

بررسی رفتار شیارشدگی قیرهای اصلاح‌شده با نانوکامپوزیت‌های SBS/MgO

غلامعلی شفافبخش*، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

محمدرضا علی‌اکبری بیدختی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

حسن دیواندری، گروه مهندسی عمران، واحد نوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، نوشهر، ایران

Email: Ghshafabakhsh@semnan.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۱۴ - پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۲

چکیده

شیارشدگی یکی از مهم‌ترین خرابی‌های روسازی‌های انعطاف‌پذیر می‌باشد که به‌طور چشمگیری از مشخصات قیر تأثیر می‌پذیرد. برای جلوگیری از این خرابی، لازم است از قیر با مشخصات عملکردی مناسبی در ساخت مخلوط‌های آسفالتی استفاده گردد. تحقیقات بسیاری نشان داده که قیرهای پلیمری مزیت‌های فراوانی داشته، ولی به دلیل سازگاری کم بین قیر و پلیمر در پایداری ذخیره‌سازی مشکل داشته است و در حین ذخیره‌سازی تشکیل دو فاز قیر و پلیمر را می‌دهد که باعث کاهش مشخصات عملکردی مخلوط‌های آسفالتی مانند مقاومت شیارشدگی می‌شود. بدین جهت، از قیرهای پلیمری اصلاح‌شده با نانوکامپوزیت‌ها استفاده شده است تا با افزودن نانو اکسید منیزیم به قیر پلیمری، سازگاری بین پلیمر و قیر و مشخصات عملکردی قیر بهبود پیدا کند و احتمال رخ دادن خرابی‌هایی مانند شیارشدگی کاهش یابد. تحقیق حاضر، برای ارزیابی اثر نانوذرات اکسید منیزیم بر عملکرد شیارشدگی قیرهای پلیمری انجام شده است. در این تحقیق، قیر خالص ۶۰/۷۰ با پلیمر SBS و نانوذرات اکسید منیزیم در پنج میزان مختلف اصلاح گردید. آزمایش‌های ویسکوزیته چرخشی و بازگشت خزشی در چند سطح تنش (MSCR) برای ارزیابی اثر نانوذرات بر قیر پلیمری به‌کار برده شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که نانوذرات اکسید منیزیم ویسکوزیته قیرهای پلیمری را افزایش داده است. با افزودن ۱/۲ درصد نانوذرات اکسید منیزیم به قیر پلیمری، پارامتر J_{nr} حدود ۴۰/۲۳ کاهش و میزان بازگشت حدود ۵۷/۵ درصد افزایش داشته است. این نتایج نشان می‌دهد که نانوذرات اکسید منیزیم تأثیر قابل توجهی بر بهبود عملکرد دمای زیاد قیرهای پلیمری اصلاح‌شده با نانوذرات دارد و مقاومت در برابر شیارشدگی را افزایش می‌دهد. به‌طور کلی، قیرهای اصلاح‌شده با کامپوزیت‌های SBS/MgO پتانسیل مطلوبی برای بهبود عملکرد قیر داشته و قابلیت کاربرد در مناطق گرم را دارند.

واژه‌های کلیدی: قیر پلیمری، نانوذرات اکسید منیزیم، شیارشدگی، ویسکوزیته

۱. مقدمه

خرابی شیارشدگی یکی از مهم‌ترین خرابی‌ها در روسازی‌های انعطاف‌پذیر می‌باشد که در اثر تجمع تغییرشکل‌های دائمی در لایه‌های روسازی زیر بار ترافیکی ایجاد می‌گردد و به‌طور چشمگیری بر عمر بهره‌برداری از روسازی انعطاف‌پذیر تأثیر می‌گذارد (آذرهوش و کوه میشی، ۲۰۲۰). این خرابی، به دلیل حرکات پلاستیکی و ویسکوز مخلوط‌های آسفالتی در دمای زیاد حین بهره‌برداری یا تراکم ناکافی در طول ساخت ایجاد می‌گردد. عوامل مختلفی شامل جنس و دانه‌بندی مصالح، درصد فضای خالی، نوع قیر و مقدار آن، دمای بهره‌برداری و بارگذاری ترافیکی بر رفتار شیارشدگی روسازی‌های انعطاف‌پذیر تأثیرگذار می‌باشد (ظاهر و همکاران، ۲۰۱۱) که در این بین مشخصات قیر مصرفی در مخلوط آسفالتی تأثیر مهمی در شکل‌گیری این خرابی دارد (شاه ابراهیمی و فخری، ۱۳۹۸). تحقیقات بسیاری نشان داده که با به‌کار بردن پلیمرهای مختلف در قیر، مشخصات عملکردی مخلوط‌های آسفالتی مانند مقاومت شیارشدگی و عمر بهره‌برداری از روسازی‌های آسفالتی افزایش می‌یابد (کوچینیلو و همکاران، ۲۰۱۹؛ ژیانو و همکاران، ۲۰۱۹) پلیمر، چسبندگی بین قیر و سنگدانه را افزایش می‌دهد (شو و همکاران، ۲۰۱۰). قیرهای اصلاح‌شده با پلیمر استایرن بوتادین استایرن به‌طور گسترده در مهندسی روسازی استفاده می‌شود. ولی این پلیمر هنوز دارای نقاط ضعفی می‌باشد که محققین در تلاش هستند تا آن‌ها را برطرف نمایند (ژو و همکاران، ۲۰۱۴). نگرانی اصلی که در استفاده از قیرهای اصلاح‌شده با پلیمر وجود دارد، پایداری ضعیف آن است، به نحوی که پس از ترکیب با قیر تشکیل دو فاز قیر و پلیمر می‌دهد که باعث چسبندگی ضعیف و اکسیداسیون می‌گردد (امینی و همکاران، ۲۰۱۷؛ شفابخش و همکاران، ۲۰۲۰). استفاده از افزودنی‌ها، روش معمولی است که برای غلبه بر نقائص قیرهای اصلاح‌شده مانند سازگاری کم قیر و پلیمر و یا پایداری

ذخیره‌سازی کم آن‌ها استفاده می‌شود (ژو و همکاران، ۲۰۱۴). نانوذرات، به دلیل اندازه کوچکشان و مساحت زیاد، مشخصات خاصی در مقایسه با مواد معمولی از خود نشان داده‌اند. نانوذرات، با نشان دادن مشخصات جدید و خصوصیات باورنکردنی، باعث شده‌اند تا به عنوان افزودنی در روسازی‌های آسفالتی به‌کار برده شوند (لی و همکاران، ۲۰۱۷). امروزه، نتایج تحقیقات مربوط به کاربرد نانوذرات در پلیمرها نشان داده که استفاده از نانوذرات در قیرهای پلیمری مفید بوده و باعث افزایش مشخصات قیر اصلاح‌شده است به نحوی که عمل اختلاط را راحت‌تر و سازگاری قیر و پلیمر را افزایش داده است (عربانی و همکاران، ۲۰۱۸؛ بالا و همکاران، ۲۰۱۷).

عمده خرابی‌هایی که در طول عمر بهره‌برداری از روسازی‌های انعطاف‌پذیر ایجاد می‌گردد، عمدتاً از نوع شیارشدگی یا به عبارتی دیگر تغییرشکل‌های دائمی در مسیر چرخ، ترک‌های خستگی و حرارتی می‌باشد که در این بین شیارشدگی به عنوان یک عامل اصلی در خرابی‌های زودرس در اکثر راه‌ها مطرح بوده و از اهمیت بیشتری برخوردار است (زیاری و همکاران، ۱۳۹۶). برای کاهش احتمال ایجاد خرابی‌های شیارشدگی لازم است تا با به‌کار بردن مصالح با مشخصات عملکردی مناسب از کیفیت نهایی مخلوط‌های آسفالتی اطمینان حاصل نمود. اصلاح قیر با پلیمر با وجود مزیت‌هایی مانند افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی و ترک‌های حرارتی و خستگی، هنوز دارای نواقصی می‌باشد که می‌توان به سازگاری ضعیف بین پلیمر و قیر اشاره نمود. چنانچه قیر پلیمری با سازگاری کم در ساخت مخلوط‌های آسفالتی استفاده گردد، باعث کاهش کیفیت مخلوط آسفالتی خواهد گردید. با توجه به اینکه عملکرد مخلوط‌های آسفالتی با مشخصات قیرهای مصرفی ارتباط زیادی دارد، ضرورت دارد تا نسبت به اصلاح قیرهای پلیمری اقدام گردد و مشخصات قیرهای پلیمری اصلاح‌شده ارزیابی گردد. اصلاح قیر با نانوکامپوزیت‌ها تأثیر قابل توجهی بر

مشخصات فیزیکی و رئولوژیک قیرهای اصلاح شده دارد. با وجود اینکه تحقیقات گسترده‌ای روی تأثیر نانوذرات بر قیر وجود دارد، تأثیر نانوذرات اکسید منیزیم بر قیرهای پلیمری تاکنون ارزیابی نشده است. در این تحقیق، با مقایسه نتایج به دست آمده از آزمایش‌های ویسکوزیته و MSCR، تأثیر نانوذرات اکسید منیزیم بر عملکرد دمایی زیادی قیرهای پلیمری اصلاح شده ارزیابی شده است.

۲. پیشینه پژوهش

تحقیقات زیادی برای بهبود و اصلاح مشخصات و عملکرد قیر با افزودنی‌های مختلفی مانند پلیمر، پودر لاستیک یا نانومواد انجام شده است. ترکیب پلیمرها و نانوذرات به دلیل مشخصات فیزیکی خوب آنها، اغلب مشخصات عملکردی قیر و مخلوط‌های آسفالتی را بهبود داده است. مارتینز- انزورسا و همکاران (۲۰۱۹) مشخصات قیرهای اصلاح شده با نانوکامپوزیت SBS/NanoClay را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که نانوکامپوزیت‌های SBS/NanoClay مقدار کمی نقطه نرمی و ویسکوزیته را افزایش داده و تأثیر سازگاری روی آن داشته است، به نحوی که پایداری ذخیره‌سازی بهبود یافته است. قیرهای اصلاح شده نسبت به قیرهای اصلاح نشده دارای مدول مختلط بزرگتری بوده‌اند که نشان از افزایش مشخصات ویسکوالاستیک دارد. محالی و ساهو (۲۰۱۹) تأثیر نانو اکسید تیتانیوم را به عنوان یک افزودنی ثانویه بر اصلاح قیرهای پلیمری بررسی کردند. بدین منظور، روی نمونه‌های قیری آزمایش‌های LAS^۱ و MSCR^۲ انجام شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان داده که مشخصات دمایی زیاد قیرهای اصلاح شده نسبت به قیر پایه افزایش یافته است؛ در حالی که مشخصات دمایی کم قیر، مانند خستگی در دمایی ۲۵ درجه سلسیوس، کاهش داشته است. نمونه اصلاح شده با ۴ درصد SBS و ۱ درصد نانو اکسید تیتانیوم عملکرد دمایی زیاد خوبی

داشته و مشخصات دمایی کم آن نسبت به نمونه اصلاح شده با نانوی تنها بهتر بوده است. عاملی و همکاران (۲۰۲۰) عملکرد تغییر شکل‌های دائمی قیر و مخلوط‌های ماستیک اصلاح شده با نانوکامپوزیت‌های SBS/montmorillonite را ارزیابی کردند. بدین منظور، ۹ مخلوط قیری مختلف با SBS و نانو و ترکیب SBS/Nano ساخته شده است. رفتار شیارشدگی قیرهای اصلاح شده با آزمایش MSCR و تغییر شکل دائمی مخلوط‌های SMA با به کارگیری آزمایش‌های جای چرخ هامبورگ و خزش دینامیک ارزیابی شده است. نتایج آزمایش MSCR نشان داده که قیر اصلاح شده با ۴٪ نانو و ۵ درصد SBS، کمترین مقدار J_{nr} و بزرگ‌ترین مقدار درصد بازگشت را داشته است که نشان از مقاومت بهتر در برابر شیارشدگی می‌باشد. مدول برجهدگی مخلوط‌های آسفالتی با افزایش مقدار نانو و SBS روندی افزایشی داشته و افزودن نانو و SBS مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی را افزایش داده است. بالا و همکاران (۲۰۱۸) اثر نانوذرات سیلیکا بر عملکرد قیرهای پلیمری را بررسی نمودند. در این تحقیق، از قیر خالص ۸۰/۱۰۰ با پلیمر پلی‌پروپیلن و نانوذرات نانوسیلیکا در مقادیر صفر تا ۴٪ استفاده شده است. آزمایش‌های عملکردی قیر شامل مقاومت کششی غیرمستقیم و مدل سفتی کشش غیرمستقیم برای ارزیابی اثر نانوسیلیکا به کار برده شده است. نتایج نشان داده که نانوسیلیکا مشخصات خستگی قیرهای پلیمری را بهبود می‌بخشد. همچنین، نتایج حاکی از تأثیر چشمگیر نانوسیلیکا بر بهبود مشخصات عملکردی قیرهای پلیمری بوده است. اوف و همکاران (۲۰۱۹) از دو نوع نانوذره نانورس و نانوسیلیکا برای بهبود مشخصات عملکردی قیرهای پلیمری استفاده کرده‌اند. در این تحقیق، ۹ ترکیب مختلف از قیر با SBS و نانوذرات و ترکیب آن دو ساخته شده و تحت آزمایش قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌ها نشان داده که عملکرد

۲- Multiple Stress Creep Recovery

۱- Linear Amplitude Sweep

بررسی کردند. در این تحقیق، از آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی، کشش‌پذیری و DSR برای نمونه‌های قیری و آزمایش‌های مارشال و ویل تراک برای مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده است. نتایج نشان داده که ویسکوزیته، مشخصات رئولوژیک قیر و مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی بهبود یافته است.

۳. روش تحقیق

این تحقیق، خصوصیات شیارشدگی قیرهای اصلاح‌شده با نانوکامپوزیت‌های SBS/Nano-MgO را مورد بررسی قرار می‌دهد. از نانوذرات اکسید منیزیم برای اصلاح قیرهای پلیمری ساخته‌شده با پلیمر استایرن بوتادین استایرن (SBS^۱) استفاده شده است. خصوصیات شیارشدگی قیرهای اصلاح‌شده با استفاده از آزمایش MSCR ارزیابی شده است.

۳-۱. مواد و مصالح

در این تحقیق، از قیر خالص ۶۰/۷۰ تهیه شده از پالایشگاه نفت جی استفاده شده است. مشخصات فیزیکی قیر خالص در جدول ۱ ارائه شده است. در این تحقیق، از نانوذرات اکسید منیزیم با خلوص زیاد استفاده شده است. پلیمر SBS از نوع خطی با ۳۰٪ استایرن تهیه گردیده است. پلیمر SBS دارای دانسیته متوسط 1.17 gm/cm^3 و نقطه ذوب ۱۷۰ درجه سلسیوس بوده است. شکل‌های ۱ و ۲ به ترتیب نمایی از پلیمر SBS و نانوذرات اکسید منیزیم ارائه داده‌اند.

مخلوط‌های قیری اصلاح‌شده با ترکیب نانو و پلیمر نسبت به قیرهای اصلاح‌شده با نانو بهتر بوده و مخلوط‌هایی با ۲٪ نانو و ۵ درصد SBS بهترین عملکرد را داشته‌اند. حامدی و رنجبر پیربستی (۲۰۱۹) اثر نانوکامپوزیت بر رفتار رئولوژیک قیر را ارزیابی کردند. در این تحقیق، از نانوذرات نانورس و پلیمر پلی‌اتیلن استفاده شده است. با استفاده از آزمایش‌های DSR و BBR، مشخصات قیر در دمای زیاد، میانی و کم ارزیابی شد. نتایج تحقیق نشان داده که استفاده از نانوکامپوزیت‌ها باعث افزایش مقاومت شیارشدگی، خستگی و ترک‌خوردگی شده است. قیرهای اصلاح‌شده نسبت به قیر پایه دارای نقطه نرمی بیشتر، کشش‌پذیری بهتر و درجه نفوذ کمتر بوده است. یی و همکاران (۲۰۲۰) اثر هم‌زمان نانوکامپوزیت‌های SBS/Montmorillonite و روغن‌های نفتی را بر مشخصات دمای زیاد و کم قیر بررسی کردند. نتایج آزمایش DSR نشان داده است که مشخصات دمای زیاد و کم، مشخصات پیرشدگی قیر اصلاح‌شده بهبود یافته است. شفاعخش و همکاران (۲۰۲۰) تأثیر افزودن نانو اکسید آلومینیوم بر قیرهای پلیمری را ارزیابی نمودند. در این تحقیق مشخصات دمای زیادی قیرهای اصلاح‌شده بررسی شده است. نتایج نشان داده است که افزودن نانو اکسید آلومینیوم به قیرهای پلیمری باعث بهبود مشخصات دمای زیادی قیرهای اصلاح‌شده است. موسوی نژاد و همکاران (۲۰۱۹) تأثیر نانوکامپوزیت‌های SBS/Nano-clay بر عملکرد شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره فولاد را

جدول ۱. مشخصات فیزیکی قیر پایه

روش آزمایش	محدوده استاندارد		نتایج آزمایش	واحد	مشخصات
	حداکثر	حداقل			
ASTM D5	۷۰	۶۰	۶۵	0.1 mm	درجه نفوذ
ASTM D36	---	۴۶	۴۹/۶	$^{\circ}\text{C}$	نقطه نرمی
ASTM D3289	۱/۰۶	۱/۰۱	۱/۰۱	g/cm^3	دانسیته
ASTM D92	---	۲۳۲	۳۳۶	$^{\circ}\text{C}$	نقطه اشتعال
ASTM D113	---	۱۰۰	>۱۰۰	cm	کشش پذیری
ASTM D2042	--	۹۹	۹۹/۹۷	%	حلالیت مواد قیری در تری کلرواتیلن



شکل ۱. پلیمر SBS -۱



شکل ۲. نانوذرات اکسید منیزیم

۳-۲. تهیه نمونه‌های قیر اصلاح شده

پلیمر SBS به میزان ۳٪ و نانوذره اکسید منیزیم در پنج مقدار مختلف (۳/۰، ۶/۰، ۹/۰، ۱۲/۱ و ۳ درصد) به منظور

اصلاح قیر پلیمری استفاده شده است. جهت اختلاط پلیمر و نانوذرات با قیر خالص، از دستگاه مخلوط‌کن برش بالا استفاده شده است. قیر خالص ابتدا تا دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس گرم شده و سپس افزودنی‌ها به آهستگی

برشی کنترل شده ۰/۱ کیلوپاسکال شروع و در ادامه تنش ۳/۲ کیلوپاسکال اعمال می شود. در هر سطح تنش، ۱۰ سیکل بارگذاری (۱ ثانیه بارگذاری و ۹ ثانیه استراحت) به نمونه های قیری که بین دو صفحه موازی دستگاه DSR (۲۵ میلی متر قطر و ۱ میلی متر فاصله بین دو صفحه) قرار گرفته اند اعمال می شود. در طول هر سیکل، قیر به یک نقطه اوج می رسد و قبل از اینکه دوباره تحت تنش قرار گیرد بازیابی می شود. در هر سیکل، دو پارامتر درصد بازگشت و انطباق خزشی غیرقابل بازگشت با استفاده از فرمول های زیر محاسبه می شوند و در نهایت میانگین ۱۰ سیکل هر پارامتر در هر سطح تنش گزارش می شود (فاریاس و همکاران، ۲۰۱۶؛ هوانگ و تانگ، ۲۰۱۵؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۸).

$$R \quad (1)$$

$$= \frac{\epsilon_p - \epsilon_u}{\epsilon_p} \times 100\%$$

$$J_{nr} = \frac{\epsilon_u}{\sigma} \quad (2)$$

که ϵ_u برابر با کرنش غیرقابل برگشت، ϵ_p برابر با کرنش ماکزیمم و σ سطح تنش می باشد.

میانگین J_{nr} در ۱۰ سیکل سطح تنش ۰/۱ KPa و ۳/۲ KPa به عنوان J_{nr100} و J_{nr3200} بیان می شود و همچنین میانگین درصد بازگشت در سطح تنش ۰/۱ KPa و ۳/۲ KPa به عنوان R_{100} و R_{3200} بیان می شود. علاوه بر این، پارامترهای حساسیت تنش R_{diff} و J_{nr_diff} با استفاده از فرمول های زیر محاسبه می گردند:

$$J_{nr_diff} \quad (3)$$

$$= \frac{J_{nr3200} - J_{nr100}}{J_{nr100}}$$

$$\times 100$$

$$R_{diff} = \frac{R_{100} - R_{3200}}{R_{100}} \quad (4)$$

که J_{nr_diff} اختلاف بین انطباق خزشی غیرقابل بازگشت در دو سطح تنش ۱۰۰ و ۳۲۰۰ پاسکال (٪) و R_{diff} اختلاف بین درصد بازگشت در دو سطح تنش ۱۰۰ و ۳۲۰۰ پاسکال (٪) است.

آزمایش MSCR برای توصیف مشخصات

جهت جلوگیری از کلوخه شدن به آن اضافه شده است و پس از آن، مخلوط به مدت ۱/۵ ساعت در دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه هم زده شده است.

۳-۳-۳. آزمایش ها

۳-۳-۱. آزمایش ویسکوزیته

در این تحقیق، از آزمایش ویسکوزیته چرخشی جهت اندازه گیری ویسکوزیته قیرهای اصلاح شده استفاده شده است. آزمایش ویسکوزیته برای تمام نمونه ها در دمای ۱۳۵ درجه سلسیوس مطابق با استاندارد ASTM D-4402 انجام شده است.

۳-۳-۲. آزمایش پایداری ذخیره سازی

آزمایش پایداری ذخیره سازی قیرهای اصلاح شده جهت بررسی سازگاری بین قیر و پلیمر انجام شده است. نمونه های قیر اصلاح شده در لوله های آلومینیومی ریخته شده و به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۱۶۳ درجه سلسیوس قرار داده شده و پس از آن به مدت ۴ ساعت در فریزر با دمای ۱۰- درجه سلسیوس قرار داده شده اند. سپس، لوله آلومینیومی به سه قسمت مساوی بریده شده و اختلاف نقطه نرمی بین نمونه بالا و پایین لوله آلومینیومی اندازه گیری شده است. چنانچه اختلاف نقطه نرمی بین نمونه بالا و پایین لوله کمتر از ۲/۵ درجه سلسیوس باشد، نمونه اصلاح شده به عنوان قیر اصلاح شده با پایداری ذخیره سازی خوب در نظر گرفته می شود (ون و همکاران، ۲۰۰۲).

۳-۳-۳. آزمایش بازگشت خزشی در چند سطح تنش

(MSCR)

آزمایش MSCR روی نمونه های قیر با دستگاه DSR مطابق با استاندارد AASHTO TP70 انجام شده است. این آزمایش در دو دمای متفاوت ۶۴ و ۷۶ درجه سلسیوس انجام شده است. آزمایش MSCR با تنش

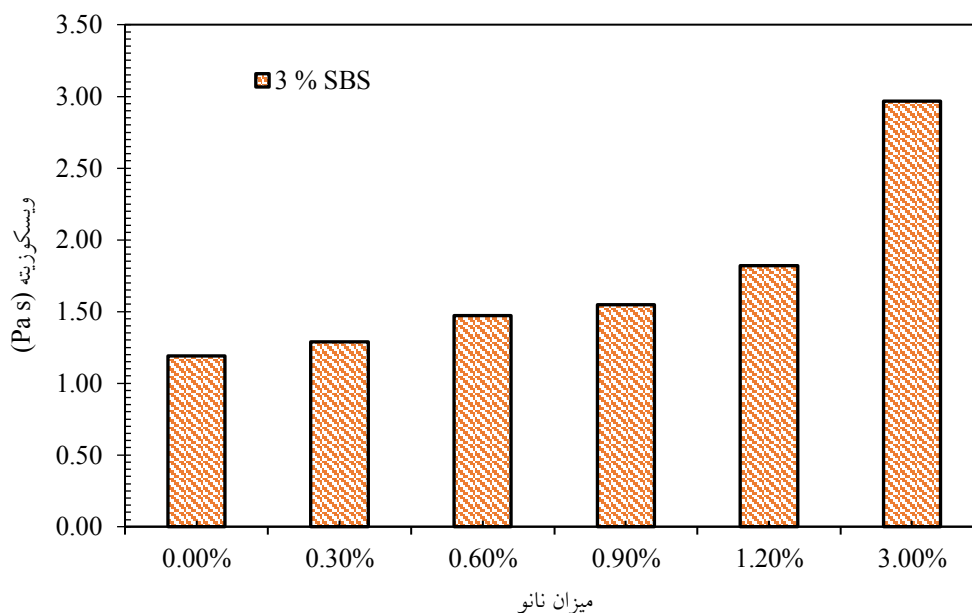
است. همان‌طور که مشهود است، ویسکوزیته قیرهای پلیمری با افزایش مقدار نانوذرات افزایش می‌یابد که به معنی افزایش ضخامت قیر و پوشش بهتر سنگدانه‌ها در مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد. تمام نمونه‌های قیر اصلاح‌شده معیار استاندارد سوپریو در دمای ۱۳۵ درجه سلسیوس را رعایت کرده و مقداری کمتر از ۳ Pa.s داشته‌اند (لی و همکاران، ۲۰۱۳). ویسکوزیته، با افزودن نانوذرات در قیر پلیمری افزایش یافته است که به نظر می‌رسد رفتار قیر به حساسیت به دما را بهبود بخشد؛ اگرچه ویسکوزیته زیاد باعث افزایش دمای اختلاط و تراکم مخلوط‌های آسفالتی می‌گردد (سینگ و همکاران، ۲۰۱۷).

شیارشدهگی قیرها به کار برده شده است. پارامتر J_{nr} تغییرشکل‌های تجمعی قیر که مانع از بازگشت آن به حالت اولیه می‌شود را بیان می‌کند و پارامتر درصد بازگشت به توانایی قیر برای بازگشت به شرایط اولیه بعد از بارگذاری برمی‌گردد. بنابراین، قیر هرچه J_{nr} کمتر و R بزرگ‌تری داشته باشد در مقابل شیارشدهگی مقاوم‌تر می‌باشد (بالدی و همکاران، ۲۰۱۶).

۴. نتایج

۴-۱. نتایج آزمایش ویسکوزیته

اثر افزودن نانوذرات اکسید منیزیم در مقادیر مختلف بر ویسکوزیته قیرهای پلیمری در شکل ۳ نشان داده شده



شکل ۳. نتایج آزمایش ویسکوزیته بر اساس درصدهای مختلف نانو اکسید منیزیم

رخ نداده است. قیرهای پلیمری اصلاح‌شده با نانوکامپوزیت‌های SBS/MgO در تمام نمونه‌ها، پایداری ذخیره‌سازی خوبی در دمای زیاد نشان داده‌اند. به‌طور کلی، قیرهای اصلاح‌شده با نانوکامپوزیت‌های SBS/MgO پایداری خوبی نسبت به قیرهای اصلاح‌شده با SBS دارند.

۴-۲. نتایج پایداری ذخیره‌سازی

نتایج پایداری ذخیره‌سازی قیرهای اصلاح‌شده با نانوکامپوزیت‌های SBS/MgO در جدول ۲ ارائه شده است. اختلاف نقطه نرمی بین قسمت بالا و پایین نمونه‌های قیری اصلاح‌شده کمتر از ۲/۵ درجه سلسیوس می‌باشد که نشان می‌دهد جدا شدن فازهای قیر و پلیمر

جدول ۲. نتایج آزمایش پایداری ذخیره‌سازی

درصد نانو	نقطه نرمی بخش بالای نمونه	نقطه نرمی بخش پایین نمونه	اختلاف نقطه نرمی
۰	۶۴	۵۸/۵	۵/۵
۰/۳	۶۱/۵	۵۹/۵	۲
۰/۶	۶۲/۵	۶۲	۰/۵
۰/۹	۶۲	۶۱/۵	۰/۵
۱/۲	۶۳	۶۳	۰
۳	۶۳/۵	۶۳	۰/۵

۳-۴. نتایج آزمایش MSCR

۳-۴-۱. بررسی پارامترهای شیارشدگی آزمایش

MSCR

این آزمایش روی نمونه‌های قیر پیر شده کوتاه‌مدت (RTFO)^۱ در دو دمای مختلف ۶۴ و ۷۶ درجه سلسیوس انجام شده است. ابتدا پارامتر J_{nr} که یکی از اصلی‌ترین پارامترهای خروجی این آزمایش می‌باشد، برای قیرهای اصلاح‌شده مورد بحث در این تحقیق در دماهای مختلف ارائه گردیده است. شکل ۴ مقدار J_{nr} برای قیرهای پلیمری حاوی ۳ درصد SBS اصلاح‌شده با نانوذرات اکسید منیزیم در دمای ۷۶ را نشان می‌دهد. در دمای ۷۶ درجه سلسیوس، مقدار J_{nr} با افزایش میزان نانوذرات از صفر تا ۱/۲ درصد روند نزولی داشته و به‌طور قابل توجهی مقدار J_{nr} کاهش یافته است که به معنی بهبود مشخصات دمای زیاد می‌باشد و با افزایش میزان نانوذرات از ۱/۲ تا ۳ درصد، روند افزایشی داشته است که نشان می‌دهد نانوذرات اکسید منیزیم در مقادیر کم تأثیر مثبتی بر مشخصات دمای زیاد قیر داشته و برای مقادیر زیاد نانو تأثیر منفی دارد. مقدار J_{nr} در میزان نانو صفر، ۰/۶، ۱/۲، ۳ درصد در سطح تنش ۳۲۰۰ پاسکال به ترتیب برابر با ۲/۴، ۱/۹۴، ۱/۷۱، ۲/۵۹ می‌باشد. میزان کاهش J_{nr} نمونه‌های اصلاح‌شده با نانوذرات نسبت به نمونه بدون نانو به ترتیب برای نمونه‌های ۰/۳، ۰/۶،

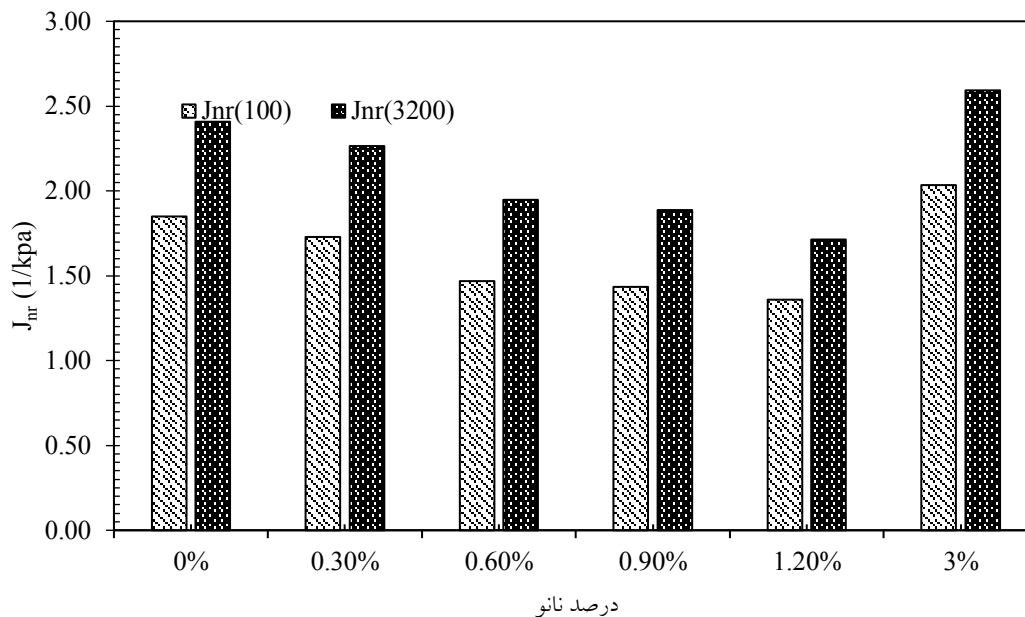
۰/۹، ۱/۲ درصد نانو برابر با ۵/۸۴، ۱۹/۰۲، ۲۱/۵۳ و ۲۸/۸۵ درصد می‌باشد که نشان از تأثیر برجسته مقدار نانو ۰/۶ درصد در بهبود مشخصات دمای زیاد قیر دارد. میزان افزایش J_{nr} در نمونه‌های اصلاح‌شده با ۳٪ نانو، برابر با ۷/۶۷ درصد می‌باشد. شکل ۵، مقدار J_{nr} برای قیرهای پلیمری حاوی ۳ درصد SBS اصلاح‌شده با نانوذرات منیزیم در دمای ۶۴ درجه سلسیوس را نشان می‌دهد. در دمای ۶۴ درجه سلسیوس، مشابه با دمای ۷۶ درجه سلسیوس، با افزایش میزان نانوذرات از صفر تا ۱/۲ درصد، مقدار J_{nr} کاهش یافته و برای میزان نانو ۳٪، J_{nr} افزایش یافته است. در سطح تنش ۳۲۰۰ پاسکال، مقدار J_{nr} در نمونه‌های ۰/۳، ۰/۶، ۰/۹، ۱/۲ و ۳ درصد نانو نسبت به نمونه بدون نانو به ترتیب ۱۲/۸۲، ۲۸/۷۱، ۳۴/۸۵، ۴۰/۲۳ و ۱۷/۶۸ درصد کاهش داشته است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، درصدهای مختلف نانوذرات اکسید منیزیم تا ۱/۲ درصد توانسته است باعث کاهش مقدار پارامتر J_{nr} شود. از دلایل آن می‌توان به افزایش مقاومت قیر اصلاح‌شده در برابر بارهای وارده و کاهش مقدار کرنش غیرقابل بازگشت اشاره کرد. افزایش مقدار J_{nr} می‌تواند به این دلیل باشد که در مقدار ۳٪ نانو، با توجه به میزان نانو بیشتر، نانومواد در کنار یکدیگر جمع شده و منجر به تحریف میدان نیرو شده‌اند که بر جنبه‌های مثبت نانومواد تأثیر گذاشته و منجر به اثرات منفی در مخلوط‌های قیری شده است و یا اینکه نانوذرات باعث تغییرات ساختاری زیادی شده که می‌تواند بر مشخصات قیر تأثیر منفی داشته باشد (ژو و همکاران، ۲۰۱۴).

شکل ۶، مقدار J_{nr} در سطح تنش ۱۰۰ پاسکال را نشان می‌دهد. افزایش دما از ۶۴ به ۷۶ درجه سلسیوس در تمام نمونه‌ها باعث افزایش مقدار J_{nr} شده است که این اتفاق ناشی از حساسیت قیر به حرارت می‌باشد. به طوری که در دماهای زیاد، قیر رقیق‌تر شده و خصوصیات چسبندگی و مقاومت آن در برابر نیروهای وارده کاهش

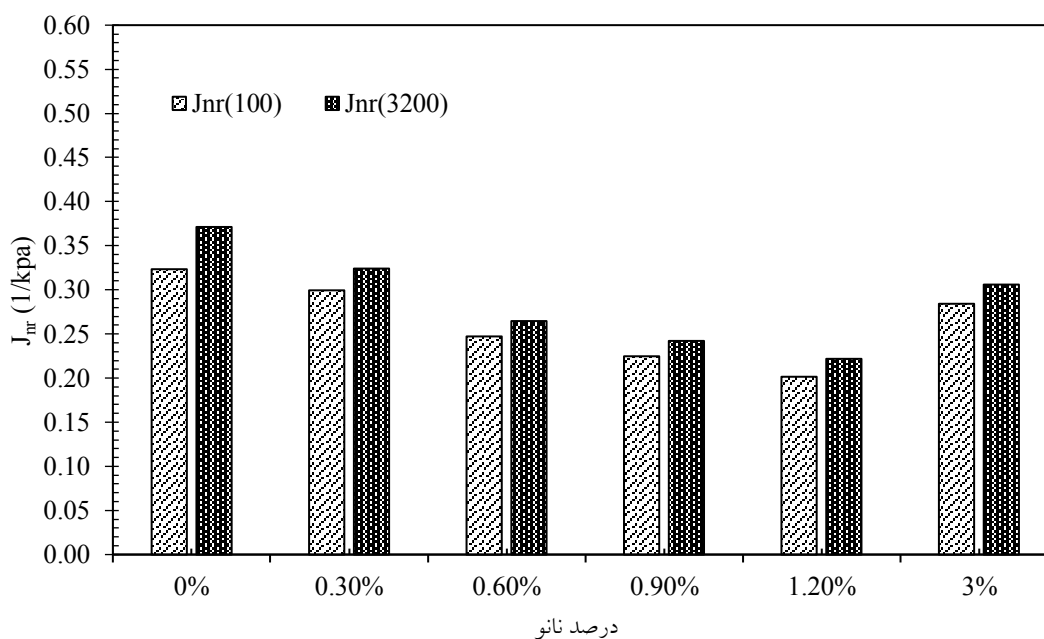
۱- Rolling Thin Film Oven

قیرها به دما و افزایش مقاومت شیارشدگی در دمای زیادتر می‌باشد.

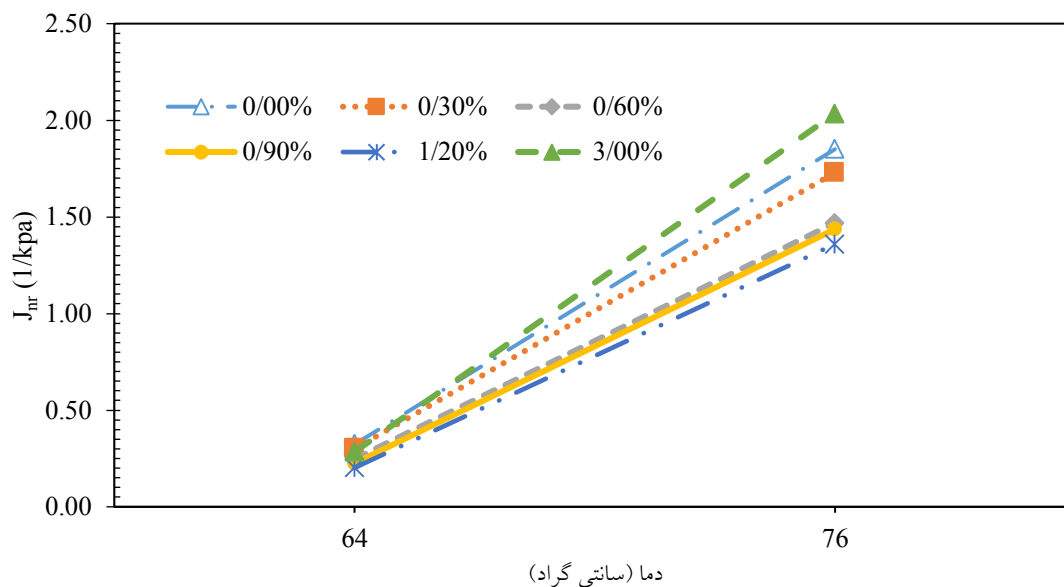
می‌یابد. افزودن نانوذرات اکسید منیزیم به قیر پلیمری تا ۱/۲ درصد باعث شده تا شیب افزایش مقدار J_{nr} با افزایش دما کاهش یابد که نشان از حساسیت کمتر این



شکل ۴. مقدار J_{nr} در دمای ۷۶ درجه سلسیوس



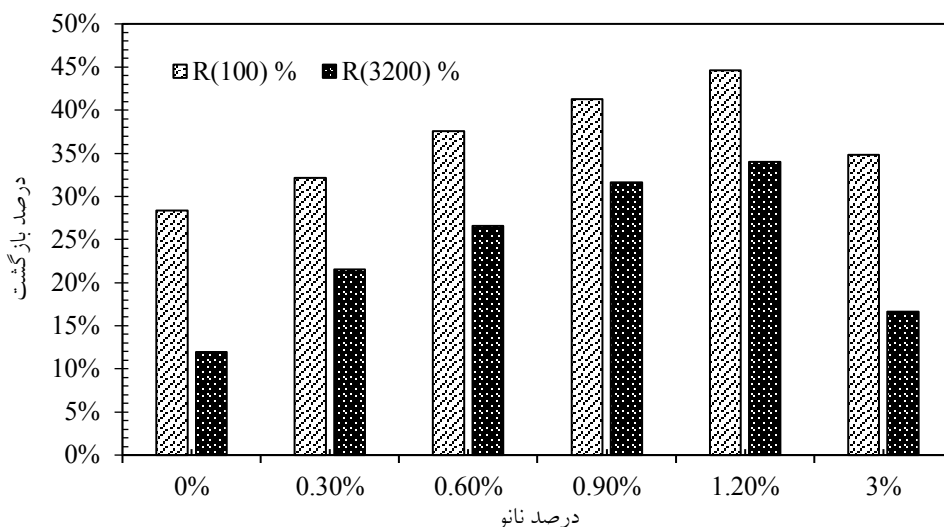
شکل ۵. مقدار J_{nr} در دمای ۶۴ درجه سلسیوس



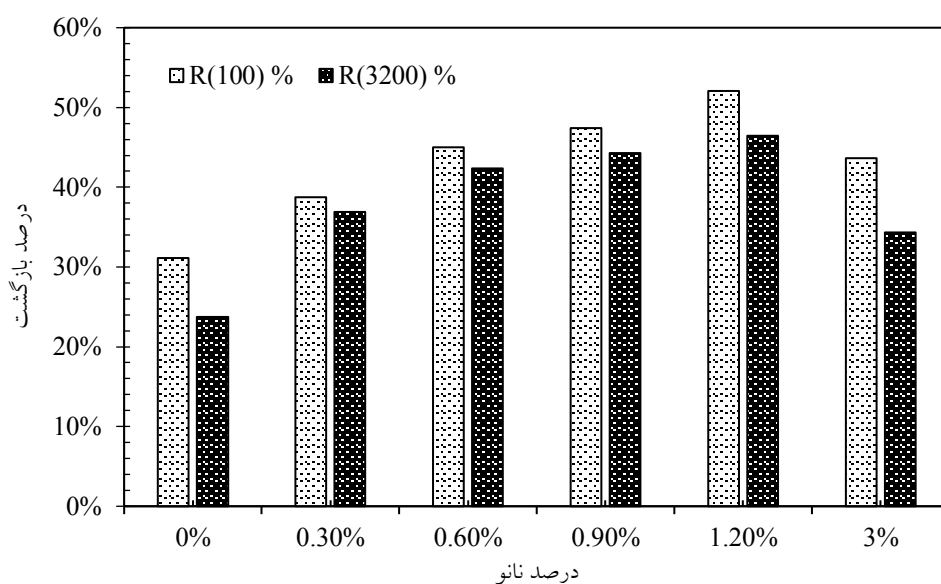
شکل ۶. مقدار J_{nr} در سطح تنش ۱۰۰ پاسکال

نشان از عملکرد بهتر قیر در برابر پدیده شیارشدگی و تغییر شکل‌های ماندگار دارد. درصد بازگشت برای قیر پلیمری اصلاح‌شده با ۱/۲ درصد نانو در هر دو دما بیشترین مقدار را داشته است که حدود ۱/۶ برابر نسبت به قیر پلیمری بدون نانو می‌باشد که این میزان افزایش نشان از تأثیر زیاد نانوذرات اکسید منیزیم بر بهبود رفتار رئولوژیک قیر دارد. کاهش مقدار درصد بازگشت و افزایش مقدار J_{nr} در نمونه قیر پلیمری اصلاح‌شده با ۳/۱ نانو نسبت به نمونه اصلاح‌شده با ۱/۲ درصد نانو نشانگر مقاومت کمتر آن در برابر شیارشدگی می‌باشد و بنابراین ممکن است خرابی‌های شیارشدگی تحت بار سنگین رخ دهد.

شکل‌های ۷ و ۸، درصد بازگشت برای قیرهای پلیمری حاوی ۳ درصد SBS اصلاح‌شده با نانوذرات منیزیم را به ترتیب در دو دمای ۷۶ و ۶۴ درجه سلسیوس نشان می‌دهند. همان‌طوری که مشاهده می‌شود، در دمای ۷۶ درجه سلسیوس، درصد بازگشت قیرهای پلیمری حاوی ۳ درصد SBS بدون نانو در سطح تنش کم برابر با ۲۸/۳۳ درصد و در سطح تنش زیاد برابر با ۱۱/۹۶ درصد بوده است. در هر دو دما، افزودن نانوذرات منیزیم، درصد بازگشت را در هر دو سطح تنش ۱۰۰ و ۳۲۰۰ پاسکال بهبود داده است. با افزایش میزان نانوذرات تا ۱/۲ درصد، درصد بازگشت روند افزایشی داشته و برای میزان نانوی ۳/۱ نسبت به نمونه حاوی ۱/۲ درصد نانو، درصد بازگشت کاهش داشته است. این افزایش درصد بازگشت



شکل ۷. درصد بازگشت در دمای ۷۶ درجه سلسیوس



شکل ۸. درصد بازگشت در دمای ۶۴ درجه سلسیوس

و تانگ، ۲۰۱۵). با این معیار، درصد بازگشت هر نمونه قیری بر اساس مقدار J_{nr} آن سنجیده می‌شود تا از پاسخ الاستیک آن اطمینان حاصل گردد. شکل ۰۹، درصد بازگشت نسبت به $J_{nr}(3200)$ را در دمای ۷۶ درجه سلسیوس نشان می‌دهد. نقطه داده مربوط به قیر پلیمری حاوی ۳ درصد SBS بدون نانوذرات در پایین منحنی قرار گرفته است. در تنش ۳/۲ کیلوپاسکال، تمام نقاط داده‌های قیرهای پلیمری حاوی ۳ درصد SBS اصلاح‌شده با نانوذرات اکسید منیزیم، به جز نمونه‌های

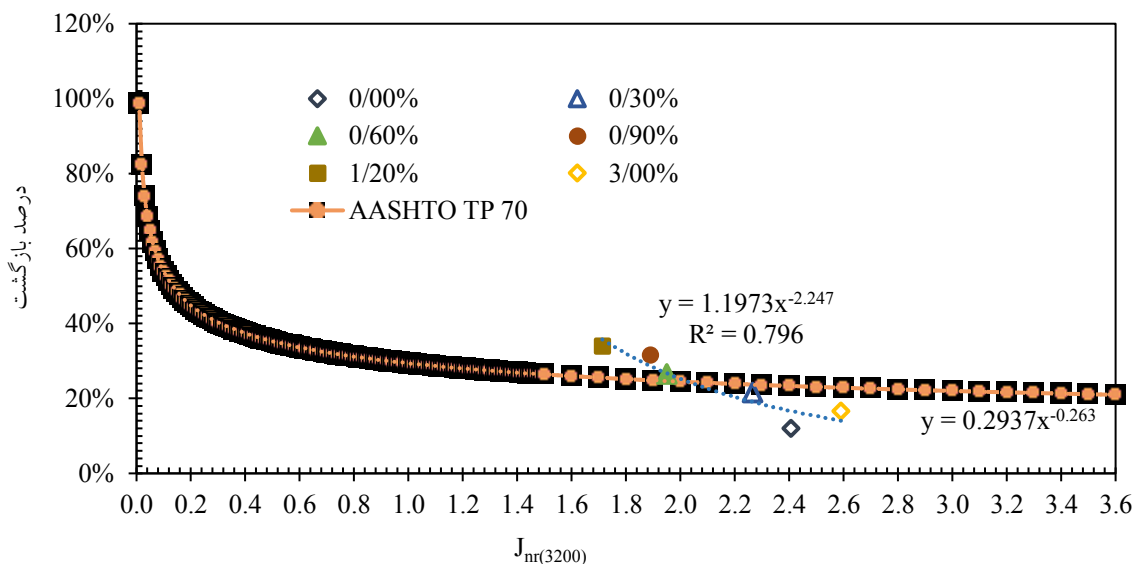
۲-۳-۴. بررسی ارتباط بین پارامترهای شیارشدگی

آزمایش MSCR

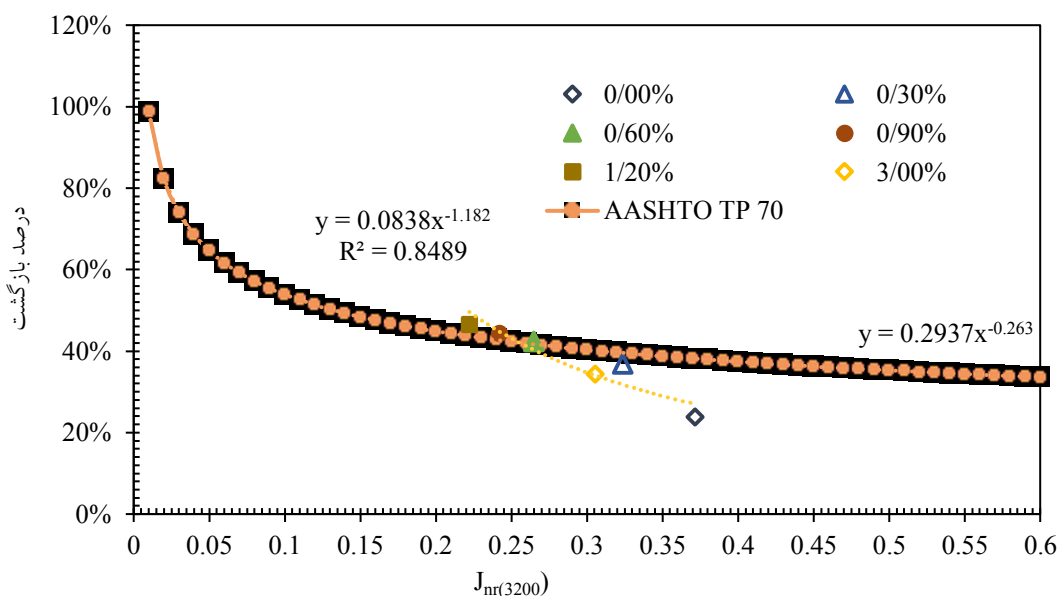
در استاندارد AASHTO TP 70، بر اساس منحنی درصد بازگشت بر حسب $J_{nr}(3200)$ ، کفایت پاسخ الاستیک تأخیری قیر اصلاح‌شده بررسی می‌شود. بدین منظور، این استاندارد منحنی معیاری برای آن در نظر گرفته است که در شکل ۹ نشان داده شده است. در صورتی که نقطه داده بالای این منحنی قرار گیرد، قیر به صورت اصلاح‌شده با پلیمر الاستومری قابل قبول در نظر گرفته می‌شود (هوانگ

می توان نتیجه گیری کرد که قیرهای پلیمری اصلاح شده با نانوذرات اکسید منیزیم به میزان ۰/۶ تا ۱/۲ درصد نانو، تمایل کمتری به تغییر شکل های دائمی داشته و بازگشت الاستیک بهتری دارند. سایر نمونه های قیری با داشتن درصد بازگشت کمتر و J_{nr} بیشتر، ملزومات لازم را برای بارهای سنگین و تقاضاهای ترافیک را نخواهد داشت.

اصلاح شده با ۰/۳ و ۳ درصد نانو، در بالای منحنی قرار گرفته اند. شکل ۱۰، درصد بازگشت نسبت به $J_{nr(3200)}$ در دمای ۶۴ درجه سلسیوس نشان می دهد. مشابه با دمای ۷۶ درجه سلسیوس، نمونه های بدون نانو و اصلاح شده با ۰/۳ و ۳ درصد نانو در پایین منحنی قرار گرفته اند. در نظر گرفتن هم زمان پارامترهای درصد بازگشت و J_{nr}



شکل ۹. درصد بازگشت نسبت به $J_{nr(3200)}$ در دمای ۷۶ درجه سلسیوس



شکل ۱۰. درصد بازگشت نسبت به $J_{nr(3200)}$ در دمای ۶۴ درجه سلسیوس

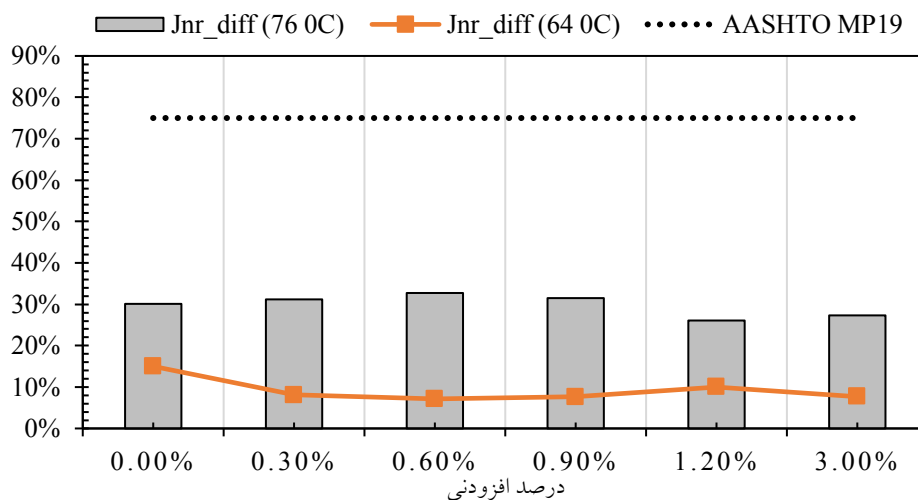
ت نسبت به $J_{nr(3200)}$ در دمای ۶۴ درجه سلسیوس

۳-۳-۴. بررسی حساسیت تنش قیرهای اصلاحی

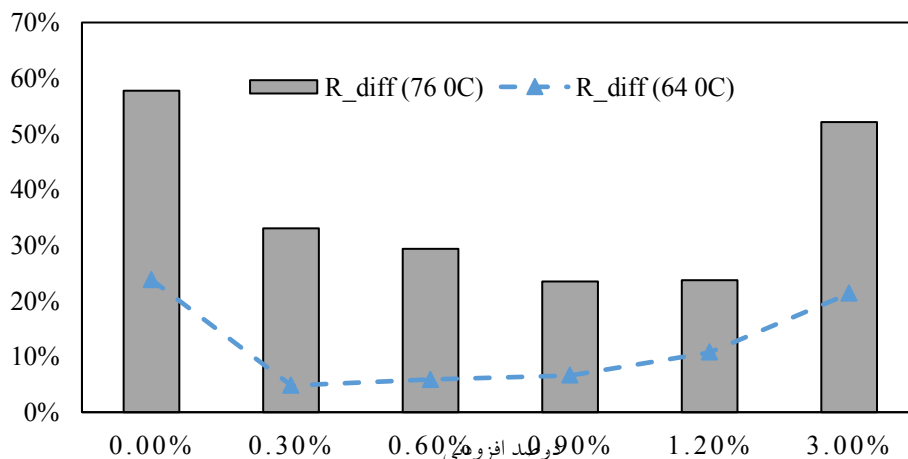
استاندارد AASHTO MP19 محدودیتی برای اختلاف مقدار J_{nr} در دو سطح تنش ۱۰۰ پاسکال و ۳۲۰۰ پاسکال ($J_{nr-diff}$) ایجاد کرده است تا نگرانی‌ها نسبت به حساسیت زیاد قیرها به تغییر تنش برشی کاهش یابد. معیار استاندارد برای $J_{nr-diff}$ برابر ۷۵٪ می‌باشد و مقدار $J_{nr-diff}$ نباید بیشتر از آن گردد (آلوز گاما و همکاران، ۲۰۱۶). شکل ۱۱، پارامتر حساسیت تنش $J_{nr-diff}$ را در دو دمای ۷۶ و ۶۴ درجه سلسیوس نشان داده است. آنالیز نتایج $J_{nr-diff}$ نمونه‌ها نشان می‌دهد که تمام نمونه‌ها مقداری کمتر از معیار AASHTO MP19 داشته‌اند که به معنی حساسیت کم نمونه‌ها به تغییرات سطح تنش

می‌باشد. رابطه مشخصی بین حساسیت تنش و مقدار نانوذرات اکسید منیزیم وجود نداشت.

شکل ۱۲، پارامتر حساسیت تنش R_{diff} را در دو دمای ۷۶ و ۶۴ درجه سلسیوس نشان داده است. در دمای ۷۶ درجه، با افزایش میزان نانو تا ۱/۲، مقدار R_{diff} روند کاهشی داشته که به معنی آن است که نانوذرات اکسید منیزیم باعث کاهش حساسیت تنش شده‌اند و برای میزان نانو ۳٪ نسبت به نمونه حاوی ۱/۲ درصد نانو، مقدار R_{diff} افزایش داشته است. در دمای ۷۶ درجه سلسیوس، کمترین مقدار R_{diff} در میزان نانو ۱/۲ درصد و در دمای ۶۴ درجه سلسیوس کمترین مقدار R_{diff} در میزان نانو ۰/۳ درصد مشاهده شده است.



شکل ۱۱. $J_{nr-diff}$ قیرهای پلیمری حاوی ۳ درصد SBS اصلاح شده با نانوذرات اکسید منیزیم



شکل ۱۲. R_{diff} قیرهای پلیمری حاوی ۳ درصد SBS اصلاح شده با نانوذرات اکسید منیزیم

۵. نتیجه‌گیری

افزایش و درصد بازگشت کاهش یافته است که نشان می‌دهد مقاومت شیارشدگی قیرهای اصلاحی با افزایش دما و سطح تنش کاهش می‌یابد.

- با در نظر گرفتن هم‌زمان پارامترهای درصد بازگشت و J_{nr} می‌توان نتیجه‌گیری کرد که قیرهای پلیمری اصلاح‌شده با نانوذرات اکسید منیزیم به میزان ۰/۶ تا ۱/۲ درصد نانو، تمایل کمتری به تغییرشکل‌های دائمی داشته و بازگشت الاستیک بهتری دارند. سایر نمونه‌های قیری با داشتن درصد بازگشت کمتر و J_{nr} بیشتر، ملزومات لازم را برای بارهای سنگین و تقاضاهای ترافیک را نخواهند داشت.
 - قیر پلیمری بدون اصلاح با نانوذرات اکسید منیزیم، پاسخ الاستیک تأخیری مناسبی مطابق با استاندارد AASHTO TP70 نداشته است. در حالی که با افزودن ۰/۶ تا ۱/۲ درصد نانو به قیر پلیمری، پاسخ الاستیک کافی را داشته‌اند.
 - برای تمام نمونه‌ها، J_{nr} کمتر از مقدار استاندارد AASHTO MP19 بوده است که نشان می‌دهد قیرهای اصلاحی حساسیت کمی به تغییرات تنش داشته‌اند.
- به‌طور کلی، نتایج آزمایش‌ها نشان داد که نانوذرات اکسید منیزیم در مقادیر بین ۰/۶ تا ۱/۲ درصد باعث بهبود عملکرد در دمای زیاد قیرهای پلیمری می‌گردد. استفاده از نانواکسید منیزیم می‌تواند باعث افزایش مقاومت شیارشدگی و ویسکوزیته قیر اصلاحی و کاهش حساسیت تنشی و دمایی آن گردد.

در این تحقیق، تأثیر نانوذرات اکسید منیزیم بر مشخصات شیارشدگی قیرهای پلیمری ارزیابی گردید. مشخصات شیارشدگی و ویسکوزیته قیرهای پلیمری با استفاده از آزمایش‌های ویسکوزیته و MSCR بررسی شد. با توجه به خروجی آزمایش‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- افزودن نانوذرات اکسید منیزیم به قیرهای پلیمری باعث بهبود سازگاری بین پلیمر و قیر و ایجاد پایداری ذخیره‌سازی شده است.
- ویسکوزیته قیر پلیمری با افزودن نانوذرات افزایش یافته است که به نظر می‌رسد حساسیت قیر به دما را بهبود بخشد، اگرچه ویسکوزیته زیاد باعث افزایش دمای اختلاط و تراکم مخلوط‌های آسفالتی می‌گردد.
- افزودن نانوذرات اکسید منیزیم به قیرهای پلیمری باعث کاهش مقدار J_{nr} و افزایش درصد بازگشت قیر شده است. بر اساس مقادیر به‌دست‌آمده برای پارامترهای J_{nr} و درصد بازگشت در آزمایش MSCR، می‌توان دریافت که بهبودی چشمگیری در شیارشدگی قیرهای پلیمری اصلاح‌شده با نانوذرات اکسید منیزیم، در مقایسه با قیرهای پلیمری بدون نانو، وجود دارد.
- نتایج نشان می‌دهد که عملکرد دمای زیادی قیرهای پلیمری اصلاح‌شده با نانوذرات اکسید منیزیم به‌شدت از میزان نانو، سطح تنش و دمای آزمایش تأثیر می‌پذیرد. با افزایش سطح تنش و دما، J_{nr}

۶. مراجع

- زیاری، ح.، دیواندری، ح. و شالچی طوسی، ح. ۱۳۹۶. "ارائه مدل تعیین چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی آسفالت با استفاده از پارامترهای آزمایش مارشال". مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۳(۳): ۵۴-۳۷.
- شاه ابراهیمی، ا. و فخری، م. ۱۳۹۸. "بررسی اثر ترکیب پلیمرها بر حساسیت رطوبتی و شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی داغ". مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۵(۲): ۱۷-۳۴.
- Alves Gama, D., Rosa Júnior, J. M., Alves de Melo, T. J. and Rodrigues Guedes, J. K. 2016. "Rheological studies of asphalt modified with elastomeric polymer". *Constr. Build. Mater.*, 106: 290-295. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.142>
- Ameli, A., Babagoli, R., Khabooshani, M., AliAsgari, R. and Jalali, F. 2020. "Permanent deformation performance of binders and stone mastic asphalt mixtures modified by SBS/montmorillonite nanocomposite". *Constr. Build. Mater.*, 239: 117700. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117700>
- Amini, B., Rajablookat, M. J., Abdi, A. and Salehfard, R. 2017. "Investigating the influence of using nanocomposites on storage stability of modified bitumen and moisture damage of HMA". *Petrol. Sci. Technol.*, 35(8): 800-805. <https://doi.org/10.1080/10916466.2017.1292292>
- Arabani, M., Tahami, S. A. and Hamedi, G. H. 2018. "Performance evaluation of dry process crumb rubber-modified asphalt mixtures with nanomaterial". *Road Mater. Pavement Design*, 19(5): 1241-1258. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1302356>
- Azarhoosh, A. and Koohmishi, M. 2020. "Investigation of the rutting potential of asphalt binder and mixture modified by styrene-ethylene/propylene-styrene nanocomposite". *Constr. Build. Mater.*, 255: 119363. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119363>
- Bala, N., Kamaruddin, I., Napiah, M. and Danlami, N. 2017. "Rheological and rutting evaluation of composite nanosilica/polyethylene modified bitumen". *IOP Conference Series: Mater. Sci. Eng.*, 201(1): 012012. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/201/1/012012>
- Bala, N., Napiah, M. and Kamaruddin, I. 2018. "Effect of nanosilica particles on polypropylene polymer modified asphalt mixture performance". *Case Stud. Constr. Mater.*, 8: 447-454. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.03.011>
- Baldi-sevilla, A., Montero, M. L., Aguiar, J. P. and Loria, L. G. 2016. "Influence of nanosilica and diatomite on the physicochemical and mechanical properties of binder at unaged and oxidized conditions". *Constr. Build. Mater.*, 127: 176-182. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.140>
- Cuciniello, G., Leandri, P., Filippi, S., Lo Presti, D., Polacco, G., Losa, M. and Airey, G. 2019. "Microstructure and rheological response of laboratory-aged SBS-modified bitumens". *Road Mater. Pavement Design*. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1621771>
- Farias, L. G. A. T., Leitinho, J. L., Amoni, B. de C., Bastos, J. B. S., Soares, J. B., Soares, S. de A. and de Sant'Ana, H. B. 2016. "Effects of nanoclay and nanocomposites on bitumen rheological properties". *Constr. Build. Mater.*, 125: 873-883. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.127>
- Hamedi, G. H. and Ranjbar Pirbasti, Z. 2020. "The effects of UHMWPE/nanoclay on rheological properties of modified asphalt binder". *Petrol. Sci. Technol.* 38(4): 309-315. <https://doi.org/10.1080/10916466.2019.1703740>
- Huang, W. and Tang, N. 2015. "Characterizing SBS modified asphalt with sulfur using multiple stress creep recovery test". *Constr. Build. Mater.*, 93: 514-521. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.041>
- Jiao, Y., Zhang, Y., Fu, L., Guo, M. and Zhang, L. 2019. "Influence of crumb rubber and tafpack super on performances of SBS modified porous asphalt mixtures". *Road Mater. Pavement Design*, 20: S196-S216. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1590223>
- Li, R., Xiao, F., Amirkhanian, S., You, Z. and Huang, J. 2017. "Developments of nano materials and technologies on asphalt materials- A review". *Constr. Build. Mater.*, 143: 633-648. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.158>
- Mahali, I. and Sahoo, U. C. 2019. "Rheological characterization of nanocomposite modified asphalt binder". *Int. J. Pavement Res. Technol.*, 12(6): 589-594. <https://doi.org/10.1007/s42947-019-0070-8>
- Martínez-Anzures, J. D., Zapién-Castillo, S., Salazar-Cruz, B. A., Rivera-Armenta, J. L., Antonio-Cruz, R. del C., Hernández-Zamora, G. and Méndez-Hernández, M. L. 2019. "Preparation and properties of modified asphalt using branch SBS/nanoclay nanocomposite as a modifier". *Road Mater. Pavement Design*, 20(6): 1275-1290. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1441062>

- Mousavinezhad, S. H., Shafabakhsh, G. and Jafari Ani, O. 2019. "Nano-clay and styrene-butadiene-styrene modified bitumen for improvement of rutting performance in asphalt mixtures containing steel slag aggregates". *Constr. Build. Mater.*, 226: 793-801. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.252>
- Ouf, M. E., Abu El-Maaty Behiry, A. E. and Shahrah, S. 2019. "Using of nano materials and additives to enhance the hot mix asphalt". *Int. J. Sci. Eng. Res.*, 10(4): 861-871.
- Shafabakhsh, G., Aliakbari Bidokhti, M. and Divandari, H. 2020. "Evaluation of the performance of SBS/Nano- Al_2O_3 composite-modified bitumen at high temperature". *Road Mater. Pavement Design*. <https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1772351>
- Shafabakhsh, G., Sadeghnejad, M. and Chelovian, A. 2015. "Experimental study on creep behavior of stone mastic asphalt by using of nano Al_2O_3 ". *Int. J. Sci. Eng. Res.*, 6(10): 903-911.
- Singh, D., Sawant, D. and Xiao, F. 2017. "High and intermediate temperature performance evaluation of crumb rubber modified binders with RAP". *Transport. Geotech.*, 10: 13-21. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.10.003>
- Taher, B. M., Mohamed, R. K. and Mahrez, A. 2011. "A review on fatigue and rutting performance of asphalt mixes". *Sci. Res. Essays*, 6(4): 670-682.
- Wen, G., Zhang, Y. Y., Zhang, Y. Y., Sun, K. and Fan, Y. 2002. "Rheological characterization of storage-stable SBS-modified asphalts". *Polym. Test.*, 21(3): 295-302.
- Xu, Q., Chen, H. and Prozzi, J. A. 2010. "Performance of fiber reinforced asphalt concrete under environmental temperature and water effects". *Constr. Build. Mater.*, 24(10): 2003-2010. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.012>
- Yao, H., You, Z., Li, L., Lee, C. H., Wingard, D., Yap, Y. K., Shi, X. and Goh, S. W. 2013. "Rheological properties and chemical bonding of asphalt modified with nanosilica". *Mater. Civ. Eng.*, 25(11): 1619-1630. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000690](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000690).
- Ye, F., Yin, W., Lu, H. and Dong, Y. 2020. "Property improvement of nano-montmorillonite/SBS modified asphalt binder by naphthenic oil". *Constr. Build. Mater.*, 243. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118200>
- Zhang, H., Chen, Z., Xu, G. and Shi, C. 2018. "Evaluation of aging behaviors of asphalt binders through different rheological indices". *Fuel*, 221: 78-88. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.087>
- Zhang, J., Li, H., Liu, P., Liang, M., Jiang, H., Yao, Z. and Airey, G. 2020. "Experimental exploration of influence of recycled polymer components on rutting resistance and fatigue behavior of asphalt mixtures". *J. Mater. Civ. Eng.*, 32(6). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003140](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003140)
- Zhu, J., Birgisson, B. and Kringos, N. 2014. "Polymer modification of bitumen: Advances and challenges". *Eur. Polym. J.* 54(1): 18-38. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.02.005>.
- Zhou, X., Zhang, G., Liu, R. and Zheng, L. 2014. "Molecular simulations of anti-aging mechanisms on nano-LDHs modified asphalt". *Key Eng. Mater.*, 599: 198-202. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.599.198>
- Yin, W., Ye, F. and Lu, H. 2017. "Establishment and experimental verification of stability evaluation model for SBS modified asphalt: Based on quantitative analysis of microstructure". *Constr. Build. Mater.*, 131: 291-302. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.041>