

B. Damyar

Ph.D., Road Maintenance and
Transport Organization, Iran

e-mail: damyarb@yahoo.com

M. H. Dehnad*

Assistant Professor, University
of Qom, Iran

e-mail: m.dehnad@qom.ac.ir

H. Zanjirani Farahani

Assistant Professor,
Department of Civil
Engineering, Tafresh
University, Tafresh, Iran.

e-mail:
Farahani1404@tafreshu.ac.ir

**Performance Investigation of Modified Bitumen
With Ethylene-Vinyl Acetate Polymer and
Rubber Powder by Performing Classical and
Superpave Tests**

In this study, ethylene vinyl acetate (EVA) polymer and rubber powder were used as 85/100 bitumen modifiers. First, classical bitumen tests including penetration grade and softening point were performed on the samples and improvement of bitumen base properties was observed. Then, in order to evaluate the performance of modified bitumen at high temperature and compare it with the behavior of base bitumen, the Superpave protocol was followed. In this way, dynamic shear rheometer (DSR) test was performed and $G^/\sin\delta$ index was examined on bitumen samples before and after aging. In addition, the bending beam rheometer (BBR) test was performed to evaluate the low temperature behavior of the modified bitumen according to the SHRP standard based on the creep stiffness and creep rate indices. The results showed that the combination of used additives improves the performance properties of bitumen at high temperature and also at low temperature compared to base bitumen. Based on the BBR test, 3% EVA polymer and 4% rubber powder, with a 12% reduction in creep stiffness in this composition, were selected the optimal values for the mixture.*

Keywords: Modified bitumen, Ethylene vinyl acetate, Rubber powder, Performance behavior, Super-pave.

* Corresponding author

Received 15 February 2021, Revised 25 March 2021, Accepted 01 April 2021.

DOI: 10.22091/cer.2021.6588.1229

بررسی عملکرد قیر اصلاح‌شده با پلیمر اتیلن‌وینیل استات و پودر لاستیک با انجام آزمایش‌های کلاسیک و روسازی ممتاز

در این مطالعه، از پلیمر اتیلن‌وینیل استات و پودر لاستیک به‌عنوان اصلاح‌کننده قیر ۸۵/۱۰۰ استفاده شده است. ابتدا آزمایش‌های کلاسیک قیر شامل درجه نفوذ و نقطه نرمی روی نمونه‌ها انجام و بهبود خواص پایه قیر مشاهده گردید. در ادامه، به‌منظور ارزیابی عملکرد قیر اصلاح‌شده در دمای بالا و مقایسه آن با رفتار قیر پایه، از پروتکل روسازی ممتاز (سوپریپو) پیروی شد. در این راستا آزمایش رئومتر برش دینامیکی انجام و شاخص $G^*/\sin\delta$ بر روی نمونه‌های قیر قبل و بعد از پیرشدگی بررسی شد. علاوه بر این، آزمایش رئومتر تیرچه خمشی به‌منظور ارزیابی رفتار دمای پایین قیر اصلاح‌شده، براساس بررسی شاخص‌های سختی خزشی و نرخ خزش، مطابق استاندارد SHRP صورت گرفت. نتایج نشان داد که ترکیبی از مواد افزودنی مورد استفاده، باعث بهبود خواص عملکردی قیر در دمای بالا و همچنین در دمای پایین در مقایسه با قیر پایه می‌شود. براساس آزمایش رئومتر تیرچه خمشی، ۳ درصد پلیمر اتیلن‌وینیل استات و ۴ درصد پودر لاستیک، با کاهش ۱۲ درصدی در سختی خزشی در این ترکیب، مقادیر مطلوب برای مخلوط انتخاب شدند.

واژگان کلیدی: قیر اصلاح شده، اتیلن‌وینیل استات، پودر لاستیک، رفتار عملکردی، روسازی-ممتاز

بهروز دامیار

دکتری راه و ترابری، سازمان راهداری و حمل‌ونقل جاده‌ای کشور.

پست الکترونیک:

damyarb@yahoo.com

سید محمد حسین دهناد*

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم.

پست الکترونیک:

m.dehnad@qom.ac.ir

حسین زنجیرانی فراهانی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تفرش.

پست الکترونیک:

Farahani1404@tafreshu.ac.ir

نشان داده است که اضافه نمودن افزودنی‌های پلیمری و پودر لاستیک به قیر تغییرات قابل توجهی در خصوصیات و رفتار قیر و در نتیجه مخلوط آسفالتی داشته است [۱-۴]. قیرهای اصلاح شده پلیمری، توانسته‌اند حساسیت حرارتی قیرها را کاهش داده و مقاومت در مقابل عریان‌شدگی را بهبود بخشند و مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با آن را در مقابل بسیاری از تغییرشکل‌ها و تنش‌های اعمال شده بر روسازی مقاوم نمایند. قیرهای اصلاح شده با پودر لاستیک نیز مزایای متعددی چون حساسیت دمایی کمتر، ویسکوزیته بیشتر در دماهای بالا و نیز انعطاف پذیری بیشتر در دماهای پایین را از خود نشان داده‌اند. مطابق مطالعات قبلی صورت گرفته، مشخص شده است که مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با این نوع قیرها دارای مقاومت خوبی در مقابل شیار

۱- مقدمه

جریان‌پذیری قیر در دماهای بالا و ترک برداشتن آن در دماهای پایین، از جمله محدودیت‌های بکارگیری آن در مخلوط‌های آسفالتی است؛ از این‌رو استفاده از قیرهای اصلاح شده، با هدف بهبود مشخصات فیزیکی، مکانیکی و رئولوژیکی قیر از گذشته مورد تأکید محققان و دارای کاربرد گسترده بوده است تا بدین ترتیب عمر روسازی‌های آسفالتی افزایش یابد. تحقیقات صورت گرفته

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۲۷، بازنگری: ۱۴۰۰/۰۲/۰۵، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۱۱

(DOI): 10.22091/cer.2021.6588.1229 شناسه دیجیتال

۱/۵ ساعت، بهترین مخلوط برای پایداری در انبار شدن است [۸].

توث^۳ و همکاران رویکردی جدید برای سازگار کردن ترکیبات ضایعات پلی اتیلن و پودر لاستیک را با بکارگیری افزودنی‌های مبتنی بر کوپلیمر اولفین-مالئیک-انیدرید ارائه دادند [۹]. در مطالعه‌ای دیگر مشخصات رئولوژیکی قیر اصلاح شده با EVA و ارتباط آنها با خصوصیات مخلوط قیری مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که اصلاح رئولوژیکی قیر به وسیله EVA به درجه قیر بستگی دارد [۱۰]. محققان اثر شرایط مخلوط کردن بر خصوصیات کششی ترکیب اتیلن وینیل استات و پودر لاستیک تولید شده از ضایعات تایر را بررسی کردند [۱۱]. پژوهشی دیگر روی عملکرد و رفتارهای مکانیکی مخلوط‌های قیری اصلاح شده با EVA و ضایعات آن انجام پذیرفت [۱۲].

در پژوهش یوسفی علاوه بر پودر لاستیک مواد دیگری شامل پلی اتیلن سبک روغن H.V.S نیز به قیر اضافه شد و آزمایش‌های نقطه نرمی، درجه نفوذ، نقطه شکست فراس، پایداری و مورفولوژی بر روی نمونه‌های تولیدی صورت گرفته است. این نتایج نشان داد افزایش مقدار پودر لاستیک باعث افزایش نقطه نرمی و کاهش درجه نفوذ، افزایش مقدار پلی اتیلن افزایش نقطه شکست فراس و کاهش درجه نفوذ و افزایش مقدار روغن باعث کاهش نقطه شکست فراس و نقطه نرمی می‌شود. ترکیب بهینه نیز با ۱۳ درصد پودر لاستیک، ۵ درصد روغن و ۳ درصد پلی اتیلن به دست می‌آید [۱۳].

در تحقیق عربانی و همکاران از قیر ۶۰/۷۰ و پودر لاستیک برای تهیه قیر لاستیکی استفاده شد و درصدهای مختلف یک روغن آروماتیک با مقادیر ۷ و ۱۰ و ۱۳ و ۱۶ درصد مورد ارزیابی قرار گرفت. روی نمونه‌ها آزمایش‌های مدول سفتی، خستگی و خزش توسط دستگاه ناتینگهام انجام گرفت. در این ارزیابی مشخص گردید که اضافه

افتادگی، تغییر شکل‌های دائم و خستگی بوده و همچنین این مخلوط‌ها در مقابل ترک‌های انعکاسی مقاومت بالاتری دارند.

مورالس^۱ و همکاران روی چندین اثر ترکیبی پلیمر بر رفتار رئولوژیکی قیر کار کردند و نتیجه گرفتند که می‌توان با مخلوط کردن پلی‌الفین با پودر لاستیک، بهبود رئولوژیکی را در دمای بالا و پایین به دست آورد به طوری که با مخلوط کردن ۳/۵ درصد وزنی پلیمر اتیلن وینیل استات^۲ (EVA) و ۳/۵ درصد پودر لاستیک می‌توان بهترین اختلاط برای ارائه رفتار بهتر قیر در محدوده وسیعی از دامنه دما را به دست آورد [۵]. در تحقیق دیگر، از دو نوع مخلوط خشک و مرطوب برای استفاده از ضایعات پلیمر در مخلوط قیر و آسفالت استفاده شد. در این تحقیق نتیجه گرفته شد که اختلاط مرطوب، مخلوط یکنواخت‌تر، کار بردی‌تر و بهتری تولید می‌کند. همچنین، به استناد انجام آزمایش‌های اصلی قیر، اشاره شد که مخلوط ۴ درصد پلی اتیلن و ۴ درصد پودر لاستیک می‌تواند ترکیب مناسبی برای اختلاط با قیر باشد [۶].

عامری و همکاران روی تأثیر اختلاط درصدهای مختلف پلیمر اتیلن وینیل استات بر قیر پالایشگاه ۶۰/۷۰ ایران تحقیق کردند و یافتند که با افزایش درصد اتیلن وینیل استات، سختی خزشی کاهش و نرخ خزش افزایش می‌یابد و نمونه حاوی ۴ درصد پلیمر بهترین عملکرد را در مخلوط دارد [۷]. پژوهشگران در مورد پایداری در انبار شدن پلی اتیلن ضایعاتی استفاده شده برای اصلاح ویژگی‌های قیر و با استفاده از تجزیه و تحلیل میکروسکوپی و ذخیره‌پذیری در دمای بالا پژوهشی انجام دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که مخلوط قیر تهیه شده در دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس و سرعت اختلاط ۳۷۵۰ دور در دقیقه با میکسر شکافنده دور بالا به مدت

¹- Morales

²- Ethylene-Vinyl Acetate

³- Tóth

چسباننده‌های اصلاح شده با محتوای مختلف پودر لاستیک انجام دادند. آنالیز و بهینه‌سازی آماری و با فرض پارامترهای رئولوژیکی مدول برشی مرکب (G^*) و اختلاف فاز (δ°) به عنوان متغیرهای پاسخ انجام شد [۱۸]. در تحقیق دیگر اثر ترکیب شیمیایی قیر، پلیمر الاستومریک و مواد افزودنی موم پارافین بر خواص قیر با استفاده از روش بهینه‌سازی بررسی شد. علاوه بر این، از رئومتر برشی، ویسکوزیته، کشش و سختی خزشی به عنوان پاسخ استفاده شد [۱۹]. خیرالدین و همکاران با استفاده از روش سطح پاسخ، تجزیه و تحلیل‌های فیزیکی و شیمیایی قیر پلی‌پورتان اصلاح شده را بهینه‌سازی نمودند [۲۰]. جیمینز و همکاران از روش سطح پاسخ برای بهینه‌سازی مخلوط‌های نهایی قیر اصلاح شده لاستیک مایع برای روسازی‌های راه استفاده کردند [۲۱].

در پژوهش پیش‌رو، با به‌کارگیری همزمان افزودنی‌های EVA و پودر لاستیک به قیر، عملکرد و رفتار نمونه‌ها در محدوده‌های دمایی مختلف (پایین، متوسط و بالا)، با انجام آزمایش‌های روسازی ممتاز (سوپرپیو) روی نمونه‌های پیر شده در کوتاه مدت و بلند مدت، مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲- روش تحقیق

برای بررسی تأثیر پلیمرهای اتیلن‌وینیل‌استات (EVA) و پودر لاستیک روی خصوصیات قیر، ابتدا پلیمرهای اتیلن‌وینیل‌استات در سه سطح ۳، ۵ و ۷ درصد و پودر لاستیک در سه سطح ۲، ۴ و ۶ درصد با قیر پایه ۸۵/۱۰۰ ترکیب می‌شود. برای اطمینان از یکنواخت بودن مخلوط پلیمر و قیر، از میکسر برش بالا با چرخه ۳۷۵۰ دور در دقیقه و به مدت ۹۰ دقیقه در دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد استفاده شد.

کردن روغن آروماتیک به نمونه‌های آسفالت لاستیکی موجب افزایش عمر خستگی، مدول سفتی و سختی خزشی و همچنین کاهش تغییر شکل محوری و عمودی شده است [۱۴].

طباطبایی و همکاران میزان ویسکوزیته قیر VB را در برابر افزایش مقدار پودر لاستیک در دماهای مختلف مورد ارزیابی قرار دادند. در این پژوهش سعی شده است که اثر پودر لاستیک به عنوان افزودنی، روی ویسکوزیته چرخشی قیر مورد بررسی قرار بگیرد. متغیرهای مورد بررسی در این پژوهش شامل مقدار پودر لاستیک، زمان و دمای آزمایش و دمای اختلاط پودر لاستیک و قیر است. این تحقیق نشان داد که با افزایش دمای اختلاط ویسکوزیته قیر افزایش می‌یابد. با افزودن مقدار پودر لاستیک ویسکوزیته قیر افزایش می‌یابد و بین دمای اختلاط و مدت زمان اختلاط تعامل وجود دارد. افزایش یکی و کاهش دیگری نتایج یکسانی را در بر خواهد داشت [۱۵]. تحقیق دیگری توسط ژانگ و هو^۴ در مورد قیر اصلاح شده با ترکیب پودر لاستیک و پلاستیک ضایعاتی با به‌کارگیری آزمون‌های رئولوژیکی برای بررسی خصوصیات دمای بالا و پایین و مشخصات ساختاری چسباننده اصلاح شده انجام شد [۱۶]. به‌کارگیری همزمان EVA و پلیمر SBS و ارزیابی مشخصات ریزساختاری قیرهای اصلاح شده در مطالعه سنگوز و ایسیکیکار انجام پذیرفت [۱۷].

مطالعات آماری و تحلیلی گوناگونی درخصوص اثر ترکیب افزودنی‌ها بر عملکرد قیر و مخلوط آسفالتی انجام شده است. بدری و همکاران با به‌کارگیری روش آماری و بهینه‌سازی سطح پاسخ، خواص رئولوژیکی چسباننده‌های قیری را که شامل درصدهای مختلف پودر لاستیک است، بررسی کرده‌اند. آنها با استفاده از دستگاه رئومتر برش دینامیکی (DSR)، یک تست جابه‌جایی دما را روی

⁴- Zhang and Hu

کندروانی آن کمتر تغییر می‌کند. همانطور که در شکل ۱-۱-۱ با مشاهده می‌شود، با اضافه شدن این پلیمرها به قیر، نقطه نرمی قیر، افزایش یافته است. به عنوان مثال در ترکیب S6، نقطه نرمی افزایش ۲۵ درجه سلسیوسی داشته است.

به طور کلی تغییرات حاصله در غلظت قیر (درجه نفوذ یا ویسکوزیته)، که از تغییر در شرایط حرارتی آن به وجود می‌آید، حساسیت حرارتی قیر نامیده می‌شود که برای قیرهای گوناگون متفاوت است.

حساسیت حرارتی قیرها از روش‌های مختلفی محاسبه می‌شود، که یکی از این روش‌ها، محاسبه حساسیت حرارتی قیر به روش شاخص نفوذ^۹ است که از معادله (۱) و معادله (۲) به دست می‌آید:

$$A = \frac{\log 800 - \log (Penat25^{\square} C)}{T_{R\&B} - 25^{\square} C} \quad (1)$$

$$PI = \frac{20 - 500A}{1 + 5A} \quad (2)$$

که در آن $T_{R\&B}$ دمای نقطه نرمی است.

افزایش پلیمر اتیلن وینیل استات (EVA) و پودر لاستیک با درصد‌های مختلف، باعث افزایش PI قیر می‌شود ولی مقدار آن برای هر ترکیب متفاوت است. با توجه به نتایج ارائه شده، بهترین PI با مقدار ۰/۹۶۹+، برای نمونه S2 یعنی ترکیب ۳ درصد EVA و ۴ درصد پودر لاستیک به دست می‌آید که نسبت به بقیه مخلوط‌ها به مقدار ایده آل ۱+ نزدیک‌تر است.

۳-۲- نتایج آزمایش‌های عملکردی قیر

در این بخش، به منظور بررسی عملکرد قیر پایه و مقایسه آن با نمونه‌های قیر اصلاح شده در دماهای بالا، متوسط و پایین در شرایط پیرشدگی کوتاه مدت و بلند مدت و پیر نشده، آزمایش‌های DSR، BBR، RTFO و PAV انجام پذیرفت. دو پارامتر مدول برشی مرکب (G^*)

سپس آزمون‌های کلاسیک شامل درجه نفوذ و نقطه نرمی و در ادامه آزمون رئومتر برش دینامیکی^۵ (DSR) روی نمونه‌های پیر شده در کوتاه مدت (آزمایش RTFO^۶)، منطبق با استاندارد مربوطه انجام پذیرفت. همچنین برای ارزیابی رفتار قیر اصلاح شده در دمای پایین و مقایسه آن با رفتار دمای پایین قیر پایه، از پروتکل روسازی ممتاز (سوپیویو) با انجام آزمون رئومتر تیرچه خمشی (BBR^V) روی نمونه‌های پیر شده در بلند مدت (آزمایش PAV^۸) و با اندازه‌گیری شاخص‌های سختی خزش و سرعت خزش، استفاده شده است. مشخصات قیر در جدول ۱ و ترکیبات مختلفی از قیر تولید شده در جدول ۲ آورده شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج آزمایش‌های کلاسیک

آزمایش درجه نفوذ قیر طبق استاندارد ASTM-D5 انجام شد. این آزمایش برای تعیین سختی نسبی قیر به کار می‌رود. با توجه به شکل ۱-۱ الف می‌توان مشاهده کرد که با افزایش میزان پلیمرهای EVA و پودر لاستیک به قیر، درجه نفوذ قیر کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، در ترکیب ۳ درصد EVA و ۴ درصد پودر لاستیک، حدود ۴ میلیمتر درجه نفوذ کمتر شده است. کاهش درجه نفوذ به معنی کاهش روانی و افزایش دوام در دماهای بالا و متوسط است و این نمونه قیرهای پلیمری در دمای بالا از شیار شدن آسفالت جلوگیری می‌کند.

نقطه نرمی قیر اولیه و قیرهای اصلاح شده طبق استاندارد ASTM-D36 اندازه‌گیری شد. درجه حرارتی که قیر در آن دما، حالت روانی پیدا می‌کند، نقطه نرمی قیر نامیده می‌شود. قیری که درجه نرمی‌اش بیشتر باشد، کم‌تر در مقابل تغییرات درجه حرارت حساس بوده و

⁵- Dynamic Shear Rheometer

⁶- Rolling thin-film oven

⁷- Bending Beam Rheometer

⁸- Pressure Aging Vessel

⁹- Penetration Index

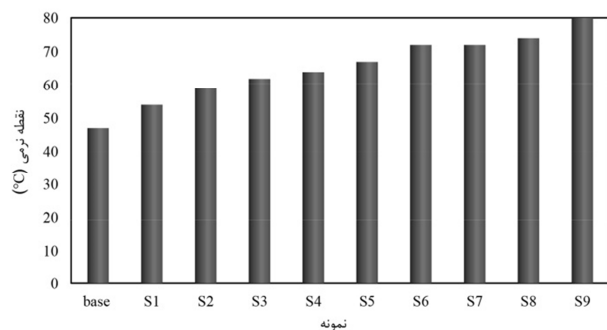
که نشان‌دهنده مقاومت نمونه در برابر تغییرشکل ناشی از اعمال یک تنش برشی سینوسی در دو بخش تغییرشکل الاستیک و تغییرشکل ویسکوز است و پارامتر اختلاف فاز (δ) که معرف مقادیر نسبی اجزای الاستیک و ویسکوز است مورد بررسی قرار گرفتند.

جدول ۱- مشخصات قیر پایه

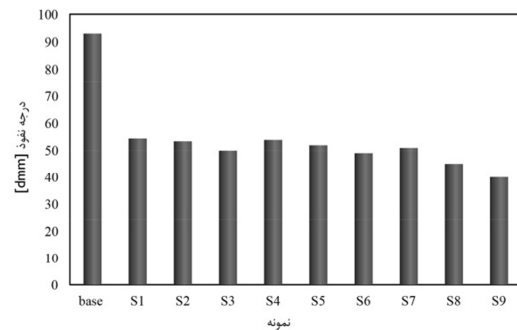
نمونه	نقطه نرمی (سلسیوس)	نفوذ (dmm)	کشش پذیری (cm)	ویسکوزیته در ۱۳۵ سلسیوس (Pa.s)
قیر پایه	۴۷/۲	۹۳	۱۰۰+	۰/۴۱

جدول ۲- انواع ترکیبات نمونه قیر تولید شده

نام نمونه	درصد افزودنی EVA به قیر پایه	درصد افزودنی پودر لاستیک به قیر پایه
S1	۳	۲
S2	۳	۴
S3	۳	۶
S4	۵	۲
S5	۵	۴
S6	۵	۶
S7	۷	۲
S8	۷	۴
S9	۷	۶



(ب)



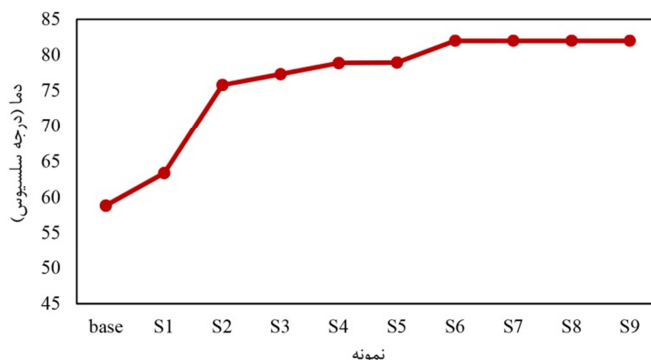
(الف)

شکل ۱- اثر افزودن EVA و پودر لاستیک بر (الف) درجه نفوذ قیر و (ب) نقطه نرمی قیر

نتایج حاصل از آزمایش رنومتر برش دینامیکی نشان می‌دهد که استفاده از پلیمر EVA و پودر لاستیک باعث عملکرد بهتر دمای بالای قیر می‌گردد به طوری که با رسم نمودار $G^*/\sin\delta$ برای نمونه‌های پیرنشده براساس دمایی که $G^*/\sin\delta$ به مقدار حداقل یک کیلوپاسکال می‌رسد، افزایش دمای عملکردی بالای قیر دیده می‌شود (شکل ۲). همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، ملاحظه می‌گردد با استفاده از پلیمر EVA و پودر

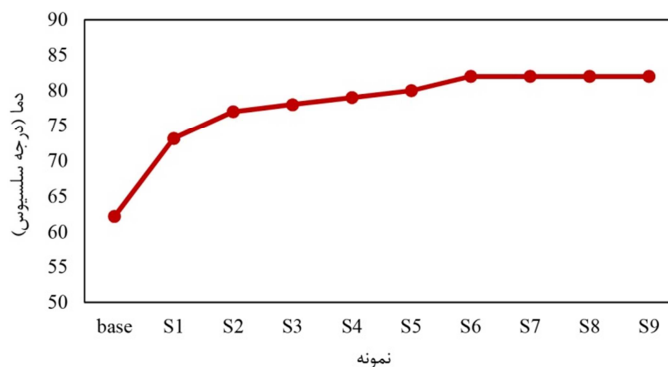
براساس پروتکل شارپ، تغییرشکل دائمی با محدود کردن مقدار $G^*/\sin\delta$ در دماهای آزمایش به مقدار بزرگتر از یک کیلوپاسکال برای قیر اصلی و ۲/۲ کیلوپاسکال برای قیر پسماند RTFO کنترل می‌شود. همچنین ترک خستگی نیز با محدود کردن مقدار $G^*/\sin\delta$ برای قیر پیرشده توسط دستگاه PAV به مقدار کمتر از ۵۰۰۰ کیلوپاسکال در دماهای آزمایش کنترل می‌شود.

کاهش زاویه اختلاف فاز (δ) نشان دهنده افزایش بخش الاستیسیته قیر و افزایش مدول مرکب برشی (G^*) نشان از مقاومت بیشتر قیر در برابر تغییر شکل های برشی است. به همین دلیل شرایط بهتری برای استفاده از قیر اصلاح شده در دماهای بالا ایجاد می شود و دمای عملکردی قیر افزایش می یابد.



شکل ۲- دمای رسیدن پارامتر $G^*/\text{Sin}\delta$ برای نمونه های پیر نشده به یک کیلوپاسکال

با رسم نمودار $G^*/\text{Sin}\delta$ برای نمونه های پیر شده براساس دمایی که $G^*/\text{Sin}\delta$ به مقدار حداقل ۲/۲ کیلوپاسکال می رسد، ملاحظه می گردد استفاده از پلیمر EVA و پودر لاستیک سبب افزایش دمای عملکردی بالای قیر می شود. پارامتر $G^*/\text{Sin}\delta$ پیش بینی کننده (بیان کننده) خرابی شیارشدگی در دمای بالای روسازی است. به طور مثال، در نمونه S6، افزایش ۲۰ درجه سلسیوسی دیده می شود که نتیجه آن بهبود پارامتر شیارشدگی قیر و بیان کننده رفتار بهتر قیر در دمای بالا و کاهش خرابی شیار شدگی مخلوط آسفالتی می باشد.



شکل ۳- دمای رسیدن $G^*/\text{Sin}\delta$ به ۲/۲ کیلوپاسکال برای نمونه های پیر شده در دستگاه RTFO

D6521 استفاده می شود که در آن چسباننده برای مدت ۲۰ ساعت در معرض فشار و دمای بالا قرار می گیرد. از

لاستیک نمونه های اصلاح شده در دماهای بالاتری به مقدار ۱ کیلوپاسکال برسند. به عنوان مثال، در ترکیب S2، نمونه پایه با درجه عملکردی PG58 به PG76 رسیده است. با توجه به اینکه در دمای بالا، ویسکوزیته قیر کاهش می یابد، اضافه نمودن افزودنی ها در افزایش ویسکوزیته قیر نیز نقش موثرتری پیدا می کند. از این رو،

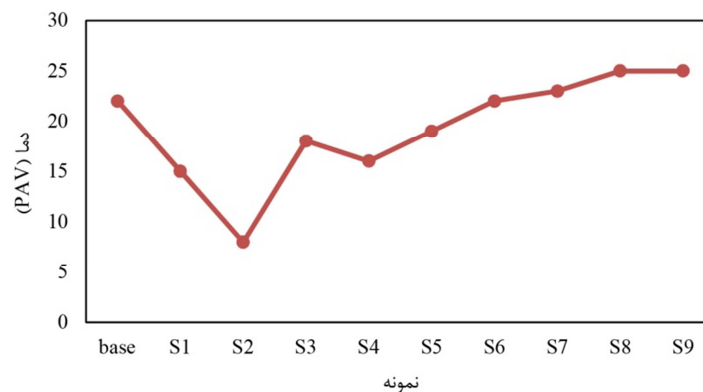
لازم به توضیح است که در نمونه های شماره ۶ الی ۹ دمای عملکردی بالای قیر 82°C گزارش شده است زیرا مطابق ملزومات عملکردی شارپ حداکثر دمای بالای قیر 82°C است که در آزمایش های انجام شده دمای بالاتر نیز به دست آمده است.

پس از انجام آزمایش پیرشدگی کوتاه مدت روی نمونه ها، فاکتور شیارشدگی $G^*/\text{Sin}\delta$ برای نمونه های پیر شده در دستگاه RTFO براساس دمایی که $G^*/\text{Sin}\delta$ به مقدار حداقل ۲/۲ کیلوپاسکال می رسد، بررسی و نتایج در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است،

از دستگاه PAV برای شبیه سازی پیرشدگی دراز مدت (در زمان سرویس)، مطابق روش استاندارد ASTM

می‌رسد. از این‌رو در این نمونه‌ها بهبود دمای میانی قیر که ترک‌های خستگی در آنها رخ می‌دهد مشاهده می‌شود. البته در نمونه‌های حاوی سه درصد عملکرد بهتری ملاحظه می‌شود ولی در سایر نمونه‌ها با افزایش درصد پلیمر و پودرلاستیک چون باعث سفت‌تر شدن قیر می‌شود این نمونه‌ها در دماهای بالاتری نسبت به قیر پایه به مقدار ۵۰۰۰ کیلوپاسکال می‌رسند و از این جهت شاید برای مناطق سردسیر مناسب نباشند. با توجه به نتایج به‌دست آمده و مقایسه فاکتور $G^*.Sin\delta$ (پارامتر خستگی) برای تمام نمونه‌ها می‌توان به این نتیجه رسید که نمونه حاوی ۳ درصد EVA و ۴ درصد پودر لاستیک عملکرد مناسب‌تری در دماهای پایین دارد.

آنجا که قیری که در معرض پیری درازمدت قرار می‌گیرد قبلاً تحت فرآیندهای اختلاط و راهسازی نیز قرار گرفته، در نتیجه در آزمایش PAV از چسباننده پیر شده حاصل از آزمایش RTFO استفاده می‌شود. بعد از انجام این آزمایش پارامتر $G^*.Sin\delta$ که معیار ترک‌های خستگی در دماهای میانی است برای تمامی نمونه‌ها مطابق استاندارد در دمای آزمایش DSR باید کمتر از ۵۰۰۰ کیلوپاسکال باشد. بنابراین برای تمامی نمونه‌ها حداقل دمایی که پارامتر $G^*.Sin\delta$ کمتر از ۵۰۰۰ کیلوپاسکال می‌گردد در شکل ۴ نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در نمونه‌های S1 تا S6 که حاوی سه و پنج درصد پلیمر هستند، دمای آزمایش PAV نسبت به قیر پایه در دماهای کمتری به مقدار ۵۰۰۰ کیلوپاسکال



شکل ۴- حداقل دمای رسیدن پارامتر $G^*.Sin\delta$ به ۵۰۰۰ کیلوپاسکال برای نمونه‌های پیر شده در PAV

زمان آزمایش، سختی خزشی^{۱۰} (S) و نرخ خزش^{۱۱} (m) را می‌توان محاسبه نمود. بار خزشی، آن دسته از تنش‌های حرارتی را که به تدریج با افت دما در یک جاده حادث می‌شوند، شبیه‌سازی می‌کند. سختی خزشی عبارت است از مقاومت چسباننده در مقابل بارگذاری خزشی و مقدار m میزان تغییر در سختی قیر با زمان (در حین بارگذاری) می‌باشد.

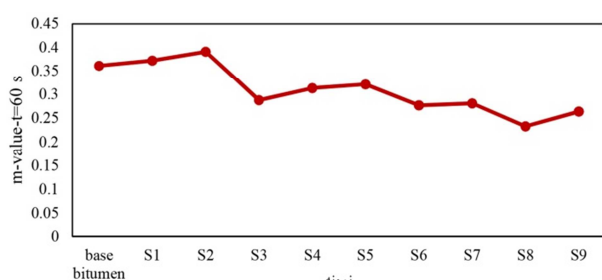
در شکل ۵- الف، مقادیر سختی خزشی آورده شده است؛ همانطور که مشاهده می‌شود سختی خزشی برای

علاوه بر بررسی‌های فوق، به‌منظور ارزیابی رفتار دمای پایین قیرهای اصلاح شده و مقایسه آن با رفتار دمای پایین قیر پایه، آزمایش رئومتر تیرچه خمشی (BBR) انجام شده است. با انجام آزمایش BBR مشخص می‌گردد ترکیب افزودنی‌های فوق باعث بهبود مشخصات عملکردی دمای پایین قیر نسبت به قیر پایه شده است. بدین صورت که ۳ درصد پلیمر EVA و ۴ درصد پودر لاستیک ضایعاتی بعنوان بهترین ترکیب انتخاب می‌شود. در آزمایش BBR با اعمال یک بار ثابت به تیرچه قیر و اندازه‌گیری میزان انحراف مرکزی تیرچه در طول مدت

¹⁰- Creep Stiffness

¹¹- Creep Rate

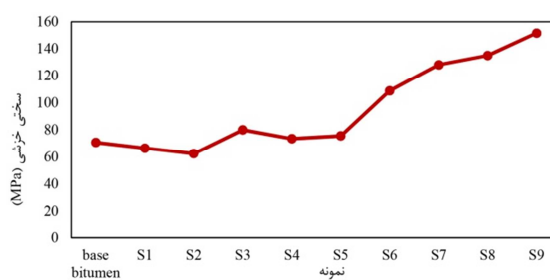
همانطور که معلوم است در نمونه های S1 و S2 سرعت تغییرات سختی خزشی (نرخ خزش) نسبت به قیر پایه افزایش یافته که در نتیجه پتانسیل مقاومت در برابر ترک خوردگی در دمای پایین بهبود یافته است. بنابراین خصوصیت انعطاف پذیری (نرمی) قیر اصلاح شده در دمای پایین با نرخ بیشتری افزایش یافته است، اما برای سایر نمونه ها نرخ خزش کمی کاهش می یابد که می تواند به علت غالب شدن تمام و کمال فاز پلیمری و سفت شدن قیر باشد که منجر به تخریب دمای پایین این نمونه ها نسبت به قیر پایه شده است.



(ب)

نمونه های S1 و S2 نسبت به قیر پایه کاهش یافته است که حاکی از بهبود عملکرد دمای پایین این قیرها نسبت به قیر پایه است؛ یعنی مخلوط قیری در دماهای پایین از الاستیسیته مناسب برخوردار است. ولی برای سایر نمونه ها نسبت به قیر پایه سختی خزشی افزایش یافته است که به معنی بدتر شدن دمای پایین این نمونه ها نسبت به قیر پایه می باشد. در ضمن با توجه به اینکه مقادیر سختی خزشی برای تمام نمونه ها کمتر از ۳۰۰ مگاپاسکال است نیازی به انجام آزمایش DDT نیست.

در شکل ۵-ب، ضریب m آورده شده است؛



(الف)

شکل ۵- مقادیر (الف) سختی خزشی و (ب) نرخ خزش برای قیر پایه و قیرهای پلیمری در دمای (۶°C-)

انجام آزمایش BBR و همچنین نتایج دمای بالای قیر حاصل از انجام آزمایش DSR قبل و بعد از پیرشدگی در جدول ۳ نمایش داده شده و مقادیر PG برای تمام نمونه ها گزارش شده است.

مطابق دستورالعمل شارپ مقادیر سختی خزشی کمتر از ۳۰۰ و ضریب m بیشتر از ۰/۳ نشان دهنده تحمل قیر به میزان ۱۰ درجه سانتی گراد پایین تر از دمای مورد آزمایش می باشد؛ بنابراین نتایج دمای پایین حاصل از

جدول ۳- دمای پایین و بالای عملکردی قیرهای تولید شده با درصد های مختلف پلیمر EVA و پودر لاستیک (CR)

نمونه	ترکیب	T SHRP ° C
-	قیر پایه	PG58-16
S1	EVA+2%CR+3% قیر پایه	PG64-22
S2	EVA+4%CR+3% قیر پایه	PG76-28
S3	EVA+6%CR+3% قیر پایه	PG76-10
S4	EVA+2%CR+5% قیر پایه	PG76-16
S5	EVA+4%CR+5% قیر پایه	PG76-16
S6	EVA+6%CR+5% قیر پایه	PG82-10
S7	EVA+2%CR+7% قیر پایه	PG82-10
S8	EVA+4%CR+7% قیر پایه	PG82-10
S9	EVA+6%CR+7% قیر پایه	PG82-10

۴- نتیجه گیری

خود نشان دهد.

با انجام آزمایش رئومتر تیرچه خمشی مشخص می‌گردد ترکیب افزودنی‌های فوق باعث بهبود مشخصات عملکردی دمای پایین قیر نسبت به قیر پایه شده است. بدین صورت که با افزایش درصد پلیمر اتیلن وینیل استات (EVA) تا ۳ درصد و همچنین افزایش درصد پودر لاستیک ضایعاتی تا ۴ درصد، سختی خزشی کاهش و نرخ خزش افزایش می‌یابد و با افزایش درصد بیشتر پلیمرهای فوق افزایش سفتی خزشی و کاهش نرخ خزش دیده می‌شود به طوری که با افزودن ۳ درصد EVA و ۴ درصد پودر لاستیک بهترین نتیجه دمای پایین به دست می‌آید.

قیر خالص به رغم خاصیت چسبندگی خوب، از پیوستگی محدودی برخوردار بوده و دارای محدودیت درجه حرارت بین نقطه شکست و نقطه نرمی است. استفاده از این پلیمرها ضمن بهبود پیوستگی، باعث توسعه محدود دمای قابل تحمل تا بیش از دو برابر قیر خالص می‌گردد، که این خود باعث بهبود مقاومت در برابر روانی، نقطه نرمی و ویسکوزیته بالاتر در شرایط سرویس و کاهش حساسیت حرارتی می‌شود. مقدار PI بیشتر دلالت بر مقدار کمتر حساسیت حرارتی قیر است و این امر نشان‌دهنده این موضوع می‌باشد که این نوع قیر می‌تواند در مناطق با اختلاف حرارتی زیاد خواص مطلوب‌تری از

مراجع

- [1] Tahami, S. A., Mirhosseini, A. F., Dessouky, S., Mork, H., & Kavussi, A. (2019). "The use of high content of fine crumb rubber in asphalt mixes using dry process". *Construction and Building Materials*, 222, 643-653.
- [2] Shafabakhsh, G. H., Sadeghnejad, M., & Sajed, Y. (2014). "Case study of rutting performance of HMA modified with waste rubber powder". *Case Studies in Construction Materials*, 1, 69-76.
- [3] Ziari, H., Akbari, T., Farahani, H., & Goli, A. (2016). "The effect of Lucobit polymer on bitumen performance". *Petroleum Science and Technology*, 34(6), 512-516.
- [4] Rezaei, S., Ziari, H., & Nowbakht, S. (2016). "Low temperature functional analysis of bitumen modified with composite of nano-SiO₂ and styrene butadiene styrene polymer". *Petroleum Science and Technology*, 34(5), 415-421.
- [5] Garcia-Morales, M., Partal, P., Navarro, F. J., & Gallegos, C. (2006). "Effect of waste polymer addition on the rheology of modified bitumen". *Fuel*, 85(7-8), 936-943.
- [6] Nemade, S. N., & Thorat, P. V. (2013). "Utilization of polymer waste for modification of bitumen in road construction". *Scientific Reviews and Chemical Communications*, 2(3), 198-213.
- [7] Ameri, M., Mansourian, A., & Sheikhmotevali, A. H. (2013). "Laboratory evaluation of ethylene vinyl acetate modified bitumens and mixtures based upon performance related parameters". *Construction and Building Materials*, 40, 438-447.
- [8] Fang, C., Yu, R., Li, Y., Zhang, M., Hu, J., & Zhang, M. (2013). "Preparation and characterization of an asphalt-modifying agent with waste packaging polyethylene and organic montmorillonite". *Polymer Testing*, 32(5), 953-960.
- [9] Tóth, B., Varga, C., & Bartha, L. (2015). "Olefin-maleic-anhydride copolymer based additives: A novel approach for compatibilizing blends of waste polyethylene and crumb rubber". *Waste Management*, 38, 65-71.
- [10] Brovelli, C., Hilliou, L., Hemar, Y., Pais, J., Pereira, P., & Crispino, M. (2013). "Rheological characteristics of EVA modified bitumen and their correlations with bitumen concrete properties". *Construction and Building Materials*, 48, 1202-1208.
- [11] Sakinah, Z. A., Ratnam, C. T., Chuah, A. L., & Yaw, T. C. S. (2009). "Effect of mixing conditions on the tensile properties of ethylene vinyl acetate/waste tire dust (EVA/WTD) blend". *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 48(11), 1139-1142.
- [12] Saoula, S., Mokhtar, K. A., Haddadi, S., & Ghorbel, E. (2009). "Improvement of the performances of modified bituminous concrete with EVA and EVA-waste". *Physics Procedia*, 2(3), 1319-1326.
- [13] Yousefi, A. (2004). "Rubber-polyethylene Modified Bitumen". *Iranian Polymer Journal*, 13(2), 101-112.
- [14] Arabani, M., Tahami, S. A., & Hamedi, G. H. (2018). "Performance evaluation of dry process crumb rubber-modified asphalt mixtures with nanomaterial". *Road Materials and Pavement Design*, 19(5), 1241-1258.

- [15] Tabatabaee, N., Tabatabaee, H. A., Sabouri, M. R., & Teymourpour, P. (2009). "Evaluation of performance grading parameters for crumb rubber modified asphalt binders and mixtures". In *Proceedings of 7th international RILEM symposium on advanced testing and characterization of bituminous materials* (Vol. 1).
- [16] Zhang, F., & Hu, C. (2016). "The research for crumb rubber/waste plastic compound modified asphalt". *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 124(2), 729-741.
- [17] Sengoz, B., & Isikyakar, G. (2008). "Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen". *Construction and Building Materials*, 22(9), 1897-1905.
- [18] Badri, R. M., Sutanto, M., & k Alobaidi, M. (2020). "Investigating the rheological properties of asphalt binder incorporating different crumb rubber contents based on a response surface methodology". *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.10.009>
- [19] Aydemir, E. B., & Ozkul, M. H. (2020). "Investigation of effect of bitumen chemical composition, elastomeric polymer and paraffin wax additives on the properties of bitumen by using response surface method". *Construction and Building Materials*, 234, 117414.
- [20] Khairuddin, F. H., Alamawi, M. Y., Yusoff, N. I. M., Badri, K. H., Ceylan, H., & Tawil, S. N. M. (2019). "Physicochemical and thermal analyses of polyurethane modified bitumen incorporated with Cecabase and Rediset: optimization using response surface methodology". *Fuel*, 254, 115662.
- [21] del Barco Carrion, A. J., Subhy, A., Rodriguez, M. A. I., & Presti, D. L. (2020). "Optimisation of liquid rubber modified bitumen for road pavements and roofing applications". *Construction and Building Materials*, 249, 118630.