

ارزیابی آزمایشگاهی انواع قیر تولیدی در کشور مطابق با ضوابط طبقه‌بندی قیر بر اساس درجه عملکردی ارتقاء یافته

یادداشت پژوهشی

*سعید احمدی (نویسنده مسئول)، استادیار، دانشکده عمران، آب و انرژی، دانشگاه جامع امام حسین، تهران، ایران

عقیل قدیم، دانش آموخته کارشناسی ارشد، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران

محمد راهی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، مدیر تحقیق و توسعه شرکت نفت پاسارگاد، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: s.ahmadi@ihu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۵ - پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۲

صفحه ۳۴۴-۳۲۹

چکیده

در سال‌های اخیر عواملی نظیر رشد تصاعدی ترافیک، اضافه بار وسایل نقلیه و تفاوت چشمگیر در درجه حرارت روزانه و فصلی موجب شده در روبه‌های آسفالتی از قیرهای اصلاح شده استفاده شود. مخلوط آسفالتی به انعطاف‌پذیری کافی در دمای سرویس دهی پایین برای جلوگیری از ترک خوردگی و به سختی مناسب در دمای بالا برای ممانعت از شیارشدگی نیاز دارد. در پژوهش حاضر، نمونه‌های مختلف قیر تولیدی از پالایشگاه‌های شیراز و تهران در دماهای مختلف و با سه سطح درجه نفوذ (۵۰/۴۰، ۷۰/۶۰ و ۱۰۰/۸۵) مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، ویژگی‌های رفتاری قیر خالص و اصلاح شده با پلیمر SBS و پودر لاستیک (CRM) در دماهای مختلف با استفاده از آزمایش خزش چندگانه برگشت‌پذیر (MSCR) ارزیابی گردید. در این راستا، تاثیر پارامترهای حاصل از آزمایش MSCR بر عملکرد قیرهای اصلاح شده با پلیمر در دماهای مختلف بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد تفاوت در مشخصات قیرهای اصلاح شده تولید شده در پالایشگاه‌های مختلف را می‌توان به عواملی همچون تفاوت در خصوصیات ته‌ماند برج تقطیر (وکیوم باتوم)، درجه نفوذ قیر پایه مورد استفاده، سازگاری پلیمر با قیر خالص و اندرکنش پلیمرهای مختلف با قیر خالص نسبت داد. در این راستا نمونه حاوی ۴ درصد SBS از پالایشگاه شیراز در طبقه "V" قرار خواهد گرفت، که نشان دهنده‌ی آن است که قیرهای تولید شده از پالایشگاه مذکور می‌تواند مقاومت خوبی در برابر ترافیک سنگین داشته باشند. این در حالی است که قیر حاصل از پالایشگاه تهران در رده "S" قرار گرفته و می‌تواند تحت ترافیک استاندارد مقاومت خوبی از خود نشان دهد.

واژه‌های کلیدی: قیر اصلاح شده، پلیمر SBS، پودر لاستیک، MSCR، خرابی شیارشدگی

۱- مقدمه

روسازی‌های آسفالتی در اثر اعمال بار ترافیکی و یا تغییرات دما، در معرض تنش‌های کششی، فشاری و تغییرشکل‌های گوناگونی قرار می‌گیرند که منجر به کاهش دوام و عمر روسازی‌ها می‌گردد. از بین اجزای تشکیل دهنده آسفالت، قیر اگرچه بخش کوچکی از مخلوط آسفالتی را تشکیل می‌دهد، اما نقش مهمی در عملکرد

دمایی کمتر و گرانیزی کافی در دمای اجرا داشته باشد. همچنین، حساسیت قیر باید به زمان بارگذاری کم و مقاومت آن در برابر تغییر شکل پلاستیک، ترک‌های برودتی و خستگی بالا باشد (Brulé 1996). خواص مثبت قیرهای پلیمری افزایش بازگشت الاستیک، گرانیزی، نقطه نرمی، چسبندگی و انعطاف‌پذیری است (Yildirim 2007). پلیمرها می‌توانند عملکرد مخلوط آسفالتی را در دماهای بالا، متوسط و پایین بهبود دهند (Aflaki and Tabatabaee 2009, Li, Clyne et al. 2011). جدول ۱ انواع پلیمرهای رایج به همراه مزایا و معایب آنها که برای اصلاح قیر استفاده می‌شود، را نشان می‌دهد.

آسفالتی می‌گردد. مهمترین ضعف قیرهای خالص، حساسیت بالا نسبت به تغییرات دما و محدود بودن دامنه عملکردی آنها از نظر دمایی است. بنابراین، استفاده از افزودنی‌های مختلف به منظور اصلاح قیر و بهبود پارامترهای عملکردی مخلوط‌های آسفالتی موضوع تحقیقات بسیاری در سال‌های اخیر بوده است. قیر باید در دمای بالا به قدر کافی سخت باشد تا بتواند از تغییر شکل‌های ماندگار جلوگیری کند و در دمای پایین به قدر کافی نرم باشد تا در برابر خرابی ناشی از فقدان شکل‌پذیری مقاومت کند (Baldino, Gabriele et al. 2012). در نتیجه قیر اصلاح شده ایده‌آل، قیری است که نسبت به قیر خالص چسبندگی بیشتر و در دامنه دماهای سرویس‌دهی، حساسیت

جدول ۱. پلیمرهای رایج جهت اصلاح قیر و مزایا و معایب آنها (Zhu, Birgisson et al. 2014)

دسته‌بندی	نوع/مثال	مزایا	معایب
پلاستومر	Polyethylene (PE) Polypropylene (PP)	- بهبود ویژگی‌های قیر در دمای بالا؛ - هزینه نسبتاً کم	- محدودیت در بهبود الاستیسیته - مشکل جداسازی فازی
	Ethylene-vinyl acetate (EVA) Ethylene-butyl acrylate (EBA)	- پایداری ذخیره سازی نسبتاً خوب؛ - مقاومت بالا در برابر شیارشدگی	- محدودیت در بهبود بازگشت الاستیک؛ - محدودیت در بهبود مشخصات دمای پایین
ترموپلاستیک	Styrene-butadiene styrene (SBS) Styrene-isoprene styrene (SIS)	- افزایش سختی؛ - کاهش حساسیت دمایی؛ - بهبود رفتار (پاسخ) الاستیک	- مشکل سازگاری با برخی قیرها؛ - عملکرد نامناسب در برابر اشعه ماوراء بنفش (UV)؛ - هزینه نسبتاً بالا
	Styrene ethylene/butylene styrene (SEBS)	- بهبود مقاومت در برابر گرما، - اکسیداسیون و ماوراء بنفش (UV)	- مشکل پایداری در ذخیره سازی؛ - کاهش نسبی الاستیسیته و هزینه زیاد

دسته‌بندی دیگر پلیمرها به گروه‌های فعال و غیرفعال تقسیم‌بندی می‌شود. گروه غیرفعال‌ها پلیمرهایی هستند که به قیر اضافه شده و به صورت فیزیکی با قیر مخلوط می‌گردند. این دسته از پلیمرها عبارتند از: SBS، SBR، EVA. گروه فعال‌ها، پلیمرهایی هستند که به صورت شیمیایی با قیر مخلوط می‌گردند. از این گروه می‌توان به ترکیبات اتیلن اشاره کرد (Navarro, Partal et al. 2009). مطالعات مختلفی نشان دادند که قیرهای اصلاح شده با پلیمر SBS، الاستیسیته قیر در دمای بالا و شکل‌پذیری در دمای پایین قیر را بهبود می‌دهد (Polacco, Berlincioni et al. 2005). همچنین، قیرهای اصلاح شده با SBS باعث کاهش حساسیت دمایی قیر می‌گردد و مقاومت در برابر شیارشدگی مسیر چرخ‌ها را نیز بهبود می‌دهد (Navarro, Partal et al. 2009). علاوه بر این، نتایج پژوهشی نشان داد که استفاده از قیرهای اصلاح شده با پلیمر SBS می‌تواند عمر خستگی مخلوط آسفالتی را نیز بهبود دهد (Li, Clyne et al. 2011). همچنین مطالعات محققان مختلف در خصوص عملکرد قیر اصلاح شده با پودرلاستیک نشان داده است که با افزایش پودر لاستیک به قیر ویسکوزیته قیر افزایش می‌یابد. همچنین، نتایج نشان داد که استفاده از قیرهای اصلاح شده با پودر لاستیک مقاومت قیر و مخلوط آسفالتی را در برابر شیارشدگی مسیر چرخ‌ها بهبود می‌دهد (Lee, Akisetty et al. 2008, Jeong, Lee et al. 2010, Mashaan, Ali et al. 2012, Wang, You et al. 2012, Lee, et al. 2012). مطابق با پژوهش‌های لی و وانگ (Akisetty et al. 2008). قیر اصلاح شده با پودرلاستیک عملکرد بهتری نسبت به قیر

دسته‌بندی دیگر پلیمرها به گروه‌های فعال و غیرفعال تقسیم‌بندی می‌شود. گروه غیرفعال‌ها پلیمرهایی هستند که به قیر اضافه شده و به صورت فیزیکی با قیر مخلوط می‌گردند. این دسته از پلیمرها عبارتند از: SBS، SBR، EVA. گروه فعال‌ها، پلیمرهایی هستند که به صورت شیمیایی با قیر مخلوط می‌گردند. از این گروه می‌توان به ترکیبات اتیلن اشاره کرد (Navarro, Partal et al. 2009). مطالعات مختلفی نشان دادند که قیرهای اصلاح شده با پلیمر SBS، الاستیسیته قیر در دمای بالا و شکل‌پذیری در دمای پایین قیر را بهبود می‌دهد (Polacco, Berlincioni et al. 2005). همچنین، قیرهای اصلاح شده با SBS باعث کاهش حساسیت دمایی قیر می‌گردد و مقاومت در برابر شیارشدگی مسیر چرخ‌ها را نیز بهبود می‌دهد (Navarro, Partal et al. 2009). علاوه بر این، نتایج پژوهشی نشان داد که استفاده از قیرهای اصلاح شده با پلیمر SBS می‌تواند عمر خستگی مخلوط آسفالتی را نیز بهبود دهد (Li, Clyne et al. 2011). همچنین مطالعات محققان مختلف در خصوص عملکرد قیر اصلاح شده با پودرلاستیک نشان داده است که با افزایش پودر لاستیک به قیر ویسکوزیته قیر افزایش می‌یابد. همچنین، نتایج نشان داد که استفاده از قیرهای اصلاح شده با پودر لاستیک مقاومت قیر و مخلوط آسفالتی را در برابر شیارشدگی مسیر چرخ‌ها بهبود می‌دهد (Lee, Akisetty et al. 2008, Jeong, Lee et al. 2010, Mashaan, Ali et al. 2012, Wang, You et al. 2012, Lee, et al. 2012). مطابق با پژوهش‌های لی و وانگ (Akisetty et al. 2008). قیر اصلاح شده با پودرلاستیک عملکرد بهتری نسبت به قیر

صورت گرفته، دو روش مرسوم تر و خشک جهت اضافه نمودن پودرلاستیک به قیر وجود دارد. هر دو فرآیند توسط بسیاری از محققین استفاده شده است. با این حال، روش تر نسبت به روش خشک ارجحیت دارد. زیرا؛ روش خشک از ترک‌های دمای پایین جلوگیری نمی‌کند (Navarro, Partal et al. 2004, Mashaan, Ali et al. 2012). در جدول ۲ به‌طور خلاصه روش‌های تهیه مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با پودر لاستیک، مزایا و معایب آنها آورده شده است.

خالص در ترک‌های خستگی نشان می‌دهد (Lee, Akisetty et al. 2008, Wang, You et al. 2012). مهم‌ترین نقطه ضعف قیر اصلاح شده با پودرلاستیک، ثبات ذخیره‌سازی کم آن است (Mull, Stuart et al. 2002, Navarro, Partal et al. 2012, Nejad, Aghajani et al. 2004). البته این مشکل در اضافه نمودن پودر لاستیک به قیر در روش خشک پیش‌تر نمود می‌کند، که علت اصلی آن می‌تواند عدم کنترل بر طبقه‌بندی قطعات لاستیک و تأثیر آن بر فضای خالی مخلوط آسفالتی باشد (Wong and Wong 2007). مطابق با مطالعات

جدول ۲. مقایسه روش‌های استفاده از پودرلاستیک

روش تهیه	تشریح روش تهیه	مزایا	مشکلات
روش خشک	پودر لاستیک تا سقف ۵ درصد وزنی مخلوط آسفالتی، جایگزین مصالح سنگی می‌شود.	۱- مقاومت لغزشی بالا ۲- هزینه تهیه پایین ۳- استفاده بیشتر از پودر لاستیک ۴- مقاومت در برابر یخ‌زدگی و ذوب	۱-افزایش ضخامت روسازی ۲-کاهش مدول برجهندگی ۳-جدا شدن ذرات لاستیک از مخلوط
روش تر	۱۰الی ۲۰ درصد پودر لاستیک در دمای بالای ۱۷۵ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۶۰-۴۵ دقیقه با قیر واکنش می‌دهد.	۱- عملکرد بسیار مناسب این نوع آسفالت نسبت به بسیاری از آسفالت‌های پلیمری	۱- مشکل جداشدگی پودر لاستیک در صورت عدم واکنش مناسب با قیر
ترکیب ترمینال	همانند روش تر، حدود ۱۰ درصد پودر لاستیک در دمای بالای ۱۷۵ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۶۰-۴۵ دقیقه با قیر واکنش می‌دهد تفاوت اصلی این روش با روش تر، استفاده از افزودنی برای حفظ پخش و توزیع در قیر است.	۱- عملکرد بسیار مناسب این نوع روسازی‌ها نسبت به بسیاری از آسفالت‌های پلیمری ۲- کاهش جدایش پودرلاستیک درون قیر ۳- امکان نگهداری بلندمدت قیر اصلاح‌شده	۱- هزینه بیشتر نسبت به سایر روش‌ها ۲- استفاده از مقدار کم پودرلاستیک

انجام دادند. نتایج این مطالعه نشان داد ۸ و ۱۰ درصد پودرلاستیک یک رده دمای بالا عملکردی قیر را افزایش می‌دهند و افزایش پودرلاستیک از ۸ به ۱۰ درصد تأثیری بر دمای بالای عملکردی ندارد. این در حالی است که مقدار ۱۵ درصد پودرلاستیک دمای عملکردی را از PG 64 به PG 76 افزایش می‌دهد. همچنین قیر اصلاح شده با ٪ SBS نسبت به قیر شاهد، ۳ رده دمای بالا را افزایش می‌دهد (Duan, Zhu et al. 2021). در مطالعه‌ای Alborno و همکاران در سال ۲۰۲۲ پروژه‌های بزرگراهی اجرا شده با قیر پودرلاستیکی و قیر پلیمری حاوی SBS در حین عمر سرویس‌دهی در معرض فاکتورهای مختلف آب و هوایی را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه آزمایش‌های طبقه‌بندی عملکردی ارتقاء یافته (MSCR)، جاروب دما و جاروب فرکانس بر روی قیرهای بازیابی شده از مغزه‌های آسفالتی پس از ۳ ماه از اجرای آسفالت

یکی از روش‌های بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی استفاده از قیر اصلاح شده پلیمری است. با این حال، مشخصات ارائه شده در AASHTO M-320، مشخصات لازم برای ارزیابی طبقه‌بندی عملکردی قیرهای اصلاح شده را به اندازه کافی ارائه نمی‌کند. در نتیجه، بسیاری از اداره‌های راه در آمریکا، آزمایش‌های اضافی دیگری را برای تکمیل مشخصات قیرهای اصلاح شده در سوپریپو اضافه کرده‌اند تا اطمینان حاصل کنند که یک اصلاح کننده‌ی قیر در طبقه‌بندی قابل قبولی در سیستم طبقه‌بندی بر اساس درجه عملکرد گنجانده شده است. این آزمایش‌ها در قالب آزمایش درجه عملکردی ارتقاء یافته ارائه شده و مستقیماً به عملکرد مربوط نمی‌شوند، بلکه فقط به وجود یک اصلاح کننده خاص در قیر مربوط می‌شوند. دوان و همکاران در سال ۲۰۲۱ مطالعه‌ای بر روی قیر اصلاح شده با درصد‌های مختلف پودرلاستیک و مقایسه آن با قیر اصلاح شده با SBS

افزودن مواد ضایعاتی نظیر پودر لاستیک با مقدار زیاد، پلی اتیلن ضایعاتی، گوگرد و همچنین ترکیب با پلیمر SBS مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد ترکیب ۲۰ درصد پودر لاستیک ضایعاتی به همراه ۴ درصد SBS و ۰٫۶ درصد گوگرد توانسته است به طبقه‌بندی عملکردی PG 94-34 دست یابد. به‌طور کلی، این مطالعه پتانسیل استفاده از مواد زائد را جهت کمک به توسعه پایدار و تاب‌آوری مصالح مورد استفاده در مخلوط آسفالتی به منظور ترویج حفاظت از منابع و محیط زیست پیشنهاد می‌دهد (Li, Khair et al. 2025).

۲- مواد و مصالح استفاده شده

قیرهای با درجه نفوذ ۴۰/۵۰، ۶۰/۷۰ و ۸۵/۱۰۰ مورد استفاده در این پژوهش از پالایشگاه‌های تهران و شیراز شرکت نفت پاسارگاد تهیه شد.

۲-۱- پلیمر SBS

جهت اصلاح قیر و انجام آزمایش‌های لازم از پلیمر SBS محصول کشور اسپانیا که در شکل ۱ نشان داده شده، استفاده گردید. اختلاط قیر و پلیمر SBS در دمای 180 ± 5 درجه سانتیگراد و به مدت ۲ ساعت با هم مخلوط شدند. جهت اطمینان از اختلاط کامل، سرعت ۵۰۰۰ دور بر دقیقه جهت اختلاط انتخاب گردید. بدین ترتیب، مطابق با مطالعات انجام شده، مقادیر ۲، ۴ و ۶ درصد (درصد وزنی قیر) پلیمر SBS جهت اختلاط با قیرهای تهیه شده از پالایشگاه‌های مختلف انتخاب شد.

مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که قیر اصلاح‌شده با خرده‌لاستیک، پارامترهای پیرشدگی و رئولوژی (Rheology) مشابهی با قیرهای اصلاح‌شده پلیمری، در شرایط ترافیکی و آب و هوایی شدید دارند (Albornoz, Moreno-Navarro et al. 2022). لیو و همکاران در سال ۲۰۲۲ بر روی توسعه قیر اصلاح‌شده با پودر لاستیک و پلیمر SBS به روش پالایشگاهی مطالعه موردی انجام دادند. نتایج نشان می‌دهد وجود پلیمر SBS در آسفالت پودرلاستیکی مخصوصاً در خرابی‌های دمای بالا مناسب بوده و مقاومت بالایی دارد. به‌طور همزمان، استفاده از پودرلاستیک و پلیمر SBS سبب می‌شود ذخیره‌سازی طولانی‌مدت بسیار خوبی در آسفالت ایجاد شود که برای تولید در مقیاس بزرگ مناسب است. در نهایت نتایج نشان داده است عملکرد ترکیب این افزودنی‌ها در آزمایشگاه ممکن است با عملکرد میدانی تطابق نداشته باشد (Liu and Wang 2022). قاضی و همکاران در سال ۲۰۲۴ تلاش نمودند با استفاده از پودرلاستیک، آسفالت نیمه گرم تولید نمایند. آنها در این تحقیق جهت ساخت آسفالت نیمه گرم از درصد‌های مختلف ساسوبیت و زایکوترم استفاده نمودند. نتایج Rheology و MSCR نشان داد افزودن پودرلاستیک به میزان ۲۰ درصد همراه با ۱٫۵ درصد زایکوترم در مناطق سردسیر و همچنین ۲ درصد ساسوبیت و ۲۰ درصد پودرلاستیک در مناطق گرمسیر عملکرد قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت. همچنین ترکیبات مذکور سبب بهبود قابل توجه خستگی قیر می‌شود (Al-Khateeb, Sukkari et al. 2024). در پژوهش دیگری که توسط لی و همکاران در سال ۲۰۲۵ انجام شد تاثیر



شکل ۱. پلیمر SBS مورد استفاده در این پژوهش



شکل ۲. پودر لاستیک مورد استفاده در این پژوهش

۲-۲- پودر لاستیک

شماره ۸ باشد که پودر لاستیک انتخابی این شرط را برآورد می‌سازد. اختلاط قیر و پودر لاستیک در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و زمان اختلاط ۱ ساعت و همچنین جهت انجام اختلاط کامل سرعت ۵۰۰۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته شد. به منظور اجرایی شدن پروژه و نیز برقراری امکان مقایسه بین اصلاح‌کننده‌های مختلف در هر مورد دو درصد بالا و پایین در نظر گرفته شد. بدین ترتیب، مطابق با مطالعات انجام شده، مقادیر ۱۰، ۱۴ و ۱۸ درصد (درصد وزنی قیر) پودر لاستیک جهت تهیه قیر پودرلاستیکی استفاده شد.

پس از بررسی پودر لاستیک‌های موجود در کشور با توجه به کیفیت و کمیت تولید هر یک از مراکز تولید پودر لاستیک، محصول مجتمع لاستیک یزد جهت ساخت قیرهای لاستیکی انتخاب شد. کارخانه، پودر لاستیک را در دو اندازه ۰/۴ و ۰/۶ میلی‌متر تولید می‌کند که اندازه ۰/۴ میلی‌متر در این پژوهش مطابق با شکل ۲ مورد استفاده قرار گرفت. روش تولید، خرد کردن در دمای محیط بوده و ضایعات فلزی از پودر لاستیک جدا شده‌اند. پودر لاستیک با ابعاد ۰/۴ از الک شماره ۳۰ عبور و بر روی الک شماره ۸۰ باقی می‌ماند. طبق استاندارد ASTM D6114 پودر لاستیک جهت کاربرد در قیرهای لاستیکی باید رد شده از الک

۳- روش تحقیق

۳-۱- آزمایش تنش خزشی چندگانه برگشت‌پذیر (MSCR)

است. برای تعیین این پارامتر، باید میانگین کرنش غیر قابل بازگشت بدست آمده از ۱۰ سیکل خزش و بازگشت را بر تنش برشی اعمال شده بر نمونه در طی آن ۱۰ سیکل تقسیم کرد. پارامتر R نیز به منظور تعیین وجود پاسخ الاستیک در نمونه قیر تحت آزمایش در نظر گرفته شده است. برای تعیین پارامتر R نیز کافی است تا نسبت میزان کرنش برگشت‌پذیر به ازای هر سیکل را به کرنش کل تعیین کرده و میانگین آن را برای ۱۰ سیکل بارگذاری با سطح تنش ۱۰۰ پاسکال و ۱۰ سیکل بارگذاری با سطح تنش ۳۲۰۰ پاسکال بدست آورد. نحوه محاسبه این پارامترها در روابط ۱ و ۲ نشان داده شده است.

روند آزمایش بر این اساس است که یک نمونه قیر با پیرشدگی کوتاه مدت به قطر ۲۵ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر در معرض ۱۰ سیکل بارگذاری با ۱ ثانیه بارگذاری خزشی و ۹ ثانیه استراحت در سطوح تنش ۱۰۰ و ۳۲۰۰ پاسکال در دمای عملکردی بالا (دمای ۶۴ درجه سلسیوس) با استفاده از دستگاه رئومتر برش دینامیکی قرار می‌گیرد. دو پارامتر اساسی J_{nr} و R از این آزمایش بدست می‌آیند. پارامتر J_{nr} به عنوان جایگزینی برای پارامتر شیارشدگی ($G^*/\sin\delta$) پیشنهاد شده است. این پارامتر برای پیش‌بینی رفتار هر دو نوع قیر خالص و اصلاح شده مناسب است. پارامتر J_{nr} بیانگر تغییر شکل پلاستیک قیر بوده

همچنین به منظور محاسبه میزان حساسیت نمونه‌های قیر به سطح تنش نیز درصد تغییرات پارامترهای J_{nr} و R با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$\text{Recovery \% at 100 Pa or 3200 Pa} = \frac{1}{10} \left[\sum_{i=1}^{10} \frac{\gamma_{(r)_i}}{\gamma_{(t)_i}} \right] \times 100 \quad (1)$$

$$J_{nr} @ 100 \text{ Pa} = \frac{1}{10} \left[\sum_{i=1}^{10} \frac{\gamma_{(nr)_i}}{0.1} \right] \quad J_{nr} @ 3200 \text{ Pa} = \frac{1}{10} \left[\sum_{i=1}^{10} \frac{\gamma_{(nr)_i}}{3.2} \right] \quad (2)$$

$$J_{nr \text{ diff}} \% = \left[\frac{J_{nr 3200 Pa} - J_{nr 100 Pa}}{J_{nr 100 Pa}} \right] \times 100 \quad R_{diff} \% = \left[\frac{R_{100 Pa} - R_{3200 Pa}}{R_{100 Pa}} \right] \times 100 \quad (3)$$

۴- نتایج و بحث

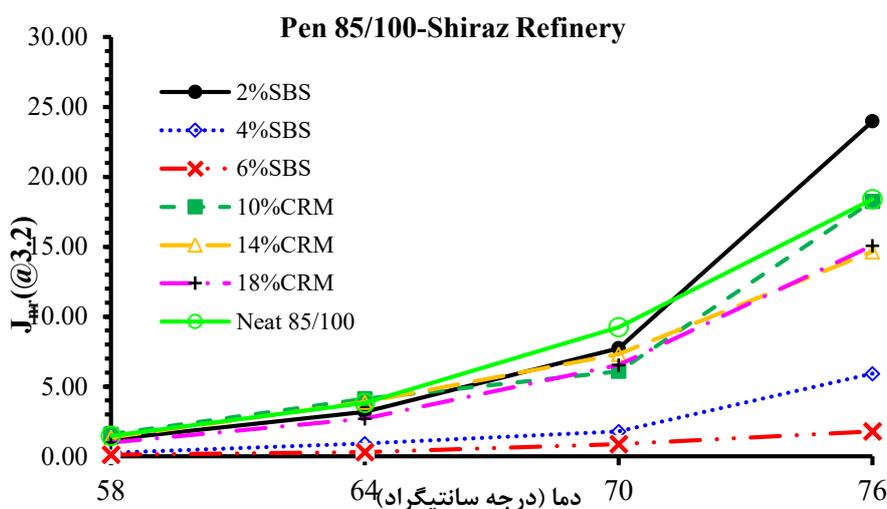
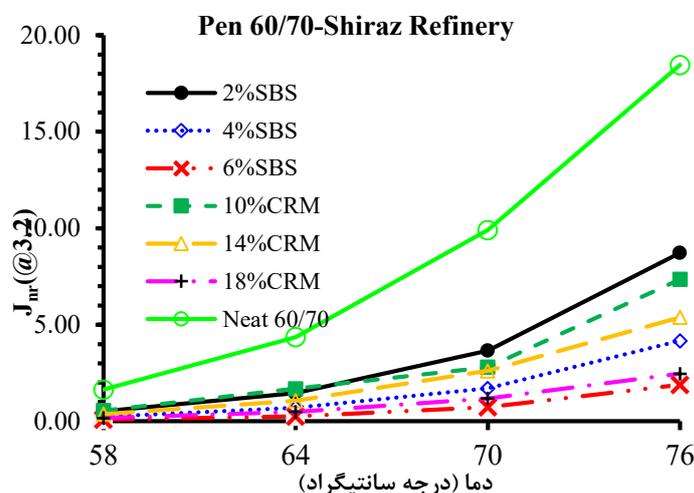
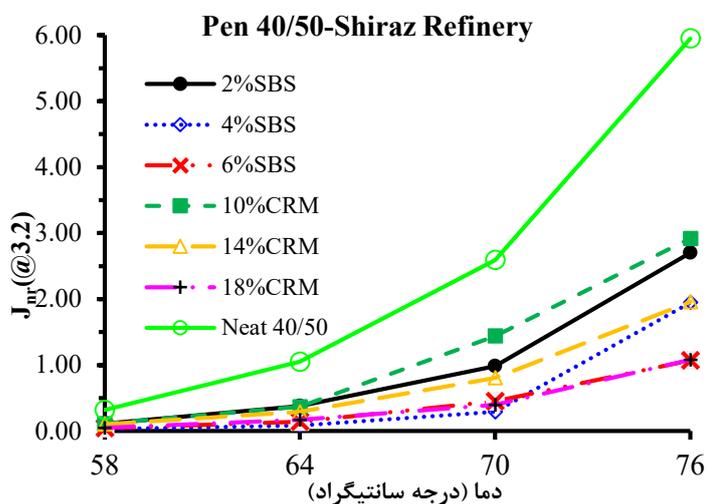
۴-۱- ارزیابی عملکرد قیرهای اصلاح شده پلیمری در دماهای مختلف بر کرنش تجمعی غیر قابل برگشت (J_{nr})

می‌گردد، برای قیر با درجه نفوذ ۴۰/۵۰، نمونه‌های ۴٪ SBS، ۶٪ SBS و ۱۸٪ CRM در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به دمای ۶۴ درجه سانتی‌گراد، به رده‌های MSCR بالاتری دست یافتند. بررسی‌های بیشتر نشان می‌دهد که همه‌ی نمونه‌های اصلاح شده می‌توانند حداقل مقدار $J_{nr3.2}$ مورد نیاز برای کلاس E را در دمای ۶۴ درجه سانتی‌گراد برآورده کنند، این در حالی است که هیچ کدام از نمونه‌ها نتوانستند حداقل مقدار $J_{nr3.2}$ مورد نیاز برای کلاس E را در دمای ۷۶ درجه سانتی‌گراد برآورده کنند. زمانی که نمونه‌های تهیه شده به صورت بصری مقایسه می‌شوند، می‌توان اذعان کرد که قیرهای ۴٪ SBS، ۶٪ SBS و ۱۸٪ CRM سازگاری بهتری در نتایج آزمایش نسبت به سایر قیرها دارند. اما به طور کلی، نتایج آزمایش MSCR نشان داد که رده‌هایی که در حال حاضر در کلاس E رده‌بندی می‌شوند، دارای مقاومت کافی در شرایط ترافیکی سنگین در دمای ۶۴ درجه سانتی‌گراد هستند. علاوه بر این، بررسی نمونه‌های قیر با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ نشان می‌دهد که با افزایش درصد SBS و پودر لاستیک، مقدار $J_{nr3.2}$ در دماهای مختلف تغییر می‌کند. با بررسی تاثیر افزودنی‌های SBS و پودر لاستیک بر مشخصات قیر در دماهای ۵۸، ۶۴، ۷۰، و ۷۶ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد که در دمای ۵۸ درجه سانتی‌گراد، افزایش درصد SBS و خرده لاستیک نشان دهنده کاهش مقدار $J_{nr3.2}$ است. این نتیجه حاکی از آن است که بهبود خواص الاستیک و افزایش مقاومت قیر در برابر تغییر شکل دائمی است. این موضوع نشان می‌دهد که افزودن SBS و پودر لاستیک به قیر، شبکه‌ای از پلیمرها ایجاد

نمودار تغییرات پارامتر $J_{nr3.2}$ نمونه‌های قیر تولید شده در پالایشگاه‌های مختلف در دماهای مختلف در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، تغییرات کرنش تجمعی غیر قابل برگشت نمونه‌های قیر با درجات نفوذ مختلف، رفتار متفاوتی را در دماهای مختلف از خود نشان می‌دهند. بطوریکه، با افزایش دما، برای تمامی نمونه‌های قیر، مقدار کرنش تجمعی غیر قابل برگشت افزایش می‌یابد. این موضوع حاکی از آن است که با افزایش دما به دلیل افزایش میزان حرکت زنجیره‌های پلیمری درون قیر، مقدار کرنش تجمعی غیر قابل برگشت افزایش می‌یابد. بطوریکه، با افزایش دما، پیوندهای بین مولکولی در پلیمرها ضعیف‌تر می‌شوند و این امر به پلیمرها اجازه می‌دهد که راحت‌تر و بیشتر حرکت کنند. این تحرک بیشتر پلیمرها باعث می‌شود که ماده تحت بار زمانی طولانی‌تری شکل خود را از دست بدهد و کمتر قابلیت بازگشت به حالت اولیه خود را داشته باشد، که به آن خزش گفته می‌شود. همانطور که در شکل‌های مورد اشاره ملاحظه می‌گردد، نتایج $J_{nr3.2}$ برای نمونه‌های قیر در دماهای ۵۸، ۶۴، ۷۰ و ۷۶ درجه سانتی‌گراد حاکی از این است که قیرها معمولاً در دمای ۶۴ درجه سانتی‌گراد در مقایسه با ۷۰ درجه سانتی‌گراد به رده MSCR بالاتری دست می‌یابند. به طور کلی، سختی یک قیر تابعی از زمان بارگذاری و دمای آزمایش است. از آنجایی که زمان بارگذاری در آزمایش‌های MSCR ثابت می‌ماند، کاهش سختی قیر که منجر به مقادیر $J_{nr3.2}$ بالاتر می‌شود، با افزایش دمای آزمایش جبران می‌گردد. به عنوان مثال، همانطور که در شکل ۳ ملاحظه

و پودرلاستیک در مقاومت در برابر خزش کاهش می‌یابد، زیرا حرکت زیاد مولکول‌ها می‌تواند به تدریج باعث کاهش خواص شبکه پلیمری شود. به طور کلی، نمودارهای ارائه شده در شکل ۳ نشان می‌دهد که استفاده از افزودنی‌های SBS و پودرلاستیک می‌تواند به بهبود خواص قیر کمک کند و مقاومت در برابر خزش را در دماهای پایین‌تر افزایش دهد. با این حال، این افزودنی‌ها در دماهای بسیار بالا ممکن است تاثیر کمتری داشته باشند و ممکن است نیاز به تنظیم میزان افزودنی‌ها بر اساس شرایط دمایی محیط وجود داشته باشد. لازم به توضیح است که نتیجه بدست آمده با پژوهش ماتا و سالاری در سال ۲۰۲۲ همخوانی دارد (Mata and Salari 2022).

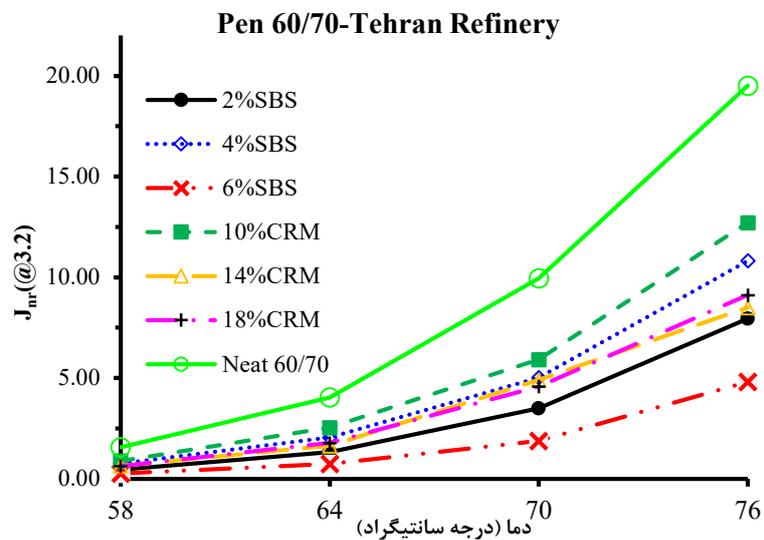
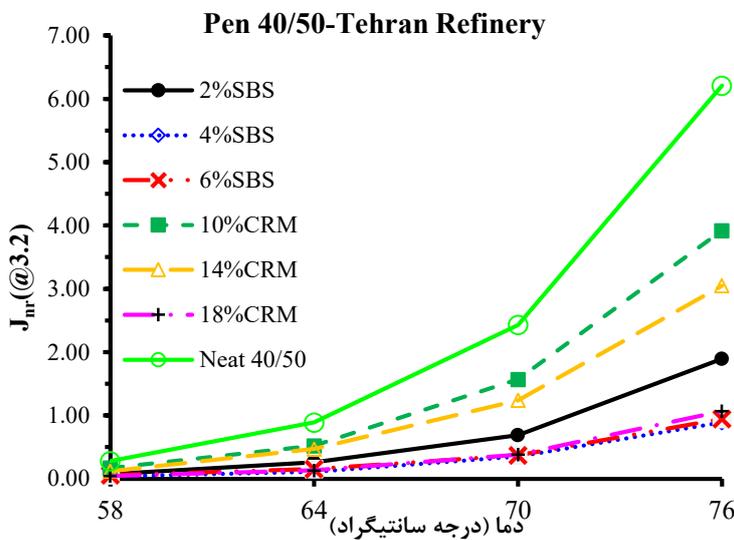
می‌کند که باعث می‌شود قیر در دماهای پایین‌تر کمتر خزش نشان دهد. در حالیکه، با افزایش دما به ۶۴ و ۷۰ درجه سانتیگراد، تاثیر افزودنی‌های SBS و پودرلاستیک بر کاهش کرنش تجمعی غیر قابل برگشت کمتر می‌شود، اما همچنان نشان دهنده کاهش است. این امر می‌تواند دلیلی بر افزایش استحکام و انعطاف‌پذیری قیر با افزودنی‌ها باشد که در نتیجه، مقاومت بهتری در برابر تغییرشکل‌های طولانی مدت ارائه می‌دهند. در دمای ۷۶ درجه سانتیگراد، اثرات مقاومت قیر در برابر تغییرشکل با افزودن اصلاح‌کننده‌های SBS و پودرلاستیک به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. این امر ممکن است ناشی از نرم شدن بیش از حد قیر باشد که به دلیل حرکت زیاد مولکولی در دماهای بالا رخ می‌دهد. به عبارت دیگر، در این دماها، مزایای افزودن SBS

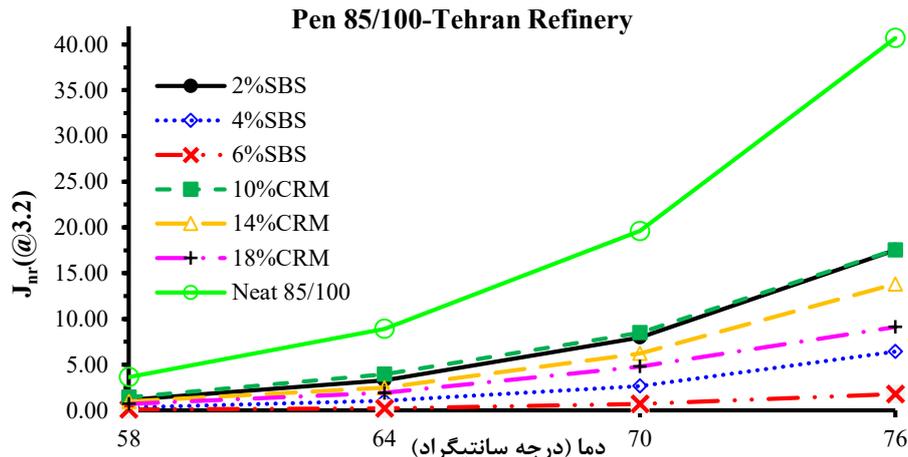


شکل ۳. تغییرات پارامتر J_{nr} نمونه‌های قیر تولید شده در پالایشگاه شیراز در دماهای مختلف

دمای بالا شده و در نتیجه کرنش تجمعی غیرقابل برگشت به طور قابل توجهی بهبود یابد. برای قیر با درجه نفوذ ۶۰/۷۰، مقادیر پایین‌تر SBS (۲٪ و ۴٪) باعث بهبود خصوصیات خزشی شده است، اما با افزایش مقدار SBS به ۶٪، میزان J_{nr} افزایش یافته است، به خصوص در دمای ۷۶ درجه سانتیگراد. این امر می‌تواند نشان دهنده آستانه‌ای باشد که در آن افزودن بیش از حد SBS ممکن است به جای بهبود، تأثیر منفی بر خواص قیر داشته باشد. در قیر با درجه نفوذ ۸۵/۱۰۰، تأثیر افزودن SBS و پودرلاستیک به طور قابل توجهی متفاوت است. به نظر می‌رسد که افزودن پودرلاستیک به طور مداوم کرنش تجمعی غیر قابل برگشت را کاهش داده است که نتایجی مشابه در پژوهش هوانگ و همکاران در سال ۲۰۲۴ مشاهده شده است (Huang, Li et al. 2024). این موضوع ممکن است به خاطر تشکیل یک شبکه پلیمری با استحکام بالا باشد که مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی را افزایش می‌دهد. به طور کلی، این نتایج حاکی از آن است که درصد و نوع افزودنی‌ها و درجه نفوذ قیر (و یا منبع قیر) در تعیین مشخصات کلی قیرهای اصلاح شده تأثیرگذار است.

نتایج تغییرات مقدار J_{nr} نمونه‌های قیر تولید شده در پالایشگاه تهران با درجات نفوذ ۴۰/۵۰، ۶۰/۷۰ و ۸۵/۱۰۰ تحت دماهای بالا در شکل ۴ ارائه شده است. بررسی نتایج ارائه شده از پالایشگاه تهران نشان می‌دهد که افزودن مقادیر مختلف SBS (۲٪، ۴٪ و ۶٪) و پودرلاستیک (۱۰٪، ۱۴٪ و ۱۸٪) به نمونه‌های قیر با درجات نفوذ مختلف (۴۰/۵۰، ۶۰/۷۰ و ۸۵/۱۰۰) تأثیر متفاوتی بر کرنش تجمعی غیر قابل برگشت در دماهای متفاوت (۵۸، ۶۴، ۷۰ و ۷۶ درجه سانتیگراد) دارد. در مورد قیر با نفوذ ۴۰/۵۰، افزودن SBS و پودرلاستیک به طور کلی منجر به کاهش قابل توجهی در مقدار کرنش تجمعی غیر قابل برگشت نسبت به نمونه شاهد شده است، که نشان دهنده بهبود در مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی است. با این حال، افزایش درصد پودرلاستیک از ۱۰٪ به ۱۸٪ منجر به کاهش قابل توجهی در مقدار J_{nr} در دمای ۷۶ درجه سانتیگراد شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار J_{nr} برای نمونه‌های ۱۰٪ CRM در دمای ۷۶ درجه سانتی‌گراد ۰/۷۳٪ کمتر از نمونه ۱۸٪ CRM است. این نتیجه حاکی از آن است افزودن پودرلاستیک می‌تواند موجب نرمی بیش از حد قیر در





شکل ۴. تغییرات پارامتر J_{nr} نمونه‌های قیر تولید شده در پالایشگاه تهران در دماهای مختلف

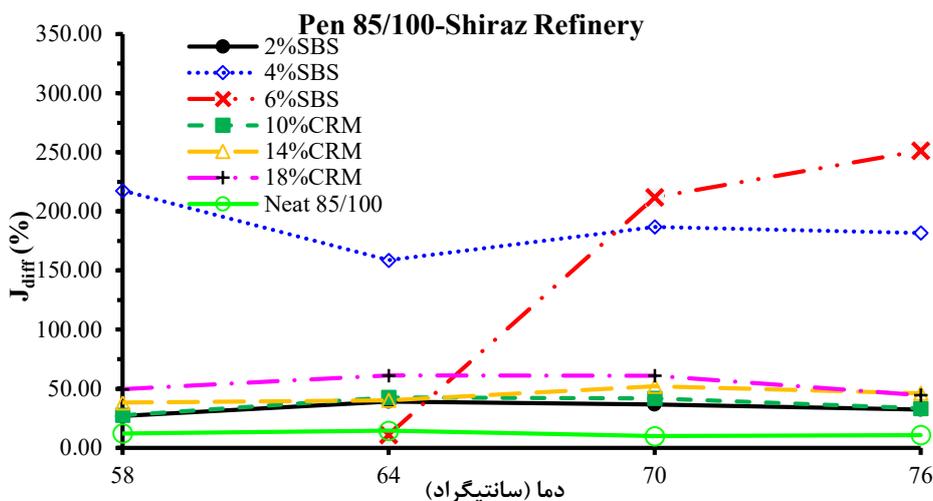
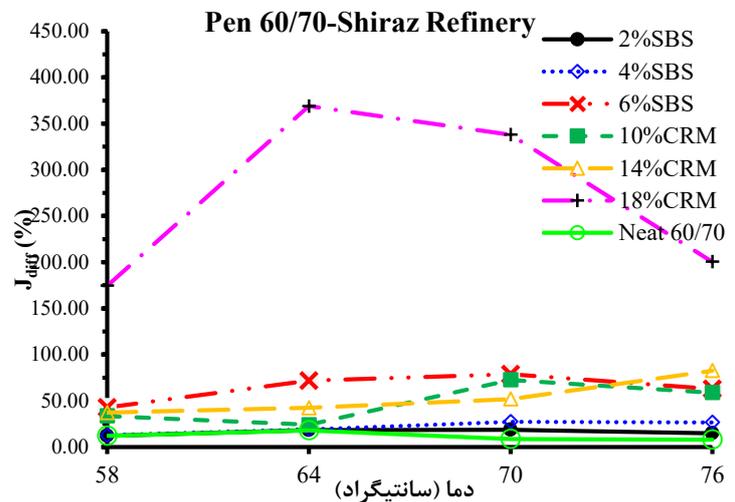
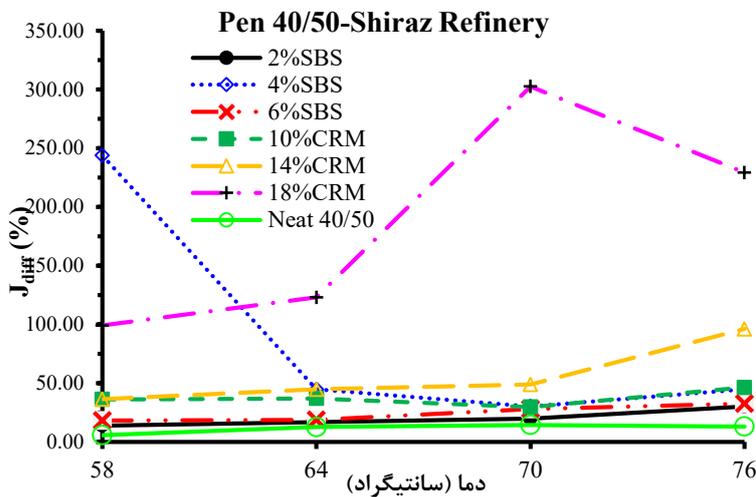
۴-۲- ارزیابی عملکرد قیرهای اصلاح شده پلیمری و میزان حساسیت آنها به سطح تنش ($J_{nr-diff}$) در دماهای مختلف

شکل ۵ ملاحظه می‌گردد، در نمونه‌های قیر با درجه نفوذ ۶۰/۷۰، نمونه ۶٪ SBS دارای بیشترین مقدار $J_{nr-diff}$ در درجه حرارت‌های بالا است، که می‌تواند نشانه‌ای از حساسیت بالای این نمونه به شیارشدگی باشد. اما در مقابل، نمونه‌های ۱۰٪ CRM، ۱۴٪ CRM و نمونه‌های حاوی درصدهای پایین‌تر SBS نشان از پایداری بیشتر در برابر تغییرات دما و عملکرد بهتر در برابر شیارشدگی دارند. با توجه به نمودارهای ارائه شده در شکل ۵، مقایسه مقدار $J_{nr-diff}$ برای قیر با درجه نفوذ ۴۰/۵۰ در دمای ۶۴ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد که نمونه ۶٪ SBS دارای بیشترین $J_{nr-diff}$ است، که این موضوع نشان‌دهنده افزایش قابل توجه در انعطاف‌پذیری و احتمال بیشتر برای خزش در این نمونه است. در حالیکه، قیرهای اصلاح شده با پودر لاستیک با درصدهای مختلف (۱۰٪، ۱۴٪ و ۱۸٪) و نمونه‌های حاوی مقادیر کمتر SBS اختلاف کمتری دارند. نمونه‌های قیری با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ با اینکه روند کلی مشابهی با نمونه‌های قیر با درجه نفوذ ۴۰/۵۰ دارند، اما در این مورد، قیر با ۱۸٪ CRM بیشترین $J_{nr-diff}$ را دارا است، و نمونه‌های ۱۰٪ CRM و ۱۴٪ CRM اختلاف کمتری نشان می‌دهند. در نمونه‌های قیری با درجه نفوذ ۸۵/۱۰۰ نیز، نمونه‌های قیر با درصدهای مختلف SBS اختلاف نسبتاً ثابت و پایینی دارند، و نمونه‌های اصلاح شده با پودر لاستیک همچنان اختلاف پایین‌تری نسبت به SBS دارند. بطور مشابه، در نمونه‌های قیر با درجه نفوذ ۴۰/۵۰ در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد نیز بیشترین مقدار $J_{nr-diff}$ متعلق به نمونه ۶٪ SBS است، اما افزایش قابل توجهی در مقدار $J_{nr-diff}$ برای ۴٪ SBS دیده می‌شود که

حساسیت قیرها نسبت به افزایش سطح تنش‌های اعمالی با استفاده از پارامتر $J_{nr-diff}$ مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به نحوی که مقادیر کمتر این پارامتر نشان‌دهنده حساسیت کمتر قیر به تغییر در سطوح تنش است. مطابق با استاندارد AASHTO M332، مقدار تغییر در کرنش جمعی غیر قابل برگشت بین دو سطح تنش ۱۰۰ و ۳۲۰۰ پاسکال را به ۷۵ درصد محدود شده است. این معیار استفاده از قیرهایی که نسبت به تغییرات تنش حساس بوده و پتانسیل شیارشدگی بالایی دارند را محدود می‌سازد. شکل‌های ۵ و ۶ تغییرات پارامتر $J_{nr-diff}$ را برای نمونه‌های قیر تولید شده در پالایشگاه‌های تهران و شیراز شرکت نفت پاسارگاد را نشان می‌دهد. بطورکلی، همانطور که مشاهده می‌شود استفاده از اصلاح‌کننده‌های پلیمری میزان حساسیت قیر خالص را نسبت به تغییرات سطح تنش افزایش می‌دهد. با افزودن SBS و پودر لاستیک نیز این روند افزایشی ادامه می‌یابد. با این وجود نتایج در محدوده قابل قبول (کمتر از ۷۵ درصد) قرار دارند. بنابراین، اگر اختلاف بین دو سطح تنش بیش از ۷۵٪ باشد، قیر مستعد شیارشدگی است. بر اساس نتایج ارائه شده در نمودارها که از سه نوع قیر با درجات نفوذ مختلف (۴۰/۵۰، ۶۰/۷۰ و ۸۵/۱۰۰) که از پالایشگاه‌های مختلف شرکت نفت پاسارگاد از جمله شیراز و تهران استخراج شده است، ملاحظه می‌گردد که تغییرات پارامتر $J_{nr-diff}$ در تنش ۱۰۰ و ۳۲۰۰ پاسکال در دماهای مختلف متفاوت است. بطورکلی، در نمودارهای ارائه شده، می‌توان ملاحظه کرد که برخی از قیرها با افزایش دما، پارامتر $J_{nr-diff}$ آنها افزایش می‌یابد و این می‌تواند نشان‌دهنده افزایش خطر شیار افتادگی باشد. به طور مثال، همانطور که در

نمونه‌های قیر با درصد‌های بالاتر پودرلاستیک به طور کلی پایداری بهتری نسبت به درصد‌های بالاتر SBS نشان دادند. این نتایج می‌تواند در انتخاب قیر مناسب برای شرایط آب و هوایی مختلف و همچنین برای کاربردهای خاص روسازی که دارای ترافیک عبوری بالا و دمای بالایی را تجربه می‌کنند، تاثیرگذار باشد. همچنین، دلیل تفاوت ایجاد شده در مقدار $J_{nr-diff}$ در نمونه‌های اصلاح شده با SBS و پودرلاستیک به خصوصیات متفاوت این دو نوع افزودنی مربوط می‌گردد. پودرلاستیک با افزایش الاستیسیته و خاصیت ارتجاعی قیر، مقاومت در برابر تغییر شکل‌های دائمی را افزایش می‌دهد. این خصوصیت می‌تواند در دماهای بالا به ویژه تحت بارگذاری‌های سنگین مانند ترافیک سنگین یا در شرایط آب و هوایی گرم، به حفظ ساختار قیر و جلوگیری از آسیب‌های ناشی از شیارافتادگی کمک کند.

می‌تواند نشانه حساسیت این نمونه به دمای بالاتر باشد. به طوریکه، ملاحظه می‌گردد که مقدار $J_{nr-diff}$ در نمونه ۶٪ SBS به میزان ۶۵٪ نسبت به نمونه ۴٪ SBS بیشتر است. بنابراین، می‌توان اذعان کرد که نمونه ۶٪ SBS نسبت به نمونه ۴٪ SBS دارای حساسیت بیشتری به شیارشدگی است. برای قیر با درجه نفوذ ۶۰/۷۰، روند کلی مشابه روند مشاهده شده در دمای ۶۴ درجه است، اما افزایش در مقدار $J_{nr-diff}$ برای ۱۸٪ CRM کمتر است که این موضوع نشان‌دهنده پایداری بهتر در برابر افزایش دما است. از طرف دیگر، برای نمونه‌های قیر با درجه نفوذ ۸۵/۱۰۰، اختلاف برای تمامی نمونه‌ها افزایش یافته، که نشان‌دهنده کاهش انعطاف‌پذیری با افزایش دما است، ولی در درصد‌های پایین‌تر SBS همچنان پایداری نسبتاً بهتری ملاحظه می‌گردد. بنابراین، برای هر دو دمای ۶۴ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد،



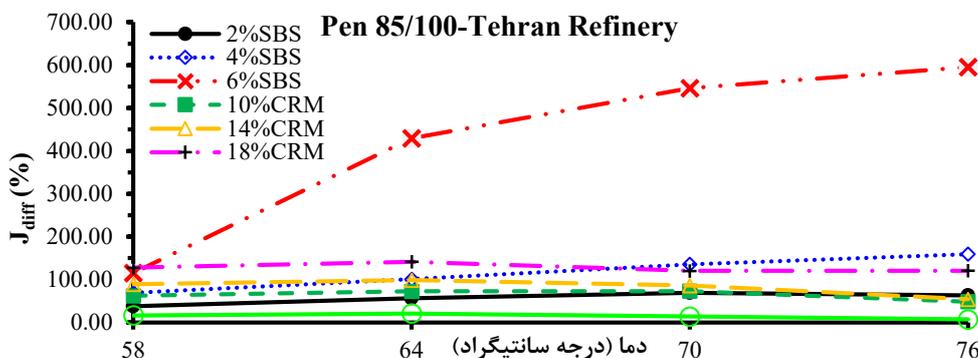
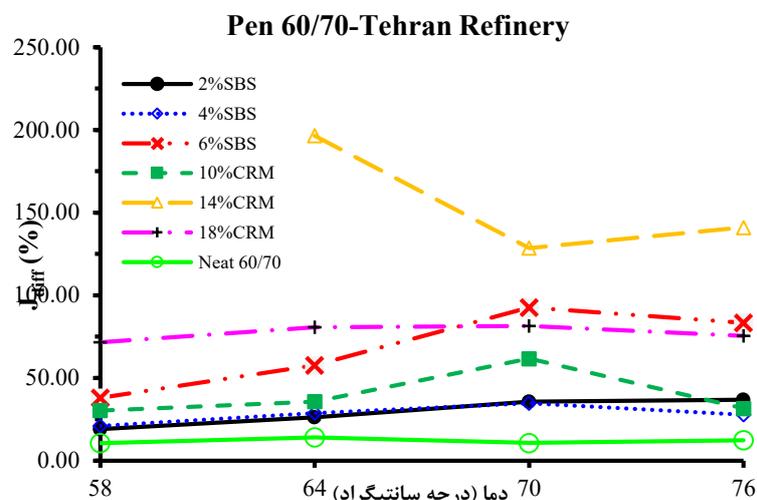
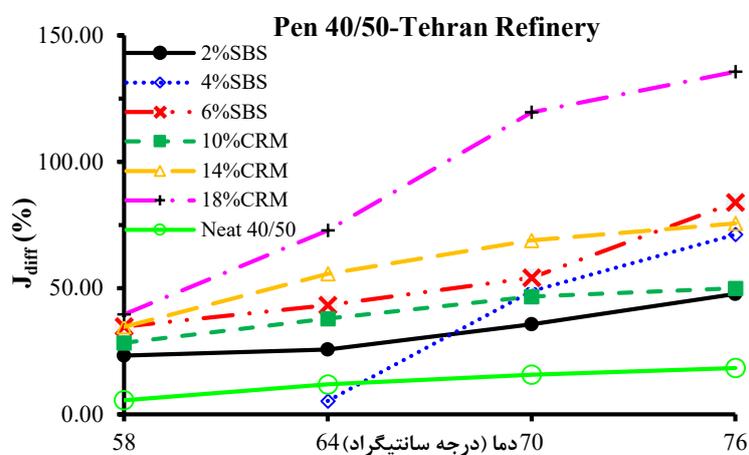
شکل ۵. میزان حساسیت قیرهای اصلاح شده پالایشگاه شیراز به سطح تنش ($J_{nr-diff}$) در دماهای مختلف

به همراه داشت، اما همچنان نسبت به قیر خالص عملکرد بهتری در برابر شیارشدگی ارائه خواهد کرد.

در دمای ۷۶ درجه سانتی‌گراد، تمامی قیرهای اصلاح شده افزایش در پارامتر $J_{nr-diff}$ را نشان دادند، اما این افزایش برای قیرهای اصلاح شده با پودر لاستیک کمتر است، که نشان دهنده بهبود خصوصیات قیر در مقاومت در برابر شیار افتادگی در دماهای بالاتر است. همچنین، نتایج تقریباً مشابهی برای نمونه‌های با درجات نفوذ ۶۰/۷۰ و ۸۵/۱۰۰ ملاحظه گردید. به طور کلی، بهبود قیر با استفاده از افزودنی‌های CRM و SBS می‌تواند عملکرد قیر را در برابر شیار افتادگی به خصوص در دماهای بالاتر بهبود بخشد. این بهبود به ویژه برای قیرهای اصلاح شده با مقادیر کمتر CRM و SBS واضح است، که نشان دهنده توانایی آن‌ها برای حفظ ساختار و مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی حتی در شرایط دمایی سخت است. این تغییرات باعث می‌شود که انتخاب نوع و مقدار افزودنی‌ها در ترکیبات قیری برای پروژه‌های راهسازی بسیار حیاتی باشد، زیرا بهبود عملکرد قیر می‌تواند به طور قابل توجهی در طول عمر و کیفیت سطوح جاده‌ای تأثیر بگذارد.

شکل ۶ میزان حساسیت قیرهای اصلاح شده به سطح تنش $(J_{nr-diff})$ را در نمونه‌های تولید شده در پالایشگاه تهران را در دماهای مختلف نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، رفتار قیرهای اصلاح شده با مقادیر مختلف SBS و CRM در دماهای متفاوت (۵۸، ۶۴، ۷۰، و ۷۶ درجه سانتی‌گراد) در مقاومت در برابر شیار افتادگی با استفاده از پارامتر $J_{nr-diff}$ قابل بررسی و مقایسه است.

به عنوان مثال، در نمونه‌های با درجه نفوذ ۴۰/۵۰، در دمای ۶۴ درجه سانتی‌گراد، قیرهای اصلاح شده با SBS درصدهای پایین‌تر، همچون ۲٪ SBS و ۴٪ SBS، مقادیر $J_{nr-diff}$ بسیار پایین‌تری نسبت به قیر خالص دارند، که نشان دهنده کارایی بهتر آن‌ها در مقاومت در برابر تغییر شکل‌های دائمی است. با این حال، با افزایش میزان SBS به ۶ درصد، میزان $J_{nr-diff}$ افزایش یافته، که ممکن است نشان دهنده حساسیت بیشتر به شیار افتادگی با افزودن ۶٪ پلیمر باشد. در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد، قیرهای اصلاح شده با CRM به ویژه با میزان ۱۰ و ۱۴ درصد، عملکرد بهتری نسبت به قیر خالص از خود نشان دادند. افزایش میزان پودر لاستیک به ۱۸ درصد اندکی افزایش $J_{nr-diff}$ را



شکل ۶. میزان حساسیت قیرهای اصلاح شده پالایشگاه تهران به سطح تنش $(J_{nr-diff})$ در دماهای مختلف

۴-۳- تغییرات رده‌های قیر مطابق با آزمایش MSCR برای قیرهای اصلاح شده با SBS

تفاوت‌های اصلی بین سیستم رده‌بندی قیر بر اساس عملکرد و بر اساس آزمایش MSCR به چگونگی رفتار قیرهای اصلاح شده در شرایط و بارگذاری‌های مختلف برمی‌گردد. سیستم PG بر اساس دمای محیط و دمای بالا و پایین‌ترین دمایی که قیر می‌تواند در برابر شیارشدگی مقاومت کند، طبقه‌بندی می‌شود. این سیستم به ارزیابی مقاومت قیر در برابر تغییرات دمایی تاکید دارد. در مقابل، آزمایش MSCR به رفتار چسبندگی و توانایی قیر برای بازیابی تغییر شکل پس از بارگذاری‌های متناوب توجه دارد. این آزمون بر اساس اندازه‌گیری مقاومت قیر در برابر شیارشدگی در دمای مشخص و تحت بارگذاری‌های تناوبی انجام می‌شود و توانایی قیر برای مقاومت در برابر کرنش تجمعی غیرقابل بازگشت و بازیابی پس از بارگذاری را ارزیابی می‌کند. در جدول ۳، تغییرات سیستم رده‌بندی قیرهای اصلاح شده با SBS با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ حاصل از پالایشگاه‌های مختلف، بر اساس روش MSCR آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، رده‌بندی‌ها بر اساس درصد SBS متفاوت است و این تفاوت در درصد اصلاح‌کننده می‌تواند تأثیر زیادی بر رفتار و عملکرد قیر داشته باشد. به عنوان مثال، نمونه‌های اصلاح شده با درصد بالاتر SBS، معمولاً مقاومت بیشتری در برابر خزش و بازیابی نشان می‌دهند و می‌توانند در برابر ترافیک سنگین‌تر مقاومت کنند. با نگاهی به نتایج موجود در جدول ۳ می‌توان ملاحظه کرد که همه نمونه‌هایی که در رده‌های H، V و E قرار گرفته‌اند، به ترتیب می‌توانند قیرهای حاصل در برابر ترافیک سنگین، ترافیک بسیار سنگین، و ترافیک فوق‌العاده سنگین مقاومت خوبی از خود نشان دهند. این نشان می‌دهد که قیرهای اصلاح شده با افزودنی SBS در این درصدها توانایی خوبی در مقابله با بارگذاری‌های سنگین دارند. با این حال، یکی از نمونه‌ها در دمای ۶۴ درجه سانتی‌گراد موفق به پاس کردن شرایط اشاره شده در استاندارد AASHTO M۳۳۲ نشده است، که می‌تواند نشان دهنده محدودیت‌هایی در دماهای بالاتر باشد. نتایج این آزمون‌ها می‌توانند برای طراحی مخلوط‌های آسفالتی که باید در شرایط خاصی عملکرد داشته باشند، مفید باشند. انتخاب قیر مناسب برای شرایط آب و هوایی و بارگذاری ترافیکی خاص، یکی از کلیدی‌ترین عوامل در افزایش عمر و کارایی روسازی است. همچنین، با بررسی قیرهای تولید شده در پالایشگاه‌های

مختلف نیز می‌توان ملاحظه کرد که استفاده از منبع قیر متفاوت می‌تواند رده‌بندی متفاوتی را ارائه کند. به عنوان مثال، همانطور که در جدول ۳ قابل ملاحظه است، نمونه ۴٪ SBS حاصل از پالایشگاه‌های تبریز، آبادان و شیراز هر سه در طبقه "V" قرار گرفته‌اند، که نشان دهنده آن است که قیرهای تولید شده از پالایشگاه‌های مذکور می‌توانند مقاومت خوبی در برابر ترافیک سنگین داشته باشند. این در حالی است که قیر حاصل از پالایشگاه تهران در رده "S" قرار گرفته است. این بدین معنی است که قیر پالایشگاه تهران می‌تواند تحت ترافیک استاندارد مقاومت خوبی از خود نشان دهد. بنابراین، می‌توان اذعان کرد که تأثیر پالایشگاه‌ها بر روی خصوصیات قیر بسیار مهم است. قیرهایی که از پالایشگاه‌های مختلف تهیه می‌شوند، ممکن است دارای ویژگی‌ها و خصوصیات گوناگونی باشند که این تفاوت‌ها می‌تواند ناشی از فرآیندهای تولید، مواد اولیه و سایر عوامل مرتبط با پالایشگاه باشند. فرایند پالایش خام برای تولید قیرها می‌تواند شامل استخراج، تقطیر، اکسیداسیون، پلیمریزاسیون و... باشد. هر پالایشگاه بر اساس تکنولوژی و رویکرد خاص خود به این فرآیندها می‌پردازد. بنابراین، قیرهای تولید شده می‌توانند از نظر ویسکوزیته، نقطه نرمی، حساسیت دمایی و مقاومت در برابر شیارشدگی و ترک خوردگی خستگی متفاوت باشند. علاوه بر این، پالایشگاه‌ها ممکن است مواد افزودنی مختلفی مانند پلیمرها را برای بهبود عملکرد قیرها اضافه کنند. این افزودنی‌ها می‌توانند به بهبود خواص الاستیک، مقاومت در برابر ترافیک سنگین و مقاومت در برابر شرایط آب و هوایی متغیر کمک کنند. همچنین، کیفیت و نوع نفت خام مورد استفاده در پالایشگاه نیز می‌تواند بر خصوصیات قیرها تأثیر بگذارد. نفت‌های خام سنگین‌تر ممکن است به طور طبیعی حاوی مقادیر بیشتری از اجزای سنگین‌تر مانند آسفالتین‌ها باشند که می‌تواند به تولید قیرها با مقاومت بیشتر منجر شود. بنابراین، انتخاب قیر مناسب برای پروژه‌های خاص، باید با در نظر گرفتن تمام این عوامل و با هدف بهینه‌سازی عملکرد روسازی در بلندمدت انجام شود. در انتخاب قیر مناسب، اطلاعات تکمیلی از پالایشگاه‌ها، مانند نتایج آزمون‌های عملکردی مانند MSCR و PG، می‌تواند بسیار کمک‌کننده باشد.

۴-۴- تغییرات رده‌های قیر مطابق با آزمایش MSCR برای قیرهای اصلاح شده با CRMB

مقاومت در برابر ترافیک با افزایش درصد پودر لاستیک، مقاومت در برابر دماهای بالا کاهش می‌یابد، که می‌تواند ناشی از تغییرات در ویسکوزیته و خواص الاستیک قیر باشد. همچنین، با مقایسه نمونه‌ها بر اساس پالایشگاه‌های مختلف، می‌توان به تأثیر فرایندهای تولیدی و مواد اولیه متفاوت پی برد. این تفاوت‌ها ممکن است بر خواص Rheology و مکانیکی قیر تأثیر بگذارند و بنابراین انتخاب قیر مناسب برای مناطق با دماهای بالا متفاوت خواهد بود. در نهایت، این نتایج نشان می‌دهند که برای بهینه‌سازی عملکرد قیرهای اصلاح شده در پروژه‌های مختلف راهسازی، باید به طور دقیق میزان افزودنی‌ها و همچنین منبع و فرایند تولید قیر در نظر گرفته شود. انتخاب قیر مناسب باید بر اساس شرایط آب و هوایی منطقه، نوع و میزان ترافیک، و البته ملاحظات اقتصادی صورت گیرد تا اطمینان حاصل شود که روسازی دارای طولانی‌ترین عمر ممکن و کمترین نیاز به تعمیر و نگهداری را خواهد داشت.

تغییرات رده‌های قیرهای اصلاح شده با پودر لاستیک را مطابق با آزمایش MSCR و استاندارد AASHTO M332 برای قیرهای تولید شده از پالایشگاه‌های مختلف با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ در جدول ۳ نشان داده شده است. با توجه به جدول ارائه شده، نمونه‌های مختلف قیر که با استفاده از پودر لاستیک با درصد‌های مختلف اصلاح شده‌اند، نشان‌دهنده تفاوت‌هایی در عملکرد بر اساس میزان افزودنی و همچنین پالایشگاه تولیدکننده هستند. همانطور که ملاحظه می‌گردد، نمونه ۱۰٪ CRM تولید شده در تمامی پالایشگاه‌ها مطابق با استاندارد AASHTO M332 در سطح "S" (ترافیک استاندارد)، "V" (ترافیک بسیار سنگین) و "H" (ترافیک سنگین) رده‌بندی شده است. اما در هر سه مورد با افزایش درصد پودر لاستیک به ۱۴٪ و ۱۸٪، نمونه‌ها در دمای ۶۴ درجه سانتی‌گراد قابل به رده‌بندی با استفاده از آزمایش MSCR نبوده، که نشان‌دهنده این است که افزایش میزان پودر لاستیک می‌تواند منجر به تضعیف عملکرد قیر در برابر دماهای بالاتر شود. این نتایج حاکی از آن است که با وجود بهبود

جدول ۳. رده‌بندی قیرهای اصلاح شده با SBS و CRMB بر اساس روش MSCR

پالایشگاه	نمونه	دمای آزمایش MSCR	طبقه‌بندی بر اساس MSCR مطابق با AASHTO M332
	SBS ۲%		ترافیک سنگین با رده H
تهران	SBS ۴%	۶۴	ترافیک استاندارد با رده S
	SBS ۶%		ترافیک خیلی سنگین با رده V
	SBS ۲%		ترافیک سنگین با رده H
شیراز	SBS ۴%	۶۴	ترافیک خیلی سنگین با رده V
	SBS ۶%		ترافیک فوق سنگین با رده E
	CRM ۱۰%		ترافیک استاندارد با رده S
تهران	CRM ۱۴%	۶۴	رد شده
	CRM ۱۸%		رد شده
	CRM ۱۰%		ترافیک سنگین با رده H
شیراز	CRM ۱۴%	۶۴	ترافیک سنگین با رده H
	CRM ۱۸%		رد شده

۵- نتیجه گیری

سنگین داشته باشند. این در حالی است که قیر حاصل از پالایشگاه تهران در رده "S" قرار گرفته است. این بدین معنی است که قیر پالایشگاه تهران می‌تواند تحت ترافیک استاندارد مقاومت مقاومت خوبی از خود نشان دهد. بنابراین، می‌توان اذعان کرد که تأثیر پالایشگاه‌ها بر روی خصوصیات قیر بسیار مهم است.

-تفاوت در مشخصات قیرهای اصلاح شده تولید شده در پالایشگاه‌های مختلف را می‌توان به عواملی همچون تفاوت در خواص ماده اولیه و یا وکیوم باتوم، درجه نفوذ قیر پایه مورد استفاده، سازگاری اصلاح کننده با قیر خالص، عوامل موثر بر فرایند اختلاط قیر خالص و اصلاح کننده، اندرکنش اصلاح کننده‌های مختلف با قیر خالص و ... نسبت داد.

- بطور کلی نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که قیرهای اصلاح شده با پلیمر SBS و CRM به طور مؤثری می‌توانند خواص قیر را بهبود بخشند و به کاهش خرابی‌های روسازی آسفالتی کمک کنند. با توجه به نتایج بدست آمده از پالایشگاه‌های شیراز و تهران، انتخاب قیر مناسب باید با در نظر گرفتن شرایط محیطی، نوع و میزان ترافیک و مشخصات محل پروژه صورت پذیرد.

در این پژوهش به بررسی عملکرد قیرهای اصلاح شده پلیمری و طبقه‌بندی آنها بر اساس آزمایش MSCR پرداخته شد. بدین منظور، عملکرد قیرهای اصلاح شده با پلیمر SBS و CRM در دماهای بالای عملکردی مختلف (۵۸، ۶۴، ۷۰ و ۷۶ درجه سانتی‌گراد) ارزیابی گردید.

- بر اساس نتایج به دست آمده، افزایش درصد SBS و CRM در قیر منجر به بهبود خواص الاستیک و مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی (شیارشده‌گی) می‌شود. این نتایج نشان می‌دهند که با افزایش درصد افزودنی‌ها، قیرها توانایی بهتری برای بازگشت به حالت اولیه خود پس از بارگذاری دارند و کمتر دچار تغییر شکل دائمی می‌شوند.

-نتایج نشان داد که درصد بازیابی (R) و کرنش تجمعی غیر قابل بازگشت (Jnr) در دماهای مختلف و برای پالایشگاه‌های مختلف متفاوت است و تفاوت‌ها به مشخصات قیرهای اصلاح شده با توجه به نوع و میزان پلیمر مورد استفاده در آنها بستگی دارد.

-نمونه ۴٪ SBS حاصل از پالایشگاه شیراز در طبقه "V" قرار خواهد گرفت، که نشان دهنده آن است که قیرهای تولید شده از پالایشگاه مذکور می‌تواند مقاومت خوبی در برابر ترافیک

۶- مراجع

-Brûlé, B. (1996). Polymer-modified asphalt cements used in the road construction industry: basic principles. *Transportation Research Record 1535(1)*: 48-53.

-Duan, H., et al. (2021). Effect of crumb rubber percentages and bitumen sources on high-temperature rheological properties of less smell crumb rubber modified bitumen. *Construction and Building Materials 277*: 122248.

-Huang, W., et al. (2024). Comprehensive study on the performance of SBS and crumb rubber composite modified asphalt based on the rubber pretreatment technology. *Case Studies in Construction Materials 20*: e03141.

-Aflaki, S. and N. Tabatabaee (2009). Proposals for modification of Iranian bitumen to meet the climatic requirements of Iran. *Construction and Building Materials, 23(6)*: 2141-2150.

-Al-Khateeb, G. G., et al. (2024). Rheology of crumb rubber-modified warm mix asphalt (WMA). *Polymers 16(7)*: 906-907.

-Albornoz, F. J. S.-C. d., et al. (2022). Ageing of crumb rubber modified bituminous binders under real service conditions. *Sustainability 14(18)*: 11189-11190.

-Baldino, N., et al. (2012). Low temperature rheology of polyphosphoric acid (PPA) added bitumen. *Construction and Building Materials 36*: 592-596.

- Navarro, F., et al. (2009). Bitumen modification with reactive and non-reactive (virgin and recycled) polymers: a comparative analysis. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 15(4): 458–464.
- Navarro, F., et al. (2004). Thermo-rheological behaviour and storage stability of ground tire rubber-modified bitumens. *Fuel* 83(14-15): 2041–2049.
- Nejad, F. M., et al. (2012). Investigating the properties of crumb rubber modified bitumen using classic and SHRP testing methods. *Construction and Building Materials* 26(1): 481–489.
- Polacco, G., et al. (2005). Asphalt modification with different polyethylene-based polymers. *European Polymer Journal* 41(12): 2831–2844.
- Wang, H., et al. (2012). Laboratory evaluation on high temperature viscosity and low temperature stiffness of asphalt binder with high percent scrap tire rubber. *Construction and Building Materials* 26(1): 583–590.
- Wong, C. C. and W.-g. Wong (2007). Effect of crumb rubber modifiers on high temperature susceptibility of wearing course mixtures. *Construction and Building Materials* 21(8): 1741–1745.
- Yildirim, Y. (2007). Polymer modified asphalt binders. *Construction and Building Materials* 21(1): 66–72.
- Zhu, J., et al. (2014). Polymer modification of bitumen: Advances and challenges. *European Polymer Journal* 54: 18–38.
- Jeong, K.-D., et al. (2010). Interaction effects of crumb rubber modified asphalt binders. *Construction and Building Materials* 24(5): 824–831.
- Lee, S.-J., et al. (2008). The effect of crumb rubber modifier (CRM) on the performance properties of rubberized binders in HMA pavements. *Construction and Building Materials* 22(7): 1368–1376.
- Li, H., et al. (2025). Investigation on high-content pretreated crumb rubber asphalt modified with polymers for sustainable and resilient pavement. *Construction and Building Materials* 465: 140163.
- Li, X., et al. (2011). Laboratory evaluation of asphalt binders and mixtures containing polyphosphoric acid. *Transportation Research Record* 2210(1): 47–56.
- Liu, Z. and Z. Wang (2022). Development of terminal blend rubber and SBS modified asphalt: A case study. *Construction and Building Materials* 334: 127459.
- Mashaan, N. S., et al. (2012). An overview of crumb rubber modified asphalt. *International Journal of Physical Sciences* 7(2): 166–170.
- Mata, D. and S. Salari (2022). Evaluation of Non-SBS Modified Binders using the Multiple Stress Creep Recovery Test, Louisiana. *Department of Transportation and Development*.
- Mull, M., et al. (2002). Fracture resistance characterization of chemically modified crumb rubber asphalt pavement. *Journal of Materials Science* 37: 557–566.

Laboratory Evaluation of Binder Types Used in Iran Based on Multiple Stress Creep Recovery System

Saeed Ahmadi, Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran.

Aghil Ghadim, M.Sc., Grad., Housing & Urban Development Research Center, Tehran, Iran.

Mohammad Rahi, M.Sc., Grad., Manager of R&D Department of Pasargad Oil Company, Tehran, Iran.

E-mail: s.ahmadi@ihu.ac.ir

Received: September 2025- Accepted: February 2026

ABSTRACT

In recent years, factors such as the exponential growth of traffic, vehicle overload, and significant differences in daily and seasonal temperatures have led to the use of modified bitumen in asphalt pavements. Asphalt mixtures require sufficient flexibility at low temperatures to prevent cracking and adequate hardness at high temperatures to prevent rutting. In this study, different specimens of bitumen produced from Shiraz and Tehran refineries were investigated at different temperatures and with three levels of penetration (40/50, 60/70, and 85/100). For this purpose, the rheological of neat bitumen and bitumen modified with SBS polymer and crumb rubber modified (CRM) at different temperatures were evaluated using the Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) test. In this regard, the effect of the parameters obtained from the MSCR test on the performance of polymer-modified bitumen at different temperatures was investigated. The results showed that the differences in the characteristics of modified bitumen produced in different refineries can be attributed to factors such as differences in the characteristics of the vacuum bottoms, the penetration of bituminous material, the compatibility of the polymer with neat bitumen, and the interaction of different polymers with neat bitumen. In this context, the specimen containing 4% SBS from the Shiraz refinery will be placed in the very high traffic level. This is while the bitumen produced from the Tehran refinery is placed in the standard traffic level.

Keywords: Modified Bitumen, SBS Polymer, Crumb Rubber, MSCR, Rutting Failure