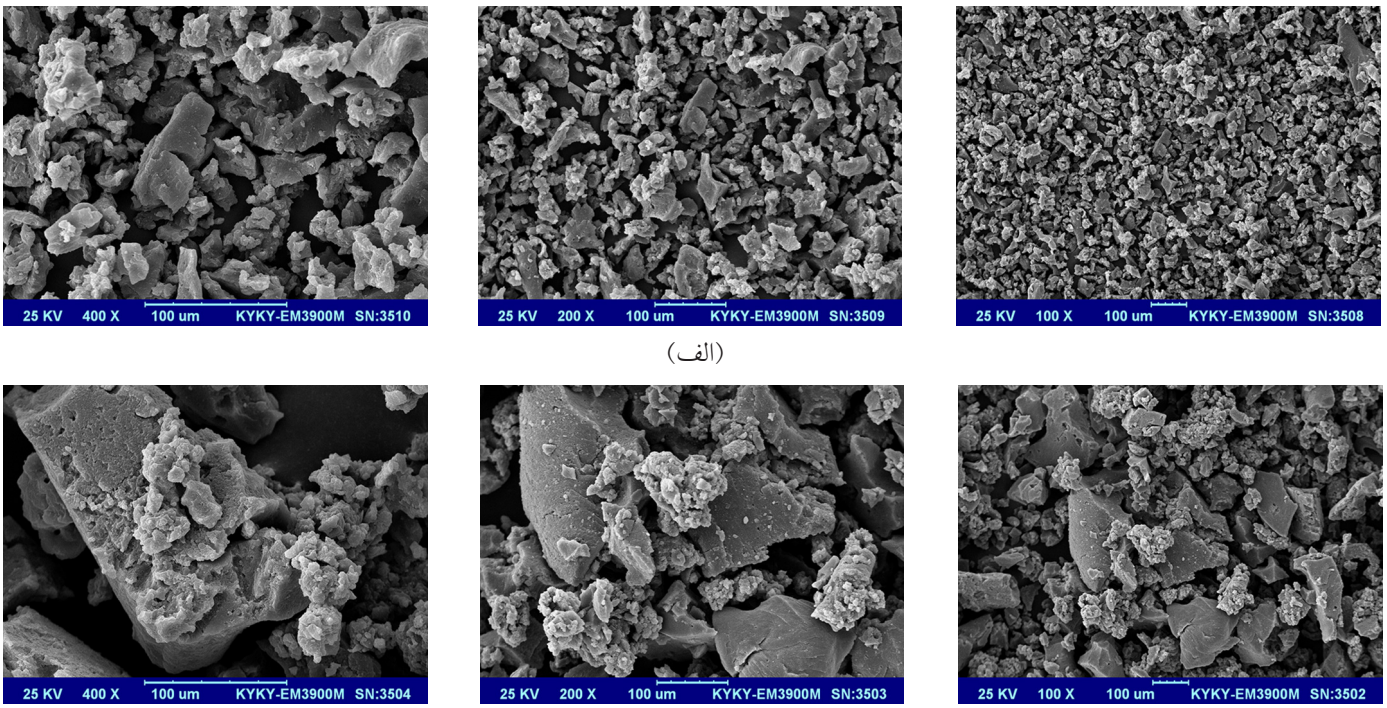
بررسی شکل‌شناسی پودر لاستیک تهیه شده به روش جت آب

شکل ۱-الف تصاویر میکروسکوپ الکترونی پودر لاستیک تهیه شده به روش جت آب را نشان می‌دهد. برای مقایسه تصاویر SEM یک نمونه پودر معمولی نیز آمده است. تصاویر با بزرگ‌نمایی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ نشان داده شده است. تصاویر به‌وضوح ابعاد بسیار ریز پودر لاستیک استفاده شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. ابعاد ذرات پودر جت آب (شکل ۱-الف) به‌ندرت به بیش از ۱۰۰ µm رسیده و به‌طور عمده کمتر از ۵۰ µm است. در مقابل، پودر معمولی ابعاد درشت‌تری دارد (شکل ۱-ب). ابعاد این پودر به‌ندرت به کمتر از ۱۰۰ µm می‌رسد. همچنین، تخلخل و زبری سطوح پودر لاستیک جت آبی زیاد بوده و نزدیک به نوع معمولی است.

اندازه ذرات بسیار ریز و نیز تخلخل و زبری سطح زیاد پودر لاستیک تهیه شده به روش جت آب دلالت بر آن دارد که این پودر برهم‌کنش بهتری با بستر پلیمر در مقایسه با پودر لاستیک معمولی و نیز سرمایشی فراهم می‌آورد که به‌طور عمده سطحی صاف دارد. نکته دیگر این است که تصاویر SEM نشان می‌دهد، توزیع اندازه ذرات پودر لاستیک جت آبی، بسیار یکنواخت‌تر از پودر لاستیک نوع معمولی است. ذرات درشت موجود در پودر لاستیک معمولی می‌تواند به‌عنوان ترک‌هایی (flaws) در قطعه لاستیکی پخت شده ظاهر شوند و مقاومت خستگی و شروع ترک را کاهش دهند. این خاصیت با آزمون‌های معمول که در این مقاله استفاده شده قابل ارائه نیست. اما، قابل پیش‌بینی است که ذرات درشت احتمال هسته‌زایی و شروع ترک را افزایش دهند.

مطالعه اثر افزایش پودر لاستیک بر خواص آمیزه رویه تایر سواری

نتایج خواص رئومتری و فیزیکی به‌دست آمده از افزایش ۱۰ و ۱۵ قسمت وزنی پودر لاستیک جت آبی در جدول ۱ آمده است. آمیزه‌های با کد A_1، A_2 و A_3 به ترتیب نمونه شاهد، آمیزه دارای ۱۰



شکل ۱- تصاویر SEM با بزرگ‌نمایی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ برای مقایسه شکل‌شناسی پودر لاستیک تهیه شده با روش: (الف) جت آب و (ب) معمولی.

قسمت وزنی پودر لاستیک جت آبی و آمیزه دارای ۱۵ قسمت وزنی پودر لاستیک است. عدم کاهش قابل ملاحظه خواص با وجود پودر لاستیک ویژگی مهم این جایگزینی است که نتایج آن در جدول ۱ آمده است. وجود پودر لاستیک تا ۱۵ قسمت وزنی نتایج زیر را به همراه داشته است:

عدم تغییر چگالی، افزایش اندک گشتاور حداقل، کاهش اندک گشتاورهای حداکثر و اختلاف، کاهش جزئی زمان‌های ایمنی و پخت بهینه (آزمون رئومتری)، کاهش استحکام کششی، ازدیاد طول و مدول، بهبود جزئی مقاومت پارگی، بهبود قابل توجه مقاومت در برابر رشد ترک دی‌متیا، کاهش اندک سایش و جهندگی و عدم تغییر سختی. با توجه به اینکه مطالعه در این قسمت به روش معمول و سنتی انجام شده است، درباره معنی‌داربودن این تغییرات نمی‌توان اظهار نظر کرد و این موضوع در ادامه مقاله و در قالب طراحی آزمون و تحلیل آماری با اطمینان بیشتری بررسی و ارائه شده است.

مطالعه اثر کمک‌فراورش وستنامر بر خواص آمیزه رویه تایر سواری دارای پودر لاستیک

وستنامر افزودنی پلی‌اولفینی نیمه‌بلوری است که نقش کمک‌فراورش، نرم‌کننده لاستیک و سازگارکننده فازی در مخلوط لاستیک‌ها را دارد. درآمیزه A_4 از ۱ قسمت وزنی وستنامر در کنار ۱۰ قسمت وزنی پودر لاستیک استفاده شده است. نتایج اندازه‌گیری خواص آمیزه در جدول ۱ آمده که با نتایج سایر آمیزه‌ها قابل مقایسه است. مقایسه خواص آمیزه A_2 (دارای ۱۰ قسمت وزنی پودر لاستیک) و A_4 (دارای ۱۰ قسمت وزنی پودر لاستیک و یک قسمت وزنی وستنامر) نشان می‌دهد، در مجموع وجود وستنامر در محدوده آزمون اثر بهبوددهنده شایان توجهی بر خواص ندارد. هرچند که به‌نظر می‌رسد، سایش اندکی بهبود یافته که حائز اهمیت است. حداقل می‌توان گفت، اثر وستنامر با آزمون‌هایی که در این مطالعه ارائه شده است، قابل تشخیص نیست.

مطالعه اثر افزایش پودر لاستیک در سطوح مختلف گوگرد و دوده در قالب طراحی آزمون فاکتوریل

در جدول ۲ سطوح متغیرها و نتایج خواص رئومتری و در جدول ۳ نتایج خواص فیزیکی آمیزه‌های تهیه شده بر اساس طراحی آزمون آمده است. جدول‌های ۴ و ۵ نتایج آماری و ضرایب برازش مدل‌های فاکتوریل کوتاه شده را نشان می‌دهد. در بالای جدول ضرایب برازش برای مدل‌های کامل (که هیچ یک از جمله‌های اصلی و برهم‌کنش (اثرهای دوتایی) در آن حذف نشده است) ارائه شده است. مقادیر ضرایب برازش برای همه خواص در محدوده بالایی قرار دارد.

در سطرهای پایین‌تر در دو جدول ۴ و ۵ نتایج ضریب برازش

جدول ۳- نتایج خواص فیزیکی آمیزه‌های لاستیکی طراحی شده بر اساس طراحی آزمون فاکتوریل کامل.

شماره آمیزه	استحکام کششی (MPa)	مدول ٪۳۰۰ (MPa)	ازدیاد طول (٪)	مقاومت پارگی (kN/m)	سختی (Shore A)	جهندگی (٪)	رشد ترک ۱۰k (mm)	سایش (mm^3)	افت ازدیاد طول (٪)
۱	۱۴/۵	۱۰/۸	۳۹۴/۳	۱۸	۵۹	۱۶/۷	۱۸/۵۳	۱۰۱/۴	۴۰/۳
۲	۱۴/۷	۸/۸	۴۵۰	۲۱/۹	۵۷	۱۸/۶	۱۳/۳۸	۹۲	۳۶/۸
۳	۱۳/۵	۸/۶	۴۳۶/۴	۱۹/۷	۵۴	۲۰/۶	۱۲/۱۵	۹۱/۱	۲۸/۴
۴	۱۳/۷	۱۰/۵	۳۷۴/۲	۱۸	۵۶	۲۰/۶	۱۸//۹۱	۱۰۲	۳۴/۸
۵	۱۴/۳	۹/۳	۴۲۵/۵	۲۴/۱	۵۶	۱۶/۷	۱۱/۷۴	۱۰۸	۳۵/۴
۶	۱۴/۱	۱۰/۵	۳۸۶/۷	۱۹/۱	۵۸	۱۸/۶	۲۰/۰۶	۱۱۲/۲	۳۵/۸
۷	۱۴/۲	۱۰	۴۱۳/۸	۱۹/۵	۵۵	۲۰/۶	۱۵/۸۳	۱۱۱/۱	۴۷/۳
۸	۱۴/۲	۸/۱	۴۷۴	۲۳	۵۶	۱۶/۷	۱۰/۸۲	۱۰۶/۴	۴۴/۱

مدل کوتاه شده آمده است که در آن جمله‌های برهم‌کنش کم‌اهمیت از لحاظ آماری حذف شده‌اند. همچنین، مقادیر ضرایب نیز بیان شده است. سطح اطمینان انتخاب شده ٪۹۰ است و مقدار P مربوط به آماره F برای هر ضریب اگر کمتر از ۰/۱ باشد، بدین معنی است که آن جمله بر پاسخ مدل اثر معنی‌دار دارد. در مدل کامل، برای جمله‌های برهم‌کنش (ضرایب a_4، a_5 و a_6) اگر مقدار P بیش از ۰/۱ بود، ضریب مربوط صفر درنظر گرفته شد. ضرایب جمله‌های اصلی (a_0، a_1، a_2 و a_3) در هیچ یک از مدل‌ها حذف نشده است. این ضرایب دیدگاه اولیه مناسبی درباره اثر هر جمله مدل بر خاصیت مدنظر را ارائه می‌دهد.

جدول ۴- نتایج آماره‌های مدل‌های خواص رئومتری MDR توسعه‌یافته بر اساس طراحی آزمون فاکتوریل کامل دوسطحی سه‌متغیری.

مدل برازش	خاصیت	گشتاور حداقل (dN.m)	گشتاور حداکثر (dN.m)	گشتاور اختلاف (dN.m)	زمان ایمنی (min)	زمان پخت بهینه (min)	سرعت پخت (dN.m/min)
کامل	ضریب برازش مدل پیشگو (R^2) ضریب برازش تنظیم شده مدل پیشگو (R_{adJ}^2)	۹۹/۲۹ ۹۵/۰۶	۹۸/۱۱ ۸۶/۷۶	۹۸/۳۵ ۸۸/۴۴	۹۸/۶۴ ۹۰/۴۷	۸۸/۷۵ ۲۱/۲۲	۹۶/۹۸ ۷۸/۸۷
کوتاه شده براساس حذف جمله‌های کم‌اهمیت از لحاظ آماری (Pruned Models)	ضریب برازش (R^2) مدل کوتاه شده پیشگو	۹۷/۰۰	۹۷/۳۰	۹۶/۹۱	۹۶/۵۱	۷۵/۷۴	۹۴/۲۰
	ضریب برازش تنظیم شده (R_{adJ}^2) مدل کوتاه شده پیشگو	۹۴/۷۵	۹۵/۲۸	۹۴/۶۰	۹۳/۸۹	۵۷/۵۴	۸۹/۸۵
	α_0 در مدل پیشگو کوتاه شده	۰/۹۷۵ (۰/۰۰۰)	۶/۲۱۶۲۵ (۰/۰۰۰)	۵/۲۴۱۳ (۰/۰۰۰)	۱/۲۲۲۵۰ (۰/۰۰۰)	۲/۲۰۵ (۰/۰۰۰)	۴/۸۰۷۵ (۰/۰۰۰)
	α_1 در مدل پیشگو کوتاه شده (آماره P)	۰/۰۷۵۰ (۰/۰۰۲)	−۰/۰۴۸۷۵ (۰/۳۷۲)	−۰/۱۲۳۷ (۰/۰۶۴)	−۰/۰۰۷۵ (۰/۴۰۲)	−۰/۰۳۰۰ (۰/۳۹۱)	−۰/۰۸۲۵۰ (۰/۴۱۲)
	α_2 درمدل پیشگو کوتاه شده (آماره P)	۰/۰۰۵۰ (۰/۶۵۳)	۰/۴۸۳۷۵ (۰/۰۰۱)	۰/۴۷۸۷ (۰/۰۰۱)	−۰/۰۷۵ (۰/۰۰۱)	−۰/۰۶۰ (۰/۱۲۷)	۰/۶۳۵۰۰ (۰/۰۰۲)
	α_3 در مدل پیشگو کوتاه شده (آماره P)	۰/۰۹۰ (۰/۰۰۱)	۰/۳۲۱۲۵ (۰/۰۰۳)	۰/۲۳۱۳ (۰/۰۰۹)	۰/۰۳۷۵ (۰/۰۰۹)	۰/۰۸۷۵ (۰/۰۴۹)	۰/۳۴۲۵۰ (۰/۰۱۹)

جدول ۵- نتایج آماره‌های مدل‌های خواص مکانیکی توسعه‌یافته بر اساس طراحی آزمون فاکتوریل کامل دوسطحی سه‌متغیری.

مدل برازش	خاصیت	استحکام کششی (MPa)	ازدیاد طول (٪)	مدول ۳۰۰ (MPa)	مقاومت پارگی (kN/m)	جهندگی (٪)	سختی (Shore A)	چگالی (g/cm^3)	سایش (mm^3)	رشدترک ۱۰k (mm)	رشدترک ۱۵k (mm)	افت ازدیاد طول* (٪)
کامل	ضریب برازش (R^2)	۹۹/۳۱	۹۹/۶۶	۹۹/۰۴	۹۹/۶۶	۹۹/۹۹	۹۸/۳۵	۹۹/۷۹	۹۹/۹۷	۹۹/۱۶	۹۹/۷۷	۹۹/۹۹
	ضریب برازش تنظیم (R_{adJ}^2)	۹۵/۱۴	۹۷/۶۰	۹۳/۲۵	۹۷/۵۹	۹۹/۹۹	۸۸/۴۴	۹۸/۵۲	۹۹/۸۲	۹۴/۱۴	۹۸/۳۷	۹۹/۹۹
کوتاه شده بر اساس حذف جمله‌های کم اهمیت از لحاظ آماری (Pruned Models)	ضریب برازش (R^2)	۹۵/۳۱	۹۷/۸۹	۹۵/۱۸	۹۱/۸۹	۱۰۰	۷۸/۵۳	۹۶/۱۹	۹۹/۶۹	۹۵/۹۳	۸۹/۹۶	۹۹/۹۹
	ضریب برازش تنظیم شده (R_{adJ}^2)	۸۹/۰۵	۹۵/۰۸	۹۱/۵۶	۸۵/۸۲	۹۹/۹۹	۶۲/۴۳	۹۳/۳۳	۹۹/۲۸	۹۲/۸۷	۹۸/۱۷	۹۹/۹۹
	α_0	۱۴/۱۵ (۰/۰۰۰)	۴۱۹/۳۷ (۰/۰۰۰)	۹/۵۷۵۰ (۰/۰۰۰)	۲۰/۴۴۵ (۰/۰۰۰)	۱۸/۶۳۷۵ (۰/۰۰۰)	۵۶/۳۷۵ (۰/۰۰۰)	۱/۱۳۱۲۵ (۰/۰۰۰)	۱۰۳/۰۳۸ (۰/۰۰۰)	۱۵/۱۷۷۵ (۰/۰۰۰)	۱۸/۸۰۸۸ (۰/۰۰۰)	۳۷/۸۵۹۹ (۰/۰۰۰)
	α_1 (آماره P)	۰/۰۷۷۵ (۰/۱۸۴)	۵/۶۱ (۰/۱۲۵)	−۰/۱۰۲۵ (۰/۳۷۸)	۱/۰۲۵ (۰/۰۳)	−۰/۴۸۷۵ (۰/۰۰۸)	−۰/۱۲۵۰ (۰/۷۳۰)	−۰/۰۰۰۷۵ (۰/۲۳۰)	۶/۴۱۷ (۰/۰۰۰)	−۰/۵۶۵۰ (۰/۱۷۱)	−۰/۷۹۸۷ (۰/۰۱۸)	۲/۷۸۲۶ (۰/۰۰۳)
	α_2 (آماره P)	۰/۰۳۲۵ (−۰/۵۲۳)	−۲۷/۱۱ (۰/۰۰۲)	۰/۸۷۰۰ (۰/۰۰۱)	−۱/۷۸۲ (۰/۰۰۴)	۰/۴۸۷۵ (۰/۰۰۸)	۰/۶۲۵۰ (۰/۱۳۸)	−۰/۰۰۰۵ (۰/۳۹۹)	۳/۶۳۵ (۰/۰۰۱)	۳/۱۵۵۰ (۰/۰۰۱)	۰/۸۶۱۲ (۰/۰۰۰)	۱/۶۸۹۴ (۰/۰۰۵)
	α_3 (آماره P)	۰/۲۴۵۰ (۰/۰۱۲)	−۵/۲۵ (۰/۱۴۲)	۰/۲۷۷۵ (۰/۰۵۵)	۰/۳۳۲ (۰/۳۴۳)	−۰/۹۸۷۵ (۰/۰۰۴)	۱/۱۲۵۰ (۰/۰۲۹)	۰/۰۰۵۲۵ (۰/۰۰۱)	۰/۳۵۵ (۰/۲۳۷)	۰/۷۵۰ (۰/۰۹۱)	۰/۷۴۳۸ (۰/۰۲۳)	−۰/۷۸۴۰ (۰/۰۱۱)
	α_4 (آماره P)	۰	۰	۰	۰	۰/۹۶۲۵ (۰/۰۰۴)	۰	۰	−۱/۴۲۵ (۰/۰۱۰)	۰	۰	−۰/۷۹۳۸ (۰/۰۱۱)
	α_5 (آماره P)	−۰/۲۳۷۵ (۰/۰۱۳)	−۱۳/۶۷ (۰/۰۱۴)	۰	۰	۰/۴۸۷۵ (۰/۰۰۸)	۰	۰	۰	۰	۰	−۴/۲۴۹۱ (۰/۰۰۲)
	α_0 (آماره P)	۰	۰	۰	۰	−۰/۴۸۷۵ (۰/۰۰۸)	۰	۰	۰	۰	۰	−۰/۷۱۸۹ (۰/۰۱۲)

*پیرسازی ۷۲ h و دمای ۱۰۰°C.

$$Y=a_0+a_1Rp+a_2S+a_3N375+a_4Rp^*S+a_5Rp^*N375+a_6S^*N375$$

مقادیر ضرایب فاکتور RP (a_1 در جدول‌های ۴ و ۵) اثر افزایش پودر لاستیک از ۴ به ۸ قسمت وزنی بر همه خواص مطالعه شده در این پژوهش را به تصویر می‌کشد. درباره خواص رئومتری، نتایج جدول ۴ حاکی از آن است که افزایش مقدار پودر لاستیک از ۴ به ۸ قسمت وزنی در فرمول‌بندی باعث افزایش معنی‌دار گشتاور حداقل و کاهش معنی‌دار گشتاور اختلاف شده است. همچنین، این جایگزینی به کاهش گشتاور حداکثر، زمان‌های ایمنی و پخت بهینه و سرعت پخت منجر شده است، هرچند این تغییرات جزئی و از لحاظ آماری کم‌اهمیت است (به مقادیر P درجدول توجه شود، مقادیر بیش از ۰/۱ برای ضریب RP به‌معنی بی‌اهمیت‌بودن اثر ضریب در سطح اطمینان ٪۹۰ است). درباره خواص رئومتری می‌توان دید، وجود این ماده هیچ برهم‌کنش معنی‌داری با مقدار دوده و گوگرد ندارد و همه جمله‌های برهم‌کنش در جدول ۴ حذف شدند.

درباره خواص مکانیکی که نتایج مدل‌ها در جدول ۵ آمده است، افزایش پودر لاستیک از ۴ به ۸ قسمت وزنی باعث افزایش مقاومت پارگی، سایش و کاهش مدول، جهندگی، سختی و رشد ترک دی‌متیا شده است. اما، از لحاظ آماری و بر اساس مقادیر P مربوط به ضرایب مدل‌ها، تنها افزایش پودر لاستیک از محدوده ۴ تا ۸ قسمت وزنی

بر خواص مقاومت پارگی، جهندگی، سایش و رشدترک اثر معنی‌دار داشته و برای سایر خواص اثر آن کم‌اهمیت است. همچنین، تعدادی از جمله‌های برهم‌کنش حائز اهمیت از لحاظ آماری در مدل‌های خواص فیزیکی مشاهده شده که باعث می‌شود، تفسیر با احتیاط انجام شود.

درباره خاصیت پیرسازی که ضرایب مدل آن در ستون آخر جدول ۵ ارائه شده می‌توان دید، اثر افزایش پودر لاستیک بر این خاصیت افزایشی و از لحاظ آماری حائز اهمیت است. در نهایت، پودر لاستیک بر چگالی آمیزه اثر کاهشی و کم‌اهمیت دارد. شکل‌های ۲ تا ۶ منحنی اثرهای اصلی برای همه خواص رئومتری و فیزیکی آمیزه لاستیکی برحسب سه متغیر پودر لاستیک، گوگرد و دوده را نشان می‌دهد.

مقادیر بهینه‌سازی نرم‌افزاری پیشنهادی برای سه متغیر پودر لاستیک، دوده و گوگرد به ترتیب ۶/۴۲، ۵۳/۰۶ و ۱/۳ بود. به عبارت دیگر، در مقایسه با نمونه شاهد نبود تغییر دوده و تغییر جزئی در مقدار گوگرد در مجاورت پودر لاستیک پیشنهاد شده است تا موازنه مناسب بین همه خواص با وجود پودر لاستیک حاصل شود. آمیزه لاستیکی با مقادیر پیشنهادی نرم‌افزار مجدداً در مخلوط‌کن آزمایشگاهی تهیه شد که نتایج در جدول ۱ آمده است (آمیزه با کد A_5). مشاهده می‌شود، با این شرایط بهینه می‌توان به استفاده از پودر لاستیک بدون از دست‌دادن درخورملاحظه خواص اقدام کرد. بنابراین، فرمول‌بندی A_5 می‌تواند یکی از فرمول‌بندی‌های پیشنهادی برای استفاده از پودر لاستیک در آمیزه رویه تایر سواری باشد. البته باید دقت شود، در این شرایط مقدار استفاده از پودر لاستیک تنها ۶ قسمت وزنی خواهد بود.

مطالعه اثر افزایش مقدار عوامل پخت (گوگرد و شتاب‌دهنده) بر خواص آمیزه دارای پودر لاستیک

نتایج افزایش ٪۵ در مقدار عوامل پخت (گوگرد و شتاب‌دهنده) در آمیزه لاستیکی دارای پودر لاستیک در جدول ۱ آمده است (A_6، A_7 و A_8). آمیزه A_6، همان فرمول‌بندی A_2 را دارد که در آن تنها مقدار گوگرد و شتاب‌دهنده افزایش یافته است. به همین شکل، آمیزه‌های A_7 و A_8 نیز به ترتیب فرمول‌بندی مشابه آمیزه A_3 (۱۵ قسمت وزنی پودر لاستیک) و A_4 (۱۰ قسمت پودر لاستیک و وستنامر) با افزایش ٪۵ عوامل پخت را دارند. همان‌طور که انتظار می‌رفت، مقایسه نتایج یک به یک آمیزه‌ها (A_2 و A_3)، (A_6 و A_7) و (A_4 و A_8) حاکی از آن است که گشتاورهای حداقل، حداکثر و اختلاف و سرعت پخت با ازدیاد عوامل پخت افزایش و زمان‌های ایمنی و پخت بهینه کاهش می‌یابد. مدول آمیزه، جهندگی و نیز رشد ترک دی‌متیا برای همه آمیزه‌ها با افزایش عوامل پخت افزایش و ازدیاد طول تا پارگی و مقاومت پارگی کاهش یافته است. سختی آمیزه‌ها با افزایش ٪۵ عوامل پخت بدون تغییر مانده است. در مجموع، افزایش همزمان گوگرد و شتاب‌دهنده اثر مثبت (کاهشی) بر رفتار سایش آمیزه لاستیکی نشان داده است. البته استثنایی وجود دارد که مربوط به نوسانات و خطای آزمایشگاهی معمول در آزمون سایش است. درباره اثر افزایش عوامل پخت بر خواص پیرسازی می‌توان دید، کاهش ازدیاد طول به‌جز یک استثنا، روند کاهشی و بهبوددهنده نشان می‌دهد. بنابراین، استفاده از پودر لاستیک در کنار افزایش جزئی عوامل پخت می‌تواند رویکرد دیگری برای استفاده از پودر لاستیک در آمیزه رویه تایر با هدف استفاده از مقادیر بیشتر آن باشد.

شناخت رفتارها و بررسی شرایط بهینه فرمول‌بندی با وجود پودر لاستیک جت آبی

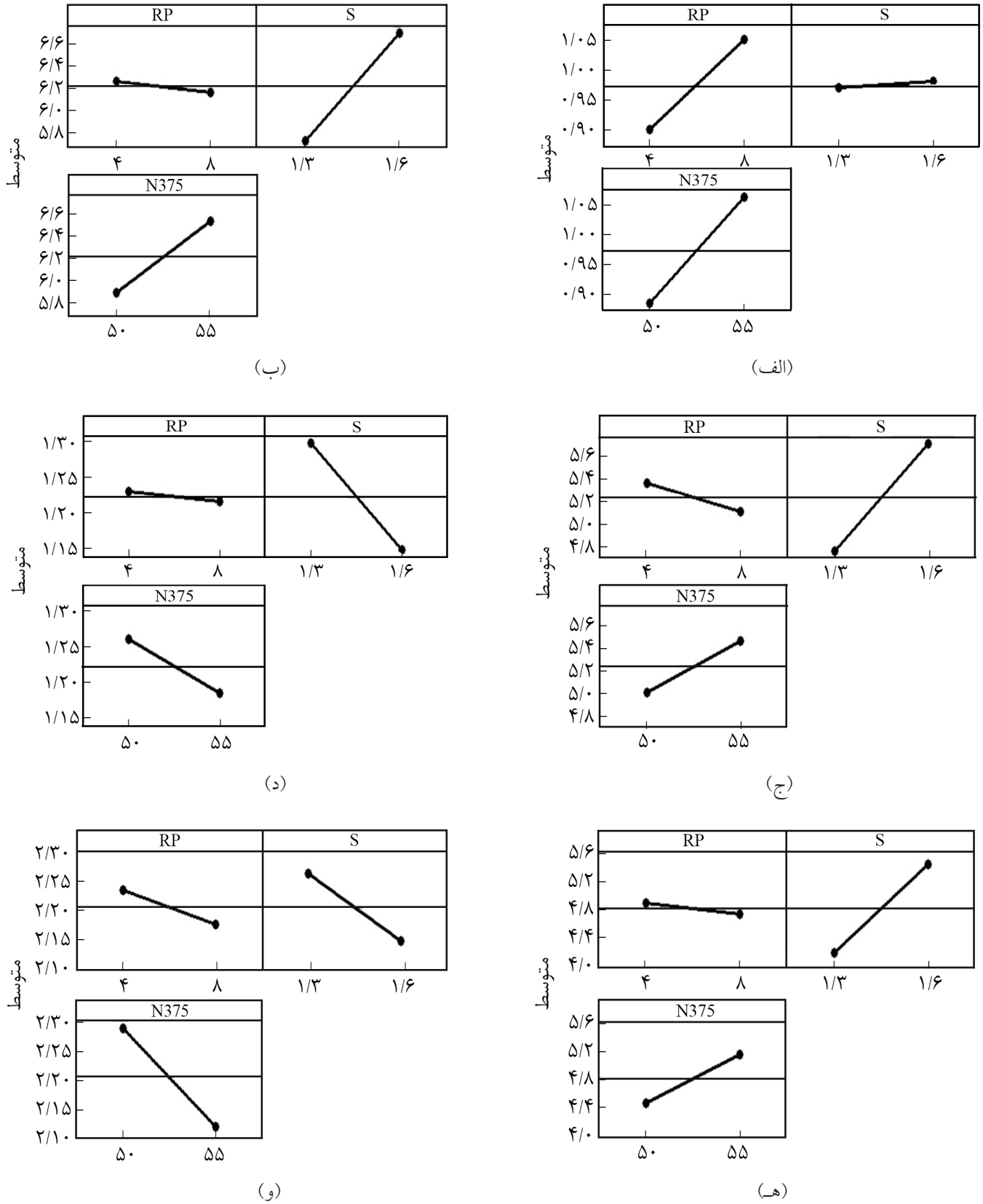
در این بخش، خواص مختلف آمیزه لاستیکی با وجود پودر لاستیک به‌طور جداگانه بررسی، تحلیل و شناخت رفتاری شد.

خواص پخت

در جدول ۱ روند تغییرات افزایش ۱۰ و ۱۵ قسمت وزنی پودر لاستیک به فرمول‌بندی شاهد و سایر تمهیدات آمیزه‌کاری اعمال شده مانند استفاده از وستنامر و افزایش ٪۵ مقدار عوامل پخت و بهینه‌سازی آماری بر خواص رئومتری آمیزه لاستیکی آمده است. شکل ۲ نیز منحنی اثرهای اصلی استفاده از پودر لاستیک از ۴ تا ۸ قسمت وزنی، تغییر مقدار گوگرد و تغییر مقدار دوده بر خواص رئومتری (گشتاورهای حداقل، حداکثر و اختلاف، زمان‌های ایمنی و پخت بهینه و سرعت پخت) آمیزه رویه تایر را نشان می‌دهد. جدول ۴ نتایج مدل‌های برازش را برای خواص رئومتری ارائه می‌دهد.

اثر افزایش پودر لاستیک مشابه افزایش مقدار دوده در فرمول‌بندی بوده و به افزایش گشتاور حداقل آمیزه لاستیکی منجر شده است. پودر لاستیک اثر کاهشی جزئی بر گشتاور حداکثر و اثر کاهشی قابل توجه بر گشتاور اختلاف دارد. افزایش مقدار گوگرد و دوده باعث افزایش هر دو خاصیت شده است (شکل ۲). تصاویر پایینی شکل ۲ اثر پودر لاستیک، دوده و گوگرد بر خواص زمان‌های ایمنی و پخت بهینه و سرعت پخت آمیزه لاستیکی رویه تایر را نشان می‌دهد. پودر لاستیک ضمن کاهش جزئی زمان ایمنی و سرعت پخت به کاهش زمان پخت آمیزه لاستیکی منجر شده است.

درباره شناخت رفتارها و سازوکارهای حاکم می‌توان گفت، گشتاور حداقل معیاری از گرانروی خام آمیزه لاستیکی است. پودر لاستیک اثر افزایشی معنی‌دار بر گرانروی نشان داده است. Gibala [۱۲]



شکل ۲- اثر عوامل فرمول‌بندی بر اساس طراحی آزمون بر خواص رئومتری آمیزه لاستیکی (رئومتری ۱۸۵°C و ۶ min): (الف) گشتاور حداقل، (ب) گشتاور حداکثر، (ج) گشتاور اختلاف، (د) زمان ایمنی، (ه) زمان پخت بهینه و (و) سرعت پخت.

اثر استفاده از دو نوع پودر لاستیک مختلف تهیه شده به روش آسیاب دوغلتکی و سرمایشی بر رفتار گرانروی آمیزه لاستیکی بر پایه SBR پرشده با دوده را مطالعه کرد. نتایج نشان داد، پودر تهیه شده با روش آسیاب بر گرانروی آمیزه مزبور اثر افزایشی دارد و مشابه اثر دوده است. وجود ذرات ریز پودر لاستیک در بین زنجیرهای لاستیک باعث کاهش قابلیت حرکت زنجیرها (occluded rubber) و افزایش گرانروی کلی آمیزه می‌شود. با وجود این، در مطالعه Gibala نشان داده شد، پودر لاستیک تهیه شده با روش سرمایشی اثر افزایشی بر گرانروی ندارد. بنابراین، از این لحاظ پودر بررسی شده در مطالعه حاضر که با فناوری جت آبی تهیه شده است، عملکرد مشابه پودر آسیابی دارد. درباره سایر خواص رئومتری نشان داده شد، پودر لاستیک اثر کاهشی بر گشتاورهای حداکثر و اختلاف دارد. همچنین، زمان ایمنی آمیزه اندکی کاهش و زمان پخت بهینه آن به‌خوبی کاهش می‌یابد.

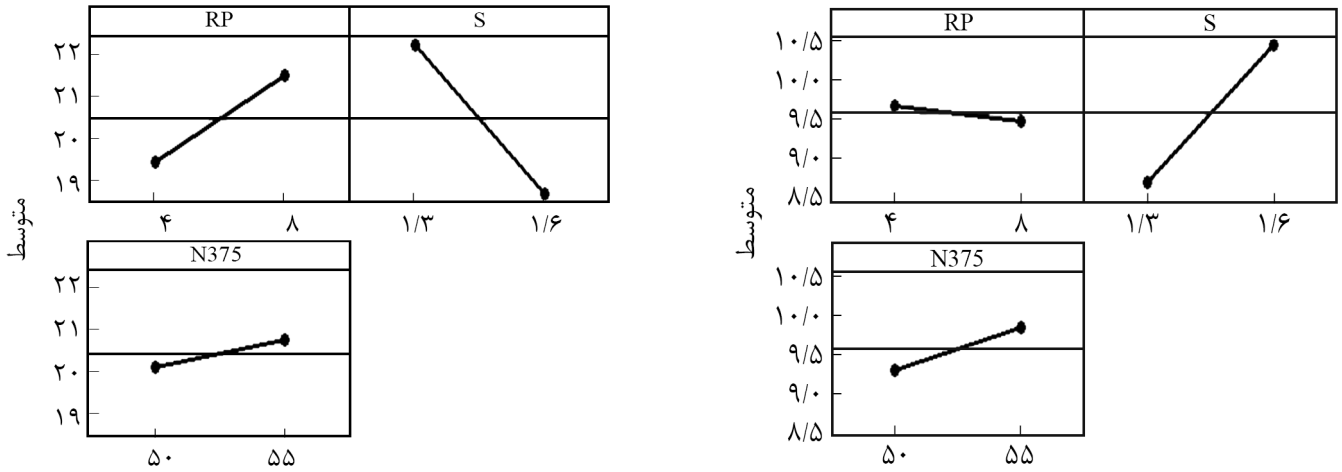
نتایج مشابه با نتایج این مطالعه برای خواص رئومتری آمیزه لاستیکی با وجود پودر لاستیک در تعدادی مقالات گزارش شده است [۴،۱۳،۱۴]. Gibala [۴] نشان داد، علت کاهش گشتاور حداکثر آمیزه لاستیکی، مهاجرت گوگرد از بستر لاستیک به پودر لاستیکی است. همچنین علت کاهش زمان ایمنی، مهاجرت شتاب‌دهنده از پودر لاستیک به بستر پلیمری است. به‌طور عمده از شتاب‌دهنده‌های سولفونامیدی در فرمول‌بندی‌بندی رویه تایر استفاده می‌شود. عامل ایجاد اتصالات عرضی MBT است که به‌سرعت وارد واکنش پخت گوگردی می‌شود. احتمالاً باقی‌مانده MBT در پودر لاستیک وجود دارد که به بستر لاستیک مهاجرت می‌کند و زمان ایمنی کلی آمیزه لاستیکی با وجود پودر لاستیک کاهش می‌یابد.

خواص کششی و مقاومت پارگی

در جدول ۱ نشان داده شد، استحکام کششی، مدول و ازدیاد طول آمیزه لاستیکی با افزایش ۱۰ و ۱۵ قسمت وزنی پودر لاستیک کاهش می‌یابد. مطالعه طراحی آزمون آماری (جدول ۲) نشان داد، نتایج استحکام کششی آمیزه‌ها بسیار نزدیک به هم هستند (جدول ۳)، همین شرایط تا حدودی برای ازدیاد طول تا پارگی نیز وجود دارد (جدول ۳). تحلیل آماری انجام شده و مدل برازش توسعه‌یافته نیز نشان می‌دهد، برای استحکام کششی فقط افزایش دوده از لحاظ آماری می‌تواند اثرگذار باشد. برای ازدیاد طول تا پارگی نیز فقط گوگرد در محدوده مطالعه شده اثرگذار مهم است (جدول ۵). نتیجه مهم این است که کاهش ازدیاد طول تا پارگی ناشی از وجود پودر لاستیک را می‌توان با کاهش مقدار گوگرد و کاهش استحکام کششی را نیز تا حدودی با افزایش مقدار دوده بهبود بخشید.

از سوی دیگر نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد، با افزایش عوامل پخت (A_7–A_9) می‌توان بخشی از کاهش استحکام کششی ناشی از وجود پودر لاستیک را جبران کرد. اما در این حالت ازدیاد طول تا پارگی کاهش بیشتری می‌یابد و از نمونه شاهد فاصله زیادی دارد. اثر نوع و اندازه پودر لاستیک بر خواص کششی آمیزه لاستیکی در مراجع مختلف گزارش شده است. Burfurd و Pittolo اثر افزودن ۱۱ قسمت وزنی پودر لاستیک مختلف تهیه شده با روش‌های آسیاب معمولی و سرمایشی با ابعاد و شکل‌شناسی مختلف را به آمیزه SBR پرشده با ۵۰ قسمت وزنی دوده مطالعه کردند [۱۰]. پودر لاستیک به مقدار ۱۵ قسمت وزنی به فرمول‌بندی‌بندی اضافه شد. در همه فرمول‌بندی‌بندی‌ها کاهش استحکام کششی و ازدیاد طول مشاهده شد، برای استحکام کششی این کاهش در بازه ٪۴ تا ٪۲۱ و برای ازدیاد طول در بازه ٪۳/۵ تا ٪۲۷ برای ۱۵ قسمت وزنی افزودن انواع مختلف پودر لاستیک استفاده شده در مطالعه آن‌ها بود. در این مطالعه، کاهش استحکام کششی آمیزه دارای ۱۵ قسمت وزنی پودر لاستیک جت آبی ٪۱۶ و کاهش ازدیاد طول آن تنها ٪۶ بوده است (مقایسه نتایج آمیزه A_1 و A_3) که بیانگر عملکرد مناسب این پودر در رفتار کششی آمیزه لاستیکی در مقایسه با سایر انواع پودر لاستیک است. ذکر این نکته حائز اهمیت است که تمام پودرهای استفاده شده در مطالعه Burfurd اندازه ذره کمتر از ۴۲۵ μm داشته‌اند. اندازه ذره پودر لاستیک مطالعه شده در این مقاله کمتر از ۱۰۰ μm بود که به خواص بهتر منجر شده است. Burford اظهار کرده است، عملکرد کشش ولکانیده تحت تأثیر چسبندگی بین پودر لاستیک و بستر پلیمر قرار می‌گیرد که انتظار می‌رود، با ازدیاد مساحت سطح افزایش یابد [۱۰]. Gibala اثر دو نوع پودر لاستیک تهیه شده به روش‌های آسیاب معمولی و سرمایشی را در آمیزه SBR پرشده با دوده مطالعه کرد [۱۲]. آمیزه دارای پودر لاستیک معمولی گرانروی بیشتری از آمیزه دارای پودر لاستیکی سرمایشی نشان داد. این موضوع به حبس (occluded) زنجیرهای لاستیک بین منافذ و خلل‌وفرج ذرات پودر نسبت داده شده و برخلاف پودر سرمایشی است که سطح صاف آن مانع از حبس زنجیر لاستیک می‌شود.

مطالعه معمولی (آمیزه A_1 تا A_3) و نیز مطالعه انجام شده در قالب طراحی آزمون آماری (جدول ۴ و شکل ۳) نشان می‌دهد، پودر لاستیک جت آبی کاهش مدول آمیزه لاستیکی را به‌همراه دارد. علت اثر کاهشی پودر لاستیک بر مدول را می‌توان ناشی از مهاجرت گوگرد از بستر پلیمر به فاز پودر لاستیک دانست. این مهاجرت مدول فاز پودر را افزایش داده، در عوض چگالی اتصالات عرضی (حالت پخت) بستر–ماتریس پلیمر و مدول بستر را کاهش می‌دهد. چون



(الف) (ب)

شکل۳- اثر عوامل فرمول‌بندی بر اساس طراحی آزمون بر: (الف) مدول ٪۳۰۰ و (ب) مقاومت پارگی آمیزه لاستیکی.

مدول کلی آمیخته پر شده به‌طور عمده با ماتریس کنترل می‌شود، اثر دوم غالب است و گشتاور حداکثر و مدول کاهش می‌یابد.

با افزایش گوگرد و دوده می‌توان این کاهش را جبران کرد (شکل ۳). همچنین نشان داده شد، افزایش جزئی عوامل پخت (گوگرد و شتاب‌دهنده) تا ٪۵ و کمتر از آن به‌راحتی قابلیت جبران مدول را دارد (آمیزه‌های A_6، A_7 و A_8). مقاومت در برابر پارگی آمیزه لاستیکی با افزایش پودر لاستیک اندکی بهبود می‌یابد. این نتیجه از مقایسه نتایج مقاومت پارگی آمیزه‌های A_2 و A_3 با A_1 و همچنین مطالعه آماری انجام‌شده و مدل توسعه‌یافته در جدول ۵ و نیز منحنی اثرهای اصلی ارائه شده در شکل ۳ قابل مشاهده است.

همچنین، کاهش گوگرد به نفع مقاومت پارگی است (شکل ۳ و مدل برازش جدول ۵). می‌توان دید، افزایش عوامل پخت مقدار گوگرد و شتاب‌دهنده (٪۵) اندکی به ضرر مقاومت پارگی است. بنابراین به‌نظر می‌رسد، تغییرات در مقاومت پارگی وابسته به چگالی اتصالات عرضی بوده و کاهش آن به نفع مقاومت پارگی است. نتایج مشابهی در سایر مراجع برای اثر پودر لاستیک بر مدول و مقاومت پارگی آمیزه لاستیکی مشاهده می‌شود [۵،۷].

سختی و جهندگی

افزایش پودر لاستیک، اثر کاهشی جزئی بر سختی و جهندگی را نشان می‌دهد (نتایج جدول ۱، مدل برازش جدول ۵ و شکل ۴). این اثر کاهشی برای خاصیت سختی اندک و از لحاظ آماری حائز اهمیت نیست. اما، اثر منفی و کاهشی آن بر خاصیت جهندگی از لحاظ آماری حائز اهمیت است (جدول ۵). جهندگی با افزایش ٪۵ عوامل پخت بهبود و به محدوده فرمول‌بندی شاهد می‌رسد (A_6، A_7 و A_8). علت کاهش مربوط به اثر منفی پودر لاستیک بر چگالی اتصالات عرضی گوگردی است که کاهش آن باعث کاهش جهندگی و تا حدودی سختی شده است. افزون بر این، آثار هیدرودینامیکی و برهم‌کنشی پودر لاستیک-لاستیک، باعث اثر افزایشی بر سختی و کاهشی بر جهندگی می‌شود. بنابراین، اثر هم‌افزایی دو علت مزبور (کاهش هم‌زمان چگالی اتصالات عرضی و اثر هیدرودینامیکی) باعث کاهش معنی‌دار جهندگی شده است. در عوض، اثر متقابل دو علت مزبور باعث اثر جزئی ورود پودر لاستیک بر سختی شده است. درباره دو خاصیت سختی و جهندگی می‌توان دید، به‌دلیل افزایش چگالی اتصالات عرضی، ازدیاد گوگرد باعث افزایش هر دو خاصیت می‌شود، درحالی که افزایش دوده باعث افزایش سختی و کاهش جهندگی شده است (شکل ۴).

رشد ترک دی‌متیا

اثر پودر لاستیک بر رشد ترک دی‌متیا در جدول ۱ آمده است. همچنین، در شکل ۵ منحنی اثرهای اصلی، اثر پودر لاستیک بر پدیده رشد ترک دی‌متیا در کنار اثر دوده و گوگرد ارائه شده است. مقدار رشد ترک برحسب mm/۱۰۰۰ cycle گزارش شده است. افزایش پودر لاستیک از ۴ به ۸ قسمت وزنی کاهش (بهبود) مقدار رشد ترک دی‌متیا را به همراه داشته است. اطلاعات کمتری درباره اثر پودر لاستیک بر ویژگی رشد ترک دی‌متیای آمیزه لاستیکی در اختیار است. در این مطالعه، وجود پودر لاستیک بهبود مقاومت در برابر رشد ترک را به همراه داشته است. نتیجه مشابهی در مطالعه احمدی و

یزدانی [۴] گزارش شده است. Swor و همکاران [۷] اثر پودر لاستیک بسیار ریز بر طول عمر خستگی آمیزه لاستیکی را مطالعه و نشان داده است، این ویژگی با وجود مقادیر زیاد پودر لاستیک بسیار ریز بهبود می‌یابد، نتیجه‌ای که در این مطالعه نیز مشاهده می‌شود.

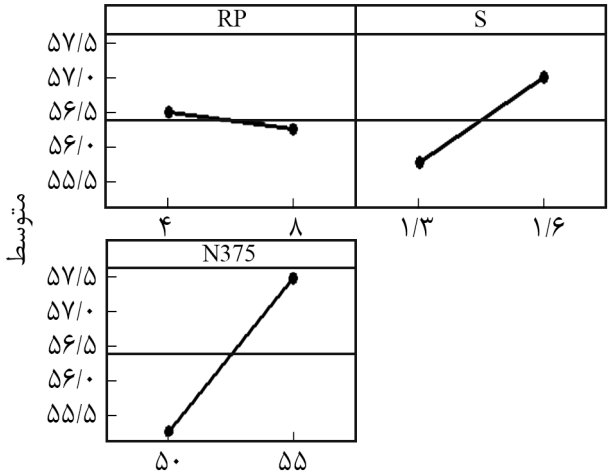
درباره سازوکار حاکم بر رشد ترک دی‌متیا می‌توان گفت، اصولاً برای پیشرفت ترک، لازم است، انرژی موردنیاز برای ایجاد سطوح جدید فراهم شود. به‌طور کلی، انرژی ورودی می‌تواند از دو منبع، اول دستگاه آزمون و دوم انرژی کرنشی رها شده از نمونه در محل ترک تأمین شود. در مقابل، این انرژی از دو راه، اول از راه شکستن پیوندها و ایجاد سطوح جدید و دوم از راه فرایند اتلاف (پسماند اتلافی) و تبدیل به گرما از راه فرایندهای بازگشت ناپذیر می‌تواند مصرف شود [۱۵،۱۶]. انرژی کرنشی و کشسانی ارتباط مستقیم با مدول آمیزه دارد [۱۷]. بنابراین به‌نظر می‌رسد، بهبود رشد ترک دی‌متیا با وجود پودر لاستیک بیشتر مربوط به اثر کاهنده پودر لاستیک بر مدول آمیزه و کاهش انرژی کشسانی ورودی به محل ترک در فرایند رشد ترک دی‌متیا باشد.

افزایش مقدار رشد ترک دی‌متیا با افزایش مقدار گوگرد، شتاب‌دهنده و دوده نیز با اثر این عوامل بر ویژگی مدول آمیزه منطبق است. هر تغییری که باعث افزایش مدول آمیزه شود، افزایش رشد ترک را به‌همراه دارد. زیرا، انرژی کشسانی ورودی به محل ترک افزایش می‌یابد. در هر سه آمیزه A_6، A_7 و A_8 که در آن‌ها از مقادیر بیشتر عوامل پخت استفاده شده است، رشد ترک دی‌متیا کاهش (نسبت به A_2، A_3 و A_4) و در محدوده نمونه شاهد (A_1) قرار گرفته است.

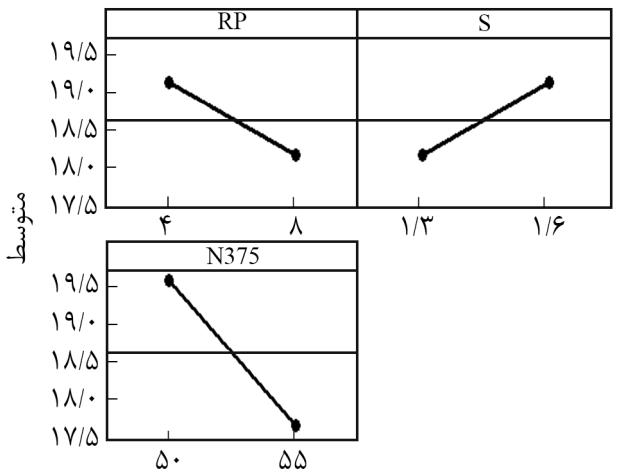
همچنین، منحنی‌های اثرهای اصلی (شکل ۵) به‌وضوح نشان می‌دهد، افزایش گوگرد اثر شدیدتری بر افزایش رشد ترک در مقایسه با افزایش دوده دارد. دلیل این است که افزایش گوگرد به افزایش چگالی اتصالات عرضی و افزایش ماهیت غیراتلافی و کشسانی آمیزه منجر شده که این موضوع باعث رشد راحت‌تر ترک می‌شود. زیرا فرایندهای اتلافی، نقش مهمی در مصرف انرژی ورودی به محل پیوند دارند. در عوض افزایش دوده به افزایش ماهیت اتلافی آمیزه لاستیکی منجر می‌شود که به نفع مقاومت در برابر رشد ترک است. بنابراین، هرچند افزایش دوده و افزایش گوگرد هر دو باعث افزایش مدول و در نتیجه افزایش انرژی ورودی به محل ترک می‌شوند، اما دوده ماهیت اتلافی آمیزه را افزایش می‌دهد. بنابراین، مقاومت رشد ترک دی‌متیا کاهش کمتری نشان می‌دهد، در مقایسه با زمانی که گوگرد افزایش یافته است (شکل ۵).

سایش

در این مطالعه، کاهش مقاومت سایشی آمیزه لاستیکی با وجود پودر لاستیک به‌خوبی نشان داده شده است (جدول ۱)، هرچند این کاهش جزئی است. اما، از لحاظ آماری حائز اهمیت تشخیص داده شده است (جدول ۵ و شکل ۵). وجود وستنامر اثر مثبت بر مقاومت سایشی نشان داده (جدول ۱) و مقدار سایش با این دو رویکرد بهبود یافته است. افزون بر این، افزایش هم‌زمان گوگرد و شتاب‌دهنده (افزایش ۵٪ عوامل پخت) یا کاهش گوگرد به تنهایی (شکل ۵) اثر کاهشی و بهبوددهنده بر سایش نشان داده‌اند. مقاومت سایشی ویژگی مهم قابل انتظار از آمیزه رویه تایر است. اثر عوامل مختلف فرمول‌بندی‌بندی بر رفتار سایش آمیزه لاستیکی را می‌توان با مدل Fukahori تحلیل کرد [۱۷،۱۸]. طبق این مدل، سایش به‌صورت پدیده رشد ترک خستگی برحسب دامنه کرنش میانگین ε^* بیان می‌شود (معادله ۲). ε^* در مدل Fukahori به‌وسیله ضریب اصطکاک (μ) مدول یانگ (E)

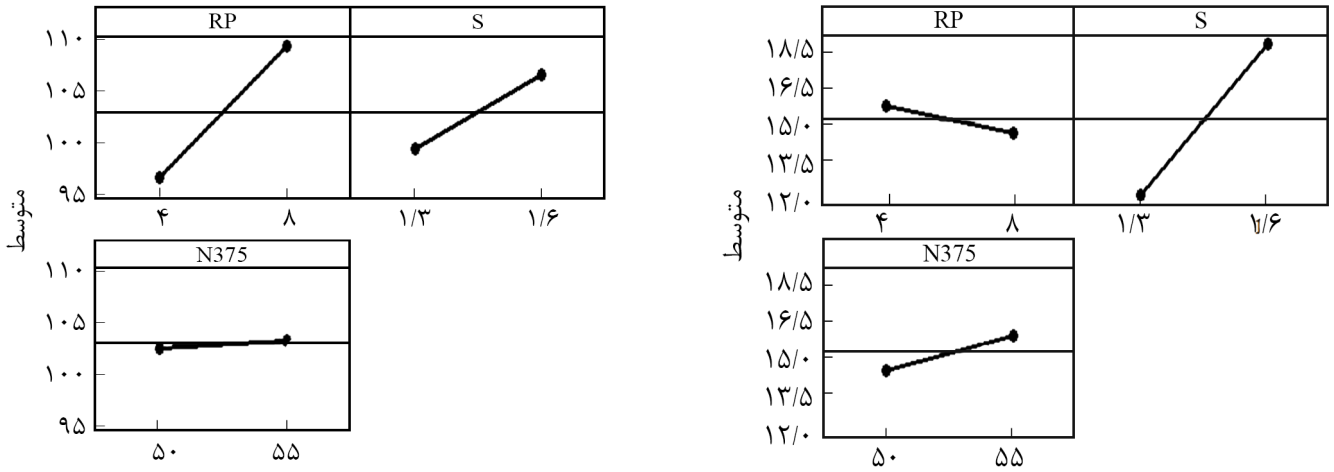


(الف)



(ب)

شکل ۴- اثر عوامل فرمول‌بندی بر اساس طراحی آزمون بر خواص آمیزه لاستیکی: (الف) سختی و (ب) جهندگی.



(الف) (ب)

شکل ۵- اثر عوامل فرمول‌بندی بر اساس طراحی آزمون بر: خواص آمیزه لاستیکی: (الف) رشد ترک دی‌متیا و (ب) سایش DIN.

ماده، بار عمودی (P) و مساحت سطح (S) و با معادله (۳) توصیف می‌شود. بدین ترتیب، سرعت سایش با معادله (۲) بیان می‌شود:

$$\dot{D} = dc\,(\varepsilon^*)/dt \qquad (۲)$$

$$\varepsilon^* = \mu P/ES \qquad (۳)$$

از یک طرف، پودر لاستیک ویژگی مدول آمیزه را اندکی کاهش داده است. بنابراین، دامنه کرنش میانگین ε^* اندکی افزایش می‌یابد که به ضرر سایش است. از سوی دیگر، پودر لاستیک ویژگی رشد آمیزه را بهبود داده است. بنابراین، با وجود کاهش مدول وجود پودر لاستیک سایش آمیزه را تنها اندکی کاهش داده است.

افزایش عوامل پخت (گوگرد و شتاب‌دهنده) با وجود پودر لاستیک، افزایش مدول آمیزه به بیشتر از مقدار شاهد (A_1) را به همراه داشته، در حالی که رشد ترک دی‌متیا به مقدار شاهد رسیده است. بنابراین، مقادیر سایش (آمیزه‌های A_6، A_7 و A_8) در محدوده نمونه شاهد (A_1) قرار گرفته است. اثر مقدار گوگرد بر رفتار سایش را نیز می‌توان با مدل Fukahori بررسی کرد. انتظار می‌رود، افزایش گوگرد به دلیل افزایش مدول آمیزه و کاهش کرنش میانگین ε^*، بهبود سایش را به همراه داشته باشد، اما این مهم اتفاق نیفتاده است (شکل ۵ و آمیزه A_6). زیرا، افزایش گوگرد با توجه به نتایج رشد ترک دی‌متیا (شکل ۵) رفتار رشد ترک آمیزه را ضعیف کرده و این اثر منفی آنقدر است که اثر مثبت کاهش کرنش میانگین (به دلیل افزایش مدول) را بر رفتار سایش کم‌رنگ کرده است. در واقع، با افزایش چگالی اتصالات عرضی قابلیت جابه‌جایی زنجیرها کاهش یافته و از طرفی ماهیت کشسانی و غیراتلافی لاستیک افزایش می‌یابد. بنابراین، رشد ترک با صرف انرژی کمتر انجام می‌شود. در این مطالعه نشان داده شد، با کاهش مقدار گوگرد (بدون تغییر شتاب‌دهنده) نیز می‌توان کاهش سایش با وجود پودر لاستیک را تا حدودی جبران کرد (آمیزه A_5 و شکل ۵). در مقابل، افزایش دوده در محدوده مورد مطالعه بر مدول آمیزه اثر مثبت (شکل ۳) و بر ماهیت رشد ترک اثر منفی (شکل ۵) گذاشته است. اثر اول به نفع مقاومت سایشی و دومی به ضرر آن است و این دو اثر یکدیگر را خنثی کرده‌اند. در نتیجه، سایش با افزایش مقدار دوده دچار تغییر نشده است (شکل ۵). مشاهده می‌شود با استفاده از مدل مزبور و کار تجربی انجام شده می‌توان دیدگاه مناسبی درباره شناخت رفتار سایش آمیزه لاستیکی به‌دست آورد.

خواص پیرسازی گرمایی

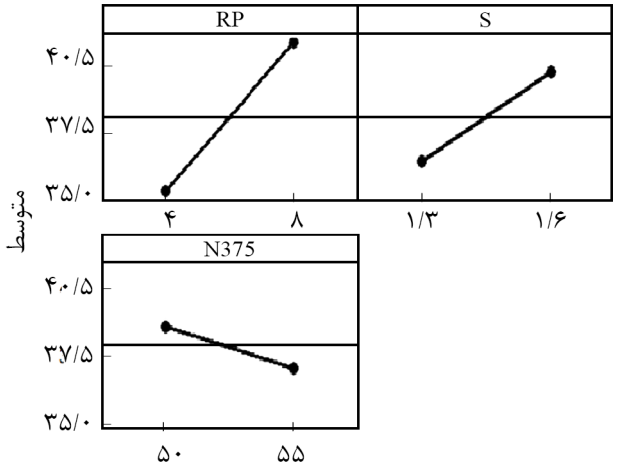
شکل ۶ اثر افزایش پودر لاستیک، گوگرد و دوده بر خاصیت پیرسازی آمیزه لاستیکی را نشان می‌دهد. برای این خاصیت، ازدیاد طول تا پارگی در شرایط معمولی و پس از پیرسازی گرمایی اندازه‌گیری و کاهش مقادیر برحسب درصد گزارش شده است. افزایش مقدار پودر لاستیک در فرمول‌بندی باعث افزایش درصد کاهش پیرسازی شده است. با وجود این، کاهش گوگرد و افزایش دوده بهبود پیرسازی را به همراه داشته است. بنابراین، وجود پودر لاستیک را می‌توان با کاهش مقدار گوگرد و پیرسازی و افزایش دوده جبران کرد.

نتایج جدول ۱ نیز تائید می‌کند، پودر لاستیک اثر مخرب بر رفتار پیرسازی آمیزه لاستیکی دارد (A_2 و A_3). سازوکار حاکم بر رفتار

پیرسازی گرمایی آمیزه لاستیکی بسیار پیچیده است. در شرایط اکسایش گرمایی، واکنش‌های تخریبی برای پلیمر و اتصالات گوگردی اتفاق می‌افتد. به علت جدایش و شکست زنجیر پیکره پلیمر و تا حدی جدایش اتصالات گوگردی و نیز پدیده بازگشت انتظار می‌رود، در پیرسازی اکسایش گرمایی، تغییراتی در چگالی اتصالات عرضی و نوع و توزیع اتصالات گوگردی ایجاد شود که اثر آن بر همه خواص از جمله خواص کششی آمیزه مشهود است [۱۹،۲۰]. وجود پودر لاستیک رفتار مقاومت پیرسازی آمیزه را اندکی کاهش داده است. شاید این کاهش پیرسازی با وجود پودر لاستیک را بتوان با توجه به تغییر مقدار محافظت‌کننده‌ها توجیه کرد. وجود محافظت‌کننده در فرمول‌بندی بر خاصیت پیرسازی اثر مثبت دارد [۲۲-۱۹].

انتظار می‌رود، محافظت‌کننده‌های موجود در پودر لاستیک به دلیل گذشت زمان، کارایی لازم را نداشته باشند. زمانی که پودر لاستیک به فرمول‌بندی‌بندی اضافه می‌شود، مقدار کلی محافظت‌کننده سامانه کاهش می‌یابد و اثر منفی خود را بر رفتار پیرسازی نشان می‌دهد. از طرفی، همان‌طور که Gibala [۴] اظهار کرده است و در بخش‌های پیش‌تر بیان شد، انتظار می‌رود، به دلیل مهاجرت گوگرد از فاز لاستیک به فاز پودر و مهاجرت شتاب‌دهنده از فاز پودر به فاز لاستیک و تغییر نسبت گوگرد به شتاب‌دهنده، تغییراتی در توزیع اتصالات گوگردی با وجود پودر لاستیک ایجاد شود که اثر خود را بر ویژگی پیرسازی نشان دهد.

تحلیل آماری نشان داد، کاهش گوگرد (بدون تغییر شتاب‌دهنده) رفتار پیرسازی را اندکی بهبود می‌دهد (شکل ۶) اثر بهبوددهنده کاهش گوگرد بر خواص پیرسازی را نیز می‌توان با توجه به تغییر در نوع



شکل ۶- اثر عوامل فرمول‌بندی بر اساس طراحی آزمون بر خواص پیرسازی (درصد افت ازدیاد طول پس از پیرسازی) آمیزه لاستیکی.

اتصالات عرضی توجیه کرد. کاهش مقدار گوگرد در فرمول‌بندی‌بندی (در مقدار ثابت شتاب‌دهنده) می‌تواند سهم پیوندهای پلی‌سولفیدی را در آمیزه لاستیکی کاهش دهد که اثر مثبت بر رفتار پیرسازی دارد [۱۹،۲۰]. زیرا پیوندهای مونو و دی‌سولفیدی پایداری گرمایی بیشتری از پیوند پلی‌سولفیدی دارند. همچنین نتایج افزایش ۵٪ عوامل پخت نشان داد، افزایش هم‌زمان گوگرد و شتاب‌دهنده نیز اثر بهبوددهنده بر رفتار پیرسازی دارد و می‌توان به محدوده مقادیر پیرسازی نمونه شاهد رسید.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، قابلیت استفاده از پودر لاستیک تولید شده به روش جت آب در آمیزه رویه تایر سواری رادیال بررسی شده است. نشان داده شد، کاهش استحکام کششی و ازدیاد طول که مشخصه بارز استفاده از پودر لاستیک در آمیزه لاستیکی است، با وجود پودر لاستیک جت آبی در مقایسه با سایر انواع پودر کمتر است. کاهش جزئی سایش و جهندگی اثر نامطلوب دیگر این جایگزینی بود. در حالی که ویژگی رشد ترک دی‌متیا بهبود شایان توجه نشان داد. مشخص شد، فقط با افزایش ۵٪ عوامل پخت (گوگرد و شتاب‌دهنده) با وجود پودر لاستیک، کاهش جهندگی، خواص پیرسازی، سایش و تا حدودی استحکام کششی آمیزه لاستیکی در مجاورت این نوع پودر لاستیک جبران می‌شود. هر چند که ویژگی مهم ازدیاد طول تا پارگی به‌طور چشمگیر کاهش می‌یابد. در این حالت نیز رشد ترک دی‌متیای آمیزه در محدوده نمونه بدون پودر لاستیک قرار می‌گیرد.

پودر تولید شده به‌روش جت آبی در مقایسه با انواع رایج تولید شده به روش‌های متداول آسیاب خشک و مرطوب و سرمایشی دارای مزایایی است که مهم‌ترین آن افزون بر اندازه ذرات بسیار ریز با سطحی زبر و متخلخل که اثرهای تقویتی مناسبی ارائه می‌دهد، اطمینان از نبود ناخالصی از جمله فلزات است. با توجه به اینکه آمیزه رویه تایر بیشترین وزن را در بین بخش‌های مختلف تایر دارد، اگر بتوان از این پودر در آمیزه رویه تایر استفاده کرد، بازار مصرف مناسبی برای آن فراهم می‌شود. همچنین، تحلیل قیمت انجام شده حاکی از آن است که استفاده از این پودر قیمت تمام شده آمیزه لاستیکی را نیز کاهش می‌دهد و افزون بر ملاحظات زیست‌محیطی آورده ریالی مناسبی نیز نصیب شرکت‌های تایرسازی می‌کند. در این مقاله نشان داده شد، به‌کمک طراحی آزمون می‌توان حتی در محدوده کم تغییرات عوامل فرمول‌بندی مطالعه قابل اطمینانی انجام داد. این مهم

برای حوزه آمیزه‌کاری که خطاهای آزمایشگاهی جزء جدایی‌ناپذیر مطالعات است، باعث اطمینان بیشتر به نتایج و تحلیل مطالعه می‌شود.

قدردانی

از حمایت‌های مدیریت محترم عامل شرکت کویر تایر تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

1. Myhre M. and MacKillop D.A., Rubber Recycling, *Rubber Chem. Technol.*, **75**, 429-473, 2002.
2. Karger-Kocsis J., Mészáros L., and Bárány T., Ground Tyre Rubber (GTR) in Thermoplastics, Thermosets, and Rubbers, *J. Mater. Sci.*, **48**, 1-38, 2013.
3. Kim J.K. and Burford R.P., Study of Powder Utilization of Waste Tires as a Filler in Rubber Compounding, *Rubber Chem. Technol.*,**71**, ,1028-1041, 1998
4. Ahmadi M. and Yazdani R., Surveying the Influence of Reclaimend Rubber and Rubber Powder on Physical, Dynamical and Processing Properties of NR/BR Compound, *lran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **21**, 217-223, 1387.
5. Burgoyne M.D., Leaker G.R., and Krekic Z., The Effect of Reusing Ground Flash and Scrap Rubber in Parent Compound, *Rubber Chem. Technol.*, **49**, 375-378, 1976.
6. Lee, T.C.P. and Millns, W., Treatment of Vulcanized Rubber, *US Pat., 4,046,834*, 1974.
7. Swor R.A., Jensen L.W., and Budzol M., Ultrafine Recycled Rubber, *Rubber Chem. Technol.*, **53**, 1215-1225, 1980.
8. Crane G., Elefritz R.A., Kay E.L., and Laman J.R., Scrap Tire Disposal Properties, *Rubber Chem. Technol.*, **51**, 577-599, 1978.
9. Phadke A.A., Chakraborty S.K., and De S.K., Cryoground Rubber-Natural Rubber Blends, *Rubber Chem. Technol.*, **57**, 19-33, 1984.
10. Burford R.P. and Pittolo M., Characterization and Performance of Powdered Rubber, *Rubber Chem. Technol.*, **55**, 1233-1249, 1982.
11. HuY., Kang Y., Wang X.C., Li X.H., Long X.P., Zhai G.Y., and Huang M., Mechanism and Experimental Investigation of Ultra High Pressure Water Jet on Rubber Cutting, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.,* **15**, 1973-1978, 2014.
12. Gibala D., Laohapisitpanich K., Thomas D., and Hamed G.R., Cure and Mechanical Behavior of Rubber Compounds Containing Ground Vulcanizeds, Part II-Mooney Viscosity, *Rubber Chem. Technol.,* **69**, 115-119, 1996.
13. Gibala D. and Hamed G.R., Cure and Mechanical Behavior of Rubber Compounds Containing Ground Vulcanizeds, Part 1-Cure Behavior, *Rubber Chem. Technol.,* **67**, 636-648, 1994.
14. Carli L.N., Bianchi O., Mauler R.S., and Crespo J.S., Crosslinking Kinetics of SBR Composites Containing Vulcanized Ground Scraps as Filler, *Polym. Bull.*, **67**, 1621-1631, 2011.
15. Hamed G.R., Energy Dissipation and the Fracture of Rubber Vulcanizates, *Rubber Chem. Technol.*, **64**, 493-500, 1991.
16. Hamed G., Molecular Aspects of the Fatigue and Fracture of Rubber, *Rubber Chem. Technol.*, **67**, 529-536, 1994.
17. Shiva M., Hadadi A. H., Nakhaei A., and Varasteh H., Study of Abrasion of Rubber Materials by Experimental Design, Response Surface and Artificial Neural Network Modeling, *lran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **28**, 197-209, 2015.
18. Fukahori Y. and Yamazaki H., Mechanism of Rubber Abrasion, Part 3: How is Friction Linked to Fracture in Rubber Abrasion, *Wear*, **188**, 19-26, 1995.
19. Ignatz-Hoover F. and Datta R., Antidegradants Impact Thermal Oxidative Stability, *Rubber Plast. News*, 1-12, 2003.
20. Rodgers B., *Rubber Compounding, Chemistry and Applications*, Marcel Dekker, Chapt.10, 2004.
21. Reed M.R., Effect of Antioxidants in Typycal Rubber Stocks, *J. Ind. Eng. Chem.*, **21**, 316-318, 1926.
22. Huntink N.M., *Durability of Rubber Products*, PhD Thesis, Twente University, 7500 AE Enschede, the Netherlands , 2003.