

## ارزیابی آزمایشگاهی ویژگی‌های عملکردی قیر اصلاح شده با ترکیب افزودنی‌های نانو سیلیس و گیلسونیت

مقاله علمی - پژوهشی

رضوان باباگلی<sup>\*</sup>، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران

<sup>\*</sup>پست الکترونیکی نویسنده مسئول: rezvan\_babagoli@yahoo.com

دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۲۵ - پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۵

صفحه ۲۷۰-۲۵۱

### چکیده

این تحقیق به بررسی نحوه تأثیر افزودنی‌های نانو سیلیس (NS1) و گیلسونیت بر رفتارهای عملکردی قیر می‌پردازد. نوع ۷۰/۶۰ قیر، گیلسونیت (۰، ۳، ۵ و ۷ درصد وزن قیر) و نانو سیلیس (۰، ۲، ۴ و ۶ درصد وزن قیر) مورد استفاده قرار گرفت. رفتارهای فیزیکی و رئولوژیکی قیر اصلاح شده توسط آزمایش‌های ویسکوزیته چرخشی (RV2)، رئومتر برشی دینامیکی (DSR3)، بازیابی خزش تنش چندگانه (MSCR4)، رئومتر تیر خمشی (BBR5)، و رفت و برگشت دامنه خطی (LAS6) ارزیابی می‌شوند. نتایج آزمون رفتار رئولوژیکی نشان داد که استفاده از گیلسونیت و افزودنی‌های NS مقاومت شیارشدگی و خستگی قیر را افزایش می‌دهند. استفاده از گیلسونیت باعث کاهش مقاومت چسبنده‌های آسفالتی در دمای پایین می‌شود، در حالی که NS آن را بهبود می‌بخشد. نتایج آزمایش پایداری ذخیره‌سازی نشان می‌دهد که استفاده از گیلسونیت پایداری ذخیره‌سازی قیر را افزایش می‌دهد. همچنین، استفاده از NS منجر به افزایش جداسازی فاز می‌شود. نتایج آزمایش MSCR با افزودن گیلسونیت و NS بهبود عملکرد قیر خالص در دمای بالا را در سطوح مختلف تنش نشان می‌دهد. علاوه بر این، استفاده از NS مقاومت شیارشدگی نمونه‌ها را افزایش می‌دهد. بر اساس آزمایش LAS، استفاده از گیلسونیت و افزودنی‌های NS خواص خستگی قیر را افزایش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: قیر، نانو سیلیس (NS)، گیلسونیت، SMA<sup>7</sup>; MSCR، خستگی، LAS

### ۱- مقدمه

که این عوامل نمی‌توانند خواص شیارشدگی و خستگی قیر را بررسی کنند. این پارامترها رابطه ضعیفی با عملکرد مخلوط نشان می‌دهند. محققان روسازی آزمایش‌های پیشرفته‌ای مانند بازیابی خزش چندگانه (MSCR) و آزمون‌های رفت و برگشت دامنه خطی (LAS) را برای ارزیابی دقیق‌تر رفتارهای شیار و خستگی قیر اصلاح شده معرفی کردند (Vargas et al, 2013). مطالعات متعددی به این نتیجه رسیدند که بهبود قیر با افزودنی‌ها برای مقاومت بهتر مخلوط‌ها در برابر آسیب‌های ذکر شده بسیار مهم است (Yuge et al, 2013). تعداد زیادی از مواد افزودنی

شیار شدن و ترک خوردگی ناشی از خستگی دو مشکل اصلی در روسازی آسفالت هستند. اخیراً بسیاری از محققان روسازی سعی کرده‌اند ویژگی‌های عملکردی مخلوط‌های آسفالتی را در دماهای با عملکرد بالا و پایین بهبود بخشند. همچنین، تحقیقات متعددی برای پیشنهاد یک فاکتور رئولوژیکی مناسب برای تعیین دقیق خواص میانی و دمای بالا آسفالت بایندها انجام شده است. سیستم درجه بندی عملکرد فاکتورهای شیار و خستگی را برای بررسی ویژگی‌های متوسط و دمای بالا مخلوط‌های اصلاح شده و اصلاح نشده معرفی می‌کند. مطالعات مختلف ثابت کرده‌اند

گیلسونیت باعث افزایش ویسکوزیته قیر پایه و کاهش درجه نفوذ آنها می‌شود. ممکن است به این دلیل باشد که استفاده از گیلسونیت باعث سفت شدن قیر می‌شود. فرآیندهای مرطوب و خشک برای آماده ساختن گیلسونیت برای استفاده در ساخت روسازی استفاده می‌شود. در فرآیند مرطوب، می‌توان مستقیماً این را در قیر اعمال کرد، اما در فرآیند خشک، قبل از قرار دادن آن در مخلوط کن برای مخلوط شدن با آسفالت، به افزودن گیلسونیت به سنگدانه نیاز است. ادبیات استفاده از گیلسونیت بهبود در تغییر شکل دائمی و رفتار خستگی چسباننده‌های آسفالت را در حالی که عملکرد آنها را در دمای پایین کاهش می‌دهد، نشان می‌دهد. صبوری و همکاران تأثیر محتویات مختلف گیلسونیت بر رفتار خستگی چسباننده آسفالت را بررسی کردند. آزمون‌های LAS و رثومتر برشی دینامیکی (DSR) برای ارزیابی ویژگی‌های قیر در دمای متوسط و آزمون خستگی خمشی چهار نقطه‌ای برای تأیید نتایج استفاده شد. یافته‌های آزمون LAS و FPB<sup>8</sup> رتبه‌های مشابهی از قیر اصلاح شده و مخلوط‌های مربوط را نشان داد (Babagoli et al, 2017). چندین افزودنی برای بهبود عملکرد مخلوط‌ها استفاده می‌شود. ایران در نقطه ای از جهان قرار دارد که در آن معادن متعدد و غنی گیلسونیت وجود دارد. تحقیقات قبلی نشان داده است که افزودن گیلسونیت باعث بهبود عملکرد قیر در دماهای بالا و کاهش مقاومت قیر در برابر ترک‌خوردگی در دماهای پایین در روسازی می‌شود. مطالعات قبلی (Ameli et al, 2020; Ziari et al, 2015; Babagoli et al, 2015; Nikookar et al, 2021) همچنین نشان داد که افزودن تنها یک افزودنی برای اصلاح مخلوط‌ها نمی‌تواند عملکرد قیر را بهتر کند. بنابراین، اصلاح قیری با استفاده از بیش از یک افزودنی برای بهبود احتمالی رفتار روسازی در نتیجه برهمکنش‌های متعدد بین افزودنی‌ها و قیر ضروری است. بر اساس مطالعات قبلی، افزودن NS منجر به افزایش عملکرد قیر به ویژه خواص ترک خوردگی در دمای پایین می‌شود. بنابراین در تحقیق حاضر، ویژگی‌های عملکردی بایندها و مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با ترکیب گیلسونیت و NS مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همچنین، اطلاعات محدودی در ادبیات برای توصیف ویژگی‌های ترکیب NS/Gilsonite در آسفالت اصلاح شده وجود دارد. مطالعه حاضر با هدف ارزیابی تأثیر گیلسونیت

شامل خرده لاستیک، استایرن-بوتادین-لاستیک، استایرن-بوتادین-استایرن-پلی پروپیلن، پلی اتیلن، الاستومر پلی الفین و نانومواد شامل نانو فیبر کربن، نانو لوله کربن، نانو خاک رس، نانو آهک هیدراته و غیره. برای افزایش عملکرد قیر استفاده می‌شود. با این حال، انتخاب یک نوع افزودنی مناسب برای یک کشور به دلیل موقعیت‌های جغرافیایی مختلف و ظرفیت‌های موجود کشورها، به نوعی با کشور دیگر متفاوت است. در هنگام روسازی، متخصصان باید عواملی غیر از عملکرد مناسب کلاسورهای آسفالتی مانند سازگاری با محیط زیست، مسائل اقتصادی، تولید اصلاح کننده و غیره را در نظر بگیرند (Fang et al, 2013). یک اصلاح کننده مفید ممکن است عملکرد قیر را در برابر چندین مشکل بهبود بخشد. همانطور که برخی از مطالعات انجام شده قبل نشان می‌دهد، اصلاح مخلوط‌ها با افزودن تنها یک عنصر نمی‌تواند رفتار مخلوط‌ها را بهتر کند. بنابراین، اصلاح با بیش از یک افزودنی ضروری است که احتمالاً منجر به بهبود روسازی‌ها در نتیجه فعل و انفعالات متعدد می‌شود. برای این منظور، در تحقیقات فعلی، گیلسونیت و نانو سیلیس (NS) برای اصلاح یک قیر خالص انتخاب شده‌اند (Ziari et al, 2021).

سیلیس یکی از مواد رایجی است که برای ساخت ژل‌های سیلیکا، سیلیس دوددار و سیلیس کلئیدی استفاده می‌شود. استفاده از NS برای تولید دارو و دارورسانی گسترده است. اثرات مثبت استفاده از ذرات NS افزایش خواص الاستومرها و مخلوط بتن سیمانی است. هزینه کمتر ساخت و توانایی افزایش خواص مخلوط‌ها منجر به جذب کارشناسان روسازی برای استفاده از این ماده در صنعت روسازی شد. NS دارای مساحت سطح بالا، محتوای جذب بالا، توانایی مناسب برای پراکندگی، پایداری عالی و خلوص شیمیایی است. بنابراین، استفاده از NS باعث افزایش چقرمگی، مقاومت در برابر حساسیت، مقاومت شیارشدگی و پایداری مخلوط‌ها می‌شود، در حالی که خواص مخلوط‌ها در دمای پایین کاهش می‌یابد. ایران یکی از مهمترین معادن گیلسونیت در جهان است. در مقایسه با سایر اصلاح کننده‌ها، گیلسونیت هزینه کمتری دارد. با توجه به فراوانی گیلسونیت در ایران، ارزیابی تأثیر این افزودنی بر رفتار بایندها و مخلوط آسفالت پایه ضروری است. بر اساس ادبیات، استفاده از

بنابراین، در این تحقیق از روش‌های MSCR و PG برای تعریف و ارزیابی درجه‌بندی بایندهای مختلف آسفالت استفاده شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- قیر

فقط یک نوع جداگانه از قیری ۷۰/۶۰ خالص استفاده می‌شود. نتایج آزمایشات قیر در جدول ۱ ارایه شده است.

(۰، ۳، ۵ و ۷ درصد وزن قیر)، و NS (0)، ۲، ۴ و ۶ درصد از نظر وزن قیر) بر خصوصیات رئولوژیکی آسفالت می‌باشد. قیر و همچنین ویژگی‌های مکانیکی مخلوط‌های SMA. عملکرد قیر اصلاح شده با اجرای آزمایش‌های فیزیکی (درجه نفوذ و نقطه نرم‌شدن) و همچنین آزمایش‌های رئولوژیکی (ویسکوزیته چرخشی، DSR، MSCR). و تست‌های LAS) ارزیابی شد. تحقیقات اندکی برای در نظر گرفتن شرایط ترافیکی در درجه‌بندی قیر انجام شده است. مطالعات قبلی به جای شرایط ترافیکی، شرایط آب و هوایی را برای طبقه‌بندی کلاسورهای آسفالت در نظر گرفته‌اند.

جدول ۱. خصوصیات قیر

نتیجه	استاندارد	آزمایش
66.5	ASTM D5	درجه نفوذ (0.1mm)
46.6	ASTM D36	نقطه نرمی (°C)
100	ASTM D113	شکل پذیری (cm)
302	ASTM D92	نقطه اشتعال (°C)
320	ASTM D70	نقطه شعله وری (°C)
1.043	ASTM D70	وزن مخصوص (gr/cm <sup>3</sup> )

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی گیسونایت

نتایج	استاندارد	پارامترها
1.11	ASTM D3289	وزن مخصوص (g/cm <sup>3</sup> )
81	ASTM D4	(%) قابلیت حل در CS2
97.65	ASTM D2042	(%) قابلیت حل در TCE
0	ASTM D5	درجه نفوذ (0.1 mm)
7.1	ASTM D5291	(%) درصد هیدروژن
0.67	ASTM D5291	(%) درصد نیتروژن
3.1	ASTM D5291	(%) درصد اکسیژن
4	UOP 864	(%) درصد سولفور
221	-	(°C) نقطه نرمی
4.1988	ASTM D3174	(%) درصد خاکستر
< 5	ASTM 3173	(%) درصد رطوبت
29	ASTM D5291	(%) درصد کربن
قهوه‌ای	-	رنگ

## ۲-۲- گیلسونیت

گیلسونیت مورد نیاز مطالعه از روستای گراوه واقع در غرب ایران تهیه می‌شود. جدول ۲ خواص شیمیایی و فیزیکی گیلسونیت را نشان می‌دهد. گیلسونیت (۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد وزن قیر) که از الک #۲۰ عبور داده شده است برای اصلاح مخلوط اصلی استفاده می‌شود. شکل ۱ مواد گیلسونیت مورد استفاده در کار فعلی را نشان می‌دهد.



شکل ۱. گیلسونایت مورد استفاده

## ۳-۲- نانورس

شکل ۲ NS مورد استفاده در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. علاوه بر این، جدول ۳ مشخصات فیزیکی NS را نشان می‌دهد.



شکل ۲. نانوسیلیس مورد استفاده

جدول ۳. خصوصیات نانو سیلیس

ظاهر	(mm) متوسط اندازه دانه	سطح مخصوص (m <sup>2</sup> /g)	وزن مخصوص (gr/cm <sup>3</sup> )	(%) درصد سیلیس
پودر سفید	30	200±34	0.032-0.058	99.82

## ۲-۴- آماده سازی نمونه

گیلسونیت به تدریج به مخلوط اضافه می‌شود و با حفظ سرعت ثابت به مدت ۳۰ دقیقه هم می‌زنیم. چندین نمونه حاوی مقادیر متفاوت NS و گیلسونایت تولید می‌شود. جدول ۷ نشان دهنده کد نمونه‌های پژوهش حاضر است. گزارش NCHRP<sup>9</sup> شماره ۴۲۵ برای طرح کلی مخلوط‌ها استفاده می‌شود (Brown et al, 1999). با توجه به طرح کلی مخلوط، قیر بهینه با محتوای قیر ۷٫۵ درصد به دست می‌آید. برای هر یک از انواع مخلوط اصلاح نشده و اصلاح شده، سه تکرار تولید می‌شود.

ابتدا ۶۰۰ گرم بایندر پایه آسفالت تا ۱۷۰ درجه سانتی گراد حرارت داده می‌شود. سطح ویژه بالای NS ممکن است باعث تولید پراکندگی غیر همگن در قیر شود. برای تهیه یک قیر اصلاح شده همگن، NS به مخلوط اضافه می‌شود و به مدت ۳۰ دقیقه در یک همزن برشی بالا با سرعت زاویه‌ای ۶۰۰۰ دور در دقیقه هم زده می‌شود. شکل ۳ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی قیر اصلاح شده با سه قدر متفاوت حاوی ۳ درصد NS را نشان می‌دهد. بر این اساس، قطر ذرات تقریباً بین ۵۰ تا ۱۵۰ نانومتر است. سپس



جدول ۴. کد گذاری نمونه‌ها

شماره	گیلسونایت	نانورس	کد نمونه
1	0	0	G0N0
2	0	2	G0N2
3	0	4	G0N4
4	0	6	G0N6
5	3	0	G3N0
6	3	2	G3N2
7	3	4	G3N4
8	3	6	G3N6
9	5	0	G5N0
10	5	2	G5N2
11	5	4	G5N4
12	5	6	G5N6
13	7	0	G7N0
14	7	2	G7N2
15	7	4	G7N4
16	7	6	G7N6

### ۳- برنامه آزمایشگاهی

#### ۳-۱- آزمایشات فیزیکی و رئولوژیکی

سائنتی گراد انجام شده است. از معادله (۱) برای محاسبه عمر خستگی چسباننده‌های مختلف آسفالت استفاده می‌شود (Norouzi et al, 2021):

$$N_f = A (\gamma_{max})^B \quad (1)$$

که در آن ثابت‌های A و B با توجه به تئوری آسیب پیوسته ویسکوالاستیک (VECD<sup>10</sup>) تعیین می‌شوند.

#### ۴- نتایج

##### ۴-۱- آزمایشات فیزیکی و رئولوژیکی قیر

شکل‌های ۴ و ۵ نتایج آزمایش فیزیکی را برای قیری اصلاح شده Gilsonite/NS، Gilsonite نشان می‌دهند. با توجه به نتایج، افزودن گیلسونیت و گیلسونیت/NS به قیر اصلی، عملکرد مخلوط‌ها را بهبود می‌بخشد. نتایج همچنین نشان می‌دهد که استفاده از گیلسونیت و گیلسونیت/NS باعث افزایش نقطه نرم‌شدن و کاهش نفوذ می‌شود که با مطالعات قبلی مطابقت دارد. نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از گیلسونایت، نوع قیر از حالت ژل محلول به شکل ژل به دلیل جذب محتوای نور آسفالت تغییر می‌کند. علاوه بر افزودن گیلسونیت، ویسکوزیته قیر را بهبود می‌بخشد و با قیر اصلی سازگار است که می‌تواند منجر به یک مخلوط

تست نقطه نرمی، نفوذ و شکل پذیری برای ارزیابی رفتار فیزیکی قیری اصلاح نشده و اصلاح شده انجام می‌شود. علاوه بر این، ویسکوزیته چرخشی (RV)، رئومتر پرتو خمشی (BBR) و آزمایش‌های DSR برای ارزیابی رفتار رئولوژیکی بایندهای مختلف آسفالت استفاده می‌شوند.

##### ۳-۱-۲- تست پایداری ذخیره‌سازی

تست پایداری ذخیره‌سازی در رابطه با ASTM-D5892-96a برای تعیین حساسیت قیر اصلاح شده به جداسازی در دمای اختلاط بالا اعمال می‌شود (Ziari et al, 2014).

##### ۳-۲- تست MSCR

آزمایش MSCR برای بررسی رفتار شیار شدن مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده طبق "AASHTO TP 70" آزمون بازیابی خزش استرس چندگانه (MSCR) با استفاده از رئومتر برشی دینامیکی انجام می‌شود.

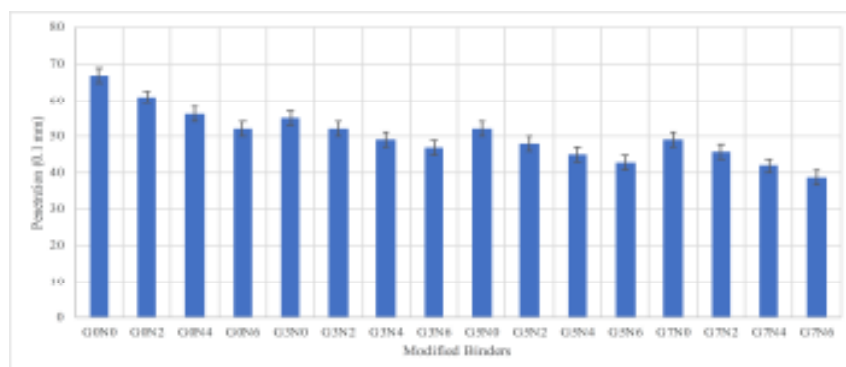
##### ۳-۳- تست LAS

تست LAS برای تخمین خواص خستگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح نشده و اصلاح شده استفاده می‌شود. با توجه به استاندارد AASHTO TP 101-14 در دمای ۲۵ درجه

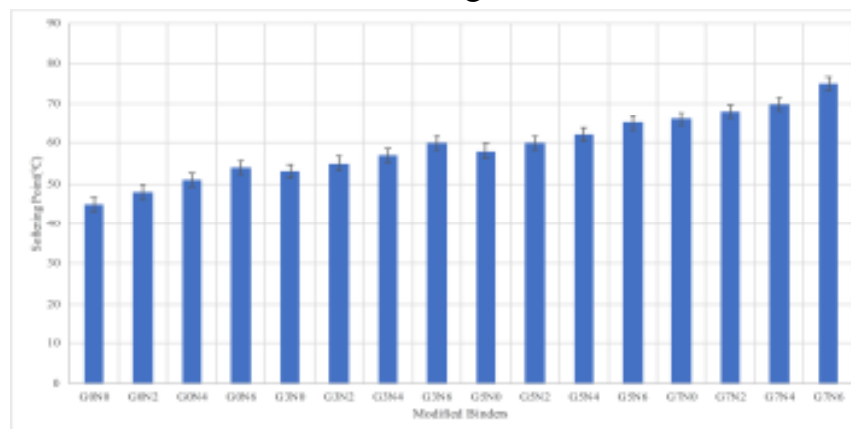
بهبود می‌بخشد و منجر به افزایش جذب آسفالت می‌شود. این نتیجه‌گیری با یافته‌ها مطابقت دارد. همچنین بر اساس نتایج، افزودن گیلسونایت باعث سفت شدن قیر می‌شود که به نوبه خود باعث کاهش و افزایش نقطه نفوذ و نرم شدن مخلوطها می‌شود. علاوه بر این، افزودن NS باعث بهبود شیارشدگی و دمای با کارایی پایین قیر اصلاح شده با گیلسونایت می‌شود (Hassan et al, 2012).

یکنواخت شود. افزایش درصد گیلسونیت و گیلسونیت/NS باعث کاهش نفوذ نمونه‌ها می‌شود و نقطه نرم شدن نمونه‌ها بالا می‌رود.

با توجه به یافته‌ها، NS قیر اصلاح شده با گیلسونایت را بهتر کرده و آنها را در برابر ترک خوردگی کشسان و مقاوم‌تر می‌کند. این نتایج را می‌توان به مساحت سطح بالای ذرات NS نسبت داد که برهمکنش NS با مولکول‌های قیر پایه را



شکل ۴. نتایج آزمایش درجه نفوذ



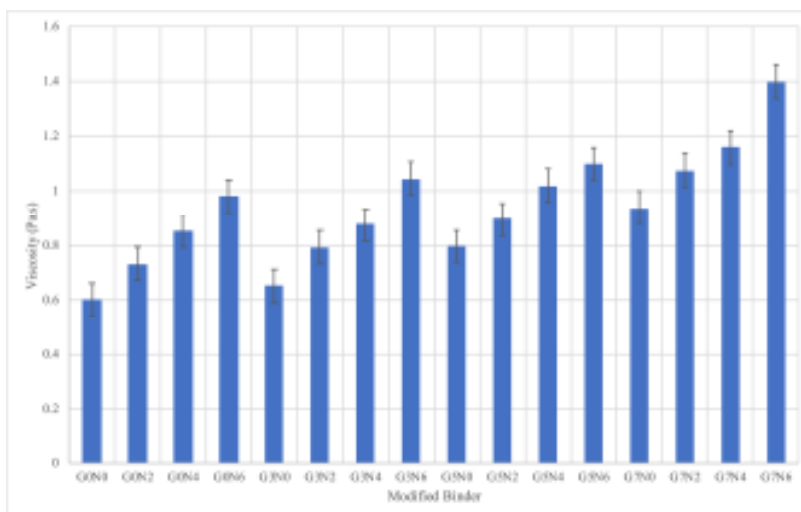
شکل ۵. نتایج آزمایش نقطه نرمی

اندازه‌گیری دمای اختلاط مخلوطها به دست می‌آیند. شکل ۷ نتایج تغییرات ویسکوزیته در برابر دما را برای Gilsonite و همچنین Gilsonite/NS آسفالت اصلاح شده نشان می‌دهد. نتایج آزمایش افزایش ویسکوزیته قیر را هنگام استفاده از گیلسونیت نشان می‌دهد زیرا مخلوطها را سفت می‌کند، که در برخی مقالات گزارش شده است. علاوه بر این، با توجه به نتایج، افزودن NS به قیر اصلاح شده با گیلسونایت، ویسکوزیته را افزایش می‌دهد که با سایر یافته‌ها مطابقت دارد. علاوه بر این، به منظور بررسی حساسیت قیر در برابر دما، مقادیر حساسیت دمای

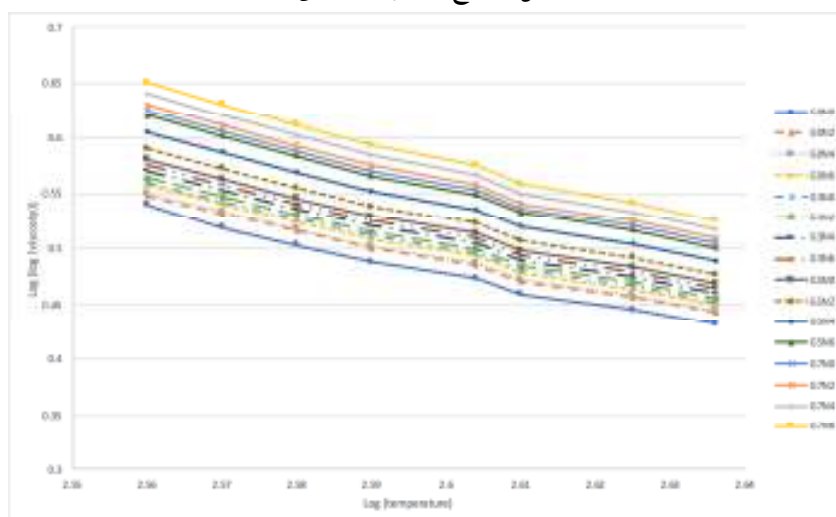
همانطور که شکل ۶ نشان می‌دهد، افزودن گیلسونیت ویسکوزیته قیر اصلی را افزایش می‌دهد که با مطالعات قبلی مطابقت دارد. با توجه به نتایج آزمایش، استفاده از افزودنی Gilsonite/NS باعث افزایش ویسکوزیته قیر می‌شود. ویسکوزیته با افزودن محتوای NS در قیر اصلاح شده Gilsonite/NS افزایش می‌یابد. چنین وضعیتی را می‌توان به مساحت سطح بالا و پایداری ذرات NS نسبت داد که برهمکنش شیمیایی بالایی در ماتریس قیر دارند. این نتیجه‌گیری با مطالعات قبلی مطابقت دارد. منحنی‌های ویسکوزیته-دما معمولاً برای ارزیابی حساسیت دما و

ویسکوزیته (VTS) به دست می‌آید. یافته‌ها نشان دهنده کاهش مقدار  $VTS^{11}$  قیر پایه در هنگام استفاده از گیلسونایت است. علاوه بر این، نتایج VTS نشان دهنده کاهش VTS در دمای ۹۰-۱۶۰ درجه سانتیگراد توسط کاربرد

ویسکوزیته (VTS) به دست می‌آید. یافته‌ها نشان دهنده کاهش مقدار  $VTS^{11}$  قیر پایه در هنگام استفاده از گیلسونایت است. علاوه بر این، نتایج VTS نشان دهنده کاهش VTS در دمای ۹۰-۱۶۰ درجه سانتیگراد توسط کاربرد



شکل ۶. نتایج ویسکوزیته دورانی



شکل ۷. نتایج ویسکوزیته-دما برای قیرهای مختلف

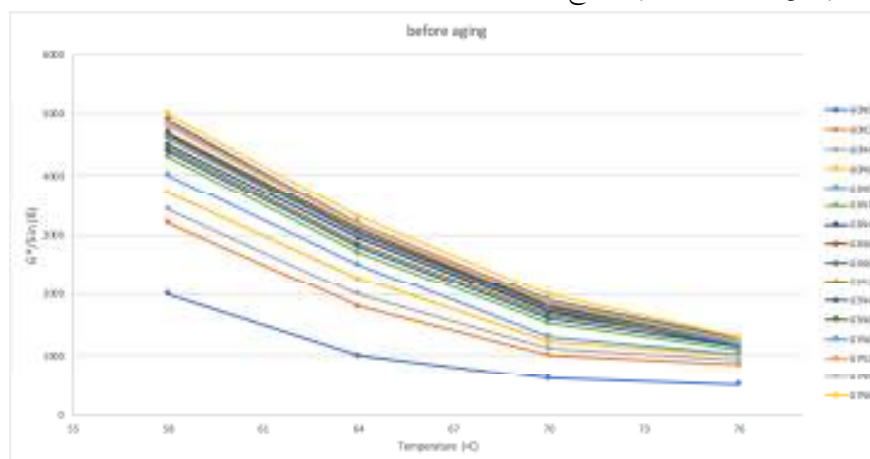
افزایش تغییر شکل دائمی قیر می‌شود که می‌تواند به سفت شدن قیر در هنگام اعمال گیلسونیت نسبت داده شود، که در برخی مقالات گزارش شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که افزودن ۷٪ گیلسونیت، رفتار قیر در دمای بالا را تا حدود ۲۸٪ افزایش می‌دهد. همچنین مشخص شد که استفاده از گیلسونایت منجر به افزایش دمای شکست قیر تا حدود ۱۲ درجه سانتیگراد می‌شود. علاوه بر این، استفاده از NS باعث

مقادیر بیشتر  $G^*/\sin$  نشان می‌دهد که قیر از مقاومت بالاتری در برابر شیار شدن بهره می‌برند. برای داشتن مخلوطی مقاوم در برابر شیار شدن، قیری با لایه نازک اصلی و نورد (RTFO) باید حداقل ۱ کیلو پاسکال و ۲،۲ کیلو پاسکال برای فاکتور شیارگی تولید کنند. شکل ۸ پارامتر شیارشدن قیر را قبل و بعد از فرآیند پیری RTFO نشان می‌دهد. با توجه به یافته‌ها، استفاده از گیلسونیت منجر به

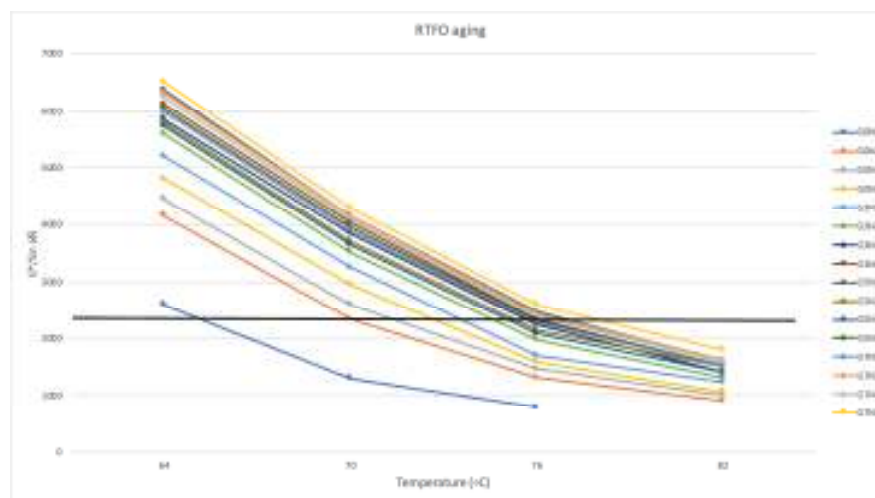


گیلسونیت ۶٪ تا ۷٪ دمای کارایی بالا را تا حدود ۳۴٪ بهبود می‌بخشد زیرا افزودن گیلسونیت/NS باعث سفت شدن قیر می‌شود. علاوه بر این، همانطور که در شکل ۸ (ب) نشان داده شده است، به دنبال روش پیری کوتاه مدت، پارامتر شیارشدن قیر اصلاح شده با گیلسونیت در مقایسه با نمونه‌های پیر نشده بهبود یافته است که می‌تواند به دلیل تبخیر اجزای سبک و تبدیل مواد آروماتیک و رزین‌ها به آسفالتین باشد. مخلوط‌های آسفالتی.

افزایش مقاومت شیارشدگی قیر اصلاح شده با گیلسونیت می‌شود. این نتیجه‌گیری با یافته‌های قبلی مطابقت دارد. افزایش پارامتر Rutting پس از افزودن Gilsonite/NS نیز در نتایج نشان داده شده است. بنابراین، افزایش محتوای گیلسونیت/NS عملکرد شیاردار را بهبود می‌بخشد، که می‌تواند به برهمکنش سطحی بالای ذرات NS در ماتریس آسفالت به دلیل وزن مولکولی بالا و وزن مخصوص آن نسبت داده شود که به نوبه خود سازگاری با قیر را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، استفاده از قیر اصلاح شده با



(الف)

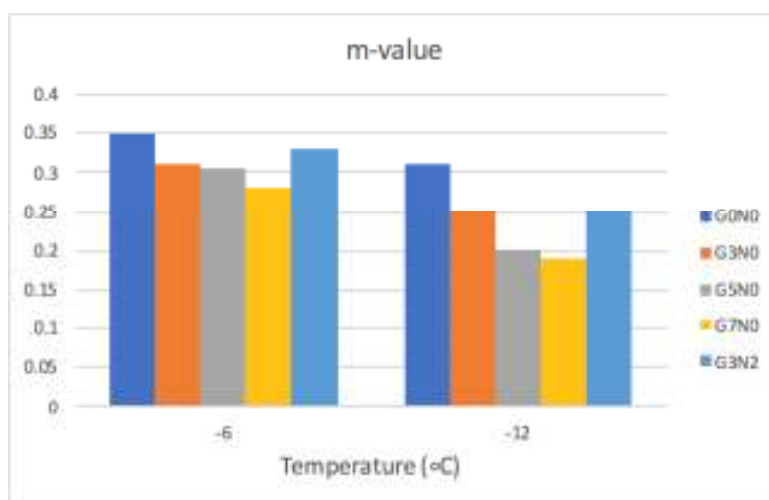


(ب)

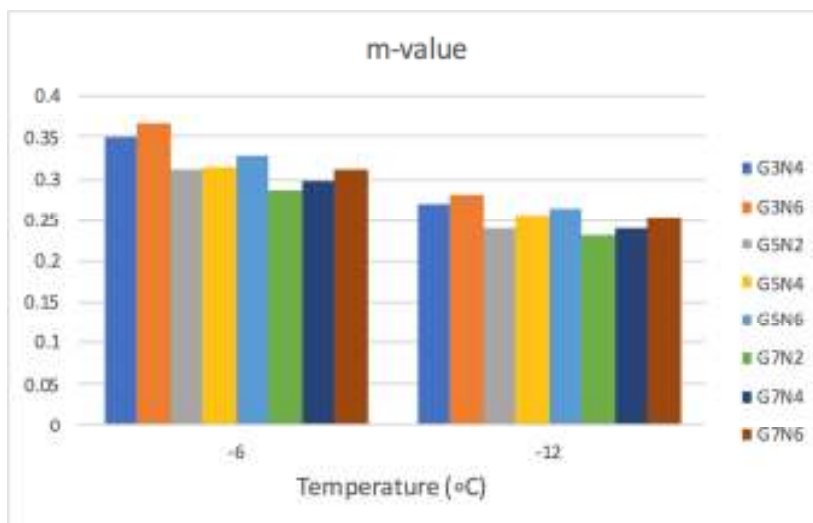
شکل ۸ پارامتر شیارشدگی برای قیرهای اصلاح شده (الف) پیر نشده (ب) پیر شده

که افزودن NS به قیر اصلاح شده با گیلسونایت به طور قابل توجهی مقادیر سختی را کاهش می‌دهد و m-value را افزایش می‌دهد. بر اساس یافته‌ها، استفاده از NS باعث افزایش عملکرد در دمای پایین قیرهای اصلاح شده توسط Gilsonite می‌شود، که می‌توان آن را به برهمکنش سطحی بالای ذرات NS در زمینه آسفالت به دلیل وزن مولکولی بالا و وزن مخصوص آن نسبت داد که به نوبه خود سازگاری با آن را بهبود می‌بخشد قیر. m-value و s-value قیر اصلاح شده منجر به کاهش سختی و بهبود m-value قیر می‌شود. NS به طور مثبت بر عملکرد قیری در دمای پایین تأثیر می‌گذارد، که با سایر یافته‌ها مطابقت دارد.

با توجه به مطالعات قبلی، استفاده از گیلسونیت بر عملکرد قیر در دمای پایین تأثیر منفی می‌گذارد که در برخی مقالات گزارش شده است. با این حال، استفاده از NS باعث بهبود رفتار قیر در دماهای پایین می‌شود. بنابراین، درک و بررسی عملکرد در دمای پایین مخلوط‌های اصلاح شده با Gilsonite/NS ضروری است. نتایج m-value و s-value بایندهای مختلف آسفالت به ترتیب در شکل ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از گیلسونیت، m-value و s-value قیر به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. کاربرد گیلسونیت باعث سفت شدن قیر و در نتیجه کاهش انعطاف پذیری قیر می‌شود. نتایج نشان می‌دهد

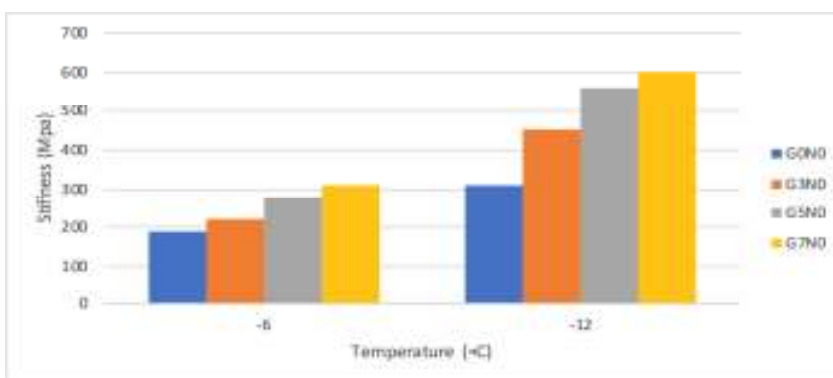


(الف)

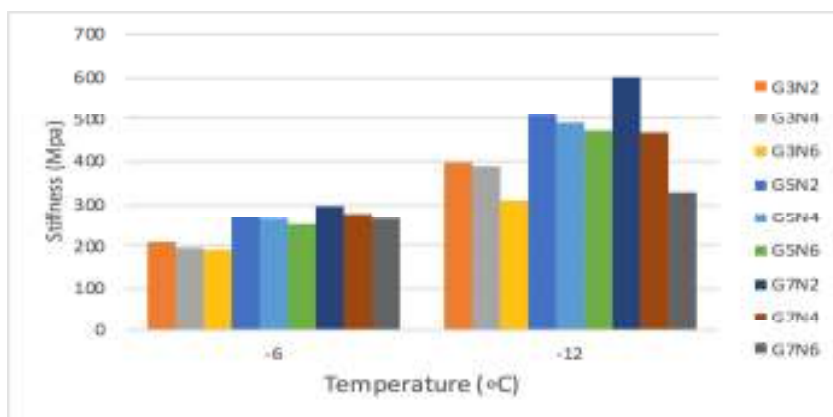


(ب)

شکل ۹. مقادیر m-value قیر اصلی و اصلاح شده (الف) گیلسونایت (ب) گیلسونایت/نانورس



(الف)

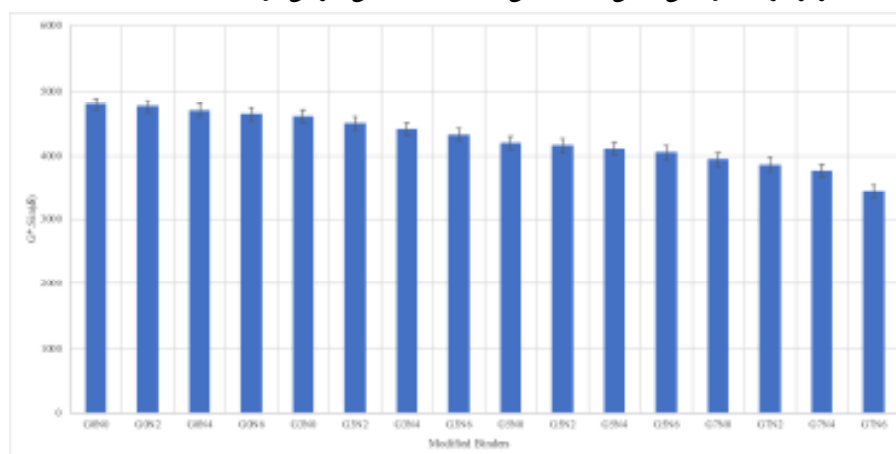


(ب)

شکل ۱۰. نتایج سختی نمونه های قیر (الف) گیلسونایت (ب) گیلسونایت/نانورس

هستند. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که افزودن گیلسونیت به قیر اصلی، مقاومت در برابر خستگی قیر مربوط به اثر سفت‌کنندگی آن را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، افزودن NS به قیر اصلاح شده توسط Gilsonite باعث بهبود رفتار خستگی قیر می‌شود.

با توجه به سیستم درجه عملکرد (PG<sup>12</sup>)، یک  $G^* \cdot \sin \delta$  کمتر از قیر مقاومت بیشتری در برابر ترک خوردگی خستگی دارد. پارامتر خستگی دارای یک محدودیت ۵۰۰۰ کیلو پاسکال برای پارامتر خستگی است، که نشان می‌دهد که قیر قادر به مقاومت در برابر ترک خوردگی ناشی از خستگی



شکل ۱۱. نتایج پارامتر خستگی قیر

#### ۴-۲- نتیجه تست پایداری ذخیره سازی

تست پایداری ذخیره سازی، مقاومت قیر را در برابر جداسازی فاز در دمای اختلاط بالا مشخص می‌کند. نتیجه آزمایش در جدول ۵ برای قیر اصلاح شده ارائه شده است. نقاط نرم شدن بخش‌های پایینی و بالایی نمونه‌های لوله متفاوت و کمتر از ۲,۵ درجه سانتیگراد، تا ۷ درصد قیر اصلاح شده با گیلسونایت است. استفاده از NS منجر به افزایش در جداسازی فاز می‌شود. تفاوت در نقاط نرم شدن بخش پایین و همچنین بالاترین بخش نمونه‌ها کمتر از ۲,۵ درجه سانتیگراد است که می‌تواند به دلیل افزایش سازگاری و ویسکوزیته قیری باشد.

جدول ۵. پایداری ذخیره سازی قیر

قیر	اختلاف نقطه نرمی (بالا)	نقطه نرمی (پایین)	اختلاف نقطه نرمی (°C)
G0N0	45	47	0
G0N2	48	52.6	-4.6
G0N4	51	60	-9
G0N6	54	62.1	-8.1
G3N0	53	73.8	-20.8
G3N2	55	69.5	-14.5
G3N4	57	69.3	-12.3
G3N6	60	71	-11
G5N0	58	71.5	-13.5
G5N2	60	73	-13
G5N4	62	73.6	-11.6
G5N6	65	74	-9
G7N0	66	74.2	-8.2
G7N2	68	74.7	-6.7
G7N4	70	75.1	-5.1
G7N6	75	75.4	-0.4

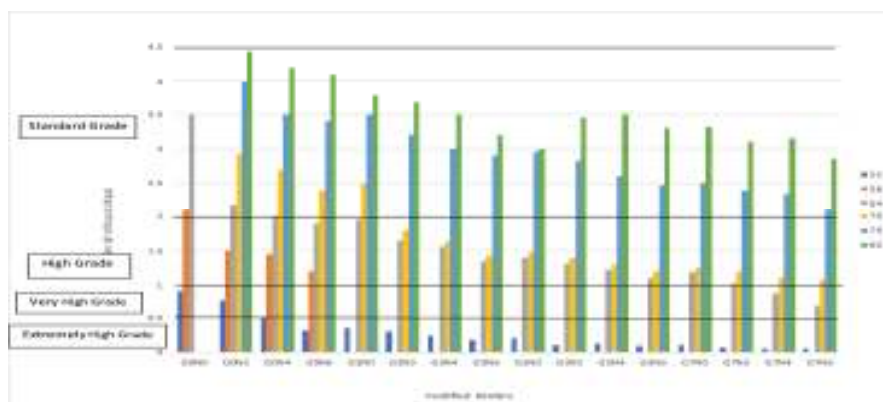
#### ۴-۳- نتایج آزمایش MSCR

قیر خالص می‌شود و این نشان می‌دهد که تولید قیری با اصلاح گیلسونایت از مقاومت شیاردار بالاتر بهره می‌برد که با مطالعات قبلی مطابقت دارد. هنگامی که مقدار گیلسونایت افزایش می‌یابد، عملکرد شیار شدن بهتر می‌شود. این افزایش به افزایش سفتی مخلوط‌ها با استفاده از گیلسونایت نسبت داده می‌شود. با افزودن گیلسونایت به قیر، چسبندگی قیر به سنگدانه‌ها بهبود می‌یابد. در نتیجه، پیوند چسبنده و استحکام کششی نیز افزایش می‌یابد. گیلسونایت شامل چندین گروه عملکردی قطبی مانند یک گروه هیدروکسیل و یک گروه

رفتارهای شیاردار قیر با آزمایش MSCR ارزیابی می‌شود. دو مورد از نتایج آزمایش MSCR شامل ضریب  $Jnr$  و درصد بازیابی ( $R\%$ ) محاسبه شده در سطوح تنش ۱۰۰ و  $Pa\ 3200$  در دمای ۵۲ تا ۸۲ سانتیگراد است که نتایج آن در شکل ۱۲ ارائه شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که افزایش  $Jnr$  باعث افزایش  $R\%$  و کاهش  $Jnr$  می‌شود. نتایج  $R\%$  و  $Jnr$  قیر در دمای ۶۴ درجه سانتیگراد در جدول ۱۰ نشان داده شده است. به طور کلی، نتایج با نادیده گرفتن سطوح تنش نشان داد که استفاده از گیلسونایت باعث کاهش ارزش  $Jnr$

قیر خالص را کاهش می‌دهد، که نشان‌دهنده مقاومت شیاردار بالاتر قیر اصلاح‌شده با افزودنی‌های NS است که در برخی مقالات گزارش شده است. این بهبود می‌تواند به دلیل مساحت سطح بالای ذرات NS باشد که نیروهای درهم تنیده قوی در بین ذرات NS و قیر ایجاد می‌کند. ذرات NS با افزایش باند و افزایش انسجام قیر، قیر کنترلی را تقویت می‌کند. بنابراین، ویژگی‌های قیر مانند سختی و عملکرد شیاردار بهبود می‌یابد.

کربوکسیل است. این گروه‌های عاملی باعث بهبود پیوند با سنگدانه و قیر می‌شوند. بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۱۰، مقدار  $Jnr$  هنگام افزودن NS به قیر کاهش می‌یابد. بالاترین مقاومت شیاردار مربوط به قیر اصلاح شده با ۷٪ گیلسونیت است. علاوه بر این، قیر اصلاح شده با ۶٪ NS و ۷٪ گیلسونیت دارای کمترین  $Jnr$  نسبت به سایر قیر اصلاح شده هستند. به طور کلی، نتایج بدون در نظر گرفتن سطوح تنش نشان داد که افزودن NS به قیر گیلسونیت، ارزش  $Jnr$



شکل ۱۲. پارامتر خزشی قیر در دمای ۵۲ تا ۸۲ درجه سانتیگراد

به دلیل افزایش انعطاف‌پذیری قیر با استفاده از NS افزایش می‌دهد (Ziari et al, 2016). جدول ۷ نتایج VECD قیر را نشان می‌دهد. استفاده از مواد افزودنی به ترتیب ضرایب C1 و C2 را افزایش و کاهش می‌دهد. بیشترین مقادیر C1 و کمترین مقادیر C2 مربوط به قیر اصلاح شده G7N6 است. جدول ۸ عمر خستگی آسفالت بایندهای اصلاح نشده و اصلاح شده را نشان می‌دهد. عمر خستگی در یک سطح کرنش کم و همچنین یک سطح کرنش بالا در جدول ۸ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، عمر خستگی آسفالت بایندهای حاوی گیلسونیت در مقایسه با قیر خالص در سطوح کرنش کم بیشتر است. یافته‌ها نشان می‌دهد که قیر حاوی ۴۰ درصد گیلسونیت بیشترین عمر خستگی را نسبت به سایر قیر اصلاح شده توسط گیلسونیت دارد و به دنبال آن قیری حاوی NS قرار دارند، در حالی که در سطوح کرنش بالاتر روند نامطلوبی مشاهده می‌شود، به طوری که قیر اصلاح شده توسط Gilsonite/NS و Gilsonite نسبت به قیر اصلی عمر خستگی کمتری دارند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از قیر اصلاح شده در سطوح کرنش کم بهتر است.

گیلسونیت باعث افزایش  $R$  ارزش قیر می‌شود. بر اساس یافته‌های ارائه شده در جدول ۶،  $R$  قیر اصلی کم است. قیری با مقادیر کمتر  $R$  مقاومت کمتری در برابر ترک خوردگی ناشی از خستگی و شیار شدن نشان می‌دهند. با توجه به نتایج، اصلاح قیر توسط NS درصد R نمونه‌ها را بهبود می‌بخشد و در نتیجه مقاومت تغییر شکل دائمی قیری را بهبود می‌بخشد. درصد تفاوت در انطباق خزش غیر قابل بازیافت ( $Jnr-diff$ ) نیز برای بررسی حساسیت قیر در برابر تغییرات سطح تنش قیر هنگام افزایش از ۱۰۰ Pa به ۳۲۰۰ Pa پیشنهاد شده است. پارامتر  $Jnr-diff$  به ۷۵٪ محدود شده است. اگر  $Jnr-diff$  از ۷۵٪ بیشتر شود، نشان دهنده حساسیت تنش قیری است. با توجه به یافته‌های ارائه شده در جدول ۱۰، مقدار  $Jnr-diff$  قیر اصلاح شده کمتر از ۷۵ درصد است.

#### ۴-۴- نتایج تست LAS

جداول ۷ و ۸ نتایج آزمون LAS را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که اصلاح قیر با استفاده از مواد افزودنی تنش برشی را در سطوح پر تنش کاهش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که افزودن NS عمر خستگی قیر خالص را احتمالاً

جدول ۶. خروجی نتایج آزمایش MSCR

قیر	R100	R3200	Jnr100	Jnr3200	Jnr-diff
	%	%	kPa-1	kPa-1	%
G0N0	6.0	4.8	3.5	-	-
G0N2	26.3	21.0	2.18	3.27	50
G0N4	26.8	21.4	2.01	3.015	50
G0N6	29.1	23.3	1.9	2.85	50
G3N0	32.5	26.0	1.95	2.805	43.8
G3N2	34.5	27.6	1.65	1.94	17.58
G3N4	46.3	37.1	1.56	1.7	8.97
G3N6	47.9	38.3	1.35	1.55	14.81
G5N0	52.2	41.8	1.4	1.45	3.57
G5N2	39.65	31.72	1.31	1.63	24.43
G5N4	37.2	29.76	1.22	1.71	40.16
G5N6	50.47	40.376	1.1	1.54	40.00
G7N0	48	38.4	1.19	1.6	34.45
G7N2	54.84	43.872	1.03	1.3	26.21
G7N4	51.23	40.984	0.87	0.97	11.49
G7N6	58.95	47.16	0.7	0.92	31.43

جدول ۷. پارامترهای خستگی

قیر	C0	C1	C2
G0N0	1	0.058	0.544
G0N2	1	0.061	0.557
G0N4	1	0.066	0.447
G0N6	1	0.064	0.460
G3N0	1	0.616	0.420
G3N2	1	0.086	0.400
G3N4	1	0.100	0.390
G3N6	1	0.120	0.380
G5N0	1	0.132	0.372
G5N2	1	0.148	0.357
G5N4	1	0.144	0.365
G5N6	1	0.158	0.34
G7N0	1	0.153	0.35
G7N2	1	0.165	0.33
G7N4	1	0.160	0.336
G7N6	1	0.180	0.31

جدول ۸. نتایج عمر خستگی نمونه‌ها

قیرها	2.5% Nf	30% Nf
G0N0	1768	0.4
G0N2	4900	0.6
G0N4	5600	0.7
G0N6	8600	0.94
G3N0	9800	1
G3N2	11300	1.2
G3N4	12800	1.4
G3N6	13670	1.5
G5N0	14200	1.8
G5N2	14600	2
G5N4	15600	2.1
G5N6	16460	2.4
G7N0	17800	2.6
G7N2	17980	2.76
G7N4	19000	2.8
G7N6	20900	2.98

نتایج ارایه شده در جدول ۹ نشان می‌دهد که استفاده از ۷٪ گیلسونیت عملکرد قیر اصلی را در دمای بالا با سه درجه از PG 58 به PG 76 تغییر می‌دهد. برآمدگی در عملکرد در دمای بالا از PG 58 تا PG 76. قیر اصلاح شده توسط Gilsonite و Gilsonite/NS نمی‌تواند حداقل پیش نیازهای استاندارد را در ۱۲- سانتی‌گراد برآورده کند. در بین قیر اصلاح شده گیلسونایت، تنها قیری حاوی ۳٪ و ۵٪ گیلسونایت کمترین نیاز استاندارد را در دمای ۶- درجه سانتیگراد دارند. با توجه به یافته‌ها، استفاده از گیلسونایت یک درجه از دمای پایین را کاهش می‌دهد و آن را از PG 22 به PG 16 تغییر می‌دهد. علاوه بر این، در بین کلاسورهای آسفالت اصلاح شده توسط Gilsonite/NS، آنهایی که با ۲، ۴ و ۶ درصد NS اصلاح شده‌اند، دارای درجه حرارت پایین هستند. حداقل پیش نیازهای استاندارد در ۶- سانتی‌گراد مقدار ذکر شده NS عملکرد قیر خالص را در دمای پایین یک درجه کاهش می‌دهد.

این ممکن است به این دلیل باشد که استفاده از گیلسونیت منجر به افزایش ویسکوزیته قیر می‌شود. قیر رفتار خستگی بهتری را در سطوح پایین‌تر از کرنش نشان می‌دهند، زیرا در سطوح کرنش بالا تغییر شکل بیشتری رخ می‌دهد. قیری که اصلاح شده است به دلیل سطح بالای ویسکوزیته تغییر شکل نمی‌دهد. بنابراین، قیری که ویسکوزیته کمتری دارند، عمر خستگی بیشتری را در مقایسه با قیر اصلاح شده با ویسکوزیته بیشتر نشان می‌دهند.

#### ۴-۵- سیستم های درجه بندی PG و MSCR قیری

مطالعه حاضر از تست‌های PG و MSCR برای درجه‌بندی قیر اصلاح شده استفاده می‌کند. پارامتر شیاردار DSR برای کلاسورهای آسفالتی غیر قدیمی ۱ کیلو پاسکال است، در حالی که برای کلاسورهای آسفالتی با سن RTFO 2.2 کیلو پاسکال است. برای تعریف دماهای با کارایی پایین قیر، معیارهای مشابهی با سیستم PG معمولی اعمال می‌شود.

جدول ۹. درجه بندی قیرها براساس سیستم MSCR و PG

قیر	درجه بندی PG			درجه بندی MSCR		
G0N0	58-22	58S-22	52H-22	-	-	-
G0N2	70-16	70S-16	64S-16	58H-16	52V-16	-
G0N4	70-16	70S-16	64S-16	58H-16	52E-16	-
G0N6	70-10	70S-10	64S-10	58V-10	52E-10	-
G3N0	70-10	70S-10	64S-10	58V-10	52E-10	-
G3N2	70-16	70S-16	64H-16	58V-16	52E-16	-
G3N4	76-16	76S-16	70S-16	64H-16	58V-16	52E-16
G3N6	76-16	76S-16	70H-16	64H-16	58E-16	52E-16
G5N0	76-16	76S-16	70H-16	64V-16	58E-16	52E-16
G5N2	76-16	76S-16	70S-16	64H-16	58V-16	52E-16
G5N4	76-16	76S-16	70S-16	64H-16	58V-16	52E-16
G5N6	76-16	76S-16	70S-16	64H-16	58V-16	52E-16
G7N0	76-16	76S-16	70S-16	64H-16	58V-16	52E-16
G7N2	76-16	76S-16	70H-16	64H-16	58V-16	52E-16
G7N4	76-16	76S-16	70H-16	64V-16	58V-16	52E-16
G7N6	76-22	76S-22	70H-22	64V-22	58V-22	52E-22

#### ۵- نتیجه گیری

افزودن NS به قیر اصلاح شده توسط گیلسونایت به طور قابل توجهی مقادیر سختی را کاهش می‌دهد و m-value را افزایش می‌دهد. همچنین، بکارگیری NS عملکرد قیر اصلاح شده توسط Gilsonite را در دمای پایین افزایش می‌دهد، که می‌تواند به برهمکنش سطحی بالای ذرات NS در ماتریس آسفالت به دلیل وزن مولکولی بالا و وزن مخصوص آن نسبت داده شود که سازگاری با قیر را بهبود می‌بخشد. نتایج آزمایش MSCR نشان می‌دهد که استفاده از گیلسونایت مقادیر Jnr قیر خالص را کاهش می‌دهد، که نشان می‌دهد تولید قیر با اصلاح گیلسونایت از مقاومت شیاردار بالاتری برخوردار است. این افزایش به افزایش سفتی مخلوطها با استفاده از گیلسونایت نسبت داده می‌شود. با افزودن گیلسونایت به قیر، چسبندگی قیر به سنگدانه‌ها بهبود می‌یابد. در نتیجه، پیوند چسبنده و استحکام کششی نیز افزایش می‌یابد. گیلسونیت شامل چندین گروه عملکردی قطبی مانند یک گروه هیدروکسیل و یک گروه کربوکسیل است. افزودن NS به قیر گیلسونایت، مقادیر Jnr قیر خالص را کاهش می‌دهد، که نشان‌دهنده مقاومت شیارشدگی بالاتر قیر اصلاح‌شده توسط افزودنی‌های NS است. این بهبود

هدف این مقاله ارزیابی روشی است که NS بر خواص قیر اصلاح‌شده با گیلسونایت تأثیر می‌گذارد. برخی آزمایش‌ها مانند آزمایش‌های DSR، MSCR و LAS برای ارزیابی خواص رئولوژیکی قیری انجام می‌شود. بر اساس یافته‌ها می‌توان نتیجه گرفت که: نتایج آزمایش فیزیکی نشان می‌دهد که افزودن گیلسونایت باعث افزایش نقطه نرمی و کاهش نفوذ می‌شود. همچنین با استفاده از گیلسونایت، نوع قیر به دلیل جذب نور آسفالت، از حالت ژل محلول به ژل تبدیل می‌شود. علاوه بر این، کاربرد گیلسونایت ویسکوزیته قیر را بهبود می‌بخشد و با قیر اصلی سازگار است که می‌تواند به یک مخلوط یکنواخت منجر شود. با توجه به یافته‌ها، NS قیر اصلاح شده با گیلسونایت را بهتر کرده و آنها را در برابر ترک خوردگی کشسان و مقاوم‌تر می‌کند. این نتایج را می‌توان به مساحت سطح بالای ذرات NS نسبت داد که برهمکنش NS با مولکول‌های قیر پایه را بهبود می‌بخشد و منجر به افزایش جذب آسفالت می‌شود. مقاومت در برابر ترک خوردگی در دمای پایین قیر با افزودن گیلسونایت کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که



آزمون عملکرد بهتر گیلسونیت را در سطوح کرنش پایین‌تر نشان می‌دهد. هنگام افزایش سطح کرنش برشی، عملکرد خستگی قیر اصلاح شده توسط Gilsonite کاهش می‌یابد و عمر خستگی بالاتر به قیر اصلی تعلق دارد.

- استفاده از گیلسونیت باعث افزایش دماهای با کارایی بالا و متوسط قیر می‌شود. با این حال، عملکرد قیری را در دمای پایین کاهش می‌دهد. علاوه بر این، استفاده از NS باعث افزایش شیارشدن قیر، خستگی و رفتارهای ترک خوردگی در دمای پایین می‌شود.

می‌تواند به دلیل سطح بالای ذرات NS باشد که باعث ایجاد نیروهای درهم تنیده قوی در بین ذرات NS و قیر می‌شود. ذرات NS با افزایش باند و افزایش انسجام قیر، قیر کنترلی را تقویت می‌کند. بنابراین، ویژگی‌های قیر مانند سختی و عملکرد شیاردار بهبود می‌یابد.

- نتایج آزمایش LAS نشان می‌دهد که استفاده از گیلسونیت عملکرد دمای متوسط قیر خالص را افزایش می‌دهد. افزودن NS رفتار الاستیک قیر را بهبود می‌بخشد که به نوبه خود عملکرد خستگی قیر را افزایش می‌دهد. نتایج آزمون LAS تقریباً اثری مشابه نتایج FPB دارد. می‌توان نتیجه گرفت که تست LAS نتایج خستگی قیر را بهتر ثبت می‌کند. نتایج

## ۶- پی‌نوشت‌ها

- 1-Nano SiO<sub>2</sub>
- 2-Rotational Viscosity
- 3-Dynamic Shear Rheometer
- 4-Multiple Stress Creep Recovery
- 5-Bending Beam Rheometer
- 6-Linear Amplitude Sweep
- 7-Stone Matrix Asphalt
- 8- Four Point Beam Fatigue
- 9- National Cooperative Highway Research Program
- 10- Visco-Elastic Continuum. Damage
- 11- Viscosity Temperature Susceptibility
- 12-Performance Grade

## ۷- مراجع

- Construction and Building Materials, 239, pp. 117700.
- Ameli, A., et al., (2020), "Laboratory evaluation of the effect of coal waste ash (CWA) and rice husk ash (RHA) on performance of asphalt mastics and Stone matrix asphalt (SMA) mixture", Construction and Building Materials, 236, pp. 117557.
- Babagoli, R. and R. Mohammadi, (2017), "Laboratory evaluation of the effect of styrene-butadiene-styrene-montmorillonite nanocomposite on rheological behavior of bitumen and performance of stone matrix asphalt mixtures", Canadian Journal of Civil Engineering, 44(9), pp. 736-742.
- Ameli, A., et al., (2020), "Performance evaluation of binders and stone matrix asphalt (SMA) mixtures modified by ground tire rubber (GTR)", waste polyethylene terephthalate (PET) and anti stripping agents (ASAs). Construction and Building Materials, 251, pp. 118932.
- Ameri, M., D. Mirzaiyan, and A. Amini, (2018), "Rutting resistance and fatigue behavior of gilsonite-modified asphalt binders", Journal of Materials in Civil Engineering, 30(11), pp. 04018292.
- Ameli, A., et al., (2020), "Permanent deformation performance of binders and stone mastic asphalt mixtures modified by SBS/montmorillonite nanocomposite",

- Journal of Pavement Engineering, 22(8), pp. 1042-1051.
- Vargas, M.A., et al., (2013), "Asphalt/polyethylene blends: Rheological properties, microstructure and viscosity modeling", Construction and Building Materials, 45, pp. 243-250.
- Yuge, X., Y. Hongru, and H. Jian, (2013), "Structure and properties of POE modified asphalt", China Elastomerics, pp. 03.
- Ziari, H., A. Goli, and A. Amini, (2016), "Effect of crumb rubber modifier on the performance properties of rubberized binders", Journal of Materials in Civil Engineering, 28(12), pp. 04016156.
- Ziari, H., et al., (2014), "Evaluation of fatigue behavior of hot mix asphalt mixtures prepared by bentonite modified bitumen", Construction and Building Materials, 68, pp. 685-691.
- Ziari, H., et al., (2021), "Investigation of the effect of crumb rubber powder and warm additives on moisture resistance of SMA mixtures", Advances in Civil Engineering.
- Ziari, H. and R. Babagoli, (2015), "Evaluation of fatigue and rutting behavior of asphalt binder containing warm additive", Petroleum Science and Technology, 33(17-18), pp. 1627-1632.
- Ziari, H., R. Babagoli, and S.E.T. Razi, (2015), "The Evaluation of Rheofalt as a Warm Mix Asphalt Additive on the Properties of Asphalt Binder", Petroleum Science and Technology, 33(21-22), pp. 1781-1786.
- Brown, E. and L. Cooley, (1999), "Designing stone matrix asphalt mixtures for rut-resistant pavements. National Cooperative Highway Research Program", Transportation Research Board, National Research Council, Washington DC USA, Report.
- Babagoli, R., M. Hasaninia, and N. Mohammad Namazi, (2015), "Laboratory evaluation of the effect of Gilsonite on the performance of stone matrix asphalt mixtures", Road Materials and Pavement Design, 16(4), pp. 889-906.
- Fang, C., et al., (2013), "Nanomaterials applied in asphalt modification: a review, Journal of Materials Science & Technology, 29(7), pp. 589-594.
- Nikookar, M., et al., (2021), "Improving the moisture sensitivity of asphalt mixtures by simultaneous modification of asphalt binder and aggregates with carbon nanofiber and carbon nanotube", Advances in Civil Engineering.
- Rezvan, B. and Z. Hassan, (2017), "Evaluation of rutting performance of stone matrix asphalt mixtures containing warm mix additives", Journal of Central South University, 24(2), pp. 360-373.
- Hassan, Z., et al., (2012), "Influence of bentonite additive on bitumen and asphalt mixture properties", World Academy of Science, Engineering and Technology, pp. 6.
- Norouzi, N., A. Ameli, and R. Babagoli, (2021), "Investigation of fatigue behaviour of warm modified binders and warm-stone matrix asphalt (WSMA) mixtures through binder and mixture tests", International

# Laboratory Evaluation of the Performance Properties of Mastics Modified by the combination of Nano-Silica and Gilsonite additives

*Rezvan Babagoli, Faculty of Civil Engineering, University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, Iran.*

*E-mail: rezvan.babagoli1987@gmail.com*

Received: August 2021-Accepted: February 2022

## **ABSTRACT**

This research investigates the way nano-silica (NS) and Gilsonite additives affect the performance behaviors of asphalt binders and SMA mixtures. A 60/70 type of asphalt binder, Gilsonite (0, 3, 5, and 7% by the weight of asphalt binder), and nano-silica (0, 2, 4, and 6% by the weight of asphalt binder) are utilized. The physical and rheological behaviors of modified asphalt binders are evaluated by rotational viscosity (RV), dynamic shear rheometer (DSR), multiple stress creep recovery (MSCR), bending beam rheometer (BBR), and linear amplitude sweep (LAS) tests. The performance properties of mixtures are evaluated by the application of four-point bending (FPB) fatigue, resilient modulus (Mr), indirect tensile strength (ITS), dynamic creep, and wheel track tests. In order to analyze the data statistically, a two-factor analysis of variance (ANOVA) is evaluated. The rheological behavior test outcomes depicted that Gilsonite utilization and NS additives enhance the rutting and fatigue resistances of asphalt binders. Gilsonite utilization decreases the low-temperature resistance of asphalt binders, while NS improves that. Storage stability test outcomes reveal that Gilsonite utilization enhances the storage stability of asphalt binders. Also, the application of NS leads to enhance phase separation. The MSCR test results demonstrate an enhancement in the high-temperature performance of virgin asphalt binder at different levels of stress by adding Gilsonite and NS. Moreover, NS utilization enhances the rutting resistance of samples. Based on the LAS test, Gilsonite utilization and NS additives enhance the fatigue properties of asphalt binder.

**Keywords:** Asphalt, Nano-silica (NS), Gilsonite; MSCR, SMA; Fatigue, LAS