

Effect of Concentration and Size of Crumb Rubber on Rheological and Flexibility Properties of Bitumen

Vahid Hadadi*

Department of Chemistry, Faculty of Basic Science, Islamshahr Branch, Islamic Azad University,
P.O. Box19615-1194, Islamshahr, Iran

Received: 10 July 2019, accepted: 27 January 2020

ABSTRACT

Hypothesis: Annually, large amounts of waste tire are disposed into environment. Since decomposition process of these tire materials takes a long time, the governments have imposed regulations to find environmentally-friendly solutions to recycle the waste tires. There are different approaches to take on the modification of physical and mechanical properties of bitumen or asphalt with crumb tires. The results of those studies have illustrated positive effect of crumb rubber on bitumen properties. Therefore, it is reasonable that concentration and size of crumb rubber could affect the bitumen properties.

Methods: The effect of concentration (3%, 7% and 10 wt%) and size (1, 0.6, 0.3 and 0.1 mm) of crumb rubber was considered on the viscosity, physical and rheological properties of bitumen/rubber blends. Furthermore, to better decide on the use of crumb rubber for bitumen, the viscosity of modified bitumen was studied.

Findings: The results of this study identified that high concentration and smaller dimension of crumb rubber improved cold flexibility and rheological properties of bitumen. Increasing in crumb rubber concentration to 10 wt% resulted in lowering flexibility temperature of bitumen from 20°C to 10°C and even, in smaller sizes (0.1 mm) the flexibility diminished to 8°C. Furthermore, this research showed that at higher concentration and smaller size of crumb rubber the resistance to rutting of bitumen enhanced from 35°C to 60°C. However, the viscosity results showed that a high level of crumb rubber (above 7 wt%) increased the viscosity dramatically and restricted its application. So, adding 7 wt% of crumb rubber with a size of less than 0.1 mm can optimize the physical and mechanical properties of bitumen.

Keywords:

bitumen,
concentration and size of crumb
rubber,
rheological properties,
flexibility at cold temperature,
dynamic viscosity

(*To whom correspondence should be addressed.

E-mail: hadadivahid57@gmail.com

Please cite this article using:

Hadadi V., Effect of Concentration and Size of Crumb Rubber on Rheological and Flexibility Properties of Bitumen, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **32**, 475-483, 2020.

اثر غلظت و اندازه پودر لاستیک بر خواص رئولوژیکی و انعطاف‌پذیری قیر

وحید حدادی*

اسلامشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اسلامشهر، دانشکده علوم پایه، گروه شیمی، صندوق پستی ۱۱۹۴-۱۹۶۱۵

دریافت: ۱۳۹۸/۴/۱۹، پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۷

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

مجله علوم و تکنولوژی پلیمر،

سال سی و دوم، شماره ۶،

صفحه ۴۸۳-۴۷۵، ۱۳۹۸

ISSN: 1016-3255

Online ISSN: 2008-0883

DOI: 10.22063/JIPST.2020.1702

چکیده

فرضیه: سالانه مقدار بسیار انبوهی از تایلر ضایعاتی در محیط زیست دور ریخته می‌شوند. از آنجا که فرایند تخریب مواد تایلر بسیار زمان‌بر است، باید راه حل دوستدار محیط زیست برای بازیافت تایلرهای ضایعاتی یافت شود. راهکارهای مختلفی برای اصلاح خواص مکانیکی و فیزیکی قیر یا آسفالت با پودر لاستیک پیشنهاد شده است. نتایج این مطالعات نشانگر اثر مثبت پودر لاستیک بر خواص قیر بوده است. بنابراین منطقی به نظر می‌رسد، غلظت و اندازه پودر لاستیک بر خواص قیر اثرگذار باشد.

روش‌ها: اثر غلظت (مقدارهای ۳، ۷ و ۱۰٪ وزنی) و اندازه پودر لاستیک (۱/۸، ۰/۳، ۰/۶ و ۱ mm) بر گرانشی و خواص فیزیکی و رئولوژیکی آمیخته‌های قیر-لاستیک بررسی شد. افزون بر این، برای تصمیم‌گیری بهتر درباره استفاده از پودر لاستیک برای قیر، گرانشی قیر اصلاح‌شده نیز مطالعه شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد، افزایش غلظت پودر لاستیک و کاهش ابعاد پودر لاستیک موجب بهبود انعطاف‌پذیری در سرما و خواص رئولوژیکی قیر شد. افزایش غلظت پودر لاستیک تا ۱۰٪ وزنی انعطاف‌پذیری قیر را از ۲۰°C به کمتر از ۱۰°C کاهش داد و حتی در اندازه‌های کوچک‌تر پودر لاستیک (۰/۸ mm)، انعطاف‌پذیری به حدود ۸°C کاهش یافت. همچنین، در غلظت بیشتر و اندازه کوچک‌تر پودر لاستیک، مقاومت در برابر شیاردار شدن قیر از ۳۵°C به حدود ۶۰°C افزایش یافت. با وجود این، نتایج گرانشی نشان داد، غلظت‌های بیش از ۷٪ وزنی پودر لاستیک، گرانشی قیر را افزایش داده و کاربرد آن را محدود کرده است. بنابراین، افزودن تا ۷٪ وزنی پودر لاستیک با اندازه کوچک‌تر از ۰/۸ mm می‌تواند خواص فیزیکی و مکانیکی قیر را بهبود بخشد.

واژه‌های کلیدی

قیر،

غلظت و اندازه پودر لاستیک،

خواص رئولوژیکی،

انعطاف‌پذیری در دمای سرد،

گرانشی دینامیکی

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

hadadivahid57@gmail.com

مقدمه

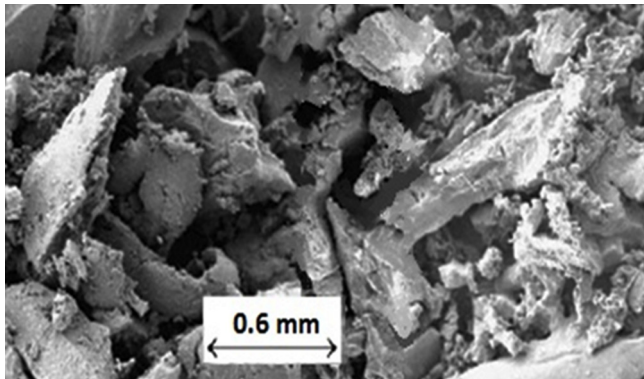
مطابق آمار منتشر شده در سپتامبر ۲۰۱۹ سالانه حدود ۱/۴ میلیون تایلر در کل جهان فروخته شده و در نتیجه همین تعداد تایلر خودرو دور ریخته می‌شوند [۱]. تاکنون با افزایش تعداد خودروهای تولید شده و نیز گسترش جاده‌ها، تعداد تایلر دورریز نیز به‌طور عمده افزایش یافته است. با توجه به طول عمر تجزیه بسیار طولانی این ضایعات، نگرانی برای دفع و بازیافت آن‌ها رو به افزایش است [۲]. پیشنهادها و روش‌های متفاوتی درباره دفع ضایعات لاستیک ارائه شده است. از میان این روش‌ها، بازیافت پودر لاستیک و بازگرداندن آن به صنایع مختلف بیشتر از همه مورد توجه بوده است [۳]. در یکی از این روش‌ها که به گرماکافت لاستیک معروف است، از شکست پیوندهای گوگردی لاستیک، زنجیرهای بوتادیانی لاستیک آزاد می‌شوند [۴]. پیچیدگی و هزینه زیاد گرماکافت موجب محدود شدن این روش برای بازیافت پودر لاستیک به مواد اولیه آن شده است [۵]. افزون بر این، از گرماکافت لاستیک، هیدروکربن‌های سبک گوگردار تولید می‌شوند که برای محیط زیست بسیار خطرناک هستند [۶]. از طرفی پژوهشگران در تلاش برای استفاده از روش یا موادی بوده‌اند که بتواند خواص مکانیکی و شیمیایی قیر را اصلاح کند [۷، ۸]. از این میان، به‌کارگرفتن پلیمرهای ضایعاتی بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۹، ۱۰]. پلی‌پروپیلن بازیافتی، از موادی بوده که برای بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی قیر و نیز کمک به محیط زیست استفاده شده است [۱۱]. پژوهش‌های دیگری درباره کاربرد پودر لاستیک در آسفالت و قیر انجام شده است. در این روش‌ها، ابتدا لاستیک به ذرات ریز آسیاب شده و سپس در درصدی متفاوت به قیر اضافه می‌شود. نتایج این پژوهش‌ها نشان داد، پودر لاستیک اثر بسیار مثبتی بر خواص فیزیکی و مکانیکی قیر دارد [۱۲]. در ابتدایی‌ترین این مطالعات دیده شد، پودر لاستیک می‌تواند مقدار درجه نفوذ را کاهش دهد و به‌عبارتی استحکام قیر را بهبود بخشد [۱۳]. آخرین پژوهش‌های انجام شده نیز ثابت می‌کند، خواص مکانیکی قیر با افزایش پودر لاستیک افزایش می‌یابد [۱۴]. Oliver [۱۵] با بررسی کشسانی قیر نشان داد، پودر لاستیک می‌تواند کشسانی قیر را تا حد زیادی اصلاح کند. Navarro و همکاران [۱۶] با بررسی رفتار رئولوژیکی و پایداری پودر لاستیک در قیر گزارش کردند، افزایش ۹٪ وزنی پودر لاستیک خواص رئولوژیکی قیر را با حفظ پایداری فازهای آن افزایش می‌دهد. افزون بر این، Yu و همکاران [۱۷] نشان دادند، افزایش پودر لاستیک به آسفالت‌های گرم موجب افزایش مقاومت در برابر پیرش (پیرسازی) آسفالت می‌شود. در پژوهشی مشابه کاهش شکست بر اثر پیرش برای

آسفالت‌های اصلاح شده با پودر لاستیک بررسی شد [۱۸]. نتایج مشخص کرد، آسفالت‌هایی که با پودر لاستیک اصلاح شده بودند، عمق شکست و مقدار پیشروی شکست کمتری داشتند. گرانروی آمیخته‌های قیری اصلاح شده با پودر لاستیک تعیین کرد، گرانروی قیر با افزایش غلظت پودر لاستیک به‌طور غیرخطی افزایش می‌یابد [۱۹]. Chen و همکاران [۲۰] پایداری گرمایی قیرهای اصلاح شده با پودر لاستیک را بررسی و گزارش کردند، قیرهای اصلاح شده با پودر لاستیک پایداری گرمایی بسیار خوبی نشان می‌دهند. با توجه به اینکه اصلاح قیر با ضایعات اغلب مواقع موجب کاهش خواص ماندگاری قیر می‌شود، ویژگی ماندگاری قیر اصلاح شده با پودر لاستیک بررسی شد [۲۱، ۲۲]. نتایج بیانگر مقاومت خوب قیرهای اصلاح شده در برابر عوامل هوازدگی و محیطی است. بررسی قابلیت شیاردار شدن آسفالت‌های اصلاح شده با پودر لاستیک نشان داد، پودر لاستیک می‌تواند شیاردار شدن آسفالت را به‌طور چشمگیری اصلاح کند [۲۳]. همچنین، مطالعات نشان داد، پودر لاستیک افزون بر تقویت خواص مکانیکی و فیزیکی قیر، صدای حاصل از ترافیک را تا ۵۰٪ کاهش می‌دهد [۲۴]. در پی ویژگی‌های مثبتی که افزودن پودر لاستیک در قیر ایجاد می‌کند، برخی از پژوهشگران شرایط استفاده از پودر لاستیک در قیر را بهینه‌سازی کردند. Mashaan و Karim [۲۵] نشان دادند، دمای اختلاط پودر لاستیک با قیر اثر زیادی بر خواص رئولوژیکی قیر اصلاح شده دارد، در حالی که زمان اختلاط تقریباً بی‌اثر است [۲۶]. آن‌ها تأیید کردند، 180°C بهترین دما برای اختلاط پودر لاستیک با قیر است. در مطالعه دیگری نشان داده شد، با افزایش غلظت پودر لاستیک خواص رئولوژیکی قیر بهبود می‌یابد. از آنجا که پودر لاستیک در قیر حل نمی‌شود و فقط به حالت ذرات پراکنده و با ایجاد برهم‌کنش‌های فیزیکی قیر را اصلاح می‌کند، اندازه ذرات این پلیمر در کنار غلظت‌های مختلف آن در داخل قیر می‌تواند اثر زیادی بر خواص قیر داشته باشد. در مطالعه‌ای اثر اندازه و غلظت ذرات لاستیک در آسفالت بررسی شد [۲۷]. اما، در این مطالعه مخلوط ذرات ریز و درشت لاستیک به آسفالت اضافه شد و کارایی آسفالت حاصل از آن و نه خواص رئولوژیکی آسفالت بررسی شده است. در پژوهش مشابه دیگری فقط اثر غلظت پودر لاستیک بر خواص رئولوژیکی قیر مطالعه شد [۲۸]. همچنین، Mashaan و همکاران [۱۳] فقط اثر غلظت پودر لاستیک را بر خواص رئولوژیکی قیر گزارش کردند، در حالی که اندازه ذرات در کنار غلظت پودر لاستیک می‌تواند معیار مهمی در تغییر خواص رئولوژیکی قیر یا آسفالت باشد. بنابر آنچه گفته شد، اثر همزمان غلظت و ابعاد پودر لاستیک بر خواص رئولوژیکی قیر بررسی نشده است. در پژوهش حاضر سعی

استرالیا در شرایط حرکت صفحه‌های متحرک با سرعت 10 rad/s (1/59 Hz) انجام شد تا نیروی برشی کافی معادل 55 mph را ایجاد کند. آزمون‌ها در محدوده دمایی 30°C تا 80°C بررسی شدند. گرانروی دینامیکی نمونه‌ها مطابق روش آزمون ASTM D4402 با دستگاه Brookfield AMETEK, HBDVE230, 230 VAC بررسی شد. بررسی شکل‌شناسی پودر لاستیک و آمیخته‌های قیری آن با میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) مدل JEOL field JSM-6700F انجام شد.

نتایج و بحث

برای هر یک از نمونه‌ها پنج آزمون ساخته شده و نتایج پنج اندازه‌گیری گزارش شد. بنابراین، داده‌های گزارش شده در این مقاله میانگین پنج نمونه آزمون شده هستند. ابتدا، برای بررسی و استدلال بهتر نتایج، تصویربرداری میکروسکوپی از پودر لاستیک (پیش از جداسازی ابعاد) انجام شد که در شکل ۱ نشان داده شده است. از تصویر پودر لاستیک، زاویه‌های تند و سطوح بالای تماس در نمونه‌هایی با ابعاد کوچک‌تر کاملاً مشخص می‌شود. در ادامه، برای بررسی اثر اندازه ذرات و غلظت پودر لاستیک (CR) بر خواص رئولوژیکی و انعطاف‌پذیری لایه‌های قیر، مقدارهای ۳، ۷ و ۱۰٪ وزنی پودر لاستیک با اندازه‌های ۰/۱، ۰/۳، ۰/۶ و ۱ mm به قیر ۶۰/۷۰ اضافه شد. نتایج انعطاف‌پذیری نمونه‌های قیر در غلظت‌ها و اندازه‌های متفاوت در شکل ۲ نشان داده شده است. از این شکل مشخص است، پودر لاستیک اثر مثبتی بر انعطاف‌پذیری قیر داشت، به طوری که با افزایش غلظت پودر لاستیک انعطاف‌پذیری نمونه‌های قیر از 20°C به حدود 10°C کاهش یافت. افزون بر این مطابق



شکل ۱- تصویر SEM از پودر لاستیک.

Fig. 1. SEM image of crumb rubber powder.

شد، اثر هر دو معیار غلظت و دانه‌بندی پودر لاستیک به طور همزمان بر انعطاف‌پذیری در سرما و خواص رئولوژیکی قیر بررسی شود.

تجربی

مواد

پودر لاستیک خودرو با اندازه‌های ۰/۱، ۰/۳، ۰/۶ و ۱ mm از شرکت ایساتیس یزد و قیر ۶۰/۷۰ با مشخصات آمده در جدول ۱ از شرکت پاسارگاد تهیه شد.

دستگاه‌ها و روش‌ها

تهیه نمونه

ابتدا قیر تا 180°C گرم‌آب شده و ذرات پودر لاستیک با مقدارها و اندازه‌های مختلف به آن اضافه شد. از آنجا که ذرات پودر لاستیک در قیر حل نمی‌شوند و تنها برهم‌کنش‌های فیزیکی میان سطح ذرات پودر لاستیک و ترکیبات موجود در قیر موجب تغییر ویژگی‌های مخلوط قیری می‌شود، همچنین بر اساس مطالعات سایر پژوهشگران، اختلاط بیش از ۳۰ min در دمای 180°C اثر چندانی بر ویژگی‌های قیر ندارد [۲۲، ۲۵، ۲۶]. بنابراین، مخلوط‌ها به کمک همزن مکانیکی با سرعت 300 rpm به مدت ۳۰ min همزده شده و سپس نمونه‌ها برای انجام آزمون‌ها قالب‌گیری شدند.

آزمون‌ها

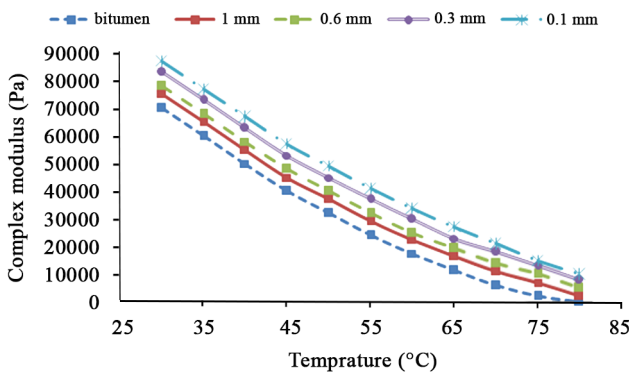
انعطاف‌پذیری نمونه‌ها مطابق استاندارد ISIRI 20184 برای تعیین انعطاف‌پذیری عایق‌های رطوبتی بام و ورق‌های قیر، با دستگاه Cold Bending ساخت شرکت کنترل‌گستر شرق بررسی شد. بررسی رئولوژیکی آزمون‌ها با رئومتر DSR, MCR101 ساخت شرکت Anton Paar

جدول ۱- خواص قیر ۶۰/۷۰.

Table 1. Bitumen 60/70 properties.

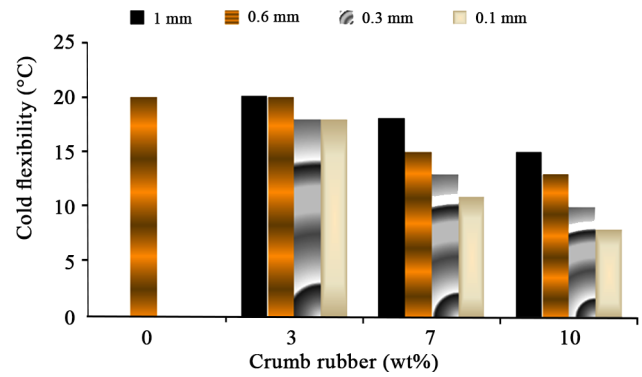
Specification	Test method	Amount
Softening point ($^\circ\text{C}$)	ASTM D36	48
Penetration (0.1 mm)	ASTM D5	66
Solubility in carbon tetrachloro		
Ethylene (%)	ASTM D4	99.1
Ductility (cm)	ASTM D113	>120
Flash point ($^\circ\text{C}$)	ASTM D92	>250
Viscosity@ 135°C (mm^2/s)	ASTM D2170	300
Specific gravity	ASTM D7	1.03

(برگشت‌پذیری به حالت اولیه پس از حذف نیروی اعمال‌شده) و نیز خاصیت کشسانی مایع (برگشت‌ناپذیری به حالت اولیه پس از حذف نیروی اعمال‌شده) دارند، آزمون رئومتر دینامیک برشی (DSR) می‌تواند معیارهای مناسبی را برای توصیف این خواص در آزمون‌های قیری مشخص کند. در این آزمون، مقدار مدول مختلط و زاویه فاز برای هر یک از نمونه‌ها در محدوده دمایی بین ۳۰°C تا ۸۰°C اندازه‌گیری شد. مدول مختلط (G^*) معیار بسیار مناسبی از مقاومت در برابر تغییرشکل را نشان می‌دهد، در حالی که زاویه فاز (δ) بیانگر مقدار پاسخ کشسانی ترکیب است. به طوری که هرچه δ کوچک‌تر از ۹۰° باشد و به صفر نزدیک‌تر شود، ترکیب قیری خاصیت کشسانی بهتری را نشان می‌دهد. با استفاده از این دو عامل، می‌توان نسبت $G^*/\sin\delta$ را محاسبه کرد. این پارامتر نشانگر مقدار مقاومت آمیخته قیری در برابر شیاردار شدن است. مقدارهای بیشتر $G^*/\sin\delta$ مقاومت بیشتر قیر را در برابر شیاردار شدن آشکار می‌کند. مقدارهای G^* برای آمیخته‌های قیری با غلظت‌ها و اندازه‌های مختلف در شکل‌های ۴ تا ۶ نشان داده شده است. نتایج این شکل‌ها بیانگر این است که در مقدارهای ثابت از پودر لاستیک، کاهش اندازه ذرات پودر لاستیک موجب افزایش مقاومت در برابر تغییرشکل آمیخته قیری شد. پیش‌تر هم بیان شد، کاهش ابعاد پودر لاستیک موجب افزایش بیشتر سطح تماس و در نهایت افزایش برهم‌کنش‌های قیر-پودر لاستیک می‌شود، به طوری که در تمام غلظت‌های ۱۰٪ تا ۳۰٪ وزنی پودر لاستیک مقاومت قیر در برابر تغییرشکل با کاهش قطر ذرات پودر لاستیک افزایش یافت. Frantzis این برهم‌کنش‌ها را پیش‌تر به طور کامل بحث کرده بود [۲۹]. به همین دلیل در این مقاله برای اجتناب از انحراف از هدف



شکل ۴- مدول مختلط بر حسب دما برای آمیخته‌های قیری اصلاح‌شده با ۳٪ پودر لاستیک با اندازه‌های مختلف.

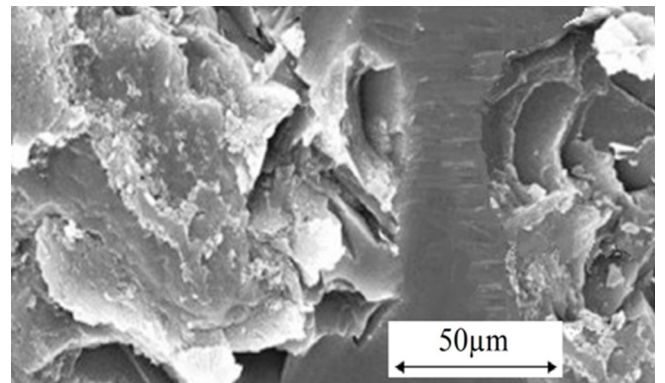
Fig. 4. Complex modulus versus temperature for bituminous blends modified by 3 wt% of crumb rubber in different sizes.



شکل ۲- اثر غلظت و اندازه پودر لاستیک بر انعطاف‌پذیری قیر.

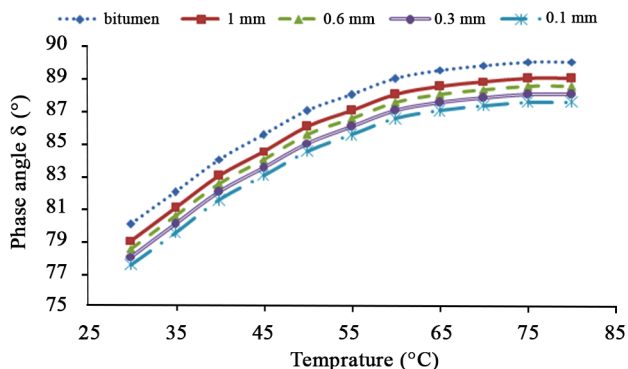
Fig. 2. Effect of concentration and size of crumb rubber on bitumen flexibility.

شکل ۲، ریزتر شدن اندازه‌های پودر لاستیک موجب انعطاف‌پذیری بیشتر قیر شد. استفاده از اندازه‌های بزرگ، به‌ویژه در غلظت‌های کم اثر بسیار جزئی بر انعطاف‌پذیری قیر دارد، در حالی که اندازه‌های کوچک‌تر به دلیل توزیع گسترده‌تر در قیر موجب افزایش چشمگیر انعطاف‌پذیری شدند. شکل ۳ برهم‌کنش میکروسکوپی دو ذره پودر لاستیک با ابعاد ۰/۱ mm و غلظت ۱۰٪ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، به دلیل ریزتر شدن ابعاد پودر لاستیک سطح تماس آن با قیر به شدت افزایش یافته که این موضوع موجب کاهش فضای خالی میان ذرات پودر لاستیک شده است. در نتیجه، مقاومت و انعطاف‌پذیری این آمیخته‌ها بسیار بیشتر نسبت به ابعاد بزرگ‌تر و غلظت‌های کمتر بوده است. نمونه دارای ۱۰٪ وزنی پودر لاستیک با اندازه ۰/۱ mm بهترین انعطاف‌پذیری را در مقایسه با سایر نمونه‌ها داشت. از آنجا که نمونه‌های قیر خاصیت کشسانی جامد



شکل ۳- شکل‌شناسی آمیخته قیری اصلاح‌شده با ۱۰٪ wt از پودر لاستیک اندازه کمتر از ۰/۱ mm.

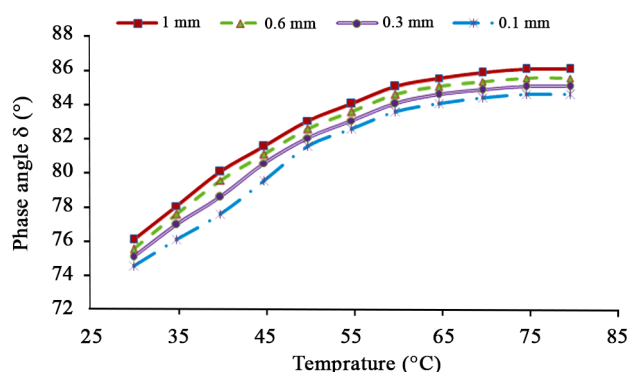
Fig.3. Morphology of bituminous blend modified by 10 wt% of crumb rubber with size less than 0.1 mm.



شکل ۷- زاویه فاز برحسب دما برای آمیخته‌های قیری اصلاح شده با پودر لاستیک با اندازه‌های مختلف.

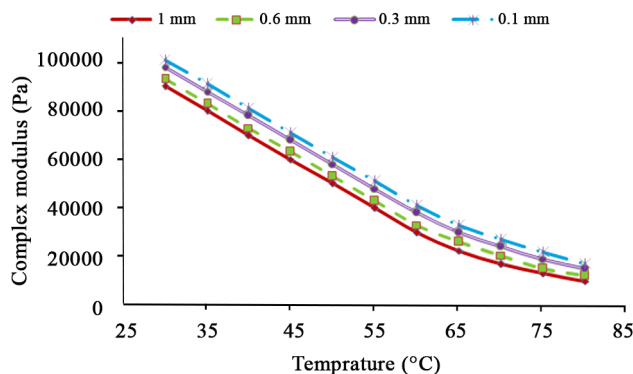
Fig. 7. Phase angle versus temperature for bituminous blends modified by 3 wt% of crumb rubber in different sizes.

کاهش ضخامت لایه قیری میان آن‌ها). از سوی دیگر بررسی اثر اندازه ذرات بر کشسانی قیر مشخص کرد، اندازه‌های کوچک‌تر ذرات پودر لاستیک خاصیت کشسانی قیر را بهبود بخشیده است. در مقدار ۷٪ وزنی پودر لاستیک با اندازه‌های کوچک‌تر از ۰/۳ mm کاهش نسبی مقدار δ با افزایش دما از 35°C تا حدود 50°C دیده شد. مشابه این تغییرات اما با شدت‌های بیشتر در مقدار ۱۰٪ وزنی پودر لاستیک نیز دیده شد. یادآور می‌شود، کاهش ابعاد پودر لاستیک موجب افزایش سطح تماس و برهم‌کنش‌های بیشتر قیر-پودر لاستیک می‌شود. افزایش غلظت پودر لاستیک در کنار کاهش ابعاد آن سطح تماس و نیز برهم‌کنش‌های قیر-پودر لاستیک را تقویت کرده و با کاهش فاصله میان ذرات پودر لاستیک در آمیخته قیری موجب تقویت مقاومت و خواص رئولوژیکی آن می‌شود. برای نتیجه‌گیری



شکل ۸- زاویه فاز برحسب دما برای آمیخته‌های قیری اصلاح شده با پودر لاستیک با اندازه‌های مختلف.

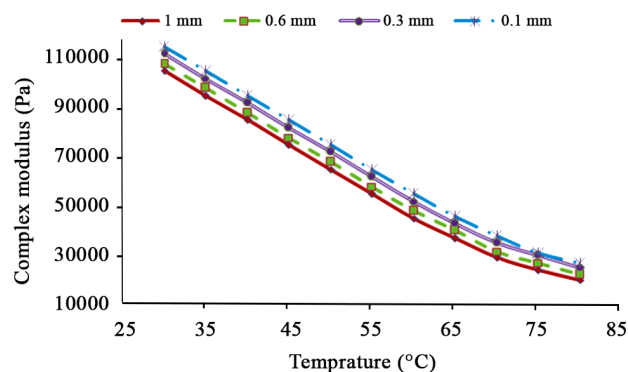
Fig. 8. Phase angle versus temperature for bituminous blends modified by 7 wt% of crumb rubber in different sizes.



شکل ۵- مدول مختلط برحسب دما برای آمیخته‌های قیری اصلاح شده با پودر لاستیک با اندازه‌های مختلف.

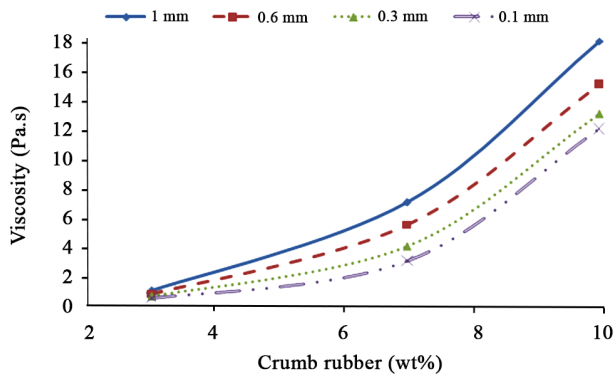
Fig. 5. Complex modulus versus temperature for bituminous blends modified by 7 wt% of crumb rubber in different sizes.

اصلی پژوهش جزئیات آن بیان نشده است. افزون بر این، مقایسه شکل‌های ۴ تا ۶ مشخص کرد، افزایش پودر لاستیک، مقاومت قیر را در برابر تغییر شکل بهبود بخشیده و این اثر در مقدارهای ۱۰٪ وزنی به حداکثر مقدار رسیده است. زیرا، با افزایش غلظت پودر لاستیک فاصله ذرات پودر لاستیک در ماتریس قیر کاهش یافته (شکل ۳) و این موضوع موجب افزایش برهم‌کنش‌ها شده است. بررسی تغییرات δ در غلظت‌ها و اندازه‌های مختلف پودر لاستیک نیز در شکل‌های ۷ تا ۹ نشان داده شده است. طبق نتایج در این شکل‌ها، افزایش مقدار پودر لاستیک موجب کاهش δ و به عبارتی موجب افزایش مقدار کشسانی قیر شده است (به دلیل کاهش فاصله میان ذرات پودر لاستیک و



شکل ۶- مدول مختلط برحسب دما برای آمیخته‌های قیری اصلاح شده با پودر لاستیک با اندازه‌های مختلف.

Fig. 6. Complex modulus versus temperature for bituminous blends modified by 10 wt% of crumb rubber in different sizes.

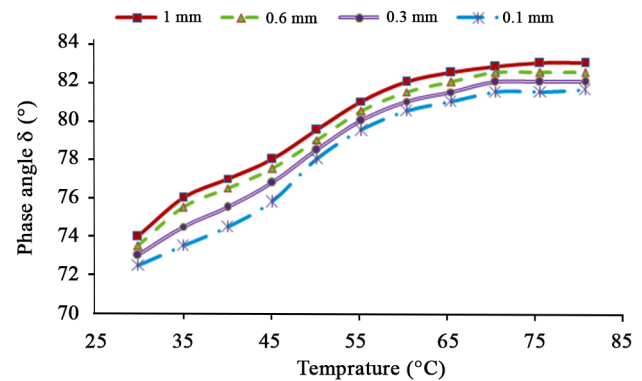


شکل ۱۱- اثر غلظت و اندازه پودر لاستیک بر گرانیوی آمیخته‌های قیری.
Fig. 11. Effect of concentration and size of crumb rubber on viscosity of bituminous blends.

نمونه دارای ۱۰٪ وزنی پودر لاستیک با اندازه ۰/۱ mm افزایش یافت. با جمع‌بندی داده‌های رئولوژیکی دیده شد، افزایش پودر لاستیک و کاهش اندازه ذرات آن اثر مثبتی بر خواص رئولوژیکی قیر دارد. با وجود آنکه بررسی خواص رئولوژیکی و انعطاف‌پذیری قیرهای اصلاح‌شده تخمین مناسبی در خصوص ویژگی‌های آن‌ها در اختیار می‌گذارد، اما قابلیت به‌کارگیری یا کاربردی بودن این نتایج نیز اهمیت بسیاری دارد. بدین دلیل افزون بر خواص رئولوژیکی، گرانیوی مخلوط‌های قیری نیز بررسی شد. از آنجا که بهترین دمای اختلاط قیر و پودر لاستیک در دمای ۱۸۰°C گزارش شده است [۲۵]، گرانیوی نمونه‌ها نیز در همین دما اندازه‌گیری شد. نتایج اثر دانه‌بندی و غلظت پودر لاستیک بر گرانیوی قیر در شکل ۱۱ نشان داده شده است. طبق نتایج، مقدار ۱۰٪ وزنی پودر لاستیک (در هر اندازه‌ای از ذرات پودر لاستیک) گرانیوی قیر را به شدت افزایش می‌دهد، به طوری که کاربری عملی آن با مشکل مواجه می‌شود. با وجود این، مقدار ۷٪ وزنی پودر لاستیک گرانیوی کمتری را نشان داد. طبق شکل ۱۱ در غلظت‌های کم پودر لاستیک (به‌عنوان مثال ۷٪ وزنی) کاهش اندازه ذرات پودر لاستیک موجب کاهش گرانیوی مخلوط قیری شد. این نتیجه نشان می‌دهد، استفاده از ذرات ریزتر پودر لاستیک اثر مثبت‌تری بر گرانیوی قیر دارد، در حالی که با ازدیاد غلظت پودر لاستیک به بیش از ۷٪ وزنی با افزایش شدید گرانیوی نتیجه منفی حاصل شد.

نتیجه‌گیری

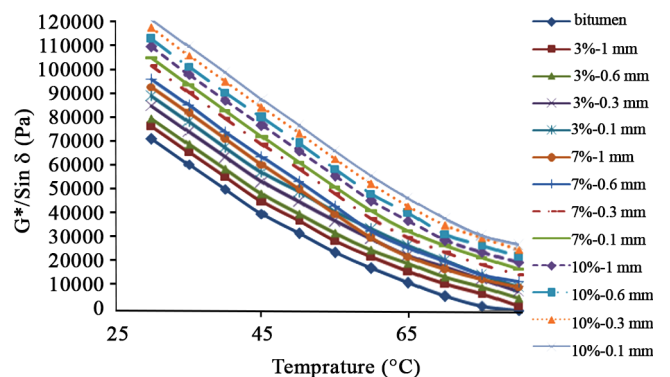
در این مطالعه، اثر همزمان غلظت و اندازه ذرات پودر لاستیک



شکل ۹- زاویه فاز برحسب دما برای آمیخته‌های قیری اصلاح‌شده با ۱۰٪ wt پودر لاستیک با اندازه‌های مختلف.

Fig. 9. Phase angle versus temperature for bituminous blends modified by 10 wt% of crumb rubber in different sizes.

بهرتر درباره اثر غلظت و اندازه ذرات پودر لاستیک بر خواص رئولوژیکی قیر، پارامتر $G^*/\sin\delta$ محاسبه و در شکل ۱۰ نشان داده شده است. طبق این شکل، افزایش غلظت و کاهش اندازه ذرات پودر لاستیک موجب افزایش مقاومت قیر در برابر شیاردارشدن شده است. به طوری که مقدار ۱۰٪ وزنی پودر لاستیک با اندازه ۰/۱ mm بهترین نتیجه برای مقابله با شیاردارشدن را نشان داد. مطابق ویژگی‌های ارائه‌شده در SHRP، دماهایی که نسبت $G^*/\sin\delta$ بیشتر از ۱ kPa باشد، نشانگر مقاومت مخلوط در برابر شیاردارشدن در آن دماهاست. بررسی شکل ۱۰ به وضوح نشان داد، افزایش غلظت و کاهش اندازه ذرات پودر لاستیک مقدار $G^*/\sin\delta$ را افزایش می‌دهد. با توجه به نتایج، دمای کارایی از ۳۵°C برای قیر خالص به حدود ۶۰°C برای



شکل ۱۰- اثر غلظت و اندازه ذرات پودر لاستیک بر مقاومت در برابر شیاردارشدن آمیخته‌های قیری.

Fig. 10. Effect of concentration and size of crumb rubber on resistance to rutting of bituminous blends.

۱ mm به ۶۰°C برای اندازه ۰/۱ mm افزایش یافت. این داده‌ها تعیین کرد، کاهش اندازه ذرات پودر لاستیک موجب افزایش بیشتر مقاومت در برابر تغییر شکل، افزایش کشسانی و افزایش مقاومت در برابر شیاردار شدن آمیخته‌های قیری می‌شود. با وجود این، نتایج گرانیوی آمیخته‌ها استفاده از غلظت‌های زیاد پودر لاستیک را محدود کرد. داده‌های گرانیوی نشان داد، مقدار ۱۰٪ وزنی پودر لاستیک گرانیوی را به شدت افزایش می‌دهد، به طوری که استفاده نهایی آن در زمان اختلاط با سایر افزودنی‌ها مشکل می‌شود. در نتیجه، بهترین ترکیب درصد قیر-پودر لاستیک پیشنهادی که از نظر کاربردی نیز قابل استفاده باشد، آمیخته دارای ۷٪ وزنی پودر لاستیک با ابعاد ۰/۱ mm است.

بر خواص رئولوژیکی و انعطاف‌پذیری بررسی و مشخص شد، افزایش پودر لاستیک موجب بهبود این خواص در قیر می‌شود. مطابق نتایج، افزایش غلظت پودر لاستیک، انعطاف‌پذیری قیر را از ۲۰°C به کمتر از ۱۰°C تغییر داد. افزون بر این، انعطاف‌پذیری قیر با کاهش ابعاد ذرات پودر لاستیک افزایش یافت. به عنوان مثال، کاهش اندازه ذرات پودر لاستیک با غلظت ۱۰٪ وزنی انعطاف‌پذیری را از ۱۵°C به ۸°C کاهش داد. همچنین نشان داده شد، افزایش مقدار پودر لاستیک موجب افزایش مقدار مدول مختلط (مقاومت در برابر تغییر شکل) و در نهایت افزایش مقدار $G^*/\sin\delta$ شد و دمای کارایی قیر اصلاح‌شده را از ۳۵°C به حدود ۶۰°C افزایش داد. افزون بر این در غلظت مشابه، دمای کارایی قیر از ۵۵°C برای اندازه

مراجع

- Lo Presti D., Recycled Tyre Rubber Modified Bitumens for Road Asphalt Mixtures: A Literature Review, *Constr. Build. Mater.*, **49**, 863-881, 2013.
- Yousefi A.A., Ait-Kadi A., and Roy C., Effect of Elastomeric and Plastomeric Tougheners on Different Properties of Recycled Polyethylene, *Adv. Polym. Technol.*, **17**, 127-143, 1998.
- Mansourirad M., Kashani M.R., and Mousavi S.M., Biological Reclaiming of Recycled Rubber and Its Effect on Mechanical Properties of New Rubber Vulcanizates, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **27**, 395-407, 2015.
- de Oliveira Neto G.C., Chaves L.E.C., Pinto L.F.R., Santana J.C.C., Amorim M.P.C., and Rodrigues M.J.F., Economic, Environmental and Social Benefits of Adoption of Pyrolysis Process of Tires: A Feasible and Ecofriendly Mode to Reduce the Impacts of Scrap Tires in Brazil, *Sustain.*, **11**, 1-18, 2019.
- Alan Lloyd A.C., Marin R., Moulton-Patterson L., Peace C., Mulé R., Washington C., and Leary M., Evaluation of Waste Tire Devulcanization Technologies, 1st ed., California, 1, 2004.
- Dębek C., Modification of Pyrolytic Oil from Waste Tyres as a Promising Method for Light Fuel Production, *Materials (Basel)*, **12**, 880, 2019.
- Hadadi V., Yousefi A.A., Ganji T., and Khosravi K., Mechanical Properties of Composite of Non-woven Polyester and Polymer Modified Bitumen, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **20**, 489-502, 2007.
- Hadadi V., Taghdir E., Ghasri M.A., and Gorji B., Effect of SBS/HVS Blend on Modification of Physical and Chemical Properties of Bituminous Emulsion Insulators, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **23**, 335-344, 2010.
- Ehsani S., Mehranpour M., and Yousefi A.A., Effect of Liquid Waste Polysulfide and Nanoclay on Engineering Properties of Bitumen, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **30**, 255-268, 2017.
- Rasoulzadeh Y., Mortazavi S.B., Yousefi A.A., Khavanin A., and Lili A.K., Effect of Recycled Waste Polymers, Natural Bitumen and HVS Cut on the Properties of Vacuum Bottom, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **23**, 85-95, 2010.
- Hadadi V., Yousefi A.A., Ganji T., and Khosravi M., Mechanical Properties of the Blends of Recycled Polypropylene with Blown and Soft Bitumens, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **20**, 539-550, 2008.
- Mashaan N.S., Ali A.H., Karim M.R., and Abdelaziz M., An Overview of Crumb Rubber Modified Asphalt, *Int. J. Phys. Sci.*, **7**, 166-170, 2012.
- Mashaan N.S., Ali A.H., Karim M.R., and Abdelaziz M., Effect of Crumb Rubber Concentration on the Physical and Rheological Properties of Rubberised Bitumen Binders, *Int. J. Phys. Sci.*, **6**, 684-690, 2011.
- Ib E. and Xiaoming H., Comparative Study of the Mechanical Performance of Bitumen Binders and Mixtures Utilizing Crumb Rubber, Tafpack Super, and Polypropylene, *Civ. Environ. Eng.*, **9**, 1-9, 2019.

15. Oliver J.W.H., Modification of Paving Asphalt by Digestion with Scrap Rubber, *J. Chem. Inf. Model.*, **53**, 1689-1699, 1981.
16. Navarro F.J., Partal P., Martínez-Boza F., and Gallegos C., Thermo-rheological Behaviour and Storage Stability of Ground Tire Rubber-Modified Bitumens, *Fuel*, **83**, 2041-2049, 2004.
17. Yu J., Yu X., Gao Z., Guo F., Wang D., and Yu H., Fatigue Resistance Characterization of Warm Asphalt Rubber by Multiple Approaches, *Appl. Sci.*, **8**, 1495, 2018.
18. Wang H., Dang Z., Li L., and You Z., Analysis on Fatigue Crack Growth Laws for Crumb Rubber Modified (CRM) Asphalt Mixture, *Constr. Build. Mater.*, **47**, 1342-1349, 2013.
19. Sun D.Q. and Li L.H., Factors Affecting the Viscosity of Crumb Rubber-Modified Asphalt, *Pet. Sci. Technol.*, **28**, 1555-1566, 2010.
20. Chen Z., Wang T., Pei J., Amirghanian S., Xiao F., Ye Q., and Fan Z., Low Temperature and Fatigue Characteristics of Treated Crumb Rubber Modified Asphalt after a Long Term Aging Procedure, *J. Clean. Prod.*, **234**, 1262-1274, 2019.
21. Xiao P., Zheng J., Kang A., Sun L., and Wang Y., Aging Characteristics of Rubber Modified Asphalts in Different Environmental Factors Combinations, *Appl. Sci.*, **7**, 806, 2017.
22. Jae Lee S., Amirghanian S.N., and Shatanawi K., Effect of Crumb Rubber on the Aging of Asphalt Binders, *Asph. Rubber*, **3**, 779-795, 2006.
23. Shafabakhsh G.H., Sadeghnejad M., and Sajed Y., Case Study of Rutting Performance of HMA Modified with Waste Rubber Powder, *Case Stud. Constr. Mater.*, **1**, 69-76, 2014.
24. Huang Y., Bird R.N., and Heidrich O., A Review of the Use of Recycled Solid Waste Materials in Asphalt Pavements, *Resour. Conserv. Recycl.*, **52**, 58-73, 2007.
25. Mashaan N.S. and Karim M.R., Investigating the Rheological Properties of Crumb Rubber Modified Bitumen and Its Correlation with Temperature Susceptibility, *Mater. Res.*, **16**, 116-127, 2012.
26. Mashaan N.S., Evaluation of Viscosity and Rheological Characteristics of Rubberized Bitumen Binder, *Transport Research Forum Conference*, Malaysian University, Malaysia, 24-25 November, 2015.
27. Cetin A., Effects of Crumb Rubber Size and Concentration on Performance of Porous Asphalt Mixtures, *Int. J. Polym. Sci.*, **2013**, 10, 2013.
28. Divandari H. and Shabani H., Effect of Crumb Rubber on Physical and Rheological Properties of Bitumen and Performance of Asphalt, *7th Conference of Civil Engineering*, Zahedan, Sistan and Balochestan University, 2013.
29. Frantzis P., Crumb Rubber-Bitumen Interactions: Diffusion of Bitumen into Rubber, *J. Mater. Civ. Eng.*, **16**, 387-390, 2004.