

مقایسه نتایج آزمایش‌های DSR و MSCR بر پایه عملکرد شیارشدگی چسباننده‌های قیری اصلاح‌شده با سیلیس مزومتخلخل

رضا فلاح، دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان
غلامعلی شفابخش*، استاد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان
زهره بهرامی، استادیار، گروه نانوفناوری، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه سمنان

Email: ghshafabakhsh@semnan.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۰۶ - پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۹

چکیده

در این تحقیق، به منظور مقایسه نتایج آزمایش‌های رئومتر برش دینامیک (DSR) و خزش و بازگشت در چند سطح تنش (MSCR) در ارتباط با عملکرد شیارشدگی چسباننده‌های قیری اصلاح‌شده با سیلیس مزومتخلخل، ابتدا مقادیر ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد وزنی از این افزودنی به یک قیر خالص افزوده گردید و پس از ۲۰ دقیقه لرزش و ۳۰ دقیقه اختلاط در دستگاه همزن با دور زیاد، اقدام به تولید چهار چسباننده قیری متفاوت شد. سپس، نمونه‌های به‌دست آمده و قیر خالص با استفاده از آزمایش لعاب نازک چرخان پیر شدند. بعد از آن، روی نمونه‌های حاصل از پسماند آزمایش لعاب نازک چرخان، آزمایش‌های رئومتر برش دینامیک و خزش و بازگشت در چند سطح تنش انجام شد. مقایسه خروجی آزمایش‌ها حاکی از همسویی نتایج بود، به طوری که روند تغییرات پارامتر بازگشت الاستیک (R) در آزمایش MSCR و پارامتر شیارشدگی ($G^*/\sin\delta$) در آزمایش DSR یکسان و در جهت عکس روند تغییرات پارامتر نرمی خزشی بازگشت‌ناپذیر (J_{nr}) بود. در هر دو آزمایش، حداکثر مقادیر پارامترهای شیارشدگی و بازگشت الاستیک و حداقل مقدار پارامتر نرمی خزشی بازگشت‌ناپذیر و به عبارت دیگر بهترین عملکرد شیارشدگی در چسباننده قیری اصلاح‌شده با ۴٪ وزنی از سیلیس مزومتخلخل روی داد. به علاوه، در هر دو آزمایش DSR و MSCR، افزایش سطح دما موجب کاهش پتانسیل مقاومت در برابر شیارشدگی و تمایل به بروز رفتار ویسکوزتر و مشابه با سیالات نیوتنی در چسباننده‌های قیری شد. وجه تمایز نتایج دو آزمایش در این بود که در آزمایش MSCR، بیشترین مقاومت در برابر افزایش سطح تنش به چسباننده حاوی ۶٪ سیلیس مزومتخلخل LUS-1 اختصاص یافت.

واژه‌های کلیدی: چسباننده قیری، رئومتر برش دینامیک، خزش و بازگشت در چند سطح تنش، سیلیس مزومتخلخل، عملکرد شیارشدگی

۱. مقدمه

همکاران، ۲۰۱۹؛ منصوریان و همکاران، ۲۰۱۹؛ اشیش و سینگ، ۲۰۱۹؛ شفابخش و همکاران، ۲۰۱۹؛ قانون و تن زاده، ۲۰۱۹؛ ژو و همکاران، ۲۰۱۹؛ دانگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ یانگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ لیوا ویلاکورتا و وارگاس نوردچک، ۲۰۱۷؛ ارشد و همکاران، ۲۰۱۷؛ وانگ و وانگ، ۲۰۱۹).

در این میان، نوع پاسخ چسباننده به لحاظ خطی و یا غیرخطی بودن در آزمایش های با دمای زیاد می تواند منجر به حصول مقادیر مختلف درصد بهینه برای اصلاح کننده آن در آزمایش های DSR و MSCR شده و در واقع منجر به ایجاد تفاوت میان نتایج این آزمایش ها گردد (منصوریان و همکاران، ۲۰۱۹). بدیهی است یکی از عوامل اثرگذار در پاسخ چسباننده، کیفیت و کمیت مقدار اصلاح کننده نیز می باشد.

در این تحقیق، هدف، بررسی و مقایسه نتایج حاصل از آزمایش های DSR و MSCR بر عملکرد شیارشدگی چسباننده های قیری اصلاح شده با نوعی نانوسیلیس جدید به نام سیلیس مزومتخلخل با ویژگی های متفاوت با نانوسیلیس های رایج است.

۲. مصالح و روش تحقیق

۲-۱. مصالح

مواد تحقیق شامل قیر خالص حاصل از پالایش نفت خام در یکی از پالایشگاه های ایران و نانوسیلیس مزومتخلخل به عنوان ماده افزودنی اصلاح کننده آن بوده است (شکل های ۱ و ۲).

در بسیاری از موارد لازم است قیر خالص حاصل از پالایش نفت خام به منظور بروز عملکرد مناسب در مقابل شیارشدگی، به ویژه در شرایط آب و هوایی گرم و ترافیک سنگین و آرام، با استفاده از افزودنی های مناسب اصلاح شده و با کمک آزمایش های استاندارد از ارتقاء عملکرد شیارشدگی آن اطمینان حاصل گردد.

کسب اطمینان از کیفیت چسباننده قیری برای مقابله با شیارشدگی از گذشته تا کنون با انجام آزمایش رنومتر برش دینامیک (DSR)^۱ امکان پذیر بوده است. اما این آزمایش در محدوده ویسکوالاستیک خطی اجرا شده، در حالی که رفتار یک مخلوط آسفالتی بسته به زمان بارگذاری، دما و سطح تنش وارده، ویسکوالاستیک بوده و لزوماً خطی نیست. به طوری که میزان کرنش چسباننده قیری در مخلوط آسفالتی که در دمای زیاد تحت بارگذاری قرار گرفته است، ممکن است به مراتب بزرگتر از کرنش حجمی کلی مخلوط آسفالتی باشد. یعنی، شیارشدگی مخلوط های آسفالتی یک پدیده متأثر از میزان سطح تنش بوده و ویسکوالاستیک غیرخطی است. لذا، یک پاسخ غیرخطی از سوی چسباننده در آزمایش خزش و بازگشت در چند سطح تنش (MSCR)^۲ بهتر از ویژگی های ویسکوالاستیک خطی روسازی ممتاز که در قالب آزمایش DSR بروز یافته، می تواند قادر به توصیف شیارشدگی مخلوط آسفالتی باشد (دی آنجلو، ۲۰۰۹). تحقیقات متعددی در سال های اخیر در خصوص قابلیت آزمایش MSCR در تعیین عملکرد دمای زیاد چسباننده های اصلاح شده با اصلاح کننده های متفاوت صورت گرفته و بعضاً نتایج آنها با نتایج آزمایش DSR مقایسه شده است (فیلیو و همکاران، ۲۰۱۹؛ چنگ و همکاران، ۲۰۱۶؛ تانگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ مورنو ناوارو و همکاران، ۲۰۱۹؛ باباگلی و همکاران، ۲۰۱۸؛ لین و

1. Dynamic shear rheometer test
2. Multiple stress creep and recovery test



شکل ۱. قیر خالص



شکل ۲. نانوسیلیس مزومتخلخل LUS-1

مساحت سطح ویژه بسیار زیاد آن (۸۰۰ تا ۱۳۰۰ متر^۲ - مربع بر گرم)، دست کم چهار برابر نانوسیلیس های رایج است (معینی و همکاران، ۲۰۱۹). به علاوه، غیرسمی بودن، سازگاری با محیط زیست، پایداری مکانیکی و شیمیایی و تعداد حفرات بسیار زیاد با قطر ۳ نانومتر، LUS-1 را از سایر نانوسیلیس های معمول متمایز نموده و از پتانسیل خوبی برای افزودن به قیر خالص به عنوان اصلاح کننده آن برخوردار کرده است (بهرامی و همکاران، ۲۰۱۵). پایداری حرارتی و گرمایی خوب این

افزودنی مورد نظر برای اصلاح قیر در این تحقیق، دارای نام علمی LUS-1^۱ بوده که مشخصات آن و قیر خالص در جدول ۱ درج شده است. اصلاح کننده مورد استفاده در این تحقیق اولین بار در دانشگاه لaval کانادا در سال ۲۰۰۳ تولید شد (بونویوت و همکاران، ۲۰۰۳). این اصلاح کننده، نسل جدیدی از مواد نانوسیلیسی است که برخلاف نانوسیلیس های رایج با مورفولوژی کروی، از مورفولوژی رشته ای برخوردار بوده و

3. Laval university silica

جداسازی لخته‌ها، که از مشکلات نانوآفزودنی‌هاست، همراه با سنتز ساده و ارزان آن، از مزایای اقتصادی این آفزودنی نانو ساختار است. از سوی دیگر، به سبب حفرات داخلی متعدد نانواندازه‌ای که روی این رشته‌ها قرار دارد، از کلیه مشخصات فنی خاص نانوذرات نیز برخوردار بوده و با وارد نمودن مواد شیمیایی مختلف به درون این حفرات، می‌توان عملکرد آن را برای کاربردهای مختلف اصلاح نمود (بونویوت و همکاران، ۲۰۰۳؛ بک و همکاران، ۱۹۹۲).

اصلاح‌کننده می‌تواند موجب افزایش دوام آسفالت در روسازی‌های آسفالتی نواحی گرم و خشک و یا گرم و مرطوب گردد. مشخصه بارز آفزودنی نانو ساختار LUS-1 این است که دارای ساختار مورفولوژیک رشته‌ای در ابعاد میکرو بوده، در حالی که این رشته‌ها خود نیز دارای حفراتی در اندازه ۳ نانومتر هستند. این بدان معنی است که به سبب ساختار خارجی میکرواندازه‌ای که دارد، قابلیت لخته شدن آن به هنگام اختلاط با قیر خالص در مقایسه با سایر نانو سیلیس‌های رایج به میزان چشمگیری کاهش می‌یابد. لذا، عدم نیاز به هزینه‌های

جدول ۱. مشخصات قیر خالص و نانو سیلیس مزومتخلخل LUS-1

مشخصات قیر خالص							
ویسکوزیته بروکفیلد در ۱۳۵ °C (Pa.sec)	افت وزنی (%)	شکل پذیری در ۲۵ °C (cm)	نقطه اشتعال (°C)	چگالی (g/cm ³)	درجه نفوذ (0.1mm)	نقطه نرمی (°C)	طبقه‌بندی مارشال قیر
۰/۳۳۶	۰/۰۷	>۱۰۰	۲۹۴	۱/۰۱۵	۹۶	۴۸/۶	۸۵-۱۰۰
مشخصات نانو سیلیس مزومتخلخل LUS-1							
فشار قابل تحمل (t/cm ²)	چگالی (g/cm ³)	وزن حفرات (cm ³ /g)	قطر حفره (nm)	سطح مخصوص (m ² /g)	ساختار	شکل ظاهری	فرمول خطی
۵	۰/۰۹	۰/۸۴۱	۳	۸۰۰-۱۳۰۰	رشته‌های با حفرات شش وجهی	پودر سفید رنگ	SiO ₂

تحقیقات انجام شده قبلی، حداکثر مقدار نانو سیلیس‌های رایج افزوده شده به قیر خالص برابر ۷ درصد وزنی قیر بوده است (ارشد و همکاران، ۲۰۱۷؛ رضایی و همکاران، ۲۰۱۷؛ سالتن و همکاران، ۲۰۱۷؛ صادق همکاران، ۲۰۱۸؛ شفا بخش و همکاران، ۲۰۱۹؛ صادقی نژاد و شفا بخش، ۲۰۱۷؛ طاهرخانی و افروزی، ۲۰۱۶؛ قانون و تن زاده، ۲۰۱۹؛ کای و همکاران، ۲۰۱۸؛ کروچو و همکاران، ۲۰۱۸؛ لیوا ویلاکورتا و وارگاس نوردچک، ۲۰۱۷؛ معینی و همکاران، ۲۰۱۹؛ مقدس نژاد

۲-۲. آزمایش‌ها

روش انجام تحقیق به صورت آزمایشگاهی بود که در آن با استفاده از قیر خالص و نانو سیلیس مزومتخلخل، نمونه‌های آزمایشگاهی تهیه شد و پس از پیرسازی در آزمایش لعاب نازک چرخان (RTFOT)^۱، آزمایش‌های DSR و MSCR روی آنها انجام گردید. بر اساس

1. Rolling thin film oven test

در این تحقیق، استاندارد مورد استفاده برای اجرای آزمایش رئومتر برش دینامیک، ASTM D7175 بوده و به ازای هر یک از انواع پنج‌گانه چسباننده‌ها، چهار سطح دمای زیاد عملکردی برای ارزیابی‌های مرتبط با قابلیت مقاومت در برابر شیارشدگی آنها مد نظر قرار گرفته است. در فرکانس ۱۰ رادیان بر ثانیه، مدول مختلط برشی (G^*) و زاویه اختلاف فاز (δ) هر یک از نمونه‌های آزمایشگاهی چسباننده‌های قیری در سطوح مختلف دمایی تعیین و سپس پارامتر شیارشدگی ($G^*/\sin\delta$) آنها محاسبه شد. بر اساس مشخصات روسازی ممتاز، شاخص ($G^*/\sin\delta$) که نشان‌دهنده سفتی دمای زیاد چسباننده قیری است باید برای ماده چسباننده پیرشده در آزمایش RTFOT حداقل ۲/۲ kPa باشد. هر چه G^* بیشتر و δ کمتر باشد، میزان مقاومت چسباننده در برابر شیارشدگی بیشتر خواهد بود.

۲-۲-۳. آزمایش خزش و بازگشت در چند سطح

تنش (MSCR)

آزمایش MSCR در این تحقیق بر اساس استاندارد ASTM D7405، ابتدا به مدت ۱۰ سیکل ۱۰ ثانیه‌ای در سطح تنش ۰/۱ kPa و بلافاصله به مدت ۱۰ سیکل ۱۰ ثانیه‌ای دیگر در سطح تنش ۳/۲ kPa انجام شد. در فرایند آزمایشگاهی MSCR، بین درصد بازگشت (R) که نشان‌دهنده الاستیسیته تأخیری چسباننده بوده و درصد کرنش در بخش خزشی آزمایش، رابطه کاملاً واضحی وجود داشته و نرمی خزشی بازگشت‌ناپذیر (J_{nr}) نیز که میزان سختی چسباننده را نمایندگی می‌کند، پاسخ چسباننده را به تنش اعمال شده نرمالیزه کرده و به وضوح تفاوت بین چسباننده‌های قیری مختلف اصلاح‌شده را نشان می‌دهد. $J_{nr\text{diff}}$ نیز حساسیت چسباننده قیری را به میزان افزایش تنش نشان داده و در برخی موارد می‌تواند نشانگر کارآمدی شبکه تشکیل شده از اصلاح‌کننده

و همکاران، ۲۰۱۶). اما لزوم شناخت اثر افزودن مقادیر حداکثری آن به قیر خالص از یک سو و گام‌های دوتایی افزایش درصد وزنی افزودنی در این تحقیق از سوی دیگر، باعث گردید که افزایش ۸ درصد وزنی آن نیز به قیر در این مطالعه در دستور کار قرار گیرد. به این منظور، ابتدا قیر خالص با طبقه‌بندی مارشال ۸۵-۱۰۰ را تا دمای ۱۷۰ درجه سلسیوس حرارت داده و سپس با افزودن نانوسیلیس مزومتخلخل LUS-1 به ترتیب برابر ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد وزنی قیر به صورت جداگانه به آن و ۲۰ دقیقه لرزاندن ترکیب، مخلوط حاصل در دستگاه مخلوط‌کن برشی با دور زیاد به میزان ۴۵۰۰ دور در دقیقه و به مدت ۳۰ دقیقه به صورت مکانیکی هم زده شد. نهایتاً، با احتساب قیر پایه اولیه و چهار چسباننده قیری دیگر، پنج نوع نمونه قیری در دسترس قرار گرفت که آزمایش‌های لعاب نازک چرخان (RTFOT)، رئومتر برش دینامیک (DSR) و خزش و بازگشت در چند سطح تنش (MSCR) روی آنها انجام شد.

۲-۲-۱. آزمایش لعاب نازک چرخشی (RTFOT)

آزمایش RTFOT در این پژوهش طبق استاندارد ASTM D2872 روی هر پنج چسباننده انجام شد. در این آزمایش، ضمن تعیین درصد افت وزنی هر یک از چسباننده‌ها، تعداد نمونه‌های مورد نیاز برای آزمایش‌های DSR و MSCR تأمین گردید. این آزمایش معرف دوام کوتاه‌مدت چسباننده قیری نیز است. کاهش جرم مواد فرار در این آزمایش، نشانه‌ای از پیرشدگی است که در حین عملیات اختلاط و تولید در قیر به وقوع می‌پیوندد. برای هر نوع چسباننده قیری، میزان افت وزنی ناشی از کاهش جرم مواد فرار نباید از یک درصد تجاوز نماید.

۲-۲-۲. آزمایش رئومتر برش دینامیک (DSR)

۱.۳. نتایج آزمایش لعاب نازک چرخشی (RTFOT)

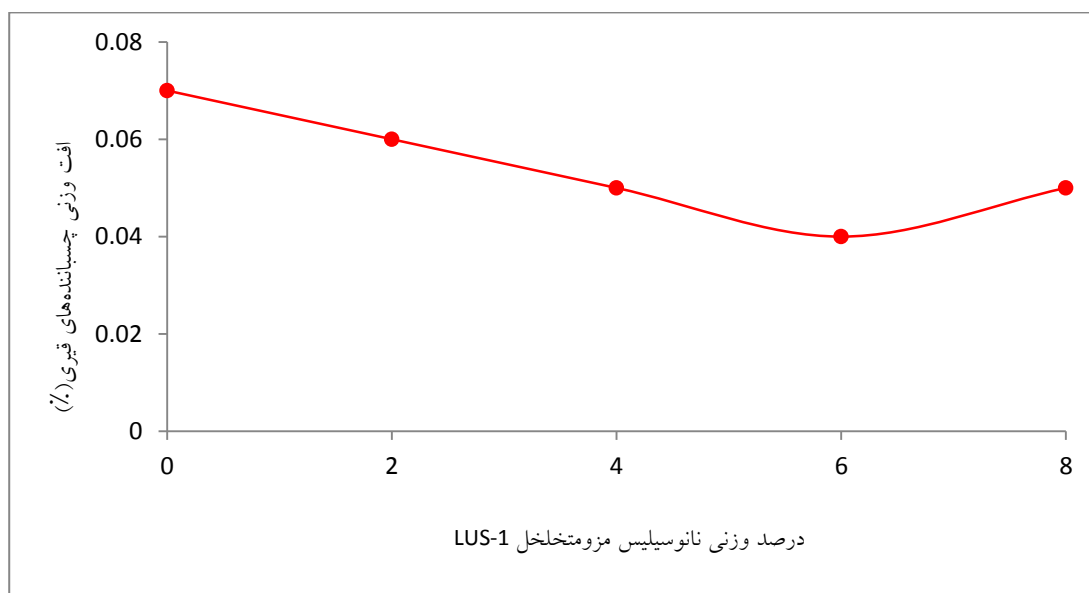
درصد کاهش وزن هر یک از چسباننده ها در آزمایش RTFOT در جدول ۲ درج شده است. تغییرات افت وزنی چسباننده های قیری در این جدول با افزایش درصد سیلیس مزومتخلخل در شکل ۳ به تصویر کشیده شده است. بر اساس شکل ۳، افزودن نانوسیلیس مزومتخلخل نه تنها باعث عبور از خط قرمز شارپ (SHRP) در خصوص افت وزنی حداکثر یک درصدی چسباننده ها نشده است، بلکه به ازای کلیه مقادیر افزودنی، کاهش درصد افت وزنی چسباننده ها در اثر پیرشدگی کوتاه مدت نسبت به قیر خالص را در پی داشته است. به نظر می رسد که افزودن نانوسیلیس LUS-1 به چسباننده ها موجب کاهش میزان واکنش آنها با اکسیژن محیط، کاهش تبخیر روغن های سبک در اثر حرارت و به عبارت دیگر افزایش پایداری ترکیبات فرار و در نتیجه افزایش دوام کوتاه مدت چسباننده های قیری شده است.

درون ملات قیری در برابر افزایش تنش باشد. استاندارد رتبه بندی عملکردی چسباننده های قیری (AASHTO M332) حداکثر نرمی خزشی بازگشتناپذیر را به ترتیب برای بارگذاری های ترافیکی استاندارد (S)، سنگین (H)، خیلی سنگین (V) و بی نهایت (E) به مقادیر ۴، ۲، ۱ و 0.5 kpa^{-1} محدود می نماید. در این تحقیق، با توجه به اینکه ابتدا دمای زیاد عملکردی پنج چسباننده تولید شده براساس نتایج آزمایش های DSR مشخص شد، به منظور صرفه جویی در هزینه ها، آزمایش MSCR برای هر یک از چسباننده ها در بازه دمایی از کمترین دمای زیاد عملکرد در بین پنج چسباننده تا دمای زیاد عملکرد خود آن چسباننده انجام شد. البته برای چسباننده های حاوی ۶ و ۸ درصد LUS-1، یک آزمایش اضافی در دمای ۷۰ درجه سلسیوس نیز انجام شد تا با دستیابی به حداقل سه نقطه برای سه مورد از چسباننده ها، امکان مقایسه برخی شاخص ها و روندها فراهم گردد.

۳. نتایج و بحث

جدول ۲. نتایج آزمایش RTFOT

درصد وزنی LUS-1	۰/۰	۲/۰	۴/۰	۶/۰	۸/۰
افت وزنی چسباننده های قیری (%)	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۵



شکل ۳. اثر درصد وزنی اصلاح‌کننده بر میزان افت وزنی چسباننده‌های قیری

محدودیت‌های شارپ، می‌توان دید که قیر خالص مورد استفاده دارای دمای زیاد عملکردی 58°C بوده و در چسباننده‌های حاوی ۲، ۶ و ۸ درصد وزنی از آن اصلاح‌کننده، این دمای زیاد به 64°C ارتقاء یافته است. اما بهترین عملکرد مربوط به چسباننده دارای ۴ درصد وزنی اصلاح‌کننده بوده است، به طوری که استفاده از ۴ درصد وزنی MNS، به میزان ۱۲ درجه سلسیوس عملکرد دمای زیاد قیر خالص را بهبود داده و آن را از ۵۸ به ۷۰ درجه سلسیوس رسانیده است.

۳-۲. نتایج آزمایش رئومتر برش دینامیک

(DSR) در دماهای زیاد

نتایج مقادیر مدول مختلط برشی (G^*)، زاویه اختلاف فاز (δ) و پارامتر شیارشدگی ($G^*/\sin \delta$) برای چسباننده‌های قیری پیر شده در آزمایش RTFOT در جدول ۳ درج شده است. پارامترهای مذکور در چسباننده‌های قیری آزمایش شده در این پژوهش متأثر از دو متغیر اصلی دمای آزمایش و درصد وزنی اصلاح‌کننده بوده‌اند. بر اساس داده‌های جدول ۳ و با توجه به

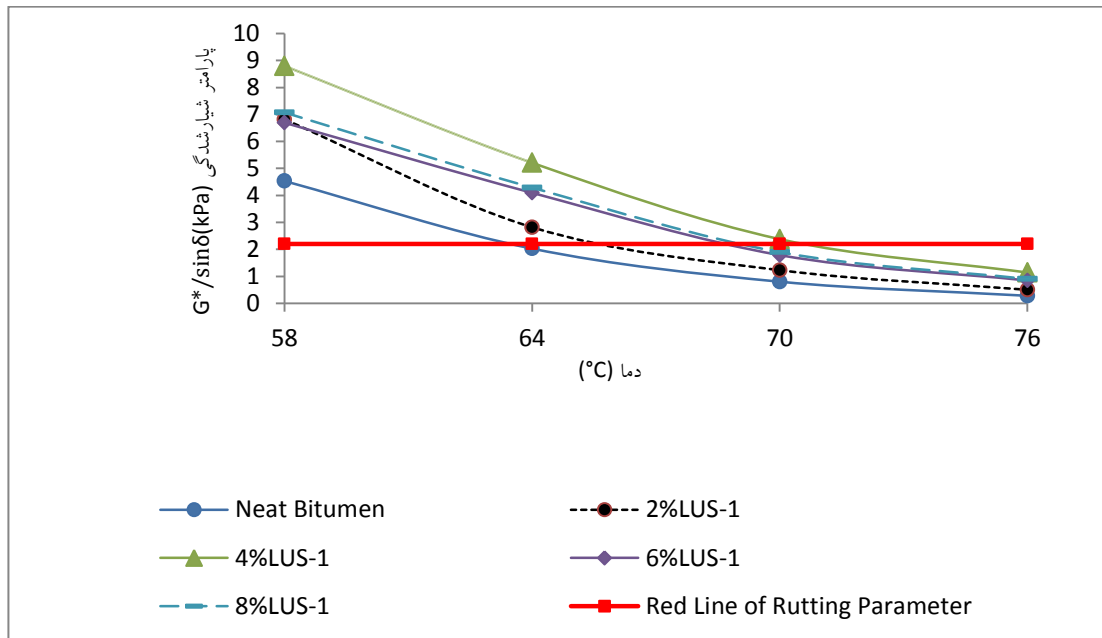
جدول ۳. نتایج آزمایش DSR روی چسباننده‌های قیری پیر شده در RTFOT در دماهای زیاد

سطوح دمایی (درجه سلسیوس)				پارامتر آزمایش DSR	نوع چسباننده قیری
۷۶	۷۰	۶۴	۵۸		
قیر خالص					
۰/۲۷۸	۰/۷۹۴	۱/۹۸۴	۴/۳۸۸	G^* (kPa)	چسباننده قیری حاوی ۲٪ وزنی LUS-1
۸۵/۹	۸۲/۴	۷۸/۲	۷۵/۵	δ (°)	
۰/۲۷۹	۰/۸۰۱	۲/۰۲۷	۴/۵۳۲	$\frac{G^*}{\sin \delta}$ (kPa)	
۰/۴۹۹	۱/۲۱۶	۲/۷۶۱	۶/۵۴۴	G^* (kPa)	چسباننده قیری حاوی ۴٪ وزنی LUS-1
۸۵/۲	۸۱/۹	۷۸/۴	۷۳/۷	δ (°)	
۰/۵۰۱	۱/۲۲۸	۲/۸۱۹	۶/۸۱۸	$\frac{G^*}{\sin \delta}$ (kPa)	
۱/۱۲۸	۲/۳۴۰	۵/۰۷۹	۸/۴۶۵	G^* (kPa)	چسباننده قیری حاوی ۶٪ وزنی LUS-1
۸۱/۸	۷۹/۸	۷۷/۲	۷۴/۲	δ (°)	
۱/۱۴۰	۲/۳۷۸	۵/۲۰۸	۸/۷۹۷	$\frac{G^*}{\sin \delta}$ (kPa)	
۰/۸۳۸	۱/۷۶۳	۴/۰۰۴	۶/۴۵۹	G^* (kPa)	چسباننده قیری حاوی ۸٪ وزنی LUS-1
۸۲/۲	۸۰/۶	۷۷/۹	۷۴/۸	δ (°)	
۰/۸۴۶	۱/۷۸۷	۴/۰۹۵	۶/۶۹۳	$\frac{G^*}{\sin \delta}$ (kPa)	
۰/۸۹۲	۱/۸۷۲	۴/۱۸۰	۶/۷۸۲	G^* (kPa)	
۸۲/۳	۸۰/۷	۷۷/۱	۷۳/۵	δ (°)	
۰/۹	۱/۸۹۷	۴/۲۸۸	۷/۰۷۳	$\frac{G^*}{\sin \delta}$ (kPa)	

۳-۲-۱. اثر دما بر پتانسیل شیاردگی چسباننده ها

سطوح مربوط به درصد وزنی افزودنی، با افزایش دما از میزان پارامتر شیاردگی کاسته شده است که علت آن افزایش مقدار δ (افزایش رفتار ویسکوز) و کاهش مقدار G^* (کاهش رفتار الاستیک) و نهایتاً نرم شدن چسباننده ها و کاهش میزان مقاومت آنها در برابر شیاردگی در دماهای زیاد است.

نمودار رسم شده در شکل ۴، نمایانگر تغییرات پارامتر شیاردگی چسباننده های قیری پیر شده در RTFOT با افزایش دما در سطوح مختلف درصد وزنی نانو اصلاح کننده MNS است. بیشترین سطح مقدار پارامتر شیاردگی $G^*/\sin \delta$ مربوط به چسباننده اصلاح شده با ۴ درصد وزنی نانوذره MNS بوده است. در هر یک از

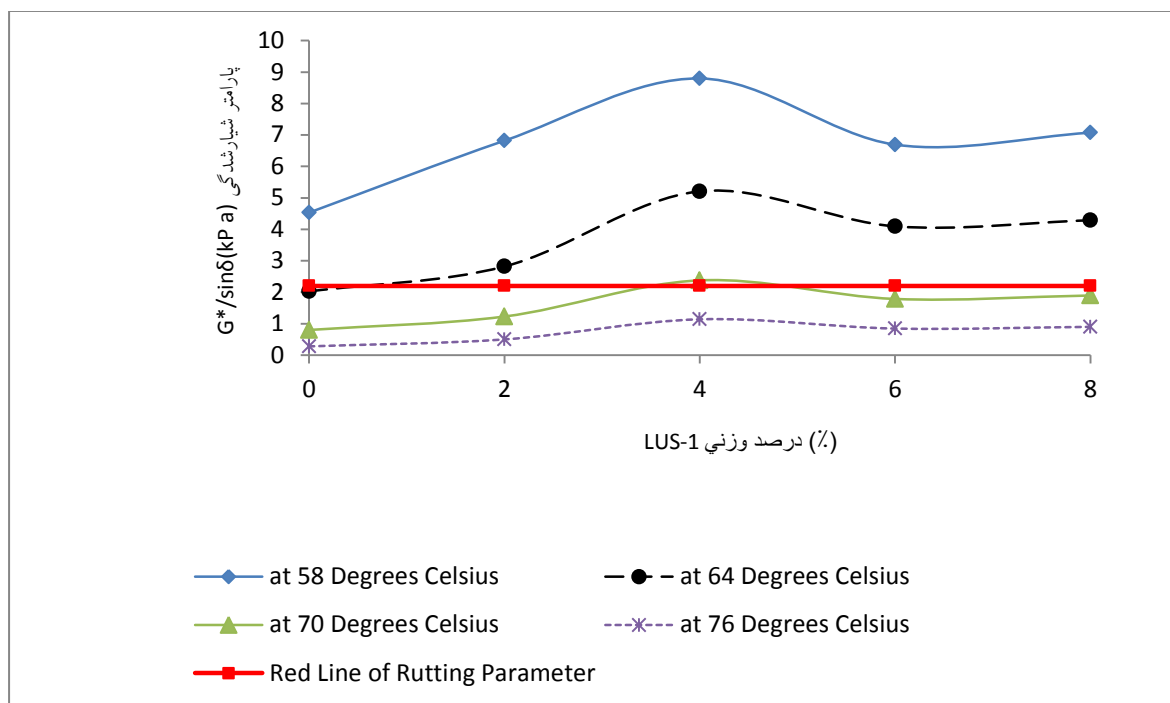


شکل ۴. اثر دما بر پارامتر شیاردگی چسباننده های قیری پیر شده در RTFOT

MNS به ۴ درصد MNS، دارای شیب تندتر بوده، اما در نمودارهای مربوط به سطوح دمایی بالاتر، یعنی ۷۰ و ۷۶ درجه سلسیوس، هم از نرخ افزایش این شیب به میزان قابل توجهی کاسته شده است و هم مقدار و دامنه نوسان مقادیر پارامتر شیاردگی به شدت کم شده است که نشان دهنده غلبه اثر دما بر میزان اصلاح کننده در سطوح دمایی ۷۰ و ۷۶ درجه سلسیوس بوده و نشانه ای از تمایل چسباننده ها به بروز رفتارهای مشابه سیالات نیوتنی در دماهای زیادتر، یعنی ماکزیمم شدن δ و مینیمم شدن G^* و میل به تثبیت مقادیر هر دوی آنهاست.

۳-۲-۲. اثر مقدار اصلاح کننده بر پتانسیل شیاردگی چسباننده ها

با توجه به نمودار شکل ۵، در چسباننده های پیر شده در آزمایش RTFOT، با افزایش درصد وزنی MNS، میزان پارامتر شیاردگی $G^*/\sin \delta$ افزایش یافته و در چسباننده های حاوی ۴ درصد وزنی نانوذره اصلاح کننده به اوج خود رسیده، سپس در مقادیر بیشتر MNS، میزان این پارامتر افت نموده است. ملاحظه می گردد که در نمودارهای مربوط به سطوح دمایی ۵۸ و ۶۴ درجه سلسیوس، نرخ افزایش پارامتر شیاردگی از ۲ درصد



شکل ۵. اثر درصد وزنی اصلاح کننده بر پارامتر شیارشدهگی چسباننده‌های قیری پیر شده در RTFOT

چسباننده‌های حاوی ۶ و ۸ درصد LUS-1، یک آزمایش اضافی نیز در دمای ۷۰ درجه سلسیوس انجام شد تا با دستیابی به حداقل سه پاسخ برای سه مورد از چسباننده‌ها، امکان مقایسه برخی شاخص‌ها و روندها فراهم گردد. بر این اساس، نتایج مربوط به درصد بازگشت الاستیک و نرمی خزشی بازگشت‌ناپذیر هر یک از چسباننده‌های آزمایش MSCR در دماها و سطوح تنشی مختلف به ترتیب در جداول ۵ و ۶ درج شده است.

۳.۳. نتایج آزمایش خزش و بازگشت در چند سطح تنش (MSCR)

با توجه به اینکه دمای زیاد عملکردی پنج چسباننده تولید شده بر اساس نتایج آزمایش‌های DSR از ۵۸ تا ۷۰ درجه سلسیوس متغیر بوده است، به منظور صرفه-جویی در هزینه‌ها، آزمایش MSCR برای هر یک از چسباننده‌ها بر اساس جدول ۴ در بازه دمایی از کمترین دمای زیاد عملکرد در بین پنج چسباننده تا دمای زیاد عملکرد خود آن چسباننده انجام شد. البته برای

جدول ۴. دماهای آزمایش MSCR برای چسباننده‌های قیری

دمای آزمایش MSCR (°C)	دمای زیاد عملکرد چسباننده در آزمایش (°C) DSR	نوع چسباننده قیری
۵۸	۵۸	قیر خالص
۵۸ و ۶۴	۶۴	چسباننده قیری حاوی ۲٪ وزنی LUS-1
۵۸، ۶۴ و ۷۰	۷۰	چسباننده قیری حاوی ۴٪ وزنی LUS-1
۵۸، ۶۴ و ۷۰	۶۴	چسباننده قیری حاوی ۶٪ وزنی LUS-1
۵۸، ۶۴ و ۷۰	۶۴	چسباننده قیری حاوی ۸٪ وزنی LUS-1

مقایسه نتایج آزمایش های DSR و MSCR بر پایه عملکرد شیارشدگی چسباننده های قیری اصلاح شده با سیلیس ...

جدول ۵. درصد بازگشت الاستیک چسباننده های قیری در سطوح مختلف دما و تنش

R _{3.2} (%)			R _{0.1} (%)			نوع چسباننده قیری
۷۰°C	۶۴°C	۵۸°C	۷۰°C	۶۴°C	۵۸°C	
-	-	۱/۵	-	-	۱۹/۵	قیر خالص
-	۰/۱۲۲	۲/۱۱	-	۸/۶۶۹	۲۲	چسباننده قیری حاوی ۲٪ وزنی LUS-1
۰/۴	۱/۰۷	۳/۶	۸/۸	۱۷/۸	۲۷	چسباننده قیری حاوی ۴٪ وزنی LUS-1
۰/۱۴	۰/۵	۲/۴	۶/۵	۱۴/۱	۲۵/۷	چسباننده قیری حاوی ۶٪ وزنی LUS-1
۰/۱	۰/۳	۲/۲	۸/۶	۱۶/۴	۲۶/۳	چسباننده قیری حاوی ۸٪ وزنی LUS-1

جدول ۶. مقادیر نرمی خزشی بازگشت ناپذیر و حساسیت تنشی چسباننده های قیری در سطوح مختلف دما و تنش

سطوح دمایی (°C)

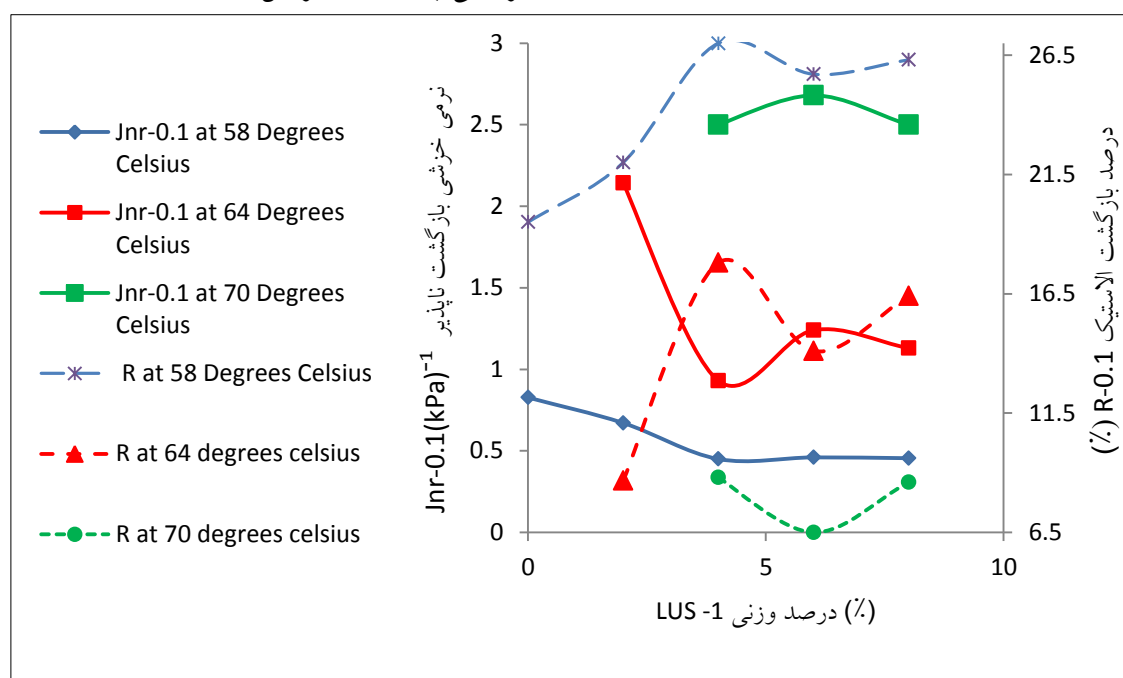
پارامتر آزمایش MSCR			نوع چسباننده قیری
۷۰	۶۴	۵۸	
قیر خالص			
-	-	۰/۸۲۷	$J_{nr-0.1} (kP)^{-1}$
-	-	۱/۴۴۳	$J_{nr-3.2} (kP)^{-1}$
-	-	۷۴/۵	$J_{nr-diff} (%)$
چسباننده قیری حاوی ۲٪ وزنی LUS-1			
-	۲/۱۴۲	۰/۶۷۱	$J_{nr-0.1} (kP)^{-1}$
-	۳/۲۹	۱/۱۳۵	$J_{nr-3.2} (kP)^{-1}$
-	۵۳/۶	۶۹/۲	$J_{nr-diff} (%)$
چسباننده قیری حاوی ۴٪ وزنی LUS-1			
۲/۵	۰/۹۳	۰/۴۵	$J_{nr-0.1} (kP)^{-1}$
۳/۸	۱/۵۱	۰/۷۰۳	$J_{nr-3.2} (kP)^{-1}$
۵۲	۶۲/۳	۵۶/۲	$J_{nr-diff} (%)$
چسباننده قیری حاوی ۶٪ وزنی LUS-1			
۲/۶۸	۱/۲۴	۰/۴۶	$J_{nr-0.1} (kP)^{-1}$
۴	۱/۷۵	۰/۶۳	$J_{nr-3.2} (kP)^{-1}$
۴۹/۳	۴۱/۱	۳۷	$J_{nr-diff} (%)$
چسباننده قیری حاوی ۸٪ وزنی LUS-1			
۲/۵	۱/۱۳	۰/۴۵۵	$J_{nr-0.1} (kP)^{-1}$
۳/۸	۱/۸۸	۰/۷۲	$J_{nr-3.2} (kP)^{-1}$
۵۲	۶۷/۴	۵۸/۲	$J_{nr-diff} (%)$

الاستیک در دمای 70°C و کمترین مقدار نرمی و بیشترین مقدار الاستیسیته در 58°C روی داده است.

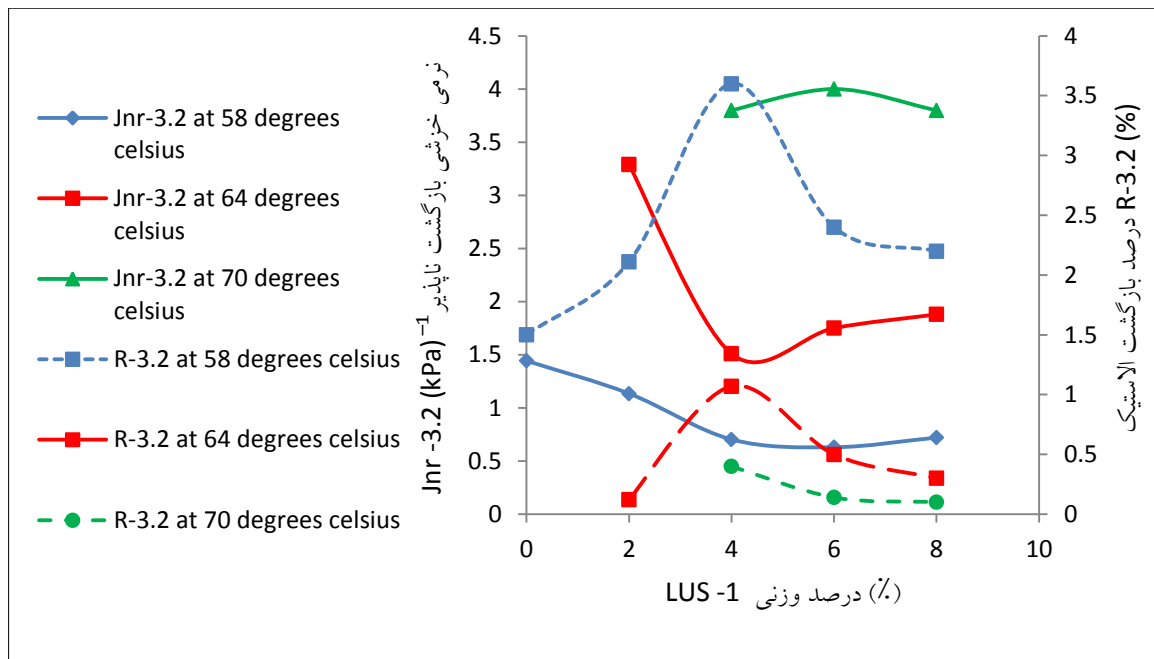
افزایش دما، حساسیت به تنش را در چسباننده‌های قیری افزایش داده، اما این افزایش حساسیت از حد مجاز آن (۷۵ درصد) عبور نکرده است. بر اساس جدول ۷، افزایش دما همچنین باعث تنزل رتبه ترافیکی چسباننده‌ها شده، به طوری که این تنزل در سطح تنش $3/2\text{ kPa}$ برای کلیه چسباننده‌ها به میزان یک رتبه بوده است. در سطح تنش $0/1\text{ kPa}$ ، این تنزل شدیدتر بوده و برای برخی از چسباننده‌ها به دو رتبه نیز رسیده است. یعنی با کاهش سطح تنش، اثر دما در تغییر رتبه‌بندی ترافیکی چسباننده‌ها افزایش یافته است.

۳-۳-۱. اثر دما بر رفتار چسباننده‌های قیری

شکل‌های ۶ و ۷ نشان‌دهنده اثر مقدار اصلاح‌کننده و سطوح دمایی بر مقادیر درصد بازگشت الاستیک و نرمی خزشی بازگشت‌ناپذیر است. بر اساس این شکل-ها، مشاهده می‌گردد که با افزایش سطح دما، چه در تنش‌های کم و چه در تنش‌های زیاد، بر میزان نرمی خزشی بازگشت‌ناپذیر افزوده شده و از مقدار بازگشت الاستیک کاسته شده است، به طوری که بیشترین مقدار نرمی خزشی بازگشت‌ناپذیر و کمترین مقدار بازگشت

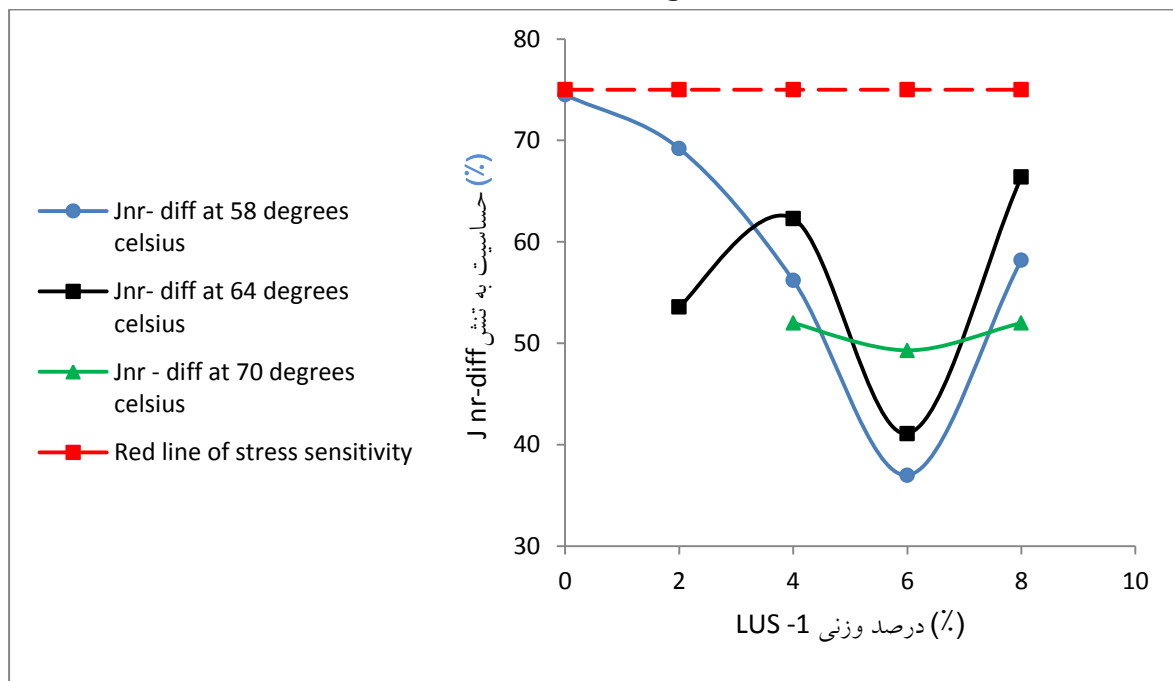


شکل ۶. اثر درصد وزنی اصلاح‌کننده و سطوح دمایی بر مقادیر درصد بازگشت الاستیک و نرمی خزشی بازگشت‌ناپذیر چسباننده-های قیری در سطح تنش $0/1$ کیلوپاسکال



شکل ۷. اثر درصد وزنی اصلاح کننده و سطوح دمایی بر مقادیر درصد بازگشت الاستیک و نرمی خزشی چسباننده های قیری

در سطح تنش ۳/۲ کیلوپاسکال



شکل ۸. اثر درصد وزنی اصلاح کننده و سطوح دمایی بر میزان حساسیت به تنش چسباننده های قیری

جدول ۷. اثر دما بر رتبه ترافیکی چسباننده‌های قیری در سطوح مختلف تنش

سطوح دمایی (°C)			سطح تنش	نوع چسباننده قیری
۷۰	۶۴	۵۸		
قیر خالص				
-	-	V	۰/۱kPa	چسباننده قیری حاوی ۲٪ وزنی LUS-1
-	-	H	۳/۲kPa	
-	S	V	۰/۱kPa	چسباننده قیری حاوی ۴٪ وزنی LUS-1
-	S	H	۳/۲kPa	
S	V	E	۰/۱kPa	چسباننده قیری حاوی ۶٪ وزنی LUS-1
S	H	V	۳/۲kPa	
S	H	E	۰/۱kPa	چسباننده قیری حاوی ۸٪ وزنی LUS-1
S	H	V	۳/۲kPa	
S	H	E	۰/۱kPa	
S	H	V	۳/۲kPa	

افزایش تنش نشده و دارای نوسان است. کمترین میزان حساسیت به تنش در چسباننده‌های حاوی ۶ درصد وزنی اصلاح‌کننده روی داده است. البته میزان حساسیت به تنش در چسباننده‌های دارای ۴ درصد وزنی LUS-1 نیز بدون مشکل بوده و با خط قرمز رسم شده (۷۵ درصد) فاصله مناسب دارد. افزایش مقدار اصلاح‌کننده طبق جدول ۷ باعث افزایش رتبه ترافیکی چسباننده‌های قیری، به‌ویژه در دماهای ۵۸°C و ۶۴°C شده، اما در دمای ۷۰°C بی‌تأثیر بوده است که حاکی از کاهش اثر مقدار اصلاح‌کننده بر ارتقاء رتبه ترافیکی چسباننده‌ها در دماهای زیاد است.

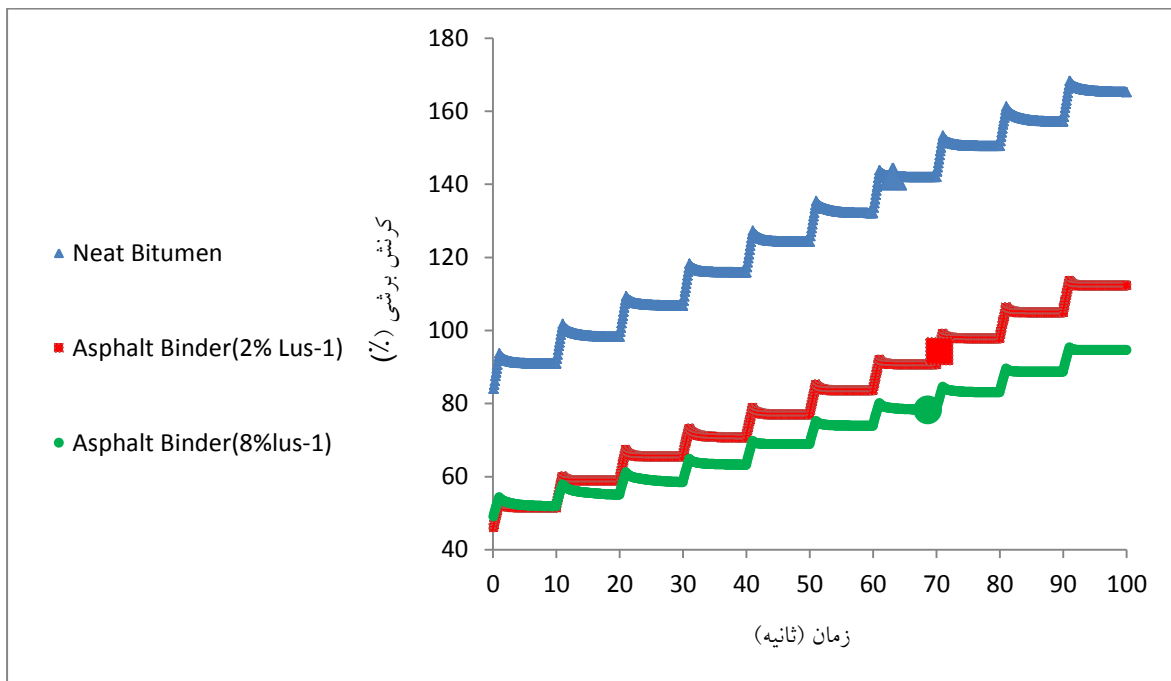
۳-۳-۳. اثر سطح تنش بر رفتار چسباننده‌های قیری

۳-۳-۲. اثر مقدار اصلاح‌کننده بر رفتار چسباننده‌های قیری

با توجه به شکل‌های ۶ و ۷، مشاهده می‌شود که در کلیه سطوح دما و تنش، بیشترین میزان درصد بازگشت الاستیک (R) و کمترین میزان نرمی خزشی بازگشت ناپذیر (Jnr) مربوط به چسباننده قیری حاوی ۴ درصد نانوذره LUS-1 بوده است. در حقیقت، نانو اصلاح‌کننده LUS-1 با ایجاد یک شبکه پکیارچه در بین اجزای تشکیل‌دهنده قیر، باعث بهبود الاستیسیته تأخیری قیر شده که با به حداکثر رسانیدن درصد بازگشت الاستیک (R) در ۴ درصد وزنی، خودنمایی کرده است. بر اساس شکل ۸، افزودن نانو اصلاح‌کننده تحقیق باعث ایجاد یک روند نزولی مطلق در حساسیت چسباننده‌ها به

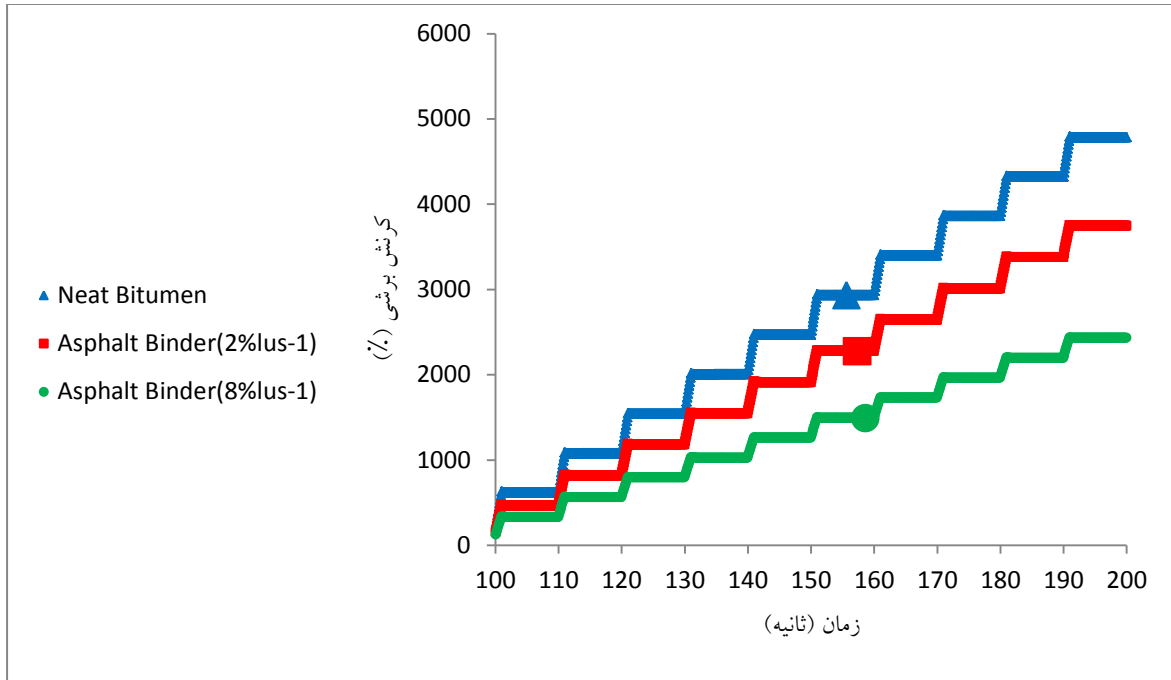
بیشترین و کمترین مقدار اصلاح کننده بیشتر و نمایان تر شده است. این فاصله حاکی از اختلاف بیشتر و واضح تر عملکرد مقدار اصلاح کننده در سطح بارگذاری بیشتر در چسباننده های قیری است. شکل های ۹ و ۱۰ همچنین بیان می کنند که چه در سطوح تنش کم و چه در سطوح تنش زیاد، در سیکل های ابتدایی خزش و بازگشت، میزان کرنش چسباننده های قیری به هم نزدیک بوده، اما با افزایش تعداد سیکل ها و نزدیک شدن به سیکل های انتهایی، اختلاف کرنش ها بیشتر و نمایان تر شده و میزان واگرایی نمودارهای کرنش با زمان چسباننده های قیری بیشتر شده است که نشان دهنده بروز رفتارهای متفاوت از سوی چسباننده های قیری با درصد های مختلف اصلاح کننده در برابر تکرار بارگذاری است.

در شکل های ۹ و ۱۰، نمودارهای تغییرات کرنش برشی با زمان در قیر خالص و چسباننده های حاوی بیشترین و کمترین مقدار اصلاح کننده ترسیم شده است. بر اساس این شکل ها، سطح تنش بر میزان نرخ کرنش چسباننده ها اثرگذار بوده است، به طوری که میزان نرخ کرنش چسباننده ها در سطح تنش $\frac{3}{2}$ نسبت به $\frac{0}{1}$ ده ها برابر شده است. این افزایش چندین برابری نرخ کرنش نشان دهنده تمایل چسباننده های قیری به بروز رفتار ویسکوزتر در سطوح بالای تنش است. در هر دو سطح تنش آزمایش، میزان کرنش برشی با زمان روند صعودی داشته که با افزایش مقدار افزودنی این روند صعودی در سطح پایین تری ادامه یافته است. در سطح تنش $\frac{0}{1}$ ، نمودار کرنش - زمان چسباننده های حاوی کمترین و بیشترین مقدار LUS-1 به هم نزدیک بوده، اما در سطح تنش $\frac{3}{2}$ ، فاصله نمودار کرنش چسباننده های حاوی



شکل ۹. مقایسه تغییرات کرنش برشی با زمان در قیر خالص و چسباننده های حاوی کمترین و بیشترین مقادیر اصلاح کننده در تنش $\frac{0}{1}$ kPa*

*توجه: مقدار کرنش برشی در هر سه نمودار از صفر شروع شده است، اما بلافاصله در ثانیه یک دهم از مرحله خزش در سیکل اول به مقادیر حداقل ۴۶، ۴۹ و ۸۴ درصد رسیده است که با توجه به تعداد ۱۰۰۱ نقطه در دستگاه مختصات، آن بخش از نمودار که مربوط به فاصله نقطه صفر و یک دهم ثانیه است بر محور کرنش برشی منطبق شده و اینگونه به نظر می رسد که نمودارها از صفر شروع نشده اند



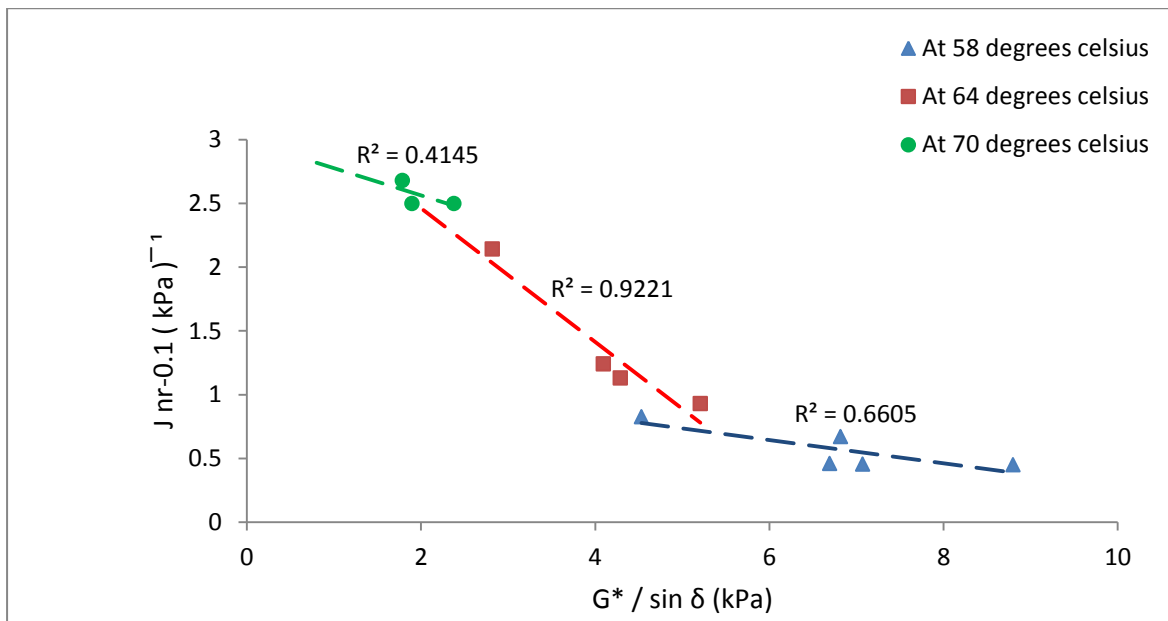
شکل ۱۰. مقایسه تغییرات کرنش برشی با زمان در قیر خالص و چسباننده‌های حاوی کمترین و بیشترین مقادیر اصلاح‌کننده (تنش ۳/۲ kPa)

دماهای زیاد خدمت را در پی داشته است. شکل‌های ۵ تا ۷ همچنین بیانگر آن هستند که نتایج آزمایش‌های DSR و MSCR سازگار بوده است. به طوری که R و $G^*/\sin\delta$ در سطوح مختلف دمایی از روند تغییرات مشابهی برخوردار بوده و در خلاف روند تغییرات J_{nr} است. شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ نیز نمایانگر همبستگی خطی نسبتاً خوب میان پارامترهای عملکرد شیارشدگی چسباننده‌های قیری اصلاح‌شده با سیلیس مزو متخلخل LUS-1 در دو آزمایش DSR و MSCR است. بیشینه مقادیر R و $G^*/\sin\delta$ و همچنین کمینه مقدار J_{nr} در چسباننده قیری حاوی ۴ درصد وزنی از اصلاح‌کننده LUS-1 روی داده است. به عبارت دیگر، در هر دو آزمایش DSR و MSCR، بیشترین مقاومت در برابر شیارشدگی در چسباننده حاوی ۴ درصد وزنی اصلاح‌کننده ایجاد شده است. همچنین، همانگونه که انتظار می‌رفت، هم در آزمایش DSR و هم در آزمایش MSCR، پتانسیل مقاومت در برابر شیارشدگی با افزایش سطح دما کاهش یافته است.

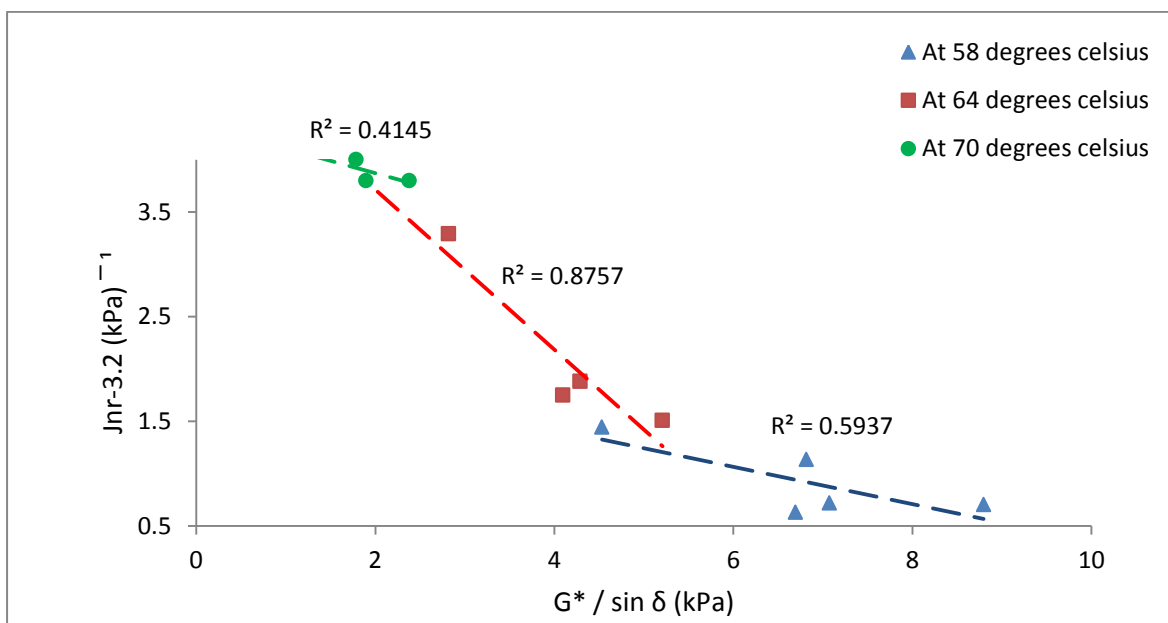
۳-۴. مقایسه نتایج آزمایش خزش و بازگشت در چند سطح تنش (MSCR) با رئومتر برش دینامیک (DSR)

۳-۴-۱. مقایسه نتایج بر اساس تغییرات سطوح دما و مقدار اصلاح‌کننده

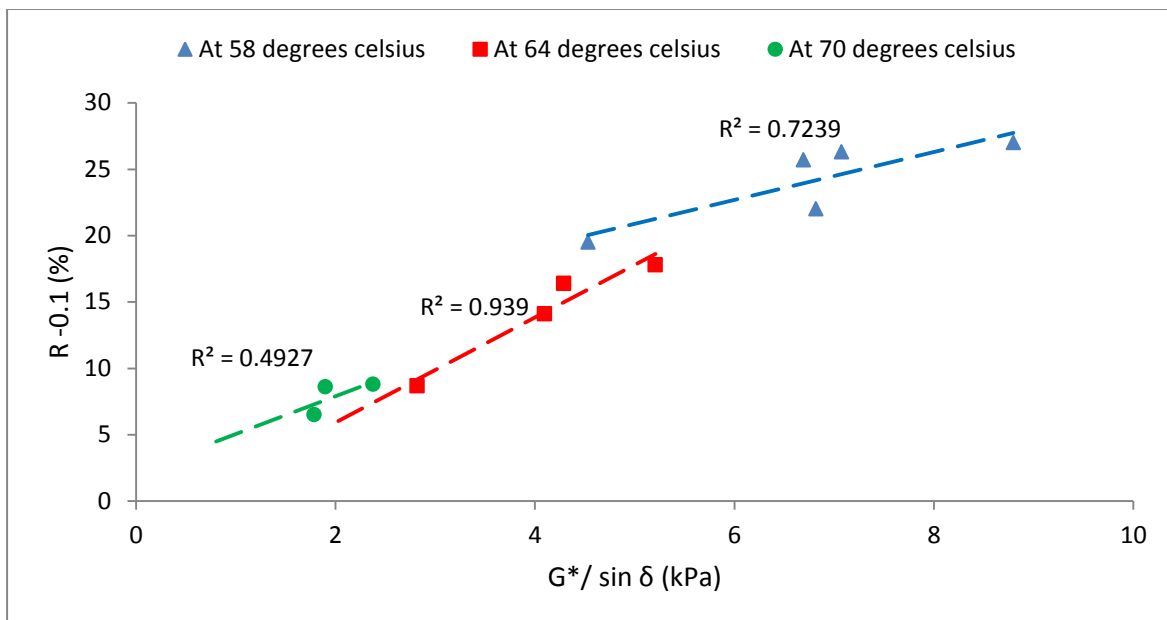
مقادیر اندازه‌گیری شده پارامترهای مرتبط با عملکرد رئولوژیک در دمای زیاد (یعنی پارامتر شیارشدگی $(G^*/\sin\delta)$ ، نرمی خزشی بازگشت ناپذیر (J_{nr}) و درصد بازگشت الاستیک (R)) در شکل‌های ۵ تا ۷ نشان می‌دهد که اصلاح‌کننده نانوساختار LUS-1 اثر قابل توجهی بر عملکرد دمای زیاد چسباننده‌های قیری داشته است. این تأثیر قابل توجه می‌تواند ناشی از ساختار دارای حفرات نانومقیاس، مساحت سطح ویژه زیاد و مورفولوژی رشته‌ای آن باشد که موجب تسهیل شکل‌گیری شبکه‌ای از سیلیس‌های نانوساختار با اثر مسلح‌کنندگی قوی در سرتاسر قیر شده و تقویت مقاومت در برابر تغییر شکل دائم در چسباننده‌های قیری و در نتیجه بهبود میزان مقاومت در برابر شیارشدگی در



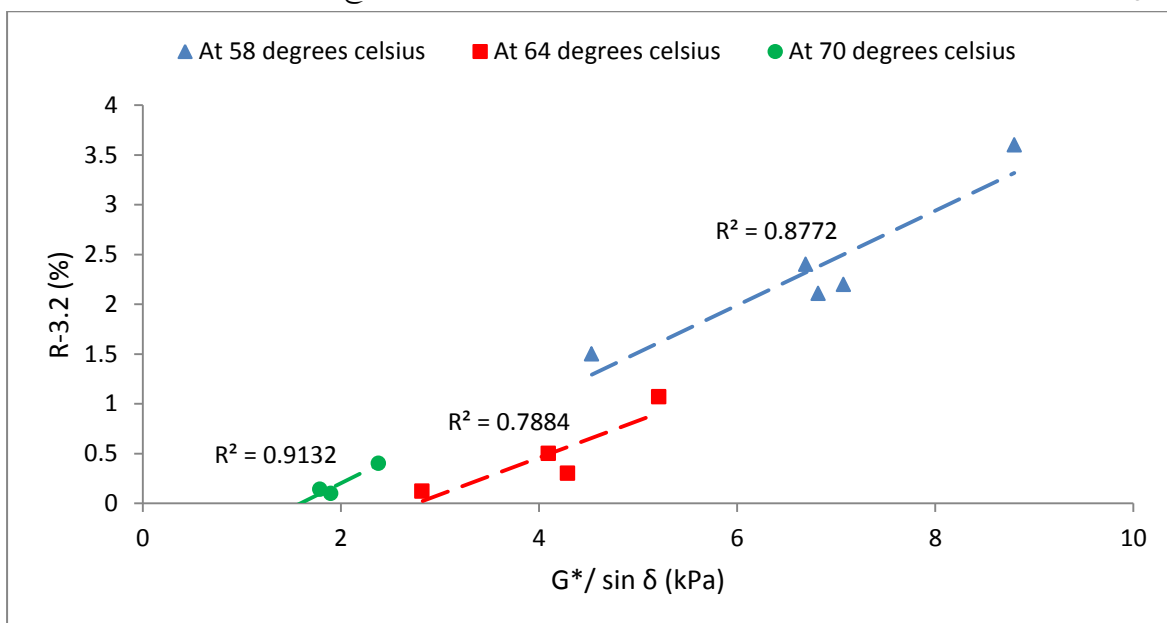
شکل ۱۱. همبستگی خطی پارامتر شیارشدگی آزمایش DSR با نرمی خزشی بازگشت‌ناپذیر (در سطح تنش ۱۰۰ پاسکال) آزمایش MSCR



شکل ۱۲. همبستگی خطی پارامتر شیارشدگی آزمایش DSR و نرمی خزشی بازگشت‌ناپذیر (در سطح تنش ۳۲۰۰ پاسکال) آزمایش MSCR



شکل ۱۳. همبستگی خطی پارامتر شیارشدگی در آزمایش DSR و بازگشت الاستیک (در سطح تنش ۱۰۰ پاسکال) آزمایش MSCR



شکل ۱۴. همبستگی خطی پارامتر شیارشدگی در آزمایش DSR و بازگشت الاستیک (در سطح تنش ۳۲۰۰ پاسکال) آزمایش MSCR

سطح دمایی، کمترین مقدار حساسیت تنشی مربوط به چسباننده قیری اصلاح شده با ۶ درصد وزنی LUS-1 است نه چسباننده قیری حاوی ۴ درصد وزنی افزودنی و این مهمترین تفاوت میان نتایج آزمایش های DSR با MSCR است. در این خصوص می توان گفت که با توجه به اینکه پارامتر حساسیت تنشی $J_{nr,diff}$ با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می شود، لذا نتایج $J_{nr,0.1}$ و $J_{nr,3.2}$ نشان می دهد که در چسباننده قیری اصلاح شده با ۶

۲-۴-۳. مقایسه نتایج بر اساس تغییرات سطوح تنشی بر اساس شکل ۸، ملاحظه می گردد که در سطح دمایی ۵۸ درجه سلسیوس، کلیه چسباننده های قیری اصلاح شده نسبت به قیر خالص از حساسیت تنشی ($J_{nr,diff}$) کمتری در مقایسه با قیر خالص برخوردار شده اند که نشان از اثر مثبت اصلاح کننده در این ارتباط دارد. اما نکته جالب توجه در شکل ۸ این است که در هر سه

مربوط به کرنش در نمودار شکل ۱۰ به خوبی نشان می-دهد که خروجی های به دست آمده در آزمایش MSCR به ویژه در این سطح تنش، ناشی از انجام آزمایش در محدوده ویسکوالاستیک غیرخطی بوده است.

۳-۴-۳. مقایسه نتایج بر اساس رفتار چسباننده های قیری

شکل های ۹ و ۱۰ نشان می دهند که نمودار کرنش کل (نمودار فرضی حاصل از اتصال نقاط مربوط به کرنش خزشی در سیکل های دهگانه) در آزمایش MSCR دارای یک روند خطی با زمان آزمایش در هر دو سطح تنش کم و زیاد است. شیب این نمودار خطی نشان دهنده نرخ کرنش چسباننده های قیری است. این شیب ثابت در واقع بیانگر تمایل نسبی چسباننده های قیری به بروز رفتارهای مشابه سیالات نیوتنی در دماهای زیاد بر اساس رابطه (۲) است.

(۲)

$$\tau = \frac{\partial v}{\partial y} \mu$$

که τ کرنش برشی (Pa)، $\frac{\partial v}{\partial y}$ نرخ کرنش (1/Sec) و μ ویسکوزیته (Pa.Sec) است.

تمایل چسباننده های قیری به بروز رفتار مشابه سیالات نیوتنی در دمای زیاد را می توان ناشی از عدم حضور اجزای صلب در آنها دانست، زیرا برخلاف چسباننده های قیری، وجود عناصر سفت و سخت مانند سنگدانه ها در مخلوط های آسفالتی به عنوان یک مانع عمل کرده و کرنش پلاستیک ایجاد شده در مخلوط آسفالتی را در یک سقف معینی محدود می نمایند که پس از آن هیچ افزایشی در کرنش پلاستیکی ایجاد نشده و این موضوع سبب ایجاد رابطه غیرخطی کرنش و زمان در مخلوط های آسفالتی می گردد. در شکل ۵ هم ملاحظه می گردد که در آزمایش DSR نیز در سطوح دمایی بالا با افزایش درصد وزنی اصلاح کننده، هم از نرخ افزایش شیب پارامتر شیارشدگی $G^*/\sin \delta$ به میزان قابل توجهی کاسته شده است و هم مقدار و دامنه نوسان آن به شدت

درصد وزنی LUS-1 در کلیه سطوح دمایی، میزان کاهش $J_{nr3.2}$ نسبت به کاهش $J_{nr0.1}$ غالب بوده، به طوری که پارامتر حساسیت تنشی ($J_{nr diff}$) این چسباننده در میان کلیه چسباننده ها کمترین مقدار را به خود اختصاص داده است. این بدان معنی است که در سطح تنش بالا، چسباننده قیری اصلاح شده با ۶ درصد وزنی LUS-1 دارای بهترین عملکرد در کلیه سطوح دمایی بوده است. به عبارت دیگر، این چسباننده در سطح تنشی بالا (۳۲۰۰ پاسکال) کاهش بیشتری در نسبت کرنش پلاستیک (بازگشت ناپذیر) به سطح تنش اعمال شده را در مقایسه با سطح تنشی پایین (۱۰۰ پاسکال) از خود به نمایش گذاشته است. بر اساس شکل ۸، چسباننده قیری اصلاح شده با ۴ درصد وزنی افزودنی تحقیق در رتبه ای پایین تر از چسباننده قیری حاوی ۶ درصد وزنی اصلاح کننده قرار می گیرد.

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

شکل های ۹ و ۱۰ نشان می دهند که در هر سیکل جداگانه بارگذاری و باربرداری و در هر دو سطح تنش، روند تغییرات کرنش در مرحله خزش (بارگذاری)، خطی و در مرحله بازگشت (باربرداری)، غیرخطی است. همچنین، چسباننده های قیری دارای کرنش الاستیک بیشتری در سطح تنش ۱۰۰ پاسکال نسبت به سطح تنش ۳۲۰۰ پاسکال هستند که این موضوع ناشی از بروز رفتار الاستیک بیشتر این چسباننده ها در سطح تنش کمتر به دلیل اعمال بار کمتر روی آنهاست. به عبارت دیگر، چون میزان تنش اعمال شده در آزمایش DSR روی چسباننده های قیری پیر شده در RTFOT به طور متوسط در حدود ۲۲۰ پاسکال (در بازه ۱۸۰ تا ۲۶۰) بوده است که به سطح پایین تنش اعمال شده در آزمایش MSCR (۱۰۰ پاسکال) نزدیک است. لذا، چسباننده های قیری در آزمایش MSCR در سطح تنش کمتر رفتاری نزدیکتر به نتایج کسب شده در آزمایش DSR داشته اند. اما در مقابل، مقادیر چند هزار درصدی

کمترین مقادیر J_{nr} در چسباننده قیری حاوی مقدار ۴ درصدی اصلاح کننده LUS-1 دیده شده است. همچنین، همبستگی خطی نسبتاً خوبی میان پارامترهای عملکرد شیارشدگی چسباننده‌های قیری اصلاح شده با سیلیس مزومتخلخل LUS-1 در دو آزمایش DSR و MSCR برقرار بوده است.

۳- در هر دو آزمایش DSR و MSCR، افزایش سطح دما موجب کاهش پتانسیل مقاومت در برابر شیارشدگی و تمایل به بروز رفتار ویسکوزتر و مشابه با سیالات نیوتنی در چسباننده‌های قیری شد.

۴- بر خلاف همسو بودن نتایج در شاخص مقاومت در برابر شیارشدگی، بر اساس پارامتر حساسیت به سطح تنش در آزمایش MSCR، چسباننده قیری دارای ۶ درصد وزنی اصلاح کننده، کمترین میزان حساسیت به افزایش سطح تنش را از خود بروز داد. این بدان معنی است که در سطح تنش بالا، چسباننده قیری اصلاح شده با ۶ درصد وزنی LUS-1 دارای بهترین عملکرد در کلیه سطوح دمایی بوده است. به عبارت دیگر، این چسباننده در سطح تنشی بالا (۳۲۰۰ پاسکال) کاهش بیشتری در نسبت کرنش پلاستیک (بازگشت ناپذیر) به سطح تنش اعمال شده را در مقایسه با سطح تنشی پایین (۱۰۰ پاسکال) از خود به نمایش گذاشته است. بنابراین، صرف نظر از میزان اعتبار این شاخص برای اصلاح کننده‌های غیرپلیمری، بر اساس آزمایش MSCR، بیشترین کارآمدی شبکه تشکیل شده از اصلاح کننده درون ملات قیری در برابر افزایش سطح تنش به چسباننده قیری حاوی ۶ درصد وزنی اصلاح کننده اختصاص یافت نه چسباننده قیری حاوی ۴ درصد وزنی اصلاح کننده و این را می‌توان مهمترین تفاوت در نتایج آزمایش‌های DSR و MSCR دانست.

کم شده است که نشان‌دهنده غلبه اثر دما بر میزان اصلاح کننده در سطوح دمایی بالا بوده و شاخصی از تمایل چسباننده‌ها به بروز رفتارهای مشابه سیالات نیوتنی در دماهای زیادتر یعنی حداکثر شدن δ و حداقل شدن G^* و میل به تثبیت مقادیر هر دوی آنهاست. بنابراین، می‌توان گفت که نتایج آزمایش‌های DSR و MSCR از نقطه نظر رفتار چسباننده‌های قیری نیز دارای نتایجی سازگار و همراستا با هم بوده‌اند.

۴. نتیجه گیری

هدف از این تحقیق، مقایسه نتایج آزمایش‌های DSR و MSCR در عملکرد شیارشدگی چسباننده‌های قیری اصلاح شده با سیلیس مزومتخلخل LUS-1 بود که در آن، نتایج زیر حاصل گردید:

۱- بر اساس نتایج هر دو آزمایش DSR و MSCR، استفاده از اصلاح کننده نانوساختار LUS-1 موجب بهبود عملکرد مقاومت در برابر شیارشدگی چسباننده‌های قیری گردید. این اثربخشی را می‌توان ناشی از ساختار رشته‌ای و متخلخل LUS-1 با مساحت سطح ویژه زیاد آن دانست که با تسهیل شکل‌گیری شبکه‌ای از سیلیس-های نانوساختار با اثر مسلح‌کنندگی قوی در سرتاسر قیر، موجب تقویت مقاومت در برابر تغییر شکل دائم در چسباننده‌های قیری شده و در نتیجه بهبود میزان مقاومت در برابر شیارشدگی در دماهای زیاد خدمت را در پی داشته است.

۲- مشخص شد که نتایج آزمایش‌های DSR و MSCR از نقطه نظر پارامترهای مقاومت در برابر شیارشدگی همسو بوده است، به طوری که روند تغییرات R و $G^*/\sin \delta$ در سطوح دمایی مختلف یکسان و روند تغییرات J_{nr} نیز برعکس این دو بوده است. همچنین، در هر دو آزمایش، بیشترین مقادیر R و $G^*/\sin \delta$

۵. مراجع

- AASHTO M 332. 2019. Standard specification for performance-graded asphalt binder using multiple stress creep recovery (MSCR) test. AASHTO specifications and test methods. <https://store.transportation.org/item/publicationdetail/4231>
1. Arshad, A. K., Samsudin, M. S., Masri, K. A., Karim, M. R. and Abdul Halim, A. G. 2017. Multiple stress creep and recovery of nanosilica modified asphalt binder. MATEC Web of Conferences, 103: 09005. doi: 10.1051/mateconf/201710309005
 - Ashish, P. K. and Singh, D. 2019. Effect of carbon nano tube on performance of asphalt binder under creep-recovery and sustained loading conditions. *Constr. Build. Mater.*, 215: 523-543. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.199
 2. ASTM D2872. 2019. Standard test method for effect of heat and air on a moving film of asphalt (rolling thin-film oven test). ASTM International, West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/D2872-19
 - ASTM D7175. 2015. Standard test method for determining the rheological properties of asphalt binder using a dynamic shear rheometer. ASTM International, West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/D7175-15
 3. Babagoli, R., Vamegh, M. and Mirzababaei, P. 2018. Laboratory evaluation of the effect of SBS and Lucobite on performance properties of bitumen. *Petrol. Sci. Technol.*, 37(3): 255-260. doi: 10.1080/10916466.2018.1539748
 4. Bahrami, Z., Badiei, A., Atyabi, F., Darabi, H. R. and Mehraei, B. 2015. Piperazine and its carboxylic acid derivatives-functionalized mesoporous silica as nanocarriers for gemcitabine: Adsorption and release study. *Mater. Sci. Eng.: C*, 49: 66-74. doi: 10.1016/j.msec.2014.12.069
 - Beck, J. S., Chu, C. T., Johnson, I. D., Kresge, C. T., Leonowicz, M. E., Roth, W. J. and Vartuli, J. C. 1992. Synthesis of mesoporous crystalline material. Google patents.
 - Bonneviot, L., Morin, M. and Badiei, A. 2003. Mesostructured metal or non-metal oxides and method for making same. US 0133868, US patent.
 - Cai, L., Shi, X. and Xue, J. 2018. Laboratory evaluation of composed modified asphalt binder and mixture containing nano-silica/rock asphalt/SBS. *Constr. Build. Mater.*, 172: 204-211. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.187
 - Crucho, J. M. L., das Neves, J. M. C., Capitão, S. D. and de Picado-Santos, L. G. 2018. Mechanical performance of asphalt concrete modified with nanoparticles: Nanosilica, zero-valent iron and nanoclay. *Constr. Build. Mater.*, 181: 309-318. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.052
 - D'Angelo, J. 2009. The relationship of the MSCR test to rutting. *Road Mater. Pavement Design*, 10: 61-80. doi: 10.1080/14680629.2009.9690236
 - Dong, Z., Zhou, T., Luan, H., Williams, R. C., Wang, P. and Leng, Z. 2019. Composite modification mechanism of blended bio-asphalt combining styrene butadiene-styrene with crumb rubber: a sustainable and environmental friendly solution for wastes. *J. Clean. Prod.*, 214: 593-605. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.01.004
 - Filho, P. G. T. M., Rodrigues dos Santos, A. T., Lucena, L. C. de F. L. and de Sousa Neto, V. F. 2019. Rheological evaluation of asphalt binder 50/70 incorporated with titanium dioxide nanoparticles. *J. Mater. Civ. Eng.*, 31(10): 04019235. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002885
 - Ghanoon, S. A. and Tanzadeh, J. 2019. Laboratory evaluation of nano-silica modification on rutting resistance of asphalt binder. *Constr. Build. Mater.*, 223: 1074-1082. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.295
 - Leiva-Villacorta, F. and Vargas-Nordbeck, A. 2017. Optimum content of nano-silica to ensure proper performance of an asphalt binder. *Road Mater. Pavement Design*, 20(2): 414-425. doi: 10.1080/14680629.2017.1385510
 - Lin, P., Yan, C., Huang, W., Li, Y., Zhou, L., Tang, N., Xiao, F., Zhang, Y. and Quan, L. 2019. Rheological, chemical and aging characteristics of high content polymer modified asphalt. *Constr. Build. Mater.*, 207: 619-629. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.086
 - Mansourian, A., Rezazad Gohari, A. and Karimian Khosrowshahi, F. 2019. Performance evaluation of asphalt binder modified with EVA/ HDPE/nanoclay based on linear and non-linear viscoelastic behaviors. *Constr. Build. Mater.*, 208: 554-563. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.065
 - Moeini, A., Badiei, A. and Rashidi, A. M. 2019. Effect of nanosilica morphology on modification of asphalt binder. *Road Mater. Pavement Design*, 21(8): 2230-2246. doi: 10.1080/14680629.2019.1602072
 - Moghadassnejad, F., Nazari, H., Naderi, K., Karimiyan Khosrowshahi, F. and Hatefi Oskuei, M. 2016. Thermal and rheological properties of nanoparticle modified asphalt binder at low and intermediate temperature range. *Petrol. Sci. Technol.*, 35(7): 641-646. doi: 10.1080/10916466.2016.1276589

- Moreno-Navarro, F., Tauste, R., Sol-Sánchez, M. and Rubio-Gómez, M. C. 2019. New approach for characterising the performance of asphalt binders through the multiple stress creep and recovery test. *Road Mater. Pavement Design*, doi: 10.1080/14680629.2019.1595094
- Rezaei, S., Khordehbinan, M. V., Fakhrefatemi, S. M. R., Ghanbari, S. and Ghanbari, M. 2017. "The effect of nano-SiO₂ and the styrene butadiene styrene polymer on the high-temperature performance of hot mix asphalt". *Petrol. Sci. Technol.*, 35(6): 553-560. doi: 10.1080/10916466.2016.1270301
- Sadeghnejad, M. and Shafabakhsh, Gh. 2017. Use of nano SiO₂ and nano TiO₂ to improve the mechanical behaviour of stone mastic asphalt mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 157: 965-974. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.163
- Saltan, M., Terzi, S. and Karahancer, S. 2017. Examination of hot mix asphalt and binder performance modified with nano silica. *Constr. Build. Mater.*, 156: 976-984. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.069
- Saltan, M., Terzi, S. and Karahancer, S. 2018. Performance analysis of nano modified bitumen and hot mix asphalt. *Constr. Build. Mater.*, 173: 228-237. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.014
- Shafabakhsh, Gh., Motamedi, M., Firouznia, M. and Isazadeh, M. 2019. Experimental investigation of the effect of asphalt binder modified with nanosilica on the rutting, fatigue and performance grade. *Petrol. Sci. Technol.*, 37: 1495-1500. doi: 10.1080/10916466.2018.1476534
- Taherkhani, H. and Afrooz, S. 2016. The properties of nanosilica-modified asphalt cement. *Petrol. Sci. Technol.*, 34(15): 1381-1386. doi: 10.1080/10916466.2016.1205604
- Tang, J., Zhu, C., Zhang, H., Xu, G., Xiao, F. and Amirhanian, S. 2019. Effect of liquid ASAs on the rheological properties of crumb rubber modified asphalt. *Constr. Build. Mater.*, 194: 238-246. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.028
- Wang, C. and Wang, Y. 2019. Physico-chemo-rheological characterization of neat and polymer-modified asphalt binders. *Constr. Build. Mater.*, 199: 471-482. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.064
- Wanyika, H. 2013. Sustained release of fungicide metalaxyl by mesoporous silica nanospheres. *J. Nanopart. Res.*, 15(8): 1-9. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11051-013-1831-y>
- Yang, Q., Liu, Q., Zhong, J., Hong, B., Wang, D. and Oeser, M. 2019. Rheological and micro-structural characterization of bitumen modified with carbon nanomaterials. *Constr. Build. Mater.*, 201: 580-589. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.173
- Zhang, L., Xing, C., Gao, F., Li, T. and Tan, Y. 2016. Using DSR and MSCR tests to characterize high temperature performance of different rubber modified asphalt, *Constr. Build. Mater.* 127: 466-474. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.010
- Zhou, Z., Gu, X., Dong, Q., Ni, F. Jiang, Y. 2019. Rutting and fatigue cracking performance of SBS-RAP blended binders with a rejuvenator. *Constr. Build. Mater.* 203: 294-303. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.119

مقایسه نتایج آزمایش های DSR و MSCR بر پایه عملکرد شیارشدگی چسباننده های قیری اصلاح شده با سیلیس ...