

ارزیابی آزمایشگاهی تاثیر نانو سیلیس بر عملکرد دمای بالای قیر

مقاله علمی - پژوهشی

امین چوبدار، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران
امین فرج الهی*، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران
علیرضاعاملی، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: AminFarajollahi@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۰۳ - پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۵

صفحه ۲۹۸-۲۸۳

چکیده

شیارشدهگی به عنوان اولین مکانیزم (سازوکار) شکست در اکثر شرایطهای مهم طراحی روسازیهای انعطاف پذیر، شناسایی و مورد استفاده قرار می‌گیرد. قیر به عنوان یکی از اصلی‌ترین مواد مورد استفاده در مخلوطهای آسفالتی می‌تواند نقش تعیین کننده‌ای داشته باشد و اصلاح خواص قیر می‌تواند تا حد زیادی این شکست‌ها را به تاخیر بیندازد و در برخی موارد به حداقل برساند. در این تحقیق، قیر PG 64-22 با استفاده از نانو سیلیس با درصد وزنی ۲، ۴ و ۶ درصد وزنی اصلاح شد و تأثیر این اصلاح کننده در کاهش خرابی حاصل از (شکست) شیارشدهگی نسبت به نمونه شاهد بررسی شد. پارامترهای شیارشدهگی شامل انطباق خزش غیر قابل بازیافت و خزش بازیابی شده نیز مورد ارزیابی قرار گرفت و سپس اثر نانو سیلیس بر بهبود این پارامترها در دماهای بالا با شبیه‌سازی بارگذاری دینامیکی با استفاده از رتومتر برش دینامیکی و انجام تست در سه دمای ۵۸، ۶۴ و ۷۰ درجه سلسیوس مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از بررسی رفتار قیر در حالت ویسکوالاستیک غیر خطی، تأثیر قابل توجهی در پارامترهای شیارشدهگی مشاهده شد. به طوری که در نتیجه افزودن نانو سیلیس، کرنش تجمعی نسبت به نمونه شاهد کاهش یافت و این کاهش با افزایش درصد اصلاح کننده ناشی از افزایش بازیابی خزش در پایان هر چرخه خزش بیشتر شد. همچنین نتیجه‌گیری شد که افزایش دما در تنش‌های زیاد و کم، تأثیر منفی بر کاهش درصد بازیابی تغییر شکل و انطباق خزشی غیر قابل بازیابی، هم در نمونه‌های قیر اصلاح نشده و هم در نمونه‌های قیر اصلاح شده دارد. اما مهم این است که میزان اثر نانو سیلیس بر بهبود این پارامترها منفی بود که در این تحقیق به تفصیل به آن پرداخته شد. همچنین در یک دمای معین، افزایش درصد اصلاح کننده نانو سیلیس به‌طور چشمگیری باعث افزایش و همچنین کاهش قابل توجه J_{nr} شد. در ادامه، تفاوت بازیابی خزش در تنش‌های بالا و پایین R_{diff} و تفاوت انطباق خزشی غیر قابل بازیابی در تنش‌های بالا و پایین $J_{nr,diff}$ به‌طور قابل توجهی بهبود یافت که نشان‌دهنده کاهش حساسیت نمونه‌های آسفالتی نسبت به تنش اعمال شده و همچنین افزایش قابل توجهی در مقاومت نمونه‌ها در برابر شیارشدهگی است.

واژه‌های کلیدی: قیر، بارگذاری دینامیکی، شیارشدهگی، اصلاح قیر، نانو سیلیس

۱- مقدمه

افزودنی‌های نانو در سال‌های اخیر برای بهبود عملکرد قیر و مخلوط‌های بتن آسفالتی رایج شده است (Nicholls, 1998). پلیمرهای متعددی برای اصلاح خواص قیر استفاده شده است و مانند سایر اصلاح کننده‌ها، پلیمرها نیز مزایا و

خواص فیزیکی و رئولوژیکی مخلوط‌های آسفالتی بر عملکرد روسازی در دماهای بالا و پایین محیط تأثیر می‌گذارد که به نوبه خود می‌تواند بر عملکرد نهایی مخلوط تأثیر بگذارد. افزودن اصلاح کننده‌ها مانند پلیمرها و

می‌توان گفت که عمدتاً مدول (G^*) در مقایسه با قیر کنترل شده (شاهد) اندکی کاهش یافت. با این حال، آون لایه نازک چرخشی ($RTFO^3$) عملکرد بسیار بهتری را از لحاظ شیارشدگی و ترک‌های خستگی قیر اصلاح شده نانو سیلیسی در مقایسه با قیر پایه در دماهای بالا هم قبل و هم بعد از آزمایشات فرسودگی نشان داد. همچنین، افزودن نانو سیلیس به قیر پایه پتانسیل بازیابی خزشی اعمال شده روی آسفالت را بهبود می‌بخشد. تحقیقات نشان داده است که این اصلاح کننده‌ها می‌توانند مقاومت مخلوط را در برابر ترک‌های ناشی از گرما، فرسایش و تغییر شکل دائمی افزایش دهند. به طور کلی، استفاده از فناوری نانو برای تولید مواد پربازده شامل ایجاد یک شرایط کاملاً کنترل شده و دقیق و استفاده از این شرایط برای آرایش منظم اتم‌ها و تولید مواد در مقیاس نانو است. یکی از مهمترین اشکال (خرابی) شکست در روسازی آسفالتی شیارشدگی یا کرنش (تغییر شکل) دائمی است. به عنوان اولین مکانیسم شکست و مهمترین شرایط طراحی روسازی انعطاف پذیر شناسایی و استفاده می‌شود. تغییر شکل دائمی در امتداد جهت افقی مسیر چرخ بر روی سطوح طولی ظاهر می‌شود که منجر به کاهش راندمان روسازی می‌شود و وسایل نقلیه را نامتعادل و خطرناک می‌کند. دلیل اصلی برای شیارشدگی روسازی آسفالت به عنوان "کرنش تجمعی" شناسایی شده است که نتیجه ازدحام ترافیک است. اگرچه شیارشدگی مشاهده شده در روسازی‌های انعطاف پذیر را می‌توان با جمع کردن کل کرنش تجمعی در یک یا چند لایه محاسبه کرد، تجمع کرنش پایدار در لایه سطحی روکش آسفالت منشاء شیار شدگی در نظر گرفته شده است. قابلیت شیار شدگی در روسازی عمدتاً تحت تأثیر درجه بندی و خواص مخلوط آن است. با این حال، خواص قیر نیز مهم است، به ویژه برای قیر اصلاح شده که ادعا می‌شود برای بهبود مقاومت در برابر شیار شدگی آسفالت استفاده می‌شود. آزمایش بازگشت خزشی در چند سطح تنش ($MSCR^4$) بر اساس ایالات متحده و یک پارامتر پذیرفته شده غیرقابل بازیابی برای تعیین بهتر عملکرد قیر در دمای بالا پیشنهاد شد. J_{nr} به عنوان یک جایگزین برای پارامتر شیارشدگی، می‌تواند به طور دقیق مقاومت به شیارشدگی و ظرفیت قیر را ارزیابی کند. آزمایش $MSCR$ را روی قیر خالص و قیر اصلاح شده پلیمری انجام داد. نتایج نشان داد که آزمایش

معایب خاص خود را دارند و باید رفتار قیر را به رفتار ایده‌آل نزدیک کنند. پلیمرهای مختلف می‌توانند در قیر محلول یا نامحلول باشند. به عنوان مثال، استایرن-بوتادین استایرن (SBS^1) در گروه الاستومرها قرار می‌گیرد که باعث بهبود انعطاف پذیری قیر در دماهای پایین می‌شود. تحقیقاتی را در مورد اثرات پلیمر SBS بر عملکرد قیر و تأثیر آن بر روی آسفالت ماستیک سنگی (دانه درشت) (SMA^2) انجام دادند (Al-hadidy et al, 2011; Khodai et al, 2009; Awanti et al, 2013). نتایج نشان داد که افزودن پلیمر SBS باعث بهبود عملکرد قیر در دماهای بالا و پایین می‌شود. محققانی از افزودنی الیاف شیشه برای اصلاح مخلوط آسفالت داغ استفاده کردند (Fakhri et al, 2017). همچنین در تحقیقی آزمایشاتی (Morea et al, 2018) را برای ارزیابی اثر آن بر شیارشدگی و مقاومت در برابر رطوبت انجام دادند و نتایج بهبود قابل توجهی را در خواص آسفالت نشان داد. کولارس و همکاران با بررسی اثر افزودن آهک هیدراته بر تولید آسفالت (Kollaros, 2017)، به این نتیجه رسیدند که استفاده از آهک به عنوان پرکننده در مخلوط‌های آسفالتی داغ، می‌تواند استحکام مخلوط‌ها و همچنین مقاومت آن‌ها در برابر شیار شدگی را افزایش دهد. همچنین افزایش مقاومت لایه پوششی در برابر شکست توسط تقویت این لایه و اصلاح برخی از خصوصیات آن با استفاده از نانو مواد یکی از موثرترین راه حل‌ها است. خواص رئولوژیکی قیر خالص و قیر اصلاح شده توسط نانورس را ارزیابی کردند، نتایج نشان داد که افزودن نانو رس به قیر باعث افزایش قابل توجه مقاومت به شیارشدگی در نمونه‌ها می‌شود. (Typeset in Frutiger by the Royal Society). در تحقیق دیگری در مورد تأثیر نانو سیلیس و لاستیک اصلاح شده بر خواص نهایی آسفالت اصلاح شده توسط خرده لاستیک (Lili et al, 2017) انجام دادند. نتایج نشان داد عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در دماهای بالا که بهبود یافته است. در تحقیق دیگری در این زمینه با عنوان "خواص و پیوند شیمیایی آسفالت و مخلوط آسفالت نانو سیلیس اصلاح شده" (Hui et al, 2012) مشخص شد که افزودن نانو سیلیس به قیر مورد استفاده در آسفالت پایه، ویسکوزیته (لزجت) قیر اصلاح شده را اندکی کاهش داد، همچنین به طور کلی

۱۰۰ نانومتر و مشخصات آنها با مواد در اندازه معمولی به دلیل اندازه کوچک و سطح بالای این مواد کاملاً متفاوت است. نانو سیلیس از پیوند شیمیایی بین ذرات کوچک SiO_2 تشکیل شده است و مزیت اصلی آن این است که محدوده سطح بالایی نسبت به سیلیس دارد و برهم کنش در بستر مورد استفاده افزایش می‌یابد. معمولاً از نانو سیلیس به عنوان یک افزودنی معدنی برای بهبود خواص قیر استفاده می‌شود. نانو سیلیس مورد استفاده در این تحقیق در اندازه ۳۰-۲۰ نانومتر بود که به عنوان مثال در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲-۳- طرح اختلاط و روش‌های آزمایش

طبق ASTM C1738 (۳۳)، قیر توسط یک میکسر با برش بالا در ۲۵۰۰ دور در دقیقه به مدت ۸۰ دقیقه در دمای ۱۴۰ درجه سلسیوس با نانومواد مخلوط شد، به طوری که همه ترکیبات همگن و یکنواخت شدند. قیر اصلاح شده در سطوح آزمایشگاهی (ابعاد کوچک) و کارگاهی (ابعاد بزرگ) تولید شد. در این آزمایش، از میکسر برشی استفاده شد. قبل از انجام تست MSCR، نمونه‌ها در حالت فرسودگی قرار گرفتند. فرآیند فرسایندگی توسط دستگاه RTFO در دمای ۱۶۴ درجه سانتیگراد به مدت ۹۰ دقیقه انجام شد. فرسودگی قیر ناشی از تبخیر روغن‌های سبک آن و اکسید شدن (واکنش با اکسیژن محیط) است.

در هنگام تولید آسفالت گرم و در طول با جابه‌جایی آن، قیر به دلیل دمای بالا و جریان هوا در هر دو مکانیسم فرسوده می‌شود. همانطور که توضیح داده شد، این آزمایش، فرسودگی را مدل می‌کند و میزان کاهش جرم را نشان می‌دهد. هدف دیگر از این آزمایش، تهیه قیر فرسوده برای سایر آزمایشات مورد استفاده برای ارزیابی خواص فیزیکی SHRP است. کاهش جرم مواد فرار نشانه‌ای از فرسودگی است که در طی عملیات اختلاط و تولید در قیر رخ می‌دهد. برای هر نوع چسب، کاهش وزن نباید بیش از ۱٪ باشد. در این تحقیق از مدل پترو تست دستگاه RTFO (ساخت آلمان) استفاده شد. تست MSCR در حالت ویسکوالاستیک غیرخطی با تغییر در سطوح تنش ۱۰۰ و ۳۲۰۰ پاسکال و ۱۰ سیکل (۱ ثانیه بارگذاری و ۹ ثانیه استراحت) برای هر یک از این مقادیر تنش (شامل مجموعاً ۲۰ سیکل، بدون استراحت

MSCR می‌تواند ویژگی‌های مقاومت شیارشدگی هر دو را تشخیص دهد و رابطه بهتری با شیار شدگی مخلوط، همراه با نتایج آزمایش MSCR در مقایسه با استانداردهای قیر موجود، فراهم کند. نتایج آزمایش MSCR را تجزیه و تحلیل کرد و دریافت که آزمایش MSCR برای قیر اصلاح شده و استاندارد و رابطه J_{nr} با نتایج آزمایش ردیابی چرخ با تنش بالای سطوح آزمایش MSCR متناسب است. آزمایش MSCR به عنوان جایگزینی برای آزمایش AASHTO M-320 بر روی قیر در دماهای بالا استفاده می‌شود که همچنین تعداد نمونه‌ها را در هر سطح از ایجاد تنش را کاهش می‌دهد. نتایج آزمایش MSCR همچنین می‌تواند به عنوان جایگزینی برای آزمایشات مختلف SHRP^۶ استفاده شود. که علاوه بر توصیف خواص اساسی، نتایج این آزمایش به راحتی اطلاعات مربوط به عملکرد تنشی را به کاربر می‌دهد. در پژوهش حاضر، تأثیر افزودنی نانو سیلیس بر اصلاح درجات عملکرد به منظور ارائه یک راه حل مناسب برای افزایش ظرفیت روسازی‌های آسفالتی در برابر بارهای دینامیکی مورد ارزیابی قرار گرفت. در حالی که مطالعات متعددی برای ارزیابی عملکرد مواد نانو بر روی بایندر انجام شده است، این مقاله نتایج یک مطالعه آزمایشگاهی را برای ارزیابی مقاومت به شیارشدگی قیر شاهد و قیر اصلاح شده با نانو سیلیس ارائه می‌دهد. نمونه‌های حاوی ۰، ۲، ۴ و ۶ درصد نانو سیلیس در آزمایشگاه تهیه و به‌طور مصنوعی در آون فرسوده شدند. پارامترهای به دست آمده از آزمون MSCR برای ارزیابی عملکرد مقاومت به شیارشدگی استفاده شد.

۲- مواد و تست‌های آزمایشگاهی

۲-۱- قیر

در این تحقیق از قیر PG 64-22^۶ استفاده شد شرکت پالایش نفت جی (اصفهان، ایران)، و مشخصات قیر در جدول ۱ نشان داده شده است.

۲-۲- نانو سیلیس

مرکز ملی نانو تکنولوژی ایالات متحده تصریح کرده است که فناوری نانو شامل تحقیق و توسعه فناوری در سطوح اتمی، مولکولی یا ماکرومولکولی در محدوده مقیاس ۱ تا

بین تغییرات در مقادیر تنش)، انجام شد که در نتیجه منجر به ایجاد رفتار ویسکوالاستیک غیرخطی در آزمون خزش گردید. در این تحقیق، از دستگاه رئومتر برش دینامیکی برای

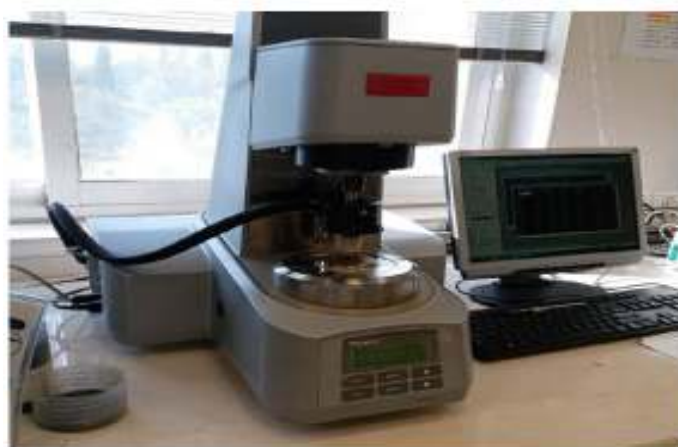
انجام تست MSCR همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، استفاده شد.

جدول ۱. مشخصات قیر

آزمایشات	محدوده استاندارد		نتایج
	حداقل	حداکثر	
شکل پذیری در دمای ۲۵ درجه سلسیوس (ASTM D113)	۱۰۰	--	+۱۰۰
نقطه نرم شدگی، (ASTM D36) °C	۴۹	۵۷	۵۴
نفوذ در ۲۵ درجه سلسیوس، ۰/۱ میلی متر (ASTM D5)	۶۰	۷۰	۶۳
شاخص نفوذ (PI)	--	--	+۰/۴
نقطه اشتعال، (ASTM D92)	۲۳۲	- -	۲۵۹
چگالی، (ASTM D70) gr/cm^3	--	--	۱/۰۳



شکل ۱. نانو سیلیس استفاده شده



شکل ۲. دستگاه رئومتر برش دینامیک

۲-۴- آزمایش بازگشت خزشی در چند سطح تنش

(MSCR)

آزمایش MSCR به عنوان جایگزینی برای آزمایش AASHTO M-320 بر روی قیر با دمای بالا که باعث کاهش تعداد نمونه‌های تولیدی در هر سطح تنش نیز می‌شود، ایجاد شد. پس از آن تست RCR توسعه داده شد. نتایج آزمایش MSCR نیز می‌تواند به عنوان جایگزینی برای تست‌های مختلف SHRP+ استفاده شود.

برای تولید نمونه‌ها از قیر PG 64-22 تهیه شده از شرکت پالایش نفت جی (اصفهان، ایران) استفاده شد. آزمایش MSCR بر اساس ASTM D7405-15 با درصد اختلاط ۰، ۲، ۴ و ۶ درصد اصلاح کننده نانو سیلیس و در ۳ دمای ۵۸، ۶۴ و ۷۰ درجه سلسیوس انجام شد. در این آزمایش تعداد کل نمونه‌ها برابر با ۱۲ بود. همانطور که در جدول ۲ نشان داده شده است، برای ساده‌سازی، نمونه‌های اصلاح شده با ۲، ۴ و ۶ درصد نانو سیلیس به ترتیب N₂، N₄ و N₆ نامیده شدند. تعداد نمونه‌ها و همچنین درصد‌های مختلف اصلاح کننده و دماهای مربوط به آنها به طور خلاصه در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۲. ترکیبی از نانو سیلیکون اکسید

نوع ترکیب	نانو سیلیس (%)	توضیح
N ₂	۲	قیر اصلاح شده N ₂
N ₄	۴	قیر اصلاح شده N ₄
N ₆	۶	قیر اصلاح شده N ₆

جدول ۳. طرح اختلاط نمونه‌ها

نمونه	قیر	نانو سیلیس (%)	دما (درجه سانتیگراد)
۱	PG 64-22	۰٪	۵۸
۲	PG 64-22	۰٪	۶۴
۳	PG 64-22	۰٪	۷۰
۴	PG 64-22	۲٪	۵۸
۵	PG 64-22	۲٪	۶۴
۶	PG 64-22	۲٪	۷۰
۷	PG 64-22	۴٪	۵۸
۸	PG 64-22	۴٪	۶۴
۹	PG 64-22	۴٪	۷۰
۱۰	PG 64-22	۶٪	۵۸
۱۱	PG 64-22	۶٪	۶۴
۱۲	PG 64-22	۶٪	۷۰

بارگذاری و ۹ ثانیه زمان بازیابی برای هر یک از تنش‌های ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۸۰۰، ۱۶۰۰، ۳۲۰۰، ۶۴۰۰، ۱۲۸۰۰ و ۲۵۶۰۰ Pa در ۱۰ سیکل استفاده کرد: آزمون با کمترین مقدار تنش شروع شد و در پایان هر ۱۰ سیکل بدون

برای انجام آزمایش روی قیر، تجهیزات در دستگاه‌های DSR موجود تعبیه شده است. DSR برای محاسبه خواص اساسی واکنش مواد ویسکوالاستیک به کرنش ناشی از استرس اعمال شده طراحی شده است. این آزمایش از ۱ ثانیه

برابر تغییر شکل دائمی به عنوان بخشی از مخلوط‌های آسفالتی پیشنهاد شد. با در نظر گرفتن انطباق خزشی غیر قابل بازیابی (J_{nr})، به عنوان شاخصی برای ارزیابی مقاومت در برابر تغییر شکل، می‌توان نتیجه گرفت که بالاترین مقدار انطباق خزشی غیر قابل بازیابی منجر به بالاترین مقدار تغییر شکل دائمی می‌شود و همچنین، اگر درصد بازیابی ($R\%$) بالاتر باشد، خواص الاستیک قیر بهتر خواهد بود؛ زیرا در ۹ ثانیه از زمان استراحت در هر چرخه، کرنش بیشتری به حالت اولیه خود باز می‌گردد. این پارامتر برای ارزیابی مقاومت قیر در برابر شیار شدگی بسیار مهم است. درصد بازیابی تغییر شکل ($R\%$) و انطباق خزش غیر قابل بازیابی (J_{nr}) برای تمام چرخه‌ها در تنش‌های ۰/۱ و ۳/۲ کیلو پاسکال محاسبه شد و نتایج نهایی به عنوان مقادیر میانگین برای هر دو پارامتر انتخاب شدند. درصد تفاوت بین انطباق خزش غیر قابل بازیابی و درصد بازیابی تغییر شکل برای هر دو تنش از معادلات (۸، ۹) برای تعیین و ارزیابی شیار شدگی در مخلوط آسفالت به دست می‌آید. بیشتر اطلاعات در مورد خواص رئولوژیکی و عملکرد پس از افزودن نانوذرات را می‌توان با تجزیه و تحلیل پارامترهای $J_{nr}diff$ و $Rdiff$ به دست آورد. این اجزا بر اساس تفاوت بین مقادیر این دو پارامتر در تنش‌های ۰/۱ و ۳/۲ کیلو پاسکال به دست می‌آیند (۳۸). در نتیجه، مقدار کمی را برای نشان دادن وابستگی ماده به تنش اعمال شده ارائه می‌کند. با توجه به دستورالعمل، مقدار $J_{nr}diff$ باید کمتر از ۷۵٪ باشد.

$$J_{nr}diff = \frac{J_{nr3.2} - J_{nr0.1}}{J_{nr0.1}} \times 100 \quad (۸)$$

$$R\% \text{ diff} = \frac{R\% \text{ 3.2} - R\% \text{ 0.1}}{R\% \text{ 0.1}} \times 100 \quad (۹)$$

۳- نتایج و تجزیه و تحلیل

۳-۱- کرنش تجمعی

شکل ۳ ارزیابی اثر افزودن نانو سیلیس را در دمای ۶۴ درجه سلسیوس و در تنش ۳/۲ کیلو پاسکال نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، پس از افزودن نانو سیلیس، کرنش تجمعی نسبت به نمونه شاهد کاهش یافت و این کاهش با افزایش درصد اصلاح کننده افزایش یافت. در شکل ۴، خزش و بازیابی برای چرخه خزش اولیه ترسیم شده است که به وضوح نشان می‌دهد که خزش اولیه با افزایش درصد نانو سیلیس کاهش یافته است.

زمان استراحت بین خزش و بازیابی یا تغییر در سطح تنش، به تنش بعدی افزایش یافت. دو سطح تنش ۰/۱ کیلو پاسکال و ۳/۲ کیلو پاسکال را برای انجام تست MSCR به دلیل ارتباط بین قیر و شیار شدگی انتخاب کرد. ۱۰ برای هر تنش انجام شد. تعداد کل چرخه‌های انجام شده برابر با ۲۰ بود. همین تعداد چرخه و تنش توسط همه سازمان‌های مربوطه پذیرفته شد و در دستورالعمل AASHTO T350-14 و ASTM شماره ۷۴۰۵ پذیرفته و گنجانده شد. در این آزمایش، انطباق خزش غیر قابل بازیابی (J_{nr}) برابر است میانگین کرنش غیر قابل بازیابی برای ۱۰ چرخه خزش و بازیابی، تقسیم بر تنش اعمال شده به چرخه‌ها گردید. J_{nr} بر اساس معادلات (۱-۳) محاسبه می‌شود. برای هر ۱۰ چرخه و سپس مقادیر متوسط بدست آمده برای J_{nr} بیانگر مقدار کل انطباق خزش غیر قابل بازیابی است.

$$\gamma_{10} = \frac{(\gamma_r - \gamma_0)}{100} \quad (۱)$$

$$J_{nr} = \frac{\gamma_{10}}{\tau} \quad (۲)$$

$$J_{nr \text{ 0.1}} = \frac{\text{SUM } [J_{nr} \text{ for 10 Cycle}]}{10} \quad (۳)$$

در این فرمول‌ها، γ_{10} مقدار کل کرنش در هر چرخه ۱۰ ثانیه‌ای است، γ_r مقدار کرنش در پایان هر چرخه، در مقدار کرنش در پایان هر چرخه، γ_0 مقدار کرنش اولیه در هر چرخه است که در اولین چرخه برابر با ۰ در نظر گرفته می‌شود. یکی دیگر از ویژگی‌های آزمایش MSCR محاسبه درصد بازیابی تغییر شکل ($R\%$) مطابق معادلات (۷-۸) است.

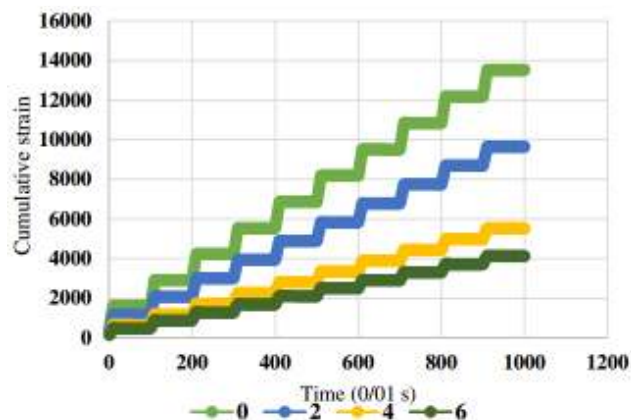
$$\gamma_1 = \gamma_c - \gamma_0 \quad (۴)$$

$$\gamma_{10} = \gamma_r - \gamma_0 \quad (۵)$$

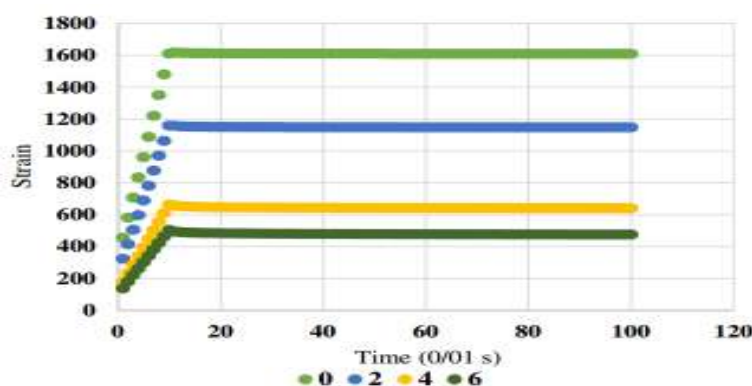
$$R\% = \frac{\gamma_r - \gamma_0}{\gamma_1} \times 100 \quad (۶)$$

$$R\% \text{ 0.1} = \frac{[R\% \text{ for 10 cycle}]}{10} \quad (۷)$$

در این معادلات، γ_{10} مقدار کل کرنش در یک ثانیه از زمان بارگذاری در هر چرخه است. γ_c مقدار کرنش در پایان یک ثانیه از زمان بارگذاری است. γ_0 مقدار کرنش اولیه در هر چرخه است که برای چرخه اول برابر با ۰ در نظر گرفته می‌شود. γ_{10} مقدار کل کرنش در هر چرخه است. γ_r مقدار کرنش در پایان هر ۱۰ چرخه است و $R\%$ مقدار خزش بازیابی شده در هر چرخه است. توضیح برای J_{nr} در کرنش ۳/۲ کیلو پاسکال مانند روش ذکر شده برای کرنش ۰/۱ کیلو پاسکال است. پارامتر J_{nr} برای محاسبه مقاومت قیر در



شکل ۳. کرنش تجمعی قیر اصلاح شده در دمای ۶۴ درجه سلسیوس و در تنش ۳/۲ کیلو پاسکال



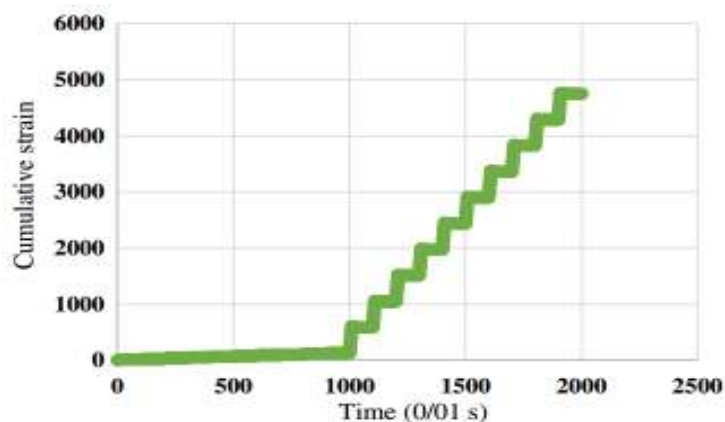
شکل ۴. چرخه اولیه کرنش برای قیر اصلاح شده N_4 در تنش ۳/۲ کیلو پاسکال

در هر چرخه، کرنش بیشتری به حالت اولیه باز می‌گردد. این پارامتر برای ارزیابی مقاومت قیر در برابر شیارشدگی بسیار مهم است، زیرا نشان‌دهنده کشش (قابلیت ارتجاعی) تاخیری قیر است. نتایج مقادیر R و R_{diff} در جداول ۴-۷ ارائه شده است. با توجه به جداول ۴-۷ می‌توان نتیجه گرفت که افزایش دما در تنش‌های زیاد و کم، تأثیر منفی بر نمونه‌ها دارد و درصد بازیابی خزش را در هر دو نمونه‌های قیر اصلاح نشده و اصلاح شده کاهش می‌دهد. به عنوان مثال، در قیر اصلاح نشده و در تنش پایین ۰/۱ کیلو پاسکال، با افزایش دما از ۵۸ تا ۶۴ درجه سلسیوس، درصد بازیابی تغییر شکل ($R\%$) حدود ۱۵ درصد کاهش یافت، این در حالی است که اگر دما تا ۷۰ درجه سلسیوس افزایش یابد، درصد بازیابی تغییر شکل نسبت به دمای ۵۸ درجه سلسیوس به میزان قابل توجهی در حدود ۶۷ درصد کاهش می‌یابد.

همچنین می‌توان نتیجه گرفت که افزایش درصد نانو سیلیس باعث افزایش بازیابی خزش در پایان هر چرخه می‌شود. این بدان معنی است که در ۹ ثانیه از زمان استراحت در هر چرخه، تغییر شکل الاستیک با تاخیر بیشتری به حالت اولیه باز می‌گردد. همانطور، که قبلاً ذکر شد، تست MSCR در حالت ویسکوالاستیک غیرخطی اجرا شد و این به دلیل افزایش تنش از ۰/۱ تا ۳/۲ کیلو پاسکال پس از ۱۰ چرخه خزش و بازیابی است که باعث جهش ناگهانی کرنش در نمودار، در نتیجه افزایش میزان تنش می‌شود، همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است.

۳-۲- درصد بازیابی تغییر شکل ($R\%$)

همانطور که قبلاً توضیح داده شد، هر چه درصد بازیابی ($R\%$) بیشتر باشد، خاصیت ارتجاعی (الاستیک) قیر بهتر است و این اتفاق می‌افتد، زیرا در ۹ ثانیه از زمان استراحت



شکل ۵. رفتار ویسکوالاستیک غیرخطی آزمایش MSCR

جدول ۴. مقادیر R و Rdiff برای قیر اصلاح نشده

فشار	دما (°C)		
	۵۸	۶۴	۷۰
۰/۱ k Pa	۸/۳۱۱۵	۷/۰۸۱۵	۲/۹۲۹۹
۳/۲ k Pa	۳/۵۲۳۱	۰/۰۶۲۰	-۲/۴۵۴۲
Rdiff (%)	۵۷/۶۱۲۱	۹۹/۱۲۵۱	۱۸۳/۷۶۵۲

جدول ۵. مقادیر R و Rdiff برای قیر اصلاح شده N₂

فشار	دما (°C)		
	۵۸	۶۴	۷۰
۰/۱ k Pa	۱۴/۱۰۱۵	۱۰/۴۳۸۳	۴/۸۸۰۳
۳/۲ k Pa	۵/۶۸۷۴	۱/۱۳۹۳	-۱/۳۶۸۰
Rdiff (%)	۵۹/۶۸۷۵	۸۹/۰۸۵۶	۱۲۸/۰۳۱۱

جدول ۶. مقادیر R و Rdiff برای قیر اصلاح شده N₄

فشار	دما (°C)		
	۵۸	۶۴	۷۰
۰/۱ k Pa	۲۸/۹۰۲۵	۲۱/۲۶۷۴	۱۴/۷۱۷۹
۳/۲ k Pa	۱۱/۸۶۰۱	۴/۰۵۵۷	۰/۲۳۹۳
Rdiff (%)	۵۸/۹۶۵۲	۸۰/۹۲۹۷	۹۸/۳۷۴۲

جدول ۷. مقادیر R و Rdiff برای قیر اصلاح شده N₆

فشار	دما (°C)		
	۵۸	۶۴	۷۰
۰/۱ k Pa	۳۶/۶۸۷۱	۲۷/۹۷۶۹	۲۱/۶۴۰۱
۳/۲ k Pa	۱۷/۱۴۹۴	۶/۴۵۳۷	۱/۵۰۷۲
Rdiff (%)	۵۳/۲۵۸۴	۷۶/۹۳۲۲	۹۳/۰۳۵۱

داده شده است، مقادیر این بهبود با افزایش درصد اصلاح کننده نانو سیلیس افزایش یافت. نتایج اثر درصد اصلاح کننده بر درصد بازیابی تغییر شکل در جدول ۹ ارائه شده است. همانطور که در این جدول نشان داده شده است، افزایش درصد نانو سیلیس در هر دمای بالا، تأثیر مثبتی بر درصد بازیابی تغییر شکل دارد. این روند در تنش‌های بالا مشابه است، همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است. مقادیر $R_{diff} \%$ در شکل ۹ ارائه شده است. همانطور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، با افزایش درصد نانو سیلیس، فاصله بین هر بازیابی خزشی کاهش می‌یابد که نشان دهنده کاهش حساسیت نمونه‌های آسفالتی به تنش اعمال شده است.

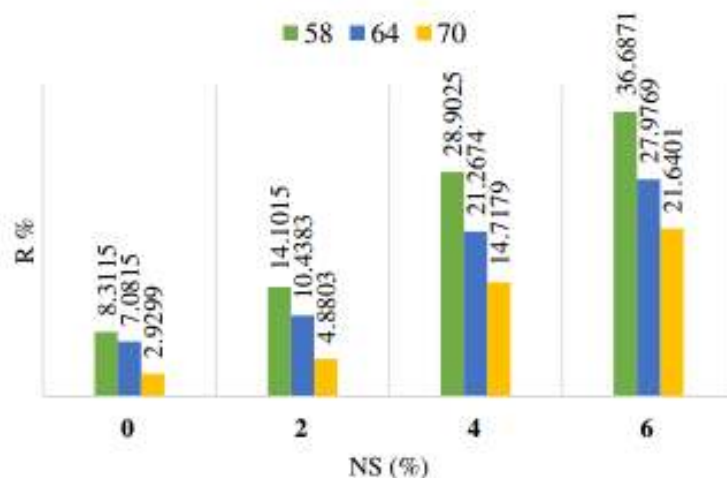
این موضوع در تنش‌های بالا نیز صادق است. اما همانطور که در جدول ۸ مشاهده می‌شود، اختلاف مربوط به افزایش درصد نانو سیلیس روندی نزولی دارد که نشان می‌دهد افزایش درصد نانو سیلیس می‌تواند تا حد زیادی اثر منفی افزایش دما را خنثی کند. شکل ۶ درصد بازیابی تغییر شکل را نسبت به افزایش درصد نانو سیلیس در تنش ۰/۱ کیلو پاسکال نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است، در یک دمای معین، افزایش درصد اصلاح کننده نانو سیلیس، درصد بازیابی تغییر شکل را افزایش داد. به عنوان مثال، در دمای ۶۴ درجه سلسیوس، قیر اصلاح شده N_2 منجر به افزایش ۴۷ درصدی درصد بازیابی تغییر شکل نسبت به نمونه شاهد شد و همانطور که در شکل ۷ نشان

جدول ۸ اثر منفی دما بر $R \%$ در تنش ۰/۱ کیلو پاسکال

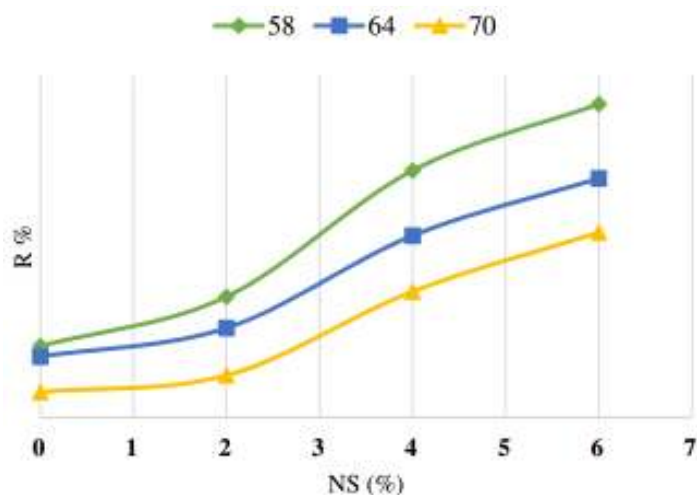
NS %	۶۴ °C	۷۰ °C	اختلاف بین ۶۴ و ۷۰ درجه سلسیوس
۰	۱۴/۷۹۸۷	۶۴/۷۴۸۸	۴۹/۹۵۰۱
۲	۲۵/۹۷۷۳	۶۵/۳۹۱۶	۳۹/۴۱۴۳
۴	۲۶/۴۱۶۷	۴۹/۰۷۷۴	۲۲/۶۶۰۷
۶	۲۳/۷۴۱۸	۴۱/۰۱۴۴	۱۷/۲۷۲۶

جدول ۹ مقدار اصلاحی $R \%$ در تنش ۰/۱ کیلو پاسکال

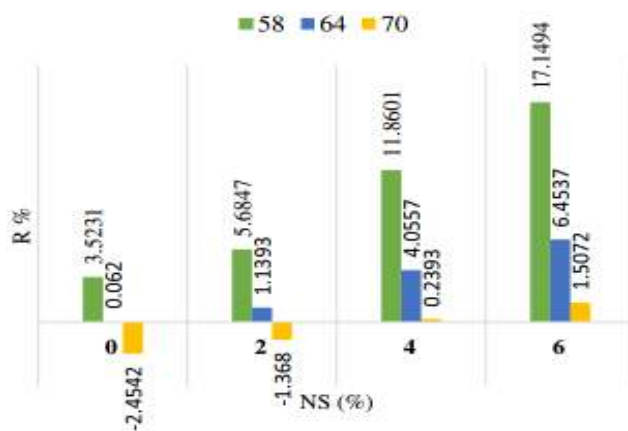
NS %	۲	۴	۶
درصد تصحیح در ۵۸ °C	۶۹/۶۶۲۵	۲۴۷/۷۴۱۰	۳۴۱/۴۰۱۶
درصد تصحیح در ۶۴ °C	۴۷/۴۰۲۳	۲۰۰/۳۲۳۳	۲۹۵/۰۷۰۲
درصد تصحیح در ۷۰ °C	۶۶/۵۶۸۸	۴۰۲/۳۳۴۵	۶۳۸/۵۹۵۱



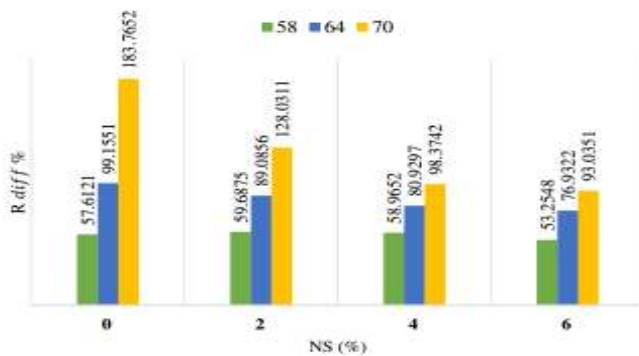
شکل ۶. مقدار $R \%$ در تنش ۰/۱ کیلو پاسکال



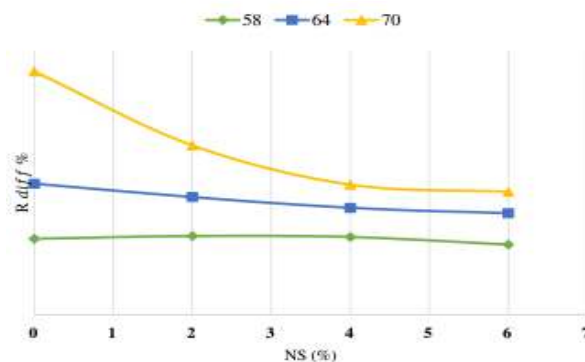
شکل ۷. بهبود R% در تنش ۰/۱ کیلوپاسکال



شکل ۸. مقدار R% در تنش ۳/۲ کیلوپاسکال



شکل ۹. مقادیر اختلاف خزش بازیابی شده Rdiff%



شکل ۱۰. تغییر روند مقادیر اختلاف خزش بازیابی شده Rdiff% با افزایش NS%

۳-۳- انطباق با خزش غیر قابل بازیابی (J_{nr})

نتایج انطباق خزش غیر قابل بازیابی (J_{nr}) و $J_{nr,diff}$ در جداول ۱۰-۱۳ ارائه شده است. طبق جداول، افزایش دما در تنش‌های زیاد و کم، مقادیر انطباق خزشی غیر قابل بازیابی را هم در نمونه‌های قیر پایه (اولیه) و هم در نمونه‌های قیر اصلاح‌شده افزایش می‌دهد و به نوعی اثر منفی افزایش دما را نشان می‌دهد.

به عنوان مثال، در قیر اصلاح نشده و در تنش پایین ۰/۱ کیلو پاسکال، با افزایش دما از ۵۸ به ۶۴ درجه سلسیوس، مقدار انطباق خزشی غیر قابل بازیابی حدود ۱۵ درصد افزایش یافت، این در حالی است که زمانی که دما تا ۷۰ درجه سلسیوس افزایش پیدا کند، مقدار انطباق خزش غیر قابل بازیابی در مقایسه با دمای ۵۸ درجه سلسیوس حدود ۶۵ درصد افزایش یافته است. این موضوع در تنش‌های بالا نیز صادق است.

همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، به وضوح در دماهای بالا حدود ۷۰ درجه سلسیوس، با افزایش درصد نانو سیلیس، حساسیت قیر به تنش به طور قابل توجهی کاهش یافت، این روند در دمای ۶۴ درجه سلسیوس نیز تکرار شد، اما بهبود حساسیت به صورت متغیر با شیب کمتر، ادامه یافت، به طوری که در نهایت، در دمای ۵۸ درجه سلسیوس، نرخ تغییر حساسیت تقریباً ثابت بود. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که نانو سیلیس می‌تواند تأثیر بسزایی بر رفتار قیر در دماهای بالا داشته باشد، به طوری که افزایش درصد این اصلاح کننده، حساسیت قیر نسبت به تنش‌های اعمال شده را به حداقل می‌رساند.

جدول ۱۰. مقادیر (J_{nr}) و $J_{nr,diff}$ برای قیر اصلاح نشده

فشار	دما (°C)		
	۵۸	۶۴	۷۰
۰/۱ k Pa	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۳۴	۰/۰۰۸۱
۳/۲ k Pa	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۴۱	۰/۰۱۰۳
Rdiff (%)	۱۰/۷۳۹۳	۲۲/۶۰۹	۲۶/۷۶۹۳

جدول ۱۱. مقادیر J_{nr} و $J_{nr,diff}$ برای قیر اصلاح شده N_2

فشار	دما (°C)		
	۵۸	۶۴	۷۰
۰/۱ k Pa	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۵۷
۳/۲ k Pa	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲۹	۰/۰۰۷۳
Rdiff (%)	۱۷/۰۸۸۸	۲۷/۰۸۲۳	۲۸/۰۲۳۱

جدول ۱۲. مقادیر J_{nr} و $J_{nr,diff}$ برای قیر اصلاح شده N_4

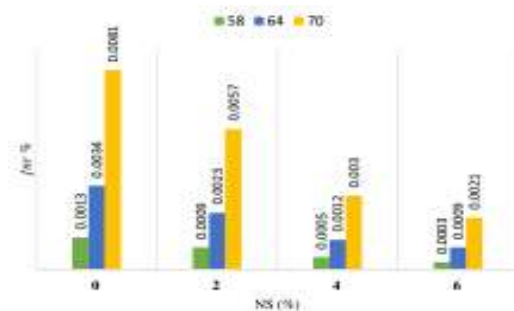
فشار	دما (°C)		
	۵۸	۶۴	۷۰
۰/۱ k Pa	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۳
۳/۲ k Pa	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۴۵
Rdiff (%)	۳۳/۲۴۴۳	۴۱/۸۷۴۵	۵۰/۴۰۱

جدول ۱۳. مقادیر J_{nr} و $J_{nr,diff}$ برای قیر اصلاح شده N_6

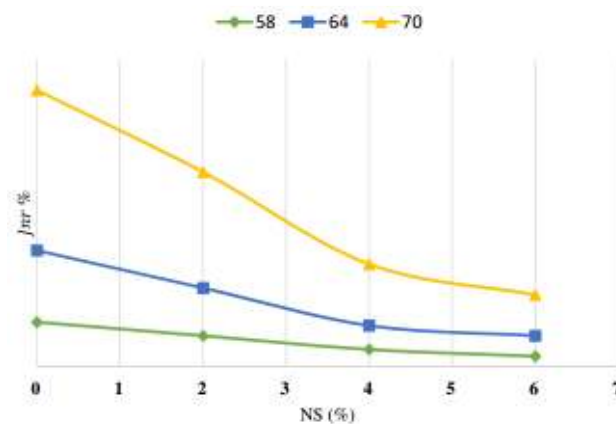
فشار	دما (°C)		
	۵۸	۶۴	۷۰
۰/۱ k Pa	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۲۱
۳/۲ k Pa	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۳۳
Rdiff (%)	۳۴/۸۵۱۵	۴۵/۳۶۲۲	۵۷/۸۳۱۴

مقادیر بهبود با افزایش درصد اصلاح کننده نانو سیلیس، افزایش یافت. پس از افزایش درصد نانو سیلیس، درصد مقادیر بهبود محاسبه شد و نتایج در جدول ۱۴ ارائه شده است. همانطور که در جدول ۱۴ نشان داده شده است، افزایش درصد نانو سیلیس در هر دمای بالا، تأثیر مثبتی بر انطباق خزش غیر قابل بازیابی داشته است و این فرایند روند کاهشی دارد. همانطور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، این روند در تنش های بالا مشابه است.

شکل ۱۱ مقدار سازگاری خزش غیر قابل بازیابی (J_{nr}) را نسبت به افزایش درصد نانو سیلیس در تنش ۰/۱ کیلو پاسکال نشان می دهد. همانطور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، در یک دمای معین، افزایش در درصد اصلاح کننده نانو سیلیس باعث افزایش انطباق خزش غیر قابل بازیابی شد. به عنوان مثال، در دمای ۶۴ درجه سلسیوس، قیر N_2 اصلاح شده، منجر به افزایش ۳۲ درصدی در انطباق خزش غیر قابل بازیابی در مقایسه با نمونه کنترل شد، همانطوری که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، این



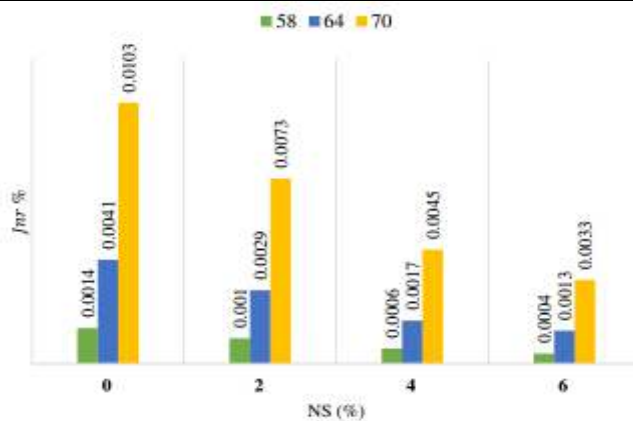
شکل ۱۱. مقدار J_{nr} در تنش ۰/۱ کیلو پاسکال



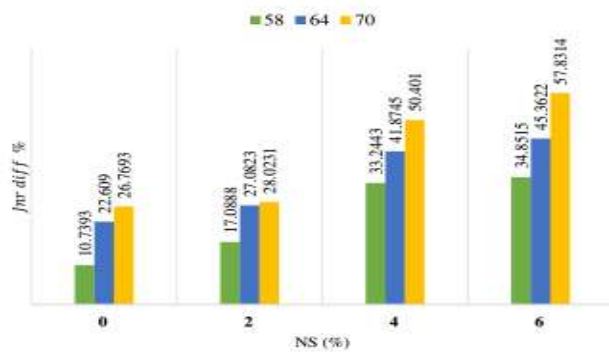
شکل ۱۲. بهبود J_{nr} در تنش ۰/۱ کیلو پاسکال

جدول ۱۴. مقدار اصلاحی J_{nr} در تنش ۰/۱ کیلو پاسکال

Ns %	۲	۴	۶
درصد تصحیح در ۵۸ °C	۴۴/۴۴۴۴	۱۶۰	۳۳/۳۳۳۳
درصد تصحیح در ۶۴ °C	۳۲/۳۵۲۹	۱۸۳/۳۳۳۳	۲۷۷/۷۷۷۷
درصد تصحیح در ۷۰ °C	۴۲/۱۰۵۲	۱۷۰	۲۸۵/۷۱۴۲



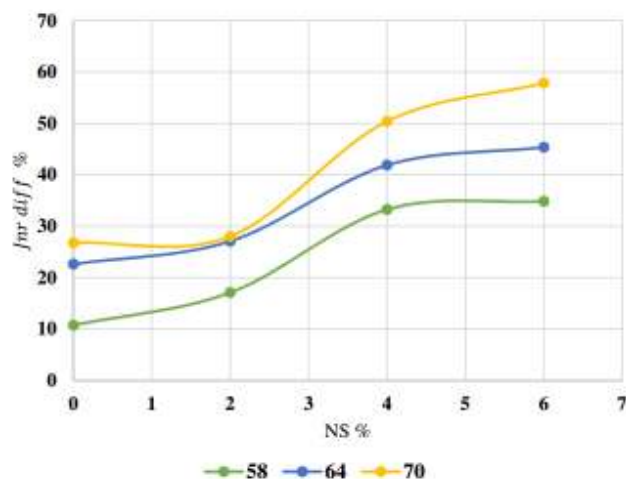
شکل ۱۳. مقدار J_{nr} در تنش ۳/۲ کیلو پاسکال



شکل ۱۴. تفاوت مقادیر انطباق خزش غیر قابل بازیابی J_{nr} diff%

انطباق خزشی غیر قابل بازیابی است. همانطور که در شکل ۱۵ نشان داده شده است، به وضوح در دماهای بالا، با افزایش درصد نانو سیلیس، حساسیت قیر به تنش به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد که با کاهش چشمگیری در انطباق خزش غیر قابل بازیابی همراه است و در نتیجه عملکرد قیر را بهبود می‌بخشد.

مقادیر $J_{nr} \text{ diff} \%$ در شکل ۱۴ ارایه شده است. همانطور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، به دنبال افزایش درصد نانو سیلیس، تفاوت در انطباق خزش غیر قابل بازیابی روندی افزایشی دارد که نشان دهنده یک کاهش حساسیت در نمونه‌های آسفالت به تنش اعمال شده و همچنین بهبود عملکرد قیر به دلیل افزایش تنش ناشی از کاهش شدید



شکل ۱۵. تغییر روند انطباق خزش غیر قابل بازیابی $J_{nr} \text{ diff} \%$ با افزایش NS%

۴- نتیجه گیری

- افزایش دما در هر دو تنش کم و زیاد باعث افزایش مقادیر انطباق خزش غیر قابل بازیابی (J_{nr})، در هر دو نمونه قیر پایه و اصلاح شده می‌شود، اما افزودن نانو سیلیس تا حد زیادی این اثر را خنثی کرد.

- در یک دمای معین، افزایش درصد اصلاح کننده نانو سیلیس، مقدار انطباق خزش غیر قابل بازیابی (J_{nr}) را کاهش داد که یک پیشرفت قابل توجه است.

- تفاوت بین بازیابی خزشی در تنش‌های زیاد و کم و انطباق خزش غیر قابل بازیابی در تنش‌های زیاد و کم به میزان زیادی بهبود یافته است که نشان دهنده تأثیر افزودن نانو سیلیس در کاهش حساسیت نمونه‌های آسفالتی نسبت به تنش‌های اعمال شده همچنین افزایش قابل توجهی در مقاومت نمونه‌ها در برابر شیار شدگی است.

۵- پی‌نوشت‌ها

- 1- Styrene-Butadiene Styrene
- 2- Stone Matrix Asphalt
- 3- Multiple Stress Creep Recovery

نتایج مطالعه حاضر نشان داد که افزودن اصلاح کننده نانو سیلیس به قیر به طور قابل توجهی مقاومت در برابر شیارشدگی قیر را بهبود بخشید و این بهبود همراه با افزایش ۶ درصدی، روند صعودی داشت. با توجه به ارزیابی رفتار قیر در حالت ویسکوالاستیک غیرخطی، نتایج به اختصار شرح داده می‌شود.

- با افزودن نانو سیلیس، کرنش تجمعی نسبت به نمونه شاهد کاهش یافت و با افزایش درصد اصلاح کننده، این کاهش افزایش یافت. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که افزایش درصد نانو سیلیس باعث افزایش بازیابی خزش در پایان هر چرخه خزش می‌شود.

- افزایش درصد نانو سیلیس می‌تواند تا حد زیادی اثر منفی افزایش دما را خنثی کند و این بهبود در تنش‌های زیاد نسبت به تنش‌های کمتر مشهود است.

- در یک دمای معین، افزایش درصد اصلاح کننده نانو سیلیس، درصد بازیابی خزش ($R\%$) را افزایش داد.

perma.cc/CT6X-87JJ.

-Khodaii. Ali, Amir Mehrara, (2009), "Evaluation of permanent deformation of unmodified and SBS modified asphalt mixtures using dynamic creep test, Constr. Build. Mater", 23 pp.2586-2592. <https://perma.cc/KT8C-5HLC>.

-Kollaros, G., E. Kalaitzaki, A. Athanasopoulou, (2018), "Using Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt Mixtures in Road Construction", American Journal of Engineering Research (AJER) e-ISSN: 2320-0847 p.ISSN. 2320-0936 Vol.6, Issue-7, pp. 261-266. <https://perma.cc/8SNN-JG7Z>.

-Lili Han, Mulian Zheng, Jinglong Li, Yifeng Li, Yueming Zhu, Qiang Ma,(2017), "Effect of nano silica and pretreated rubber on the properties of terminal blend crumb rubber modified asphalt", Constr. Build. Mater., 157 pp.277-291. <https://perma.cc/CQB5-8SNR>.

-Nicholls, C., (1998), "Asphalt Surfacing". London: E and FN Spon., pp. 68-79. <https://perma.cc/HQ8J-5BMQ>.

-Morea, F., R. Zerbino, (2018), "Improvement of asphalt mixture performance with glass macro-fibers, Constr. Build. Mater," 164 (2018) pp.113-120. <https://perma.cc/9DCU-UM7C>.

4- Rolling Thin Film OVEN

5-Strategic Highway Research Program

6-Performance Grade

۶-مراجع

-Al-Hadidy. A.I., Tan Yi-qiu, (2011), "Effect of styrene-butadiene-styrene on the properties of asphalt and stone-matrix-asphalt mixture", J. Mater. Civil Eng. 23 (4). ASCE, ISSN 0899-1561/2011/4-504-510/\$25.00. <https://perma.cc/K34C-62GS>.

-Awanti. S.S., (2013), "Laboratory evaluation of SMA mixes prepared with SBS modified and neat bitumen", Procedia – Social and Behavioral Sciences 104 pp.59-68. <https://perma.cc/U4ZQ-27A8>.

-Fakhri. Mansour, Sayyed Ali Hosseini, (2017), "Laboratory evaluation of rutting and moisture damage resistance of glass fiber modified warm mix asphalt incorporating high RAP proportion, Constr. Build. Mater, 134 (2017) pp.626- 640. <https://perma.cc/H7PK-X53Z>.

-Hui Yao, Zhanping You, Liang Li, Chee Huei Lee, David Wingard, Yoke Khin Yap, (2012), "Xianming Shi, Shu Wei Goh, Properties and chemical bonding of asphalt and asphalt mixtures modified with nanosilica", J. Mater. Civ. Eng. <https://>

Laboratory Evaluation of the Effect of Nano Silica on High Temperature Properties of Binder

Amin Choubdar, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Malard Branch, Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.

Amin Farajollahi, Department of Civil Engineering, Malard Branch, Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.

Alireza Ameli, Department of Civil Engineering, Malard Branch, Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.

E-mail: AminFarajollahi@gmail.com

Received: August 2021-Accepted: February 2022

ABSTRACT

Rutting is identified and used as the first failure mechanism in most important design conditions of flexible pavements. Bitumen can play a decisive role as one of the main materials used in asphalt mixtures, and modifying the properties of bitumen can greatly delay these failures and minimizing them in some cases. In this study, the PG 64-22 bitumen was modified using 2, 4 and 6% weight percentage of nano-silica and the effect of this modifier on reducing rutting failure was evaluated compared to the control sample. The rutting parameters including non-recoverable creep compliance (J_{nr}) and the recovered creep (R%) were also evaluated, and then the effect of nano-silica on the improvement of these parameters at high temperatures was evaluated by simulating dynamic loading using Dynamic Shear Rheometer (DSR) and performing the MSCR test at 3 temperatures of 58, 64 and 70 C. After investigating the bitumen behavior in the non-linear viscoelastic state, a significant effect was observed in the rutting parameters. So that, as a result of nano-silica addition, the cumulative strain decreased compared to the control sample and this decrease became more by increasing the modifier percentage, resulting from increasing the creep recovery at the end of each creep cycle. It was also concluded that, the increase in temperature in high and low stresses, has a negative effect on decreasing deformation recovery percent (R%) and the non-recoverable creep compliance (J_{nr}), both in unmodified and modified bitumen samples, but importantly, the amount of nano-silica effect on the improvement of these parameters was negative, which was discussed in detail in this study. Also, at a certain temperature, increasing the percentage of nano-silica modifier significantly increased R%, and also significantly decreased the J_{nr} . In the following, the difference of creep recovery in high and low stresses of R_{diff} and the difference of the non-recoverable creep compliance in high and low stresses of $J_{nr\ diff}$ significantly improved, indicating a reduction in the sensitivity of asphalt samples to the applied stress and also a significant increase in resistance of the samples against rutting.

Keywords: Bitumen, Dynamic Loading, Rytting, Binder modifying, Nano Silica