

## ارزیابی تأثیر نانو اکسید آلومینیوم بر رفتار رئولوژیک قیر لاستیکی

شاهین شعبانی\*، استادیار، گروه عمران، دانشگاه پیام‌نور، واحد تهران شمال

محمودرضا کی‌منش، استادیار، گروه عمران، دانشگاه پیام‌نور، واحد تهران شمال

میرمحمد سیدهاشمی، دانشجوی دکترا، گروه عمران-راه و ترابری، دانشگاه پیام‌نور، واحد تهران شمال

Email: shabani@pnu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۱۵ - پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۱۷

### چکیده

با توجه به ساختار ترافیکی در کشور ایران و وارد آمدن بارهای بیش از حد به سطح روسازی و سپس به لایه‌های زیرین، نیاز به اجرای یک لایه مقاوم در برابر بارهای ترافیکی در شرایط آب و هوایی مختلف کاملاً بارز و مبرهن است. در سالیان اخیر، روند صعودی هزینه‌های مرمت و بازسازی روسازی‌ها که در اثر افزایش مقدار و تکرار بارهای ترافیکی وارده به روسازی‌ها ایجاد شده است، موجب گردیده که گرایش به استفاده از قیر و آسفالت‌های اصلاح شده با مواد افزودنی، به‌خصوص در نواحی با آمد و شد فراوان، رو به افزایش باشد. تحقیقات فراوانی در زمینه شناسایی افزودنی مناسب به منظور بهبود عملکرد قیر و مخلوط آسفالتی صورت پذیرفته است. در این پژوهش، به بررسی میزان کارایی و تأثیر نانو اکسید آلومینیوم ( $Al_2O_3$ ) به عنوان افزودنی در قیر لاستیکی به منظور بهبود عملکرد آن در برابر خرابی‌های شیارشدگی و خستگی پرداخته شده است. جهت دستیابی به اهداف این تحقیق، ابتدا قیر با ۲۰٪ پودر لاستیک و درصد‌های مختلف نانو اکسید آلومینیوم (صفر، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد وزنی قیر) ترکیب شده و تحت آزمایش‌های فیزیکی و رئولوژیک قرار گرفت. نتایج نشان داد که بهبود عملکرد قیر در دماهای متوسط و زیاد می‌تواند منجر به کاهش وقوع خرابی‌های ناشی از خستگی و شیارشدگی گردد. بررسی نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از ۲۰٪ پودر لاستیک و ۱/۵ درصد نانو اکسید آلومینیوم می‌تواند بهترین عملکرد رئولوژیک را برای قیر به همراه داشته باشد. پیش‌بینی می‌شود که استفاده از این قیر قادر باشد رفتار مخلوط آسفالتی را به‌منظور مقابله با خرابی خستگی و شیارشدگی تا حد قابل توجهی بهبود بخشد.

واژه‌های کلیدی: قیر، خستگی، شیارشدگی، پودر لاستیک، نانو اکسید آلومینیوم

### ۱. مقدمه

میان، راه‌سازی در کشورهای مختلف دنیا، به ویژه کشورهای در حال توسعه، از اهمیت خاصی برخوردار است. روسازی راه‌ها از مهمترین بخش‌های راه‌سازی است، که معمولاً تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار داشته

امروزه رشد جمعیت شهرنشین، توسعه صنعت و افزایش ترافیک در داخل و اطراف شهرها، نیاز به ساختمان و راه‌سازی را بیش از پیش مشخص کرده است. در این

- فاز خستگی، فاز نهایی عمر یک روسازی است. تغییر شکل‌های کشسان که به صورت افت و خیز بواسطه بار ترافیکی حاصل می‌شود باعث ایجاد تنش‌های کششی در پوشش آسفالتی می‌شوند و بعد از دوره معینی به علت پدیده خستگی، روسازی قابلیت سازه‌ای و مقاومت خود را از دست می‌دهد (صبوری و همکاران، ۲۰۱۴).

گسیختگی خستگی به صورت ترک‌های طولی در ساختمان روسازی شروع شده و با گذشت زمان کوتاهی ترک‌های عرضی ظاهر و امکان نفوذ آب به داخل ساختمان روسازی فراهم می‌گردد. قابل توجه است که ترک‌های خستگی فقط در جایی که آسفالت تحت بارگذاری ترافیکی مکرر قرار دارد، همانند مسیر چرخ‌ها، رخ می‌دهند. ترک‌خوردگی مستقیماً با افزایش کرنش‌های کششی در زیر لایه آسفالتی در ارتباط است و زمانی که کرنش از حد آستانه افزایش می‌یابد، شروع می‌شود. همچنین، شیارشدگی در روسازی در محل عبور چرخ به صورت فرورفتگی‌هایی ظاهر می‌شود که معمولاً مقدار آن در محل‌های با دمای بیشتر تشدید خواهد یافت. این خرابی می‌تواند نگرانی‌های زیادی در بحث ایمنی عبور وسایل نقلیه ایجاد کند (صبوری و همکاران، ۲۰۱۴).

قیرهای به دست آمده از نفت خام و یا قیر طبیعی که سالیان دراز عمده‌تاً به عنوان ماده چسباننده در ساخت جاده‌ها و یا دیگر مصارف پوششی به کار می‌روند، هیچگاه از یک سری خواص فیزیکی و مکانیکی کاملاً رضایت‌بخش در تمامی شرایط دمایی و بارگذاری برخوردار نبوده است. در این میان، اصلاح خواص قیر و استفاده از مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با استفاده از مکمل‌های نوین، مانند پودر لاستیک و نانومواد، می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در اصلاح معایب و بهبود مشخصات شیمیایی و فیزیکی مخلوط آسفالت در مقابل پدیده‌هایی همانند خستگی و شیارشدگی داشته باشد که بررسی و ارزیابی این تأثیر با استفاده از افزودنی‌های پودر

که در عمر و دوام آنها تأثیر دارد. از آنجا که یک راه از مناطق مختلف عبور می‌کند که حجم ترافیک، نوع ترافیک، شرایط جغرافیایی و میزان بارندگی این مناطق با یکدیگر متفاوت است، لذا معایب و نواقص گوناگون در نقاط مختلف یک راه به وجود می‌آید که در صورت عدم رسیدگی، ارزیابی و مرمت آنها، خرابی سریع جاده را در پی خواهد داشت. میزان خرابی رویه‌های آسفالتی، با توجه به خستگی ناشی از تکرار بارگذاری و وجود شرایط آب و هوایی، متغیر است (فخری و فرخی، ۱۳۸۶).

خرابی سازه‌ای به گونه‌ای از خرابی اطلاق می‌گردد که در آن سیستم روسازی ظرفیت باربری کافی در مقابل بارهای وارده را دارا نیست. سازه این نوع روسازی بدون افزایش خرابی، قابلیت تحمل هیچ گونه باری را ندارد. با این حال، خرابی عملکردی در حالتی رخ می‌دهد که سیستم روسازی به لحاظ سازه‌ای قدرت باربری خود را حفظ کرده ولیکن بهره‌برداری از آن به علت ناهموار شدن بیش از حد سطح با اشکال و سختی صورت می‌گیرد. همچنین، عمر مفید یک روسازی شامل سه فاز است:

- فاز تحکیم، اولین فاز از عمر مفید روسازی است که در خلال آن، لایه‌های مختلف به واسطه عبور بارهای ترافیکی، مورد تحکیم قرار می‌گیرند. این فاز نسبتاً کوتاه بوده و به میزان تراکم حاصل شده برای لایه‌های مختلف در حین عملیات ساخت وابسته است.

- فاز کشسانی، بلافاصله بعد از تحکیم رخ می‌دهد و در طول این فاز، تغییر شکل‌های کشسان در ساختمان روسازی پدید می‌آید و بار ناشی از عبور وسایل نقلیه، یک تغییر شکل مشخص و گذرا را در روسازی سبب می‌شود که با عبور وسیله نقلیه تغییر شکل حاصله از بین رفته و روسازی به حالت اولیه برمی‌گردد. خرابی شیارشدگی در روسازی معمولاً در این مرحله آغاز و ادامه می‌یابد.

لاستیک و نانو اکسید آلومینیوم از اهداف اصلی این پژوهش می‌باشد.

## ۲. مروری بر تحقیقات گذشته

استفاده از مواد افزودنی در قیر و مخلوط‌های آسفالتی با هدف بهبود عملکرد آنها در برابر بارهای وارده و شرایط محیطی موضوع اصلی بسیاری از تحقیقاتی است که در سالیان اخیر در زمینه مهندسی روسازی صورت پذیرفته است. هدف استفاده از این مواد افزودنی می‌تواند یک یا تمامی مواردی از جمله بهبود شرایط آسفالت، کاهش ضخامت روسازی آسفالتی و در نتیجه صرفه‌جویی اقتصادی و مسائل زیست‌محیطی باشد. در سالیان اخیر، استفاده از فناوری نانومواد در علوم مختلف سبب پیشرفت‌های شگرفی گردیده است. صنایع مختلفی از جمله نساجی، خودروسازی و پزشکی توانسته‌اند با استفاده از قابلیت‌های نهفته در علوم نانو به اهداف غیر قابل باوری دست یابند. نسبت سطح به حجم بیشتر در مقیاس نانو از جمله اصلی‌ترین مواردی است که فناوری نانو بر پایه آن بنا نهاده شده است.

چلوویان و شفابخش در تحقیقی که در سال ۲۰۱۷ صورت پذیرفت، به بررسی تأثیر افزودنی نانو اکسید آلومینیوم بر خصوصیات مکانیکی مخلوط آسفالت ماستیک درشت‌دانه پرداخته‌اند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که استفاده از ۰/۶ درصد نانو اکسید آلومینیوم می‌تواند تا حد قابل توجهی عمر مخلوط‌های آسفالتی را بهبود داده و همچنین سبب بهبود مدول شیارشدگی آنها گردد. با این حال، آنها بیان داشتند که امکان‌سنجی استفاده از نانو اکسید آلومینیوم در آسفالت نیاز به تحقیقات بیشتر و جامع‌تر دارد.

رضوان و ایزدی (۱۳۹۴) در تحقیقی، به معرفی دو نوع نانوماده (اکسید آهن و اکسید آلومینیوم) به عنوان افزودنی‌های ضدعریان‌شدگی که اصلاح‌کننده قیر هستند، پرداختند. دو نوع سنگدانه مختلف با پتانسیل

حساسیت رطوبتی متفاوت (سنگ آهک و گرانیت)، قیر با درجه نفوذ ۶۰-۷۰ تهیه شده از پالایشگاه اصفهان و دو نوع نانو ذره اکسید آهن و اکسید آلومینیوم که هر کدام در دو مقدار وزن قیر (۲ و ۴ درصد) مورد استفاده قرار می‌گیرند، از مواد به‌کار رفته در این پژوهش بودند. به منظور بررسی تأثیر استفاده از نانومواد، از روش لاتمن اصلاح‌شده به عنوان متداول‌ترین روش برای تعیین حساسیت رطوبتی نمونه‌های مخلوط آسفالت گرم استفاده شده است. نتایج روش لاتمن اصلاح‌شده نشان داد که استفاده از مواد نانو باعث افزایش شاخص نسبت کشش غیرمستقیم در نمونه‌های ساخته شده با قیرهای اصلاح شده گشته است. استفاده از نانو اکسید آهن در کاهش پتانسیل خرابی رطوبتی در نمونه‌های مخلوط آسفالتی نسبت به نانو اکسید آلومینیوم مشهودتر بوده است. نتیجه دیگری که از این پژوهش به دست آمد آن بود که مشابه با پژوهش‌های پیشین، نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه‌های سنگ آهک دارای مقاومت بیشتری در برابر خرابی رطوبتی بوده‌اند.

کردی و شفابخش (۲۰۱۷) به بررسی تأثیر افزودنی نانو اکسید آهن بر خصوصیات مکانیکی مخلوط آسفالت ماستیک درشت‌دانه پرداخته‌اند. آنها ابتدا درصد‌های مختلفی از نانو اکسید آهن را به شیوه تر به قیر ۶۰-۷۰ افزوده و قیرهای اصلاح شده را در ساخت مخلوط‌های آسفالت ماستیک درشت‌دانه مورد استفاده قرار دادند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که استفاده از ۰/۹ درصد نانو اکسید آهن می‌تواند تا حد قابل توجهی عمر مخلوط‌های آسفالتی را بهبود داده و همچنین سبب بهبود مدول سفتی آنها گردد. از دیگر نتایج تحقیق آنها، کاهش قابل توجه در میزان تغییر شکل‌های ماندگار مخلوط‌های آسفالت ماستیک درشت‌دانه بر اثر افزودن درصد‌های مختلف نانو اکسید آهن بوده است.

شفابخش و همکاران (۲۰۱۴) با افزودن مقادیر مختلف نانو  $TiO_2$  (۱، ۳ و ۵ درصد وزنی مخلوط آسفالتی) به شیوه تر به قیر و مخلوط‌های آسفالتی با قطر

و ارتفاع ۴۰ و ۱۰۰ میلی‌متر و انجام آزمایش خستگی به روش کشش غیرمستقیم در دماها و تنش‌های مختلف روی آنها دریافتند که نانو  $TiO_2$  باعث جلوگیری از ترک‌های کششی و قائمی که به راحتی توسط تنش‌های کششی ایجاد می‌شوند گردیده و همچنین باعث جلوگیری از انتشار و گسترش آنها می‌شود. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد که جایگزینی ۵٪ از وزن مخلوط‌های آسفالتی توسط نانو  $TiO_2$ ، بهترین میزان از این ماده می‌باشد، که باعث بهبود عملکرد خستگی مخلوط‌های آسفالتی، حتی در دما و تنش‌های زیاد، می‌شود.

عربانی و همکاران (۲۰۱۳) به ارزیابی تأثیر نانو اکسید روی بر خصوصیات فیزیکی قیر پرداختند. آنها در این تحقیق ابتدا قیر با نانو اکسید روی را با استفاده از روش خشک مخلوط کرده و سپس روی قیرهای اصلاح شده آزمایش‌هایی همچون کندروانی، درجه نفوذ، نقطه نرمی و خاصیت کشسانی را صورت دادند. نتایج تحقیقات این گروه نشان داد که افزودن نانو اکسید روی می‌تواند منجر به بهبود پارامترهای درجه نفوذ، نقطه نرمی و خاصیت کشسانی قیر گردد.

مقدس‌نژاد و همکاران در سال ۱۳۹۳ با بررسی نتایج آزمایش‌های قیر و خزش دینامیک نمونه‌های آسفالتی بیان کردند که نانورس با اصلاح قیر، اثر مثبتی روی عملکرد خزشی مخلوط‌های آسفالتی دارد. همچنین، نتایج آزمایش کشش مستقیم روی نمونه‌های قیری مشخص کرد که استفاده از نانوذرات باعث افزایش مقاومت کششی قیر شده است. آنها در این تحقیق از روش تر به منظور افزودن نانورس به قیر استفاده نمودند. غفارپور جهرمی و خدایی در پژوهشی در سال ۲۰۰۹ در باره اثر نانورس در خواص قیرها به این نتیجه رسیدند که با افزایش درصد رس به قیر، خصوصیات رئولوژی قیر بهبود پیدا می‌کند. آنها به منظور دستیابی به این نتیجه از آزمایش‌های رایج قیر (نقطه نرمی و درجه نفوذ) و آزمایش رئومتر برش دینامیک استفاده نمودند.

آنها در تحقیق خود هر دو روش افزودن نانو به قیر (خشک و تر) را مورد بررسی قرار داده و نتیجه گرفتند که روش تر مناسب‌تر می‌باشد.

یو و میلز بیل (۲۰۱۱) با استفاده از روش خشک، به بررسی افزودن نانورس‌ها بر عملکرد مخلوط آسفالتی پرداختند. آنها پس از استفاده از نانورس‌ها در مخلوط‌های آسفالتی به این نتیجه رسیدند که استفاده از این مواد باعث افزایش مدول دینامیک مخلوط‌های آسفالتی خواهد شد. صادق‌پور و همکاران (۲۰۱۰) در تحقیقی به این نتیجه رسیدند که افزودن نانورس‌ها با استفاده از روش تر باعث بهبود پایداری قیرهای اصلاح شده پلیمری می‌گردد.

طاهرخانی و همکاران (۱۳۹۲) در پژوهشی نتیجه گرفتند که با افزودن نانورس به قیر، زاویه فاز کاهش یافته که می‌تواند منجر به بهبود رفتار ارتجاعی قیر شود. همچنین، با افزایش نانورس به قیر، مدول مختلط برشی قیر افزایش می‌یابد که این مسأله نشان‌دهنده اثر نانورس بر سختی قیر می‌باشد. روش افزودن نانورس به قیر در این تحقیق روش تر بوده است.

در تحقیقی، خصوصیات رئولوژیک قیرهای اصلاح شده با افزودنی‌های نانویی مورد بررسی قرار گرفته است. این افزودنی‌ها، نانورس ناخالص و نانورس اصلاح شده پلیمری بوده که به قیر PG ۵۸-۳۴ در ۲ تا ۴ درصد وزنی قیر افزوده شده‌اند. روش افزودن نانومواد به قیر در این تحقیق هم روش خشک و هم روش تر انتخاب گردیده است. مطابق آزمایش‌های انجام شده، ویسکوزیته چرخشی و مدول برشی مختلط قیر به طور قابل ملاحظه‌ای با افزودن نانورس ناخالص افزایش و با افزودن نانورس اصلاح شده پلیمری به مقدار کمی کاهش یافته است. همچنین، خصوصیات مقاومتی قیر در برابر بارهای خستگی و خزشی در قیر اصلاح شده با نانورس ناخالص نسبت به قیر اصلاح شده با نانورس اصلاح شده با پلیمر، افزایش یافته است (غفارپور جهرمی و خدایی، ۲۰۰۹).

تشکیل دهنده قیر و نانو خواهد شد. نانومواد مختلفی همچون نانورس، نانوآکسید آهن، نانوآکسید تیتانیوم و نانوآکسید سیلیس تاکنون مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. نتایج تحقیقات گذشته نشان داد که استفاده از آنها به دلیل توان بالای نانومواد سبب بهبود رفتار قیر و مخلوط‌های آسفالتی در برابر بارهای ترافیکی و شرایط زیست‌محیطی مختلف می‌گردد. در این تحقیق، به منظور کامل‌تر کردن پیشینه تحقیق و ارزیابی تأثیر نانومواد بر عملکرد قیر و آسفالت، به یکی از نانومواد که کمتر توسط محققین در حوزه روسازی مورد توجه قرار گرفته است پرداخته می‌شود. همانطور که پیشتر نیز بیان گردید، در این تحقیق سعی بر آن است تا با استفاده از تجربیات مطالعات گذشته در این زمینه، به بررسی تأثیر افزودن درصد‌های مختلف نانوآکسید آلومینیوم بر عملکرد رئولوژیک قیر و مقاومت آن در برابر شیارشدگی و خستگی پرداخته شود.

### ۳. مواد و روش‌ها

#### ۳-۱. مواد مصرفی

قیر در مخلوط بتن آسفالتی به عنوان یک عامل چسباننده عمل می‌کند که مصالح سنگی را به صورت یک حجم پیوسته پیوند می‌دهد. قیر یک ماده با رفتار ویسکوالاستوپلاستیک است که مقاومت و خصوصیات رفتاری فیزیکی آن وابسته به دما می‌باشد. قیر مصرفی، قیر ۱۰۰-۸۵ پالایشگاه نفت پاسارگاد تهران است. مشخصات قیر در جدول ۱ درج گردیده است.

بهاروند و همکاران (۲۰۱۴) طی تحقیقاتی نتیجه گرفتند که نانورس‌ها نقش پرکنندگی بالایی دارند و چسبندگی بین مصالح و قیر را بهبود می‌دهند. همچنین، افزودن نانورس موجب افزایش ضخامت غشای قیری اطراف سنگدانه‌ها و حجم قیر می‌گردد.

فرامرزی و معصومی راد (۱۳۹۳) طی آزمایش‌هایی تأثیر استفاده از نانولوله‌های کربنی را بر خصوصیات مخلوط آسفالتی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آزمایش‌های انجام شده روی قیر و مخلوط‌های آسفالتی نشان داد که اصلاح آسفالت توسط نانولوله‌های کربنی موجب افزایش مقاومت در برابر خستگی مخلوط‌های آسفالتی، به‌خصوص در دماهای کم، می‌شود. شیوه افزودن نانو به قیر در این تحقیق هر دو شیوه تر و خشک بوده که محققین در این تحقیق به این نتیجه رسیدند که افزودن نانو به قیر با استفاده از روش تر سبب ایجاد ترکیبی یکنواخت‌تر خواهد شد.

شیراکاوا و همکاران در سال ۲۰۱۲ به بررسی ترکیب نانولوله کربنی با استفاده از یک حلال میانی پرداختند. نتایج آزمایش آنها نشان می‌دهد که استفاده از نانولوله کربنی باعث بهبود درجه نفوذ قیر می‌شود.

بررسی نتایج مطالعات صورت گرفته در این بخش نشان می‌دهد که نانومواد در صورتی که به شیوه مناسب و صحیح به قیر و مخلوط آسفالتی افزوده شوند دارای توان بالایی در بهبود بسیاری از خصوصیات آنها خواهند داشت. در اکثر تحقیقات، محققین از شیوه تر برای اضافه کردن نانو به قیر استفاده نموده و نتیجه گرفته‌اند که این شیوه افزودن سبب ایجاد پیوندی یکنواخت‌تر بین اجزای

جدول ۱. مشخصات قیر ۱۰۰-۸۵ به کار رفته در این تحقیق

روش انجام آزمایش	محدوده مجاز آیین نامه	مقدار	خصوصیت
ASTM D70	-	۱/۰۱۳	وزن مخصوص در ۲۵ °C ( $\text{Kg/m}^3$ )
ASTM D5M-19	۸۵-۱۰۰	۹۱	درجه نفوذ در ۲۵ °C (۰/۱ mm)
ASTM D36M-14e1	۴۵-۵۲	۴۶	نقطه نرمی (درجه سلسیوس)
ASTM D113-17	>۱۰۰	+۱۰۰	قابلیت کشش (انگمی) در ۲۵ °C (سانتی متر)
ASTM D92-18	>۲۳۲	۳۰۸	درجه اشتعال (°C)
ASTM D2042	>۹۹	۹۹/۶	درجه خلوص با تری کلروراتیلین (%)
ASTM D2170M-18	>۲۰۰	۲۲۶	ویسکوزیته سینماتیک در دمای ۱۳۵ °C (C.St)
ASTM D2170M-18	>۱۳۰	۱۳۸	ویسکوزیته سینماتیک در دمای ۱۵۰ °C (C.St)

براساس استاندارد ASTM D6114-M19، پودر لاستیک عبوری از الک ۲/۳۶ میلی متر (نمره ۸) باید برای تولید قیرهای لاستیکی استفاده گردد. در پودر لاستیک نباید هیچ ذره فلزی غیر آهنی دیده شود و همچنین درصد ذرات آهنی باید به ۰/۰۱ درصد وزنی پودر لاستیک محدود شود. حداکثر رطوبت مجاز پودر لاستیک باید حدود ۰/۰۷۵ درصد وزنی آن و چگالی پودر لاستیک حدود ۱/۱-۱/۲ باشد.

در این تحقیق، بر اساس مطالعات گذشته (مشعان و همکاران، ۲۰۱۴)، به صورت ثابت از مقدار ۲۰٪ پودر لاستیک (نسبت به وزن قیر) با مش ۸۰ در تمامی نمونه‌های قیری استفاده گردیده است. نمایی از پودر لاستیک مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۱ نشان داده شده است.

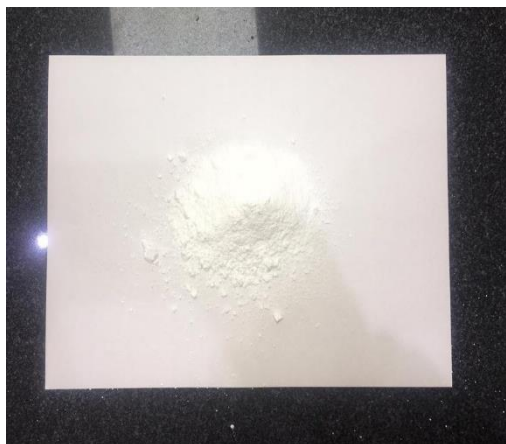
مشخصات نانوآکسید آلومینیوم مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۲ ارائه شده است. مشخصات مندرج در جدول بر اساس اطلاعاتی است که شرکت فروشنده نانو ارائه داده است. نانوی مورد استفاده در این تحقیق از شرکت نوترینو تهران تهیه گردیده است. همچنین، تصاویر نانومواد در شکل ۲ قابل مشاهده می‌باشد.

ضایعات لاستیکی می‌تواند به طور گسترده و با صرف هزینه کم به کار رود. با استفاده از این ماده که دورریز و غیرقابل تجزیه می‌باشد، علاوه بر تأمین ارزان اصلاح کننده مورد نیاز و بهبود خواص آسفالت، کمک شایانی به حفظ محیط زیست نیز می‌شود. در حال حاضر، استاندارد ASTM D6114-M19 ویژگی‌هایی را که باید مخلوط آسفالتی بهبود یافته با ضایعات لاستیکی دارا باشد بیان می‌کند. نوآوری‌های زیادی برای بهبود بیشتر این فرآیند به وجود آمده‌اند و فناوری‌های متعددی نیز در حال حاضر برای تولید آن مورد استفاده قرار می‌گیرند.

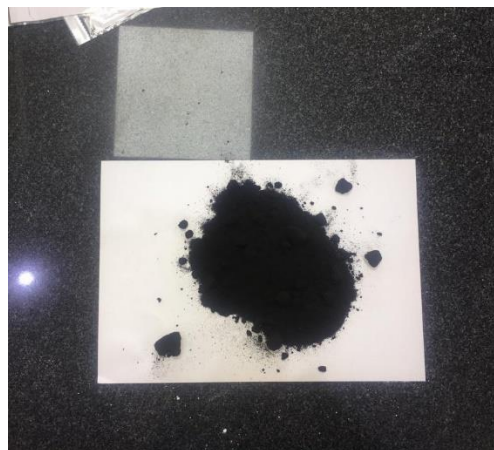
بزرگترین مشکلی که این واحدهای تولیدی با آن روبرو هستند، جدایی فازهای لاستیک و آسفالت می‌باشد که این مسأله می‌تواند تمامی مزایای آسفالت لاستیکی را با چالش بزرگی روبرو نماید. در هنگام ذخیره‌سازی آسفالت معمولی، جدایی فازها چیزی در حدود ۲ تا ۴ درصد است که این مقدار برای آسفالت لاستیکی برابر ۲۵٪ است. این مشکل به خوبی با ایجاد پیوندهای شیمیایی بین قیر و سنگدانه قابل حل و کاهش (از ۲۵٪ به ۷٪) است. در این تحقیق، به منظور تقویت هرچه بیشتر این پیوند، از نانوفناوری و مشخصاً نانوآکسید آلومینیوم استفاده می‌شود.

جدول ۲. مشخصات پایه‌ای نانو اکسید آلومینیوم مصرفی در این مطالعه

فرمول شیمیایی	وزن مخصوص حجمی (g/cm <sup>3</sup> )	اندازه ذرات (Nm)	رنگ	ریخت شناسی <sup>۱</sup>	سطح ویژه (m <sup>2</sup> /g)	درجه خلوص (%)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۹	۶۰	سفید	شبه کروی	۱۶۰	۹۹/۹



شکل ۲. نانو اکسید آلومینیوم مورد استفاده در این تحقیق



شکل ۱. پودر لاستیک مورد استفاده در این تحقیق

استوانه‌های مدرج شیشه‌ای ریخته شده و به مدت دو هفته ساکن نگه داشته شدند. در انتها، نتایج به این صورت بود که میکس نمودن به مدت ۳۰ دقیقه با ۲۵۰۰ دور بر دقیقه بهترین نتیجه را داشته است. در نتیجه، می‌توان اینگونه برداشت نمود که به دلیل فرآیند میکس مناسب، توده‌های نانو مواد از یکدیگر باز شده و نانو مواد به شکل جدا از هم و در نتیجه سبک‌تر می‌توانند در حلال پایدار باقی مانده و ته‌نشین نگردند.

در بسیاری از تحقیقات صورت گرفته، درصد نانو مواد مورد استفاده در قیر بین صفر تا ۱/۵ درصد نسبت به وزن قیر متغیر بوده است. زیرا استفاده بیش از این مقدار طرح را غیر اقتصادی می‌کند (چلوویان و شفا بخش، ۲۰۱۷). در نتیجه، بر اساس تجربیات موجود از تحقیقات گذشته، در این تحقیق از درصدهای مختلف نانو اکسید آلومینیوم (صفر، ۰/۵، ۱/۰ و ۱/۵ درصد نسبت به وزن قیر) استفاده گردیده است. به منظور انجام اختلاط نهایی، ابتدا قیر لاستیکی را تا دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس

### ۲-۳. اختلاط قیر لاستیکی و نانو اکسید آلومینیوم

فرآیند اختلاط بدین صورت است که ابتدا نانو مواد توسط میکسر برش بالا در حلال کروزن پراکنده می‌گردد. در این پژوهش، چندین نمونه محلول کروزن- نانو مواد در زمان‌های مختلف میکس و نیز دوره‌های مختلف میکس ساخته شد. مقایسه بین نمونه‌های مختلف بر اساس میزان پایداری نانو مواد در حلال و ته نشین شدن آنها در یک دوره زمانی مشخص انجام گردید. مقایسه بین نمونه‌های مختلف مورد مطالعه نشان داد که بهترین پراکندگی نانو مواد در حلال، به کارگیری این روش می‌باشد که ابتدا حلال کروزن را به همراه هر یک از نانو مواد در میکسر برش بالا با دوره‌های مختلف و به مدت‌های مختلف میکس نموده تا نانو مواد به خوبی در حلال پراکنده گردند. این روش، انرژی لازم جهت باز کردن توده‌های نانو مواد، بدون آسیب رساندن به آن، را فراهم می‌کند.

جهت بررسی پراکندگی مناسب و پایدار بودن محلول پس از عملیات میکس، هر یک از ترکیبات در

<sup>۱</sup>- Morphology

فیزیکی صورت گرفته روی قیر اولیه و اصلاح شده با درصد‌های مختلف نانو بوده است. در پایان فرآیند اختلاط، قیرهای اصلاح شده به صورت جدول ۳ می‌باشند.

گرم نموده و در طول نیم ساعت با فواصل زمانی یکسان، ترکیب نانوذرات - حلال به آرامی در میکسر ریخته شده و با ۴۰۰۰ دور بر دقیقه فرآیند اختلاط ادامه یافته تا جایی که مخلوطی همگن از قیر و نانو ذرات ایجاد گردد. انتخاب مناسب‌ترین ترکیب همگن بر اساس آزمایش‌های

جدول ۳. مشخصات قیرهای اصلاح شده در این تحقیق

قیر نانوئی (اصلاح شده با نانو اکسید آلومینیوم)	قیر لاستیکی	قیر عادی
قیر لاستیکی + ۰/۵٪ نانو اکسید آلومینیوم (20%R+0.5%N)	قیر ۸۵-۱۰۰	قیر ۸۵-۱۰۰
قیر لاستیکی + ۱/۰٪ نانو اکسید آلومینیوم (20%R+1.0%N)	اصلاح شده با ۲۰٪ پودر لاستیک (20%R)	(C)
قیر لاستیکی + ۱/۵٪ نانو اکسید آلومینیوم (20%R+1.5%N)		

با افزودن مقادیر مختلف نانومواد، تعادل دمایی قیر تغییر کرده و از آنجایی که حساسیت حرارتی نانومواد نسبت به تغییرات دمایی کمتر است، این ذرات با تبادل گرمایی، دمای لازم برای نرم‌شدگی قیر را افزایش می‌دهند. افزایش نقطه نرمی به این علت است که نانومواد با جذب گرمای قیر، مانع شکستن پیوندهای لایه‌های قیر شده و از این رو نقطه نرمی قیر تغییر کمتری نسبت به تغییرات گرمایی از خود نشان داده است. پس از این درصدها، به علت افزایش میزان نانو، فواصل بین ذرات تشکیل‌دهنده قیر افزایش یافته، که این عامل استحکام قیر را کاهش می‌دهد.

نتایج آزمایش نقطه نرمی در این تحقیق نشان می‌دهد که افزودن نانو اکسید آلومینیوم تا حد قابل توجهی می‌تواند نقطه نرمی قیر را بهبود بخشد. به گونه‌ای که افزودن ۱/۵ درصد نانو، مقدار نقطه نرمی را به میزان ۱۳٪ نسبت به قیر کنترل و ۸٪ نسبت به قیر لاستیکی ارتقا داده در نتیجه می‌توان همین مقدار را به عنوان ارتقا حساسیت قیر در برابر حرارت تلقی نمود.

در تعیین خصوصیات قیر، از آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی، کشش‌پذیری، ویسکوزیته سینماتیک، رئومتر برش دینامیک (ASTM D7175-15)، رئومتر تیرچه خمشی (ASTM D6648-08) و آزمایش<sup>۱</sup> MSCR (ASTM D7405-15) استفاده گردید.

## ۴. نتایج و تحلیل‌ها

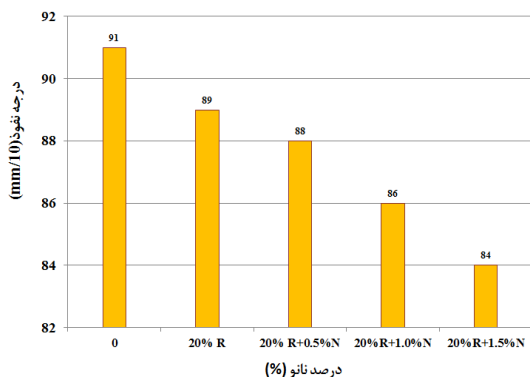
### ۴-۱. نتایج آزمایش‌های فیزیکی قیر

در گام نخست، به منظور بررسی ابتدایی اثر نانومواد بر قیر، آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی، خاصیت انگمی و ویسکوزیته سینماتیک صورت گرفته است. نتایج این آزمایش‌ها در شکل‌های ۴ تا ۷ نشان داده شده است. هدف از انجام آزمایش نقطه نرمی ارزیابی حساسیت قیر به حرارت می‌باشد. هرچه عدد نقطه نرمی قیر بیشتر باشد حساسیت آن به قیر کمتر خواهد بود. همانطور که از نتایج مشخص می‌باشد، قیر عادی نقطه نرمی پایینی داشته و در نتیجه دمای کمتری برای عبور گوی از حلقه در آزمایش درجه نرمی مورد نیاز می‌باشد.

<sup>۱</sup>- [Multiple Stress Creep Recovery](#)



مستحکم‌تر، مانع جداشدگی ذرات قیر شده که در نتیجه قیری با خواص بهتر تشکیل می‌شود. در قیر اصلاح شده با ۲۰٪ پودر لاستیک و ۱/۵ درصد نانو اکسید آلومینیوم، نتایج به مراتب بهتر بوده و مقدار درجه نفوذ تا نزدیک ۸۴ نیز رسیده؛ هرچند که کاهش بیش از حد درجه نفوذ می‌تواند پارامتری منفی در آب و هوای سرد باشد.

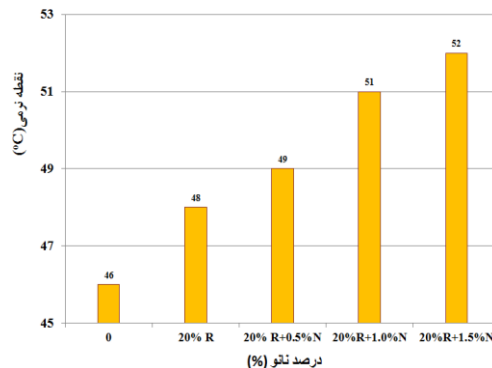


شکل ۵. نتایج آزمایش درجه نفوذ بر اساس درصدهای مختلف نانو اکسید آلومینیوم

نیروی کششی را بدون اینکه گسیخته گردد تحمل می‌نماید که این مقدار حدود ۱۴ و ۱۱ درصد بیش از مقدار نیروی کششی می‌باشد که قیر کنترل (بدون افزودنی) و قیر لاستیکی می‌تواند تحمل نماید. این افزایش تاب کششی، به خصوص در ایام گرم سال، می‌تواند کمک شایانی به تحمل تنش‌های کششی ناشی از حرارت در مخلوط‌های آسفالتی نماید.

ویسکوزیته قیر نقش مهمی در پوشاندن سنگدانه‌ها و ممانعت از ورود رطوبت در تخریب پیوند سنگدانه و قیر بر عهده دارد. نتایج آزمایش ویسکوزیته سینماتیک برای دماهای ۱۳۵ و ۱۵۰ درجه سلسیوس در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزودن نانومواد، مقدار ویسکوزیته قیر در هر دو دما افزایش می‌یابد. این افزایش در هر دو دمای ۱۳۵ و ۱۵۰ درجه سلسیوس با افزودن ۱/۵ نانو اکسید آلومینیوم به قیر ادامه دارد.

شکل ۵ نشان‌دهنده نتایج آزمایش درجه نفوذ بر اثر افزودن درصدهای مختلف نانو اکسید آلومینیوم می‌باشد. همانطوری که از نتایج مشخص است، با افزودن نانومواد، قیر سفت‌تر شده که دلیل آن تشکیل پیوندهای قوی‌تر بین ترکیبات قیر می‌باشد. آسفالتین (اسکلت ساختمانی قیر) با ایجاد پیوندهایی با ذرات نانو، علاوه بر ایجاد پیوندی

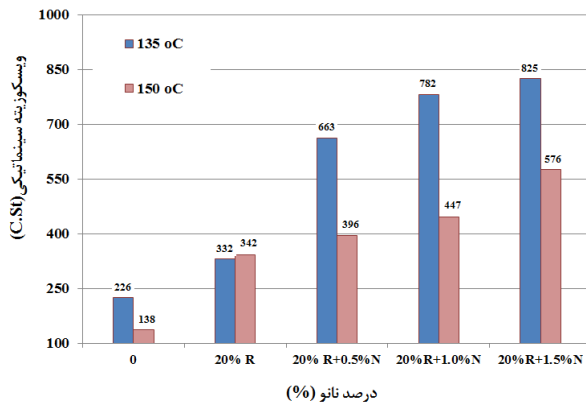


شکل ۴. نتایج آزمایش نقطه نرمی بر اساس درصدهای مختلف نانو اکسید آلومینیوم

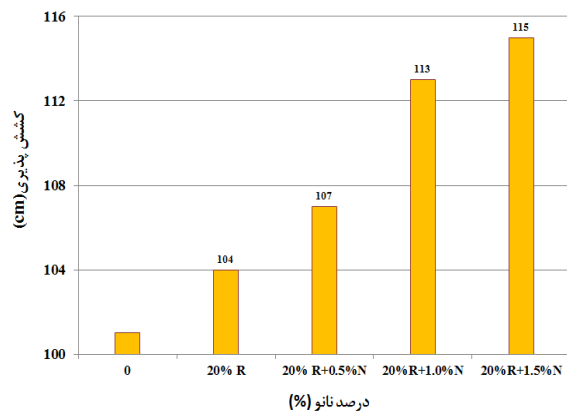
در آزمایش کشش‌پذیری، نمونه قیری تحت نیروی کششی قرار گرفته که در بیشتر قیرهای ایران، این عدد بالای ۱۰۰ سانتی‌متر می‌باشد. تارهای فوقانی و تحتانی لایه نازک قیر در این آزمایش به علت خروج نیرو از مرکز ناشی از حرکت این لایه در حمام دستگاه، تحت کشش و فشار قرار می‌گیرند. شکل ۶، نتایج حاصل از این آزمایش را روی نمونه‌های بدون نانو و اصلاح شده با درصدهای مختلف نانومواد نشان می‌دهد. نتایج نشان از افزایش خاصیت کشسانی در نمونه‌های قیری با افزودن ذرات نانو دارد. علت این افزایش را می‌توان به قرارگیری ذرات نانو در بین ذرات قیر نسبت داد که سبب ایجاد پیوندهای قوی‌تری بین آنها می‌گردد. این پیوندها مانع از گسیختگی قیر اصلاح شده می‌گردد. نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که افزایش خاصیت کشسانی در قیر با افزایش درصد نانو اکسید آلومینیوم به صورت صعودی افزایش می‌یابد.

نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که قیر لاستیکی حاوی ۱/۵ درصد نانو اکسید آلومینیوم بیشترین مقدار

## ارزیابی تأثیر نانو اکسید آلومینیوم بر رفتار رئولوژیک قیر لاستیکی



شکل ۷. نتایج آزمایش ویسکوزیته سینماتیک بر اساس درصدهای مختلف نانو اکسید آلومینیوم



شکل ۶. نتایج آزمایش کشش پذیری بر اساس درصدهای مختلف نانو اکسید آلومینیوم

### ۴-۲. نتایج آزمایش رئومتر برش دینامیک

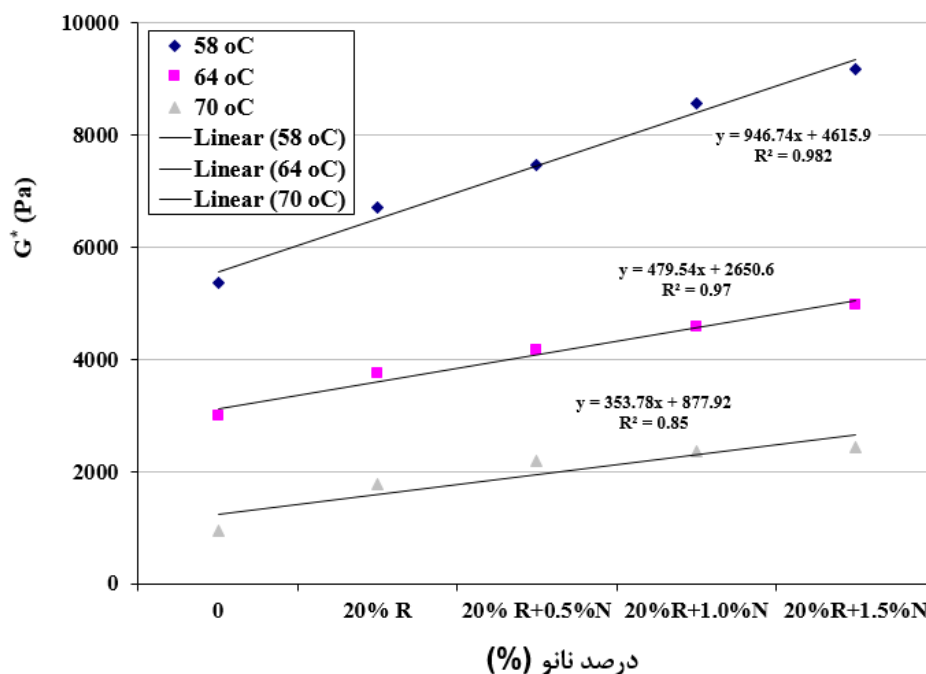
این آزمایش در سه وضعیت قیر عادی و قیر پیر شده کوتاه مدت (RTFO)<sup>۱</sup> در دماهای ۵۸، ۶۴ و ۷۰ درجه سلسیوس و قیر پیر شده بلند مدت (PAV)<sup>۲</sup> در دمای ۲۰ درجه سلسیوس صورت پذیرفته است. ابتدا و در نتیجه مدول برشی ( $G^*$ ) که یکی از اصلی ترین خروجی های این آزمایش می باشد، برای قیرهای مختلف مورد بحث در این تحقیق (قیر کنترل، قیر لاستیکی و قیر اصلاح شده با لاستیک و نانو اکسید آلومینیوم) در دماهای مختلف و در حالت پیر نشده ارائه گردیده است.

همانطور که نتایج نشان می دهد، افزودن درصدهای مختلف نانو اکسید آلومینیوم توانسته است در تمامی دماها مقدار مدول برشی قیر را بهبود بخشد. از دلایل افزایش مدول برشی می توان به این مورد اشاره نمود که افزودن درصدهای مختلف نانو مواد به قیر سبب افزایش ویسکوزیته آن گردیده که این ویسکوزیته بیشتر منجر به ایجاد مقاومت بیشتری از قیر در برابر نیروهای برشی وارده می گردد. پیش بینی می گردد که این ویسکوزیته بیشتر منجر به ایجاد قشر ضخیم تری از قیر اطراف سنگدانه ها گردد که در همین راستا چسبندگی بین قیر و سنگدانه ها افزایش می یابد.

از طرفی، تأثیر دما بر روند تغییرات ویسکوزیته سینماتیک کاملاً مشهود می باشد. همانطور که در هر یک از شکل ها به خوبی مشخص است، روند بهبود ویسکوزیته سینماتیک بر اثر افزودن نانو مواد با افزایش دما از ۱۳۵ درجه به ۱۵۰ درجه سانتی گراد دچار کاهش می گردد. دلیل این مسأله می تواند حساسیت حرارتی قیر باشد. با این حال و با افزایش دما، کماکان روند افزایش ویسکوزیته سینماتیک قیر ادامه داشته و تنها شیب افزایش دچار کاهش می گردد که این مسأله نشان از تأثیر زیاد نانو مواد بر بهبود مقاومت قیر در برابر روان شدن می باشد. همانطور که از نتایج مشخص است، در صورت استفاده از ۲۰٪ پودر لاستیک و ۱/۵ درصد نانو اکسید آلومینیوم به منظور اصلاح عملکرد قیر، میزان افزایش ویسکوزیته بیشتر می باشد. ذرات نانو مواد، با تقویت پیوندهای موجود بین آسفالتین و مالتین، قوام و غلظت قیر را افزایش می دهند و نقش مهمی در اتصال بهتر سنگدانه ها و قیر بر عهده دارند.

<sup>۱</sup> - Rolling Thin Film Oven

<sup>۲</sup> - Pressure Aging Vessel



شکل ۸. مدول برشی قیرهای اصلاح شده با درصد‌های مختلف نانو اکسید آلومینیوم در حالت قیر پیرنشده

و قیر رقیق می‌گردد که این مسأله دیگر با اضافه کردن نانومواد دچار بهبود نمی‌گردد.

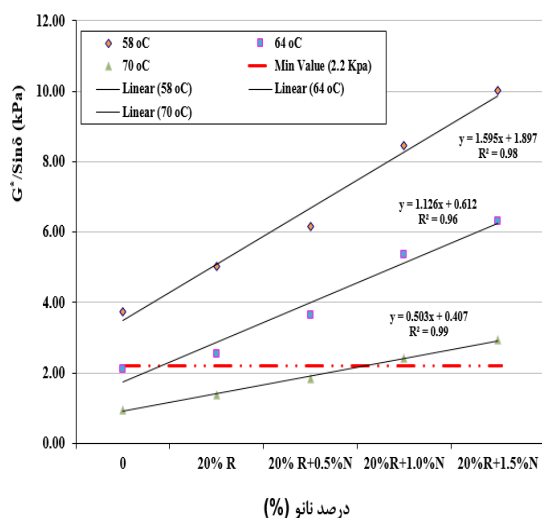
همانطور که نتایج نشان می‌دهد، در نمونه‌های قیری حاوی ۲۰٪ پودر لاستیک و ۱/۵ درصد نانو اکسید آلومینیوم، مقدار مدول برشی به بیشترین مقدار خود رسیده است. برای مثال، در دمای ۵۸ درجه سلسیوس، مقدار آن در مقایسه با قیر کنترل و قیر لاستیکی (۲۰٪ پودر لاستیک و بدون نانو) حدود ۷۰ و ۴۰ درصد افزایش یافته است. در واقع، ذرات نانو اکسید آلومینیوم در این وضعیت به فرآیند مسلح‌سازی قیر و بهبود ویسکوزیته آن کمک کرده تا این بهبود حاصل گردد.

برای ارزیابی اثر نانو اکسید آلومینیوم بر مقاومت شیارافتادگی قیر، آزمایش رئومتر برش دینامیک در دماهای ۵۸، ۶۴ و ۷۰ درجه سلسیوس روی قیر کنترل، قیر لاستیکی (اصلاح شده با ۲۰٪ پودر لاستیک) و قیر لاستیکی اصلاح شده با درصد‌های مختلف نانو اکسید آلومینیوم صورت گرفته که نتایج آن در دو حالت قیر پیرنشده و قیر پیرشده کوتاه‌مدت در شکل‌های ۹ و ۱۰

شکل ۸ نشان‌دهنده تأثیر زیاد دما بر عملکرد قیر می‌باشد. همانطور که از نتایج مشخص است، مقدار مدول برشی در دمای ۵۸ درجه سلسیوس و در مقدار ۲۰٪ پودر لاستیک و ۱/۵ درصد نانو اکسید آلومینیوم حدود ۳/۸ برابر مقدار آن در دمای ۷۰ درجه سلسیوس می‌باشد. این امر به دلیل حساسیت زیاد قیر به حرارت می‌باشد. حرارت‌های بالاتر سبب رقیق شدن قیر گردیده و از خصوصیات چسبندگی و مقاومت آن در مقابل نیروی برشی وارده در این آزمایش می‌کاهد.

همچنین، افزایش دما سبب می‌شود که شیب افزایش مدول برشی در نمونه‌های قیری با درصد‌های مختلف نانومواد کاهش یابد. به گونه‌ای که در دمای ۵۸ درجه سلسیوس تأثیر درصد‌های نانومواد بسیار بیشتر از دماهای ۶۴ و ۷۰ درجه سلسیوس بوده است. این مسأله را می‌توان این‌گونه توجیه نمود که در دمای کم، قیر دارای چسبندگی و ویسکوزیته مشخصی بوده که با افزودن نانومواد این مسأله بهبود می‌یابد. این درحالیست که وقتی دما افزایش می‌یابد، خصوصیات قیر به شدت کاهش یافته

از ۶۴ درجه سلسیوس دارای افت عملکرد خواهد شد. با این حال، نتایج نشان می‌دهد که با افزودن لاستیک و نانو اکسید آلومینیوم به قیر در دمای ۷۰ درجه سلسیوس، مقدار  $G^*/\text{Sin}\delta$  در این دما نیز بیشتر از مقدار حداقلی ۱ کیلو پاسکال در وضعیت پیر نشده رسیده است که این نکته از آن جهت حائز اهمیت است که نتایج این تحقیق توانسته دمای سرویس دهی قیر را بهبود ببخشد.



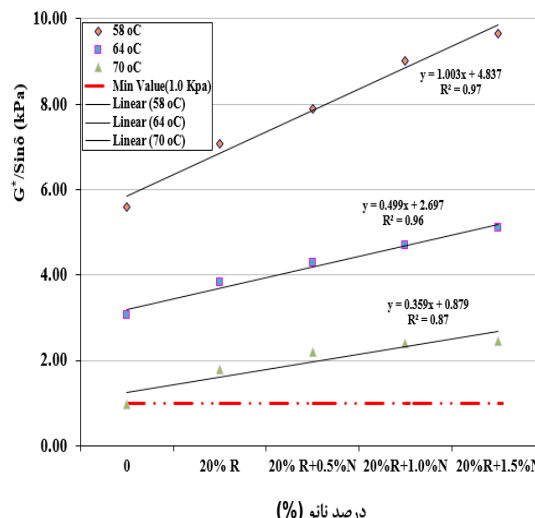
شکل ۱۰.  $G^*/\text{Sin}\delta$  قیرهای اصلاح شده با درصد های مختلف نانو اکسید آلومینیوم در حالت پیر شده کوتاه مدت

این مقدار بر اثر افزودن درصد های مختلف نانو اکسید آلومینیوم افزایش یافته است که می‌تواند نشانه خوبی در جهت بهبود عملکرد قیر در برابر پدیده شیارشدگی و تغییر شکل های ماندگار باشد. همانطور که شکل ۱۰ نشان می‌دهد، در دمای ۵۸ درجه سلسیوس، مقدار  $G^*/\text{Sin}\delta$  در قیر اصلاح شده با ۱/۵ درصد نانو اکسید آلومینیوم حدود ۲/۷ و ۲/۱۰ برابر قیر کنترل و قیر لاستیکی می‌باشد

<sup>۱</sup>- [Strategic Highway Research Program](#)

نشان داده شده است. گروه SHRP<sup>۱</sup> پس از تحقیقات گسترده، حداقل مقدار  $G^*/\text{Sin}\delta$  را ۱ کیلو پاسکال برای قیرهای پیر نشده و ۲/۲ کیلو پاسکال برای قیرهای پیر شده کوتاه مدت پیشنهاد نموده است.

نتایج نشان می‌دهد که در حالت قیر عادی (پیر نشده)، در تمامی دماها، مقدار  $G^*/\text{Sin}\delta$  بیش از ۱ کیلو پاسکال تعیین شده توسط شارپ می‌باشد و این تنها دمای ۷۰ درجه سلسیوس بوده که مقدار  $G^*/\text{Sin}\delta$  در آن کمتر از ۱ است. این مسأله به این علت است که قیر مورد استفاده در این تحقیق قیر ۱۰۰-۸۵ بوده که از نظر عملکردی معادل قیر ۲۲-۶۴ می‌باشد و در دماهای بیشتر



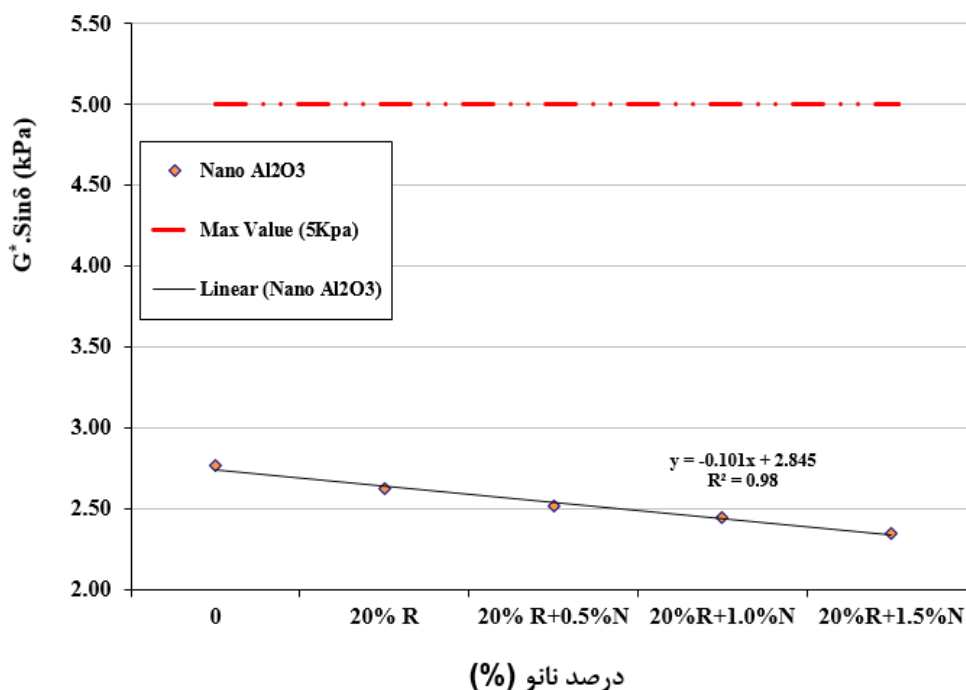
شکل ۹.  $G^*/\text{Sin}\delta$  قیرهای اصلاح شده با درصد های مختلف نانو اکسید آلومینیوم در حالت پیر نشده

همانطور که نتایج نشان می‌دهد، قیر ۱۰۰-۸۵ مورد استفاده در این تحقیق در دماهای ۶۴ و ۷۰ درجه سلسیوس و در وضعیت RTFO مقدار  $G^*/\text{Sin}\delta$  کمتری از حداقل مقدار آیین نامه ای (۲/۲ کیلو پاسکال) داشته است. با این حال، نتایج نشان می‌دهد که در قیرهای اصلاح شده با نانو اکسید آلومینیوم در تمامی دماها این مقدار بیش از حداقل مقدار مؤسسه شارپ می‌باشد که

قرار گرفت، رخ می‌دهد، لذا برای تعیین خستگی، آزمایش رئومتر برش دینامیک در دمای ۲۰ درجه سلسیوس روی قیرهای پیرشده در دو دستگاه RTFO و PAV انجام می‌شود. فاکتور کنترلی ترک‌های خستگی  $G^*.sin\delta$  می‌باشد. مؤسسه شارپ، حداکثر مقدار ۵ کیلوپاسکال را برای  $G^*.sin\delta$  در نظر می‌گیرد. مقادیر کم برای  $G^*$  و  $\delta$  می‌تواند از نظر مقاومت در برابر ترک‌های خستگی مناسب باشد. لذا آزمایش‌های شارپ، استفاده از قیرهای الاستیک (پیرشده در دستگاه PAV) را برای کنترل مخلوط در برابر ترک‌های خستگی توصیه می‌کند. مقادیر  $G^*.sin\delta$  برای قیرهای اصلاح شده با درصد‌های مختلف نانوآکسید آلومینیوم در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، افزودن درصد‌های مختلف نانوآکسید آلومینیوم توانسته عملکرد قیر را در برابر پدیده خستگی بهبود بخشد.

که این میزان افزایش نشان از تأثیر بالای نانوآکسید آلومینیوم در بهبود رفتار رئولوژیک قیر دارد. هرچند که با افزایش دما از میزان تأثیر نانوآکسید آلومینیوم بر آن کاسته شده که دلیل آن حساسیت زیاد قیر به دما می‌باشد. تأثیر زیاد افزودنی نانوآکسید تیتانیوم در دمای ۷۰ درجه می‌باشد؛ آنجایی که مقدار  $G^*/Sin\delta$  بر اثر افزایش دما کاهش محسوسی داشته و کمتر از مقدار ضابطه‌ای ۲/۲ گردیده است و با افزودن درصد‌های مختلفی از این نانو مقدار  $G^*/Sin\delta$  در آن ارتقا یافته و عملکرد رئولوژیک این قیر در برابر پدیده شیارشدگی بهبود یافته است.

همانند شیارشدگی،  $G^*$  و  $\delta$  در ملزومات قیر سوپریو مورد استفاده قرار می‌گیرند تا به کنترل ترک‌های خستگی در روسازی‌های آسفالتی کمک کنند. از آنجا که ترک‌های خستگی معمولاً در دماهای کم تا متوسط روسازی، پس از اینکه روسازی مدتی تحت بارگذاری



شکل ۱۱.  $G^*.Sin\delta$  قیرهای اصلاح شده با درصد‌های مختلف نانوآکسید آلومینیوم در حالت پیرشده بلندمدت

روسازی مانع حرکت آنها می‌شود، تنش‌های کششی در روسازی به وجود می‌آید. هنگامی که این تنش از مقاومت کششی مخلوط آسفالتی بیشتر شود، ترک‌های برودتی

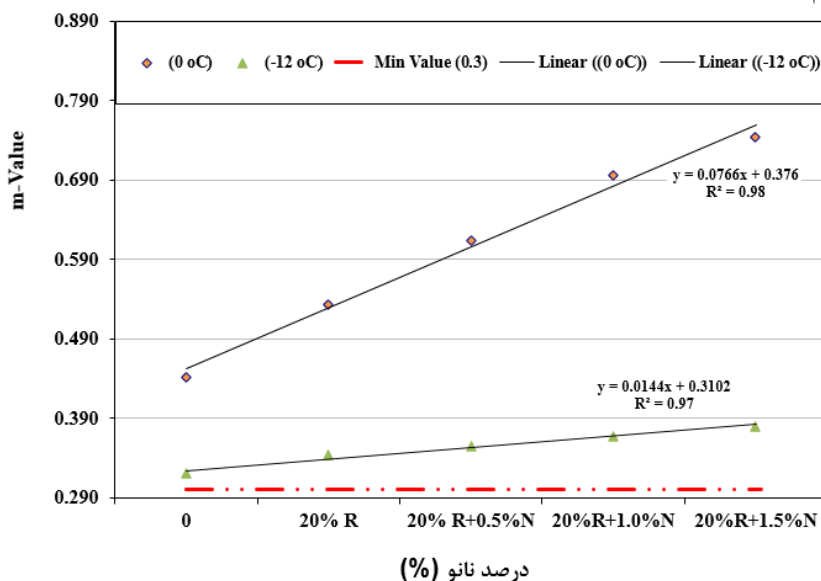
#### ۳-۴. نتایج آزمایش رئومتر تیرچه خمشی

هنگامی که دمای روسازی کاهش می‌یابد، مخلوط آسفالتی منقبض می‌شود. از آنجا که اصطکاک در لایه‌های زیرین

بیشتر m-value مناسب می‌باشد، زیرا همانطور که دما کاهش می‌یابد و روسازی شروع به انقباض می‌کند، قیر مانند یک ماده با سختی کم واکنش نشان خواهد داد. این کاهش سختی (نسبت تنش به کرنش) منجر به تنش‌های کششی کوچک‌تر در قیر می‌شود و لذا احتمال کمتری برای ایجاد ترک‌های برودتی وجود خواهد داشت. حداقل مقدار m-value بعد از ۶۰ ثانیه بارگذاری، طبق ملزومات قیر روسازی با عملکرد بالا<sup>۱</sup> برابر ۰/۳ می‌باشد. نتایج آزمایش رئومتر تیرچه خمشی روی قیرهای اصلاح شده با درصد‌های مختلف نانو اکسید آلومینیوم و پیر شده در دستگاه‌های RTFO و PAV در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

(دمای کم) به وجود می‌آید. آزمایش رئومتر تیرچه خمشی برای تعیین سفتی خزشی قیر استفاده می‌شود. اگر سختی خزشی بسیار زیاد باشد، قیر رفتار شکننده و ترد خواهد داشت و به احتمال زیاد ترک‌های برودتی (دمای کم) رخ می‌دهد. برای جلوگیری از این ترک‌ها، آزمایش‌های شارپ سفتی خزشی را به مقدار حداکثر ۳۰۰ مگاپاسکال محدود می‌نماید.

از آنجایی که ترک‌های برودتی معمولاً بعد از گذشت مدتی از زمان بهره‌برداری روسازی اتفاق می‌افتد، بنابراین آزمایش‌ها روی قیرهای پیر شده در دستگاه‌های RTFO و PAV انجام می‌شود. نرخ تغییرات سفتی قیر با زمان در دماهای کم به m-value معروف است. مقدار



شکل ۱۲. m-Value قیرهای اصلاح شده با درصد‌های مختلف نانو اکسید آلومینیوم در دماهای مختلف

افزایش خواهد یافت، که این مسأله می‌تواند کمک شایانی به قیر در دماهای کم و شرایط آب و هوایی سرد نماید. همانطور که پیشتر نیز تشریح گردید، در این شرایط آب و هوایی سرد، قیر و مخلوط آسفالتی دچار ترک‌های برودتی می‌گردند که هرچقدر نرخ تغییرات سختی خزشی بیشتر باشد، مقاومت قیر در برابر این ترک‌ها بیشتر خواهد بود.

همانطور که نتایج نشان می‌دهد، مقدار تغییرات سختی خزشی (m) در هر دو دمای مورد آزمایش از حداقل تعیین شده توسط مؤسسه تحقیقاتی شارپ (۰/۳) بیشتر می‌باشد. این در حالیست که این مقدار با افزودن درصد‌های مختلف نانو اکسید آلومینیوم افزایش می‌یابد.

نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که هرچه درصد نانومواد افزوده شده به قیر بیشتر شود، مقدار m نیز

<sup>۱</sup>- Superpave

۱ ثانیه بارگذاری و ۹ ثانیه باربرداری در سطح تنش‌های ۰/۱ و ۳/۲ کیلوپاسکال در ۱۰ سیکل برای هر سطح تنش می‌باشد. نرمی برگشت‌ناپذیر (Jnr) و درصد بازگشت (R) در هر سیکل برای تعیین عملکرد دمای بالای مخلوط آسفالتی به دست می‌آید.

جداول ۴ و ۵ نتایج آزمایش MSCR را در دو دمای ۵۸ و ۶۴ درجه سلسیوس نشان می‌دهند. همانطور که نتایج نشان می‌دهند، قیر خالص بیشترین مقدار Jnr را در هر دو سطح تنش دارد که این امر نشان‌دهنده نرم‌تر بودن قیر پایه است. با افزایش درصدهای مواد افزودنی، به-تدریج قیر سخت‌تر شده و در هر دو سطح تنش مقادیر نرمی بازگشت‌پذیر (Jnr) کاهش و درصد بازگشت (R) افزایش می‌یابد.

شایان ذکر است از آنجایی که یکی از معیارهای بررسی در این آزمایش درصد تفاوت Jnr در دو سطح تنش می‌باشد، در ستون آخر این مقایسه آورده شده است. مطابق با استاندارد، درصد تفاوت Jnr نباید بیش از ۷۵٪ باشد. این پارامتر در واقع بیان‌کننده حساسیت مواد به سطح تنش می‌باشد. به عبارت دیگر، با تغییر سطح تنش از ۰/۱ به ۳/۲ کیلوپاسکال مقدار Jnr نباید بیش از ۷۵٪ تغییر کند.

نتایج نشان می‌دهد که در دمای صفر درجه سلسیوس، با افزودن ۱/۵ درصد نانوآکسید آلومینیوم، مقاومت قیر در برابر ترک‌های برودتی به ترتیب حدود ۱/۶۸ و ۱/۴ برابر مقاومت قیر عادی و قیر لاستیکی می‌باشد. این در حالیکه این تأثیر در دمای ۱۲- درجه سلسیوس حدوداً ۱/۱۸ و ۱/۱ بوده است. موارد فوق نتایج کلی زیر را به همراه دارد:

- تأثیر نانو بر رفتار قیر در دماهای کم با کاهش دما کاهش یافته است. به‌گونه‌ای که این تأثیرات در دمای صفر درجه بیش از تأثیر آنها در دمای ۱۲- درجه می‌باشد. این مسأله با توجه به حساسیت زیاد قیر به حرارت کاملاً طبیعی و قابل پیش‌بینی بوده است.
- از نظر نتایج این آزمایش، مناسب‌ترین مقدار برای نانوآکسید آلومینیوم به منظور جایگزینی در قیر و بهبود رفتار قیر، ۱/۵ درصد می‌باشد.

#### ۴-۴. نتایج آزمایش MSCR

مطابق با استاندارد ASTM D7405-15، آزمایش MSCR روی نمونه‌های RTFO در دمای PG (در این تحقیق ۵۸ و ۶۴ درجه سلسیوس) انجام می‌پذیرد و شامل

جدول ۴. نتایج آزمایش MSCR در دمای ۵۸ درجه سلسیوس

Jnr-diff	مقدار R		مقدار Jnr (kPa <sup>-1</sup> )		درصد افزودنی
	۳/۲ kPa	۰/۱ kPa	۳/۲ kPa	۰/۱ kPa	
۶۷/۶۱	۱۳/۱۱	۲۸/۱۵	۲/۹۵	۱/۷۶	صفر
۶۲/۳۵	۱۶/۰۳	۳۴/۱۲	۲/۶۳	۱/۶۲	۲۰٪ لاستیک
۵۸/۷۸	۱۸/۰۵	۳۶/۱۱	۲/۳۵	۱/۴۸	۲۰٪ لاستیک + ۰/۵٪ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۵۷/۰۴	۱۹/۸۹	۳۹/۵۳	۲/۱۲	۱/۳۵	۲۰٪ لاستیک + ۱/۱۰٪ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۵۵/۳۷	۲۰/۳۲	۴۳/۱۸	۱/۸۸	۱/۲۱	۲۰٪ لاستیک + ۱/۱۵٪ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

جدول ۵. نتایج آزمایش MSCR در دمای ۶۴ درجه سلسیوس

J <sub>nr-diff</sub>	مقدار R		مقدار J <sub>nr</sub> (kPa <sup>-1</sup> )		درصد افزودنی
	۳/۲ kPa	۰/۱ kPa	۳/۲ kPa	۰/۱ kPa	
۶۴/۳۴	۱۵/۳۰	۳۰/۱۴	۲/۱۲	۱/۲۹	صفر
۶۴/۴۱	۱۸/۶۰	۳۷/۳۲	۱/۹۴	۱/۱۸	۲۰٪ لاستیک
۶۰/۵۹	۲۰/۳۰	۳۹/۱۵	۱/۶۹	۱/۰۵	۲۰٪ لاستیک + ۰/۵٪ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۵۸/۴۳	۲۲/۷۰	۴۳/۱۴	۱/۴۱	۰/۸۹	۲۰٪ لاستیک + ۱/۰٪ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۵۷/۳۳	۲۳/۴۰	۴۷/۴۵	۱/۱۸	۰/۷۵	۲۰٪ لاستیک + ۱/۵٪ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

حاوی ۲۰٪ پودر لاستیک و ۱/۵ درصد نانو اکسید آلومینیوم، مقدار مدول برشی به بیشترین مقدار خود رسیده است.

- در حالت قیر عادی (پیرنشده)، در تمامی دماها، مقدار  $G^*/\text{Sin}\delta$  بیش از ۱ کیلو پاسکال تعیین شده توسط شارپ بوده و این تنها دمای ۷۰ درجه سلسیوس است که مقدار  $G^*/\text{Sin}\delta$  در آن کمتر از ۱ می‌باشد. با این حال، نتایج نشان می‌دهد که با افزودن لاستیک و نانو اکسید آلومینیوم به قیر در دمای ۷۰ درجه سلسیوس، مقدار  $G^*/\text{Sin}\delta$  در این دما نیز به بیشتر از مقدار حداقلی ۱ کیلو پاسکال در وضعیت پیرنشده رسیده است.
- در حالت قیر پیر نشده، پیر شده کوتاه مدت و پیر شده بلند مدت، بر اثر افزودن درصد های مختلف نانو اکسید آلومینیوم، رفتار قیر در برابر خرابی های ناشی از خستگی و شیار شدگی بهبود قابل توجهی یافته و بهترین مقدار در اثر افزودن ۱/۵ درصد نانو اکسید حاصل شده است.
- تأثیر نانو اکسید آلومینیوم بر رفتار قیر در دما های کم، با کاهش دما کاهش یافته است. به گونه ای که این تأثیرات در دمای صفر درجه سلسیوس بیش از تأثیر آنها در دمای ۱۲- درجه سلسیوس می‌باشد. این مسأله با توجه به حساسیت زیاد قیر به حرارت کاملاً طبیعی و قابل پیش بینی بوده است. با توجه به نتایج آزمایش BBR، مناسب ترین مقدار نانو اکسید

همانطور که نتایج نشان می‌دهد، در نمونه های مورد بررسی در این آزمایش و در تمامی حالات، این مقدار کمتر از ۷۵٪ بوده است. با این حال، نکته حائز اهمیت، تأثیر افزودن افزودنی ها بوده که هرچقدر مقدار آنها افزایش می‌یابد، مقدار  $J_{nr-diff}$  کاهش یافته است که نشان می‌دهد افزودن افزودنی ها سبب کاهش حساسیت قیر به تنش خواهد شد.

## ۵. نتیجه گیری

در این پژوهش، به بررسی میزان کارایی و تأثیر نانو اکسید آلومینیوم (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) به عنوان افزودنی در قیر لاستیکی، به منظور بهبود عملکرد آن در برابر تغییرات دما و مقاومت در برابر خرابی های نظیر شیار شدگی و خستگی، پرداخته شد. مهمترین نتایج به دست آمده از این تحقیق به صورت زیر می‌باشد:

- آزمایش های فیزیکی قیر در این تحقیق نشان می‌دهد که افزودن نانو اکسید آلومینیوم تا حد قابل توجهی می‌تواند خصوصیات فیزیکی قیر همچون نقطه نرمی، درجه نفوذ، کشش پذیری و ویسکوزیته را بهبود بخشد و ترکیب ۲۰٪ پودر لاستیک و ۱/۵ درصد نانو اکسید آلومینیوم بهترین عملکرد را دارد.
- نتایج آزمایش رئومتر برش دینامیک نشان می‌دهد که افزودن درصد های مختلف نانو اکسید آلومینیوم توانسته است در تمامی دماها مقدار مدول برشی قیر را بهبود بخشد. به گونه ای که در نمونه های قیری



آلومینیوم به منظور جایگزینی در قیر و بهبود رفتار آن، ۱/۵ درصد می‌باشد. نشان می‌دهد افزودن افزودنی‌ها سبب کاهش حساسیت قیر به تنش خواهد شد.

## ۶. تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله، مراتب تشکر و قدردانی خود را از آزمایشگاه قیر پژوهشگاه نفت تهران بابت همکاری در انجام آزمایش‌های این تحقیق اعلام می‌دارد.

• در نمونه‌های مورد بررسی در این آزمایش و در تمامی حالات، با افزودن پودر لاستیک و نانو اکسید آلومینیوم، مقدار Jnr-diff کاهش یافته است که

## ۷. مراجع

رضوان، م و ایزدی، ا. ۱۳۹۴. "بررسی اثر نانو اکسیدهای آهن و آلومینیوم بر کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی گرم". مجله مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل. دوره ۱. شماره ۴. صفحه ۹۳ تا ۱۰۲.

طاهرخانی، ح.، شفیع‌ی ماتک، م. و امینی، ح. ۱۳۹۲. "بررسی تأثیر افزودن نانورس اصلاح شده به قیر بر روی مقاومت در برابر پدیده شیارشدگی به کمک آزمایش DSR". هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، زاهدان.

فخری، م. و فرخی، م. ۱۳۸۶. "بررسی نحوه‌ی گسترش ترک‌های بالا به پایین در روسازی‌های آسفالتی با استفاده از فرضیه مکانیک شکست". مجله عمران مدرس، ۱۰(۳).

فرامرزی، م. و معصومی راد، ع. ۱۳۹۳. "پیش‌بینی عمر خستگی مخلوط آسفالتی گرم اصلاح شده با نانولوله‌های کربنی". ششمین همایش ملی قیر و آسفالت ایران.

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی. ۱۳۹۰. "آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران". نشریه ۲۳۴.

مقدس‌نژاد، ف. ۱۳۹۳. "تأثیر نانوذرات در مقاومت بتن آسفالتی در برابر بارهای خزشی دینامیکی". ششمین همایش ملی قیر و آسفالت ایران.

Arabani, M., Shakeri, V. and Sadeghnejad, M. 2013. "Experimental evaluation of fatigue life of asphalt mixture modified with nano zinc oxide". 7<sup>th</sup> National Congress on Civil Engineering, I.R.Iran.

ASTM D7552. 2014. "Standard test method for determining the complex shear modulus ( $G^*$ ) of bituminous mixtures using dynamic shear rheometer". ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

Chelovian, A. and Shafabakhsh, Gh. 2017. "Laboratory evaluation of nano  $Al_2O_3$  effect on dynamic performance of stone mastic asphalt". [Int. J. Pavement Res. Technol.](#), 10(2): 131-138.

Ghaffarpour Jahromi, S. and Khodaii, A. 2009. "Effect of nanoclay on rheological properties of bitumen binder". *Constr. Build. Mater.*, 23; 2894-2904.

Khattak, M. J., Khattab, A., Rizvi, H. R. and Zhang, P. 2012. "The impact of carbon nano-fiber modification on asphalt binder rheology". *Constr. Build. Mater.*, 30: 257-264.

Kordi, Z. and Shafabakhsh, Gh. 2017. "Evaluating mechanical properties of stone mastic asphalt modified with nano  $Fe_2O_3$ ". *Constr. Build. Mater.*, 134: 530-539.

Mashaan, N. S., Ali, A. H., Karim, M. R. and Abdelaziz, M. 2014. "A review on using crumb rubber in reinforcement of asphalt pavement". *Sci. World J.*, 2014: Article ID 214612, 21 p.

Sabouri, M. and Kim, Y. 2014. "Development of a failure criterion for asphalt mixtures under different modes of fatigue loading". *Transport. Res. Record: J. Transport. Res. Board*, 2447: 117-125.

Sadeghpour Galooyak, S., Dabir, B., Nazarbeygi, A. E. and Moeini, A. 2010. "Rheological properties and storage stability of bitumen/SBS/montmorillonite composites". *Constr. Build. Mater.*, 24: 300-307.

Shafabakhsh, Gh., Mirabdolazimi, S. M. and Sadeghnejad, M. 2014. "Evaluation the effect of nano- $TiO_2$  on the rutting and fatigue behavior of asphalt mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 54: 566-571.

Shirakawa, T., Tada, A. and Okazaki, N. 2012. "Development of functional carbon nanotubes-asphalt composites". *Int. J. GEOMATE*, 2(1): 161-165.

Wasage, T. L. J., Ong, G. P., Fwa, T. F. and Tan, S. A. 2004. "Laboratory evaluation of rutting resistance of geosynthetics reinforced asphalt pavement". *J. Inst. Eng.*, 44(2): 29-44.

You, Z. P. and Mills-Beale, J. 2011. "Nanoclay-modified asphalt materials: Preparation and characterization". *Constr. Build. Mater.*, 25: 1072-1078.

