ارزیابی تأثیر هم‌زمان پودر لاستیک و نانو رس بر خصوصیات عملکردی قیرها و مخلوط‌های آسفالتی

علمی – پژوهشی

امیر امینی*، پژوهشگر پسادکتری، گروه مهندسی عمران، گرایش راه و ترابری، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
مهدی خضری، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مدیریت بازرگانی، گرایش بازاریابی، دانشگاه آزاد اسلامی یزد، یزد، ایران
فرزاد دادخواه، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، گرایش سازه ، دانشگاه آزاد اسلامی تیران، اصفهان، ایران
احمد صفری محمدی، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: amini.amir68@gmail.com

دریافت: ۱٤۰۱/۰۲/۲۷– پذیرش: ۱٤۰۱/۱۰/۱۵
صفحه ۳۳٦-۳۲۳

چکیده

باوجود مزایای قابل‌توجه پودر لاستیک در صنعت روسازی، ولی افزایش قابل‌توجه ویسکوزیته و مشکلات ذخیره‌سازی قیرهای لاستیکی باعث محدودیت‌های اجرایی این تکنولوژی شده است. بر همین اساس، روش‌های مختلفی به‌منظور اصلاح خصوصیات فنی و اجرایی قیرهای لاستیکی به‌عنوان افزودنی مکمل مطرح‌شده است. هدف از این مطالعه بهبود عملکرد خستگی و شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از قیر لاستیکی اصلاح‌شده با نانو رس می‌باشد. در راستای دستیابی به اهداف تعیین شده، قیرهای لاستیکی حاوی ۸ و ۱٤ درصد با مقادیر ۲ تا ۶ درصد نانو رس اصلاح شدند با استفاده از آزمایش‌های پیشرفته جاروب دامنه خطی (LAS)، خزش و بازگشت در چند سطح تنش (MSCR)، تیر خمشی چهار نقطه و خزش دینامیکی بررسی شدند. نتایج آزمایش MSCR و خزش دینامیکی نشان داد افزودن نانو رس تا ٤ درصد تأثیر قابل‌توجهی بر افزایش مقاومت شیارشدگی و کاهش تغییر شکل‌های دائمی داشته است، ولی با افزایش آن به ۶ درصد از روند صعودی آن کاسته شده است. همچنین، نتایج آزمایش تیر خمشی چهار نقطه نشان داد، با توجه به تأثیر مثبت نانو رس در بهبود عمر خستگی و مقاومت پیرشدگی، مخلوط حاوی قیر اصلاح‌شده با ۱٤ درصد پودر لاستیک و ۳ درصد نانو رس با افزایش ۱۹۵ درصد عمر خستگی نسبت به نمونه شاهد، بیشترین بهبود را داشته است. به‌طورکلی بررسی هم‌زمان رفتار خستگی و شیارشدگی نشان داد استفاده هم‌زمان ٤ درصد نانو رس و ۱٤ درصد پودر لاستیک بهترین تأثیر را بر عملکرد آسفالت داشته است.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالتی، قیر لاستیکی اصلاح‌شده با نانو رس، عمر خستگی، مقاومت شیارشدگی، تیر خمشی چهار نقطه

۱-مقدمه

شیارشدگی و خستگی عمده‌ترین خرابی‌های روسازی آسفالتی می‌باشند که تأثیر بسزایی بر خصوصیات عملکردی و عمر مفید راه‌ها دارند (Ameri, Mirzaiyan, & Amini, 2018). در سال‌های اخیر عوامل متعددی ازجمله ازدیاد بار ترافیک و بالا رفتن فشار مجاز چرخ‌های وسایط نقلیه باعث افزایش تنش در لایه‌های روسازی و درنتیجه کاهش عمر مفید روسازی‌های آسفالتی شده است (Airey, 2004). یکی از راهکارهای مقابله با خرابی‌های زودرس آسفالت و افزایش عمر مفید راه‌ها، استفاده از مواد اصلاح‌کننده ازجمله مواد پلیمری در صنعت روسازی می‌باشد (Viscione et al., 2021). این در حالی

است که با افزایش شدید قیمت افزودنی‌های پلیمری، استفاده از مواد اصلاح‌کننده بازیافتی و ارزان‌قیمت موردتوجه ویژه قرارگرفته است. استفاده از مواد ضایعاتی و پلیمرهای بازیافتی در صنعت روسازی، علاوه بر صرفه‌جویی اقتصادی و رفع مشکلات زیست‌محیطی، موجب بهبود عملکرد فنی و اقتصادی قیرها و مخلوط‌های آسفالتی می‌شود(Ziari, Nasiri, Amini, & Ferdosian, 2019). از طرفی، افزایش تعداد وسایل نقلیه در جاده‌ها، باعث تولید میلیون‌ها لاستیک فرسوده در کشورهای درحال‌توسعه است(Yu, Yu, Presti, 2013 ; et al., 2018). بر همین اساس و در راستای نیاز به مواد اصلاح‌کننده روسازی، در سال‌های اخیر توجه به مواد بازیافتی و ارزان قیمت باهدف اصلاح خصوصیات روسازی بیش از گذشته موردتوجه قرارگرفته است (Ziari, Amini, & Goli, 2020). پودر لاستیک یکی از این مواد افزودنی است که علاوه بر رفع مشکلات زیست‌محیطی و اقتصادی، موجب افزایش عمر خستگی، مقاومت شیارشدگی و کاهش حساسیت دمایی قیرها و مخلوط‌های آسفالتی می‌شود (Ziari, Goli, & Amini, 2016a). باوجود مزایای قابل‌توجه پودر لاستیک، ولی افزایش قابل‌توجه ویسکوزیته و مشکلات ذخیره‌سازی قیرهای لاستیکی باعث محدودیت‌های اجرایی این فنّاوری شده است. بر همین اساس، در سال‌های اخیر روش‌های مختلفی به‌منظور اصلاح خصوصیات قیرهای لاستیکی مطرح‌شده است (Han et al., 2017; Ren et al., 2020; Tang et al., 2019).

یکی از شاخص‌ترین روش‌های مطرح‌شده، استفاده از نانو مواد به‌عنوان افزودنی مکمل در بهبود خصوصیات قیرهای اصلاح‌شده است (Ziari, Goli, Ziari, & Amini, 2017 ; Amini, Goli, & Mirzaiyan, 2018). در میان نانو ذرات مورد استفاده در اصلاح ویژگی‌های قیرها و مخلوط‌های آسفالتی، نانو رس با توجه به خصوصیات عملکردی مناسب موردتوجه ویژه محققان صنعت روسازی قرارگرفته است (Ashish, Singh, & Bohm, 2017). نانو رس با توجه به خصوصیات منحصربه‌فرد ازجمله سطح ویژه بالا، خواص الکتریکی سطحی و ظرفیت تبادل کاتیونی توانسته است به‌عنوان افزودنی مکمل در قیرها و مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده پلیمری مطرح شود (Saboo & Sukhija, 2021). در سال‌های اخیر مطالعات مختلفی به ارزیابی تأثیر نانو رس و پودر لاستیک برخصوصیات فیزیکی و رفتار عملکردی قیرهای و مخلوط‌های آسفالتی پرداخته‌اند. سال ۲۰۱۶ زیاری و همکاران (Ziari, Goli, & Amini, 2016b) با بررسی خصوصیات عملکردی قیرها در دمای بالا و پایین تحت تأثیر مقدار پودر لاستیک، نوع قیر و اندازه ذرات پودر لاستیک نشان دادند که پودر لاستیک تأثیر قابل‌توجهی بر خصوصیات عملکردی قیرها دارد و موجب بهبود عملکرد شیارشدگی و مقاومت خستگی قیرها در دمای بالا و متوسط می‌شود. همچنین نتایج این پژوهش نشان داد که تأثیر مثبت پودر لاستیک بر رفتار عملکردی و فیزیکی قیرها تحت تأثیر اندازه ذرات و درصد مصرفی می‌باشد.

گلی و همکاران (Goli et al., 2017) سال ۲۰۱۷ با بررسی تأثیر نانولوله‌های کربن بر خواص رئولوژیکی و پایداری حرارتی قیرهای حاوی پلیمر SBS نشان دادند، استفاده از نانو مواد علاوه بر تأثیر مثبت بر خصوصیات فنی و عملکردی قیر، توانایی بهبود خصوصیات ذخیره‌سازی قیرهای پلیمری را دارد. همچنین، یافته‌های این مطالعه نشان داد در بین ترکیبات ساخته‌شده، استفاده از ترکیب هم‌زمان پلیمر و نانولوله کربن داری بهترین عملکرد می‌باشد. امینی و همکاران سال ۲۰۱۷ (Amini, Ziari, & Goli, 2018) تأثیر نوع قیر و درصدهای مختلف پودر لاستیک را بر روی خصوصیات رئولوژیکی و مکانیکی قیرهای اصلاح‌شده لاستیکی با استفاده از آزمایش‌های عملکردی PG و سیستم پیشرفته شارپ بررسی کردند. مطابق با یافته‌های این تحقیق، پودر لاستیک تأثیر قابل‌توجهی بر کاهش کرنش ماندگار قیر و بهبود مقاومت شیار شدگی قیرها در دمای بالا و در دو حالت پیر شده و پیر نشده دارد. همچنین استفاده از این افزودنی علاوه بر بهبود خصوصیات فنی و فیزیکی قیر، توانایی پوشش دامنه‌های عملکردی PG را بر اساس آزمایش‌ها شارپ برای مناطق مختلف آب و هوایی ایران را دارد. یو و همکاران (Yu, Ren, et al., 2018) سال ۲۰۱۸ به بررسی تأثیر نانو رس بر خصوصیات پایداری حرارتی قیرهای لاستیکی پرداختند. در این تحقیق از آزمایش‌های رده عملکردی، پایداری ذخیره‌سازی با اندازه‌گیری تفاوت در نقطه نرمی یا مدول‌های پیچیده در قسمت‌های بالایی و پایینی و پراش اشعه ایکس استفاده شد. یافته‌های این تحقیق نشان داد، نانو رس تأثیر ناچیزی بر کارایی، شیار شدگی و خواص خستگی داشتند. درحالی‌که، نانو رس لایه‌ای پس از برهمکنش با بخش‌های قیر موجب بهبود پایداری ذخیره‌سازی قیر لاستیکی می‌شود. سال ۲۰۱۹ موسوی نژاد و همکاران (Mousavinezhad, Shafabakhsh, & Jafari Ani,

2019) به بررسی تأثیر نانو رس و استایرن- بوتادین-استایرن بر عملکرد شیارشدگی قیرها و مخلوط‌های آسفالتی حاوی سنگ‌دانه‌های سرباره فولادی پرداختند. آزمایش‌های مختلفی ازجمله درجه نفوذ، نقطه نرمی، شکل‌پذیری و رئومتر برشی دینامیکی برای بررسی خصوصیات قیرها و مخلوط‌های آسفالتی استفاده شد. نتایج این مطالعه نشان از بهبود چقرمگی و ویسکوزیته به‌طور متوسط به میزان ۲۵٪ و ۱۰۱٪ پس از افزودن نانو پلیمر بود که ویژگی‌های رئولوژیکی قیر را افزایش داد و درجه نفوذ را کاهش داد. همچنین، مقاومت شیارشدگی آسفالت و عمق شیارشدگی نیز از بهبود وضعیت آسفالت تحت تأثیر استفاده از مواد افزودنی نشان داد.

سال ۲۰۲۰ قانون و همکاران (Ghanoon, Tanzadeh, & Mirsepahi, 2020) به بررسی تأثیر ترکیب اصلاح‌کننده‌های نانو رس، نانو آهک و SBS بر مقاومت شیارشدگی قیرها پرداختند. در این مطالعه، قیر PG64-22 با استفاده از ۲، ٤ و ٦ درصد وزنی نانو رس اصلاح شد. نتایج این تحقیق نشان داد که افزایش نانو رس به قیر پایه باعث بهبود خواص رئولوژیکی و مقاومت شیارشدگی می‌شود.

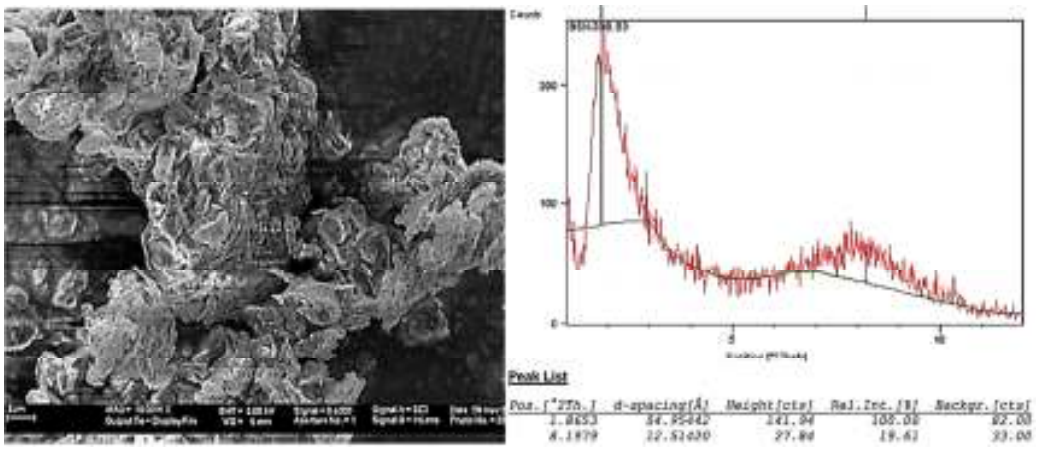
همچنین اثر افزودن ۳ درصد SBS به نمونه قیر موردبررسی قرار گرفت و نتایج حاکی از تأثیر مثبت این افزودنی به‌ویژه در دماهای پایین‌تر بود. در مرحله بعد، قیر با استفاده از ٤ و ٦ درصد وزنی نانو آهک و ۳ درصد SBS با ٤ و ٦ درصد وزنی نانو رس در ترکیب با قیر پایه اصلاح شد و برای ارزیابی اثر ترکیبی این سه ماده مورد آزمایش قرار گرفت. اثر این اصلاح‌کننده در کاهش شکست شیارشدگی در مقایسه با نمونه شاهد ارزیابی شد. نتایج نشان داد که افزایش نانو رس به قیر پایه باعث بهبود خواص رئولوژیکی و مقاومت شیارشدگی شد و بهترین بهبود با ٦ درصد نانو رس حاصل شد. اثر ۳ درصد SBS اگرچه نتایج مشابهی با نانو رس نداشت، اما نتایج حاکی از بهبود قابل‌توجه خواص قیر بود. درنهایت بهترین ترکیب در این تحقیق ترکیبی از ۳ درصد SBS، ٤ درصد نانو رس و ٦ درصد نانو آهک بود که نتایج خوبی به همراه داشت.

ایلماز و همکاران (Yılmaz & Gürbüz, 2021) سال ۲۰۲۱ با بررسی اثر نانو رس به‌عنوان یک افزودنی بر ویژگی‌های عملکرد قیر و خواص ساختاری قیر نشان دادند استفاده از نانو رس موجب افزایش شیارشدگی قیر و مقاومت در برابر پیرشدگی کوتاه‌مدت و کاهش عمر خستگی پس از پیری طولانی‌مدت شد. علاوه بر این، غلظت افزودنی بهینه برای افزایش ویژگی‌های عملکرد قیر بر اساس داده‌های تجربی ۸ درصد بوده است. با توجه به مباحث مطرح‌شده و لزوم اصلاح خصوصیات قیرهای لاستیکی، در این تحقیق تلاش شده است مقاومت شیارشدگی و عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از قیر لاستیکی اصلاح‌شده با نانو رس بهبود یابد. بر همین اساس، از درصدهای مختلف نانو رس برای اصلاح خصوصیات عملکردی قیرهای لاستیکی استفاده‌شده است و رفتار خستگی و شیارشدگی قیرها با استفاده از آزمایش‌های پیشرفته جاروب دامنه خطی (LAS) و خزش و بازگشت در چند سطح تنش (MSCR) بر روی قیرها و خستگی تیر خمشی چهار نقطه و خزش دینامیکی بر روی مخلوط‌های آسفالتی ارزیابی خواهد شد.

۲-روش تحقیق و مصالح آزمایشگاهی

۲-۱- قیر و مواد افزودنی

در این پژوهش از قیر ۷۰-٦۰ شرکت نفت جی با رده عملکردی PG64-22 استفاده‌شده است. پودر لاستیک مصرفی از شرکت پرشیا مک در استان اصفهان تهیه‌شده است که پس از الک کردن در اندازه مش شماره ٤۰ و در درصدهای ۸ و ١٤ استفاده‌شده است. همچنین، نانو رس مورداستفاده از نانو ذرات خاک مونتموریلونیت و از شرکت نانو سانی در شهر مشهد با درصدهای ۲، ۳، ٤ و ٦ استفاده‌شده است. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز X-ray مربوط به نانو رس در شکل ۱ نشان داده شده است. برای تهیه قیر لاستیکی اصلاح‌شده با نانو رس، ابتدا قیر خالص تا حدود ۱۰±۱۵۰ درجه سانتی‌گراد گرم و سپس پودر لاستیک در مدت ۱۵ دقیقه اضافه شد و به کمک دستگاه همزن مکانیکی با دور کم مخلوط شد. سپس عمل اختلاط در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد، زمان ٦۰ دقیقه و سرعت همزن٤۰۰۰ دور بر دقیقه و با استفاده از همزن برش بالا آزمایشگاه نفت جی اصفهان انجام شد. درنهایت، نانو رس به قیر اصلاح‌شده لاستیکی اضافه شد و به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و با سرعت ٤۰۰۰ دور بر دقیقه اختلاط صورت گرفت.



شکل ۱. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز X-ray مربوط به نانو رس

۲-۲- طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی

برای تعیین طرح اختلاط بر اساس استاندارد مارشال، ابتدا مصالح سنگی با دانه‌بندی شماره ٤ نشریه ۲۳٤ روسازی‌های ایران، به مدت ۱۲ ساعت در گرمخانه در دمای ۱٦٥ درجه سانتی‌گراد گرم شدند. سپس قیر گرم شده مخلوط شدند و تراکم مخلوط توسط چکش مارشال با ۷٥ ضربه برای هر دو طرف انجام شد. سپس، مقدار قیر بهینه برای طرح اختلاط، بر اساس میانگین سه مقدار قیر متناظر با بیشترین استحکام مارشال، مقدار قیر متناظر با بیشترین وزن مخصوص و مقدار قیر متناظر با درصد فضای خالی ٤ درصد برابر ٥/٦ درصد تعیین شد. با توجه به ویسکوزیته بالای قیرهای لاستیکی، دمای تولید و ساخت نمونه‌های آسفالتی اصلاح‌شده و شاهد متفاوت منظور شد. بر همین اساس، دمای ساخت و تراکم برای مخلوط‌های آسفالتی شاهد اصلاح‌نشده به ترتیب ۱٦۰ الی ۱٦٥ و ۱۳٥ الی ۱٤۰ درجه سانتی‌گراد و دمای تولید و تراکم برای مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با قیر لاستیکی به ترتیب ۱۸۰ الی ۱۸٥ و ۱٦۰ الی ۱٦٥ درجه سانتی‌گراد انتخاب گردید.

۲-۳- برنامه آزمایشگاهی

خزش و بازگشت در چند سطح تنش (MSCR)

آزمایش MSCR برای تعیین حساسیت شیارشدگی قیرهای آسفالتی و بر اساس درصد بازگشت و درصد کرنش پایدار خزشی انجام می‌شود. این آزمایش توسط دستگاه رئومتر برش دینامیکی یا DSR و در دمای عملکردی بالای قیر بر روی نمونه‌های با پیرشدگی کوتاه‌مدت RTFO مطابق استاندارد AASHTO T240 انجام می‌شود. در این آزمایش، نمونه‌ها تحت ۱ ثانیه بارگذاری و ۹ ثانیه زمان استراحت و درمجموع ۱۰ سیکل بارگذاری و باربرداری در هر سطح تنش ۰٫۱ و ۳٫۲ کیلو پاسکال قرار گرفتند. در این مطالعه آزمایش MSCR در بازه دمایی ٦٤ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد انجام‌شده است.

۲-٤-جاروب دامنه خطی (LAS)

هدف از انجام آزمایش LAS تعیین مقاومت قیرها در برابر خرابی خستگی به‌وسیله بارهای سیکلی سیستماتیک و دامنه‌های بارگذاری افزایشی خطی می‌باشد. آزمایش LAS در دمای متوسط و طبق استاندارد AASHTO TP101 بر روی قیرهای پیر شده بلندمدت انجام می‌شود. اعمال بارهای سیکلی در این آزمایش در دو مرحله انجام می‌شود: (۱) مرحله اول با دامنه بارگذاری ثابت ۰٫۱ درصد کرنش و فرکانس متغیر از ۰٫۲ تا ۳۰ هرتز می‌باشد. (۲) در مرحله دوم آزمایش LAS تحت فرکانس ثابت ۱۰ هرتز و دامنه‌های بارگذاری افزایشی از ۰ تا ۳۰٪ کرنش قرار می‌گیرد. در این تحقیق آزمایش LAS در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و بر روی قیرهای پیر شده PAV انجام‌شده است.

۲-٥- خزش دینامیکی

خزش دینامیکی یکی از آزمایش‌های رایج برای مشخص کردن مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر تغییر شکل‌های است. اعمال بارگذاری تکراری با استفاده از آزمایش بار تکرارشونده و ثبت تغییر مکان‌های دائمی تجمعی به‌عنوان تابعی از تعداد سیکل بارگذاری، یکی از رایج‌ترین روش‌های

اندازه‌گیری تغییر شکل‌های دائمی مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد. در این مطالعه، آزمایش خزش دینامیکی بر روی مخلوط‌های آسفالتی با استاندارد Australian: AS 2891.12.1 و با شرایط بارگذاری نیمه سینوسی ۵۰۰ میلی‌ثانیه بارگذاری و ۱۵۰۰ میلی‌ثانیه استراحت با سطح تنش ٤۵۰ کیلو پاسکال و در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام‌شده است.

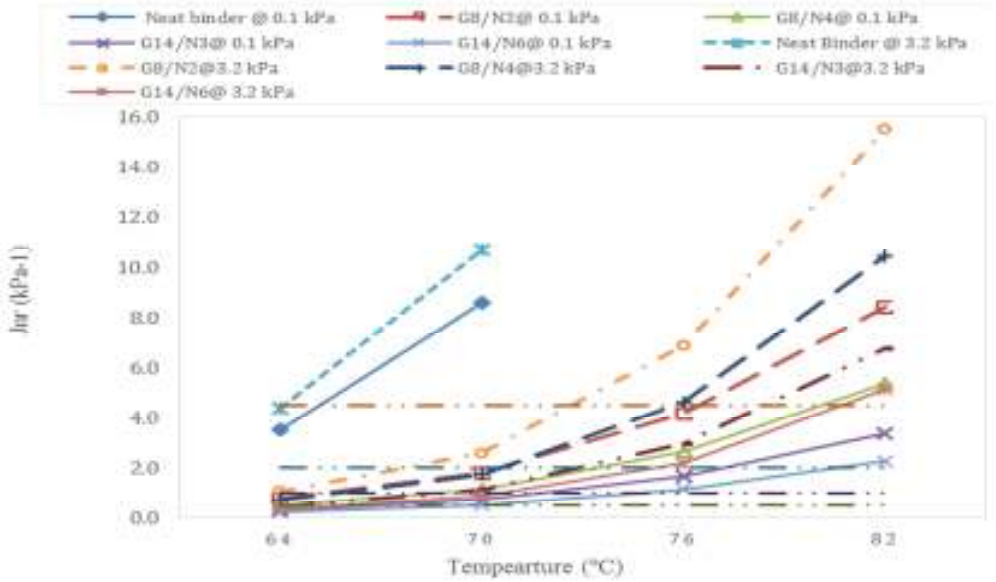
۳-٤- خستگی تیر خمشی چهار نقطه

آزمایش تیر خمشی چهار نقطه برای تعیین خصوصیات خستگی مخلوط‌های آسفالتی در دمای متوسط روسازی تحت تأثیر بارگذاری نیمه سینوسی و مطابق با استاندارد AASHTO T321-07 انجام می‌شود. این آزمایش یکی از روش‌های باقابلیت اطمینان بالا برای پیش‌بینی عمر مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد که با به‌کارگیری یک تیر آسفالتی که تحت سیستم بارگذاری شبه سینوسی یا سینوسی انجام می‌شود. روش تحلیل معیار شکست خستگی نتایج تیرهای خمشی بر اساس تعداد سیکل معادل با ۵۰ درصد سختی اولیه مخلوط انتخاب‌شده است. همچنین، فرکانس۱۰ هرتز، سطوح کرنش ٦۰۰ میکرو استرین و دمای ۲۰ درجه برای هر مخلوط به‌عنوان شرایط انجام آزمایش تیر خمشی چهار نقطه انتخاب‌شده است. در این مطالعه، آزمایش خستگی چهار نقطه بر روی مخلوط‌های آسفالتی پیر نشده و پیر شده مطابق با استاندارد AASHTO R30 انجام‌شده است.

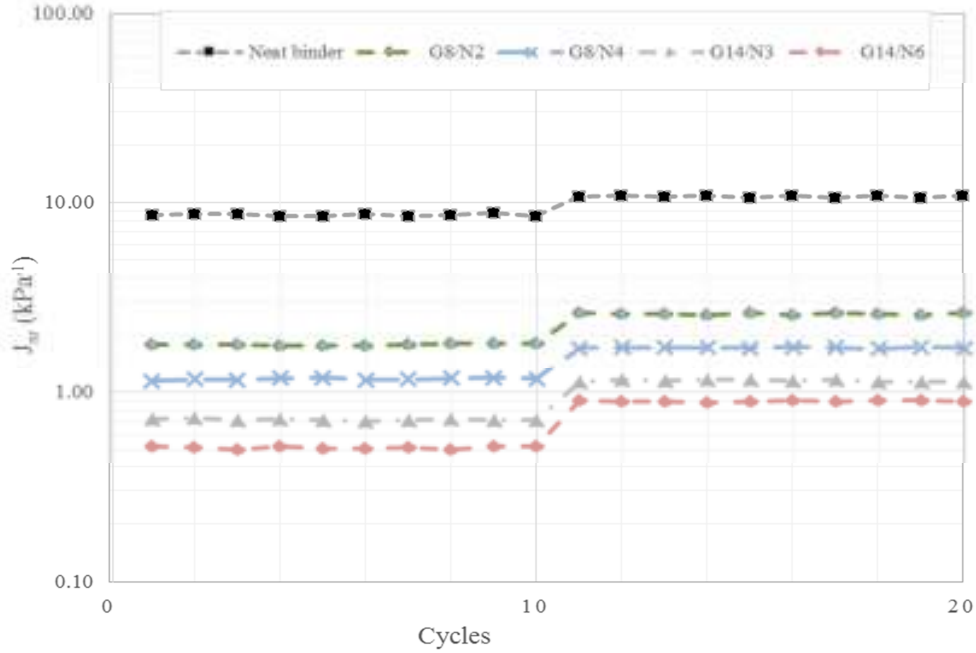
۳-ارایه و تفسیر نتایج

۳-۱- نتایج آزمایش خزش و بازگشت در چند سطح تنش (MSCR)

بررسی نتایج شیارشدگی قیرهای لاستیکی در شکل ۲ نشان می‌دهد اصلاح خواص آن‌ها با نانو رس موجب کاهش تغییر شکل‌های پلاستیک و افزایش مقاومت شیارشدگی قیرها می‌باشد. همچنین، مقایسه شیارشدگی قیرهای اصلاح‌شده نشان می‌دهد با افزایش دما به ۷٦ درجه سانتی‌گراد و سطح تنش ۳/۲ کیلو پاسکال قیر G14/N6 حاوی ۱٤ درصد پودر لاستیک و ٦ درصد نانو رس ازنظر مقاومت شیارشدگی و تغییر شکل‌های دائمی به نسبت قیرهای دیگر عملکرد بهتری نشان می‌دهد. بر اساس نتایج موجود می‌توان این‌طور نتیجه گرفت، علاوه بر این‌که افزودن پودر لاستیک به قیر با جذب مواد روغنی و سبک قیر و افزایش درصد آسفالتن، موجب افزایش ویسکوزیته و مقاومت شیارشدگی می‌شود، اصلاح خواص آن با نانو مواد نیز به دلیل ساختار صفحه‌ای و سطح ویژه بالا موجب تقویت و استحکام قیر لاستیکی شده است. از طرفی افزودن نانو رس با افزایش پراکندگی ذرات پودر لاستیک در قیرهای لاستیکی باعث بهبود عملکرد رئولوژیکی قیر و درنهایت موجب بهبود خصوصیات خزشی و شیارشدگی آن می‌شود. بررسی سطوح تنش ۰/۱ و ۳/۲ در شکل ۳ نشان می‌دهد که افزایش تنش تأثیر قابل‌توجهی بر رفتار قیرها ازنظر سختی و برگشت‌پذیری داشته است.



شکل ۲. بررسی تأثیر نانو رس بر شاخص شیارشدگی قیرهای لاستیکی در سطوح تنش ۰،۱ و ۳،۲ کیلو پاسکال



شکل ۳. بررسی تأثیر افزایش سطح تنش بر مقاومت شیارشدگی قیرهای اصلاح‌شده

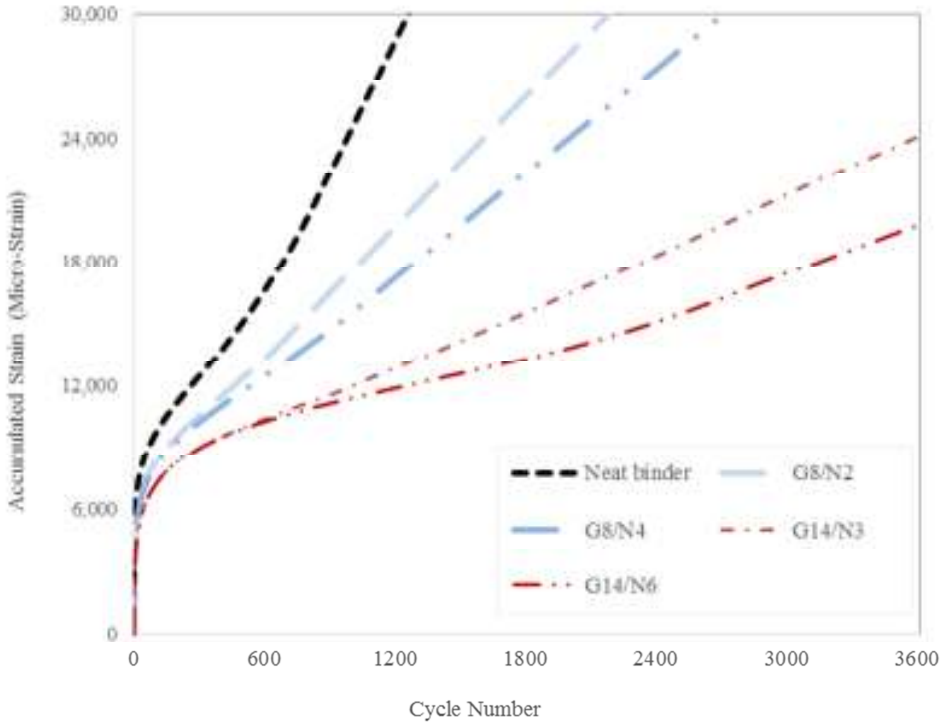
به‌طوری‌که در سطح تنش ۳/۲ مقادیر کرنش‌ها به‌طور قابل‌توجهی افزایش و مقادیر بازگشت‌پذیری قیرها کاهش‌یافته و رفتار قیر از حالت الاستیک به حالت پلاستیک تغییر شکل می‌دهد. مقایسه کرنش قیرها در ۱۰ ثانیه اول و ۱۰ ثانیه آخر (سیکل‌های اول و آخر بارگذاری-باربرداری) نشان می‌دهد که با افزایش سطح تنش از ۰٫۱ به ۳/۲ کیلو پاسکال تأثیر مثبت افزودنی‌های بر عملکرد شیارشدگی به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد.نتایج برگشت‌پذیری برای سطوح تنش ۰/۱ و ۳/۲ کیلو پاسکال در شکل ٤ نشان می‌دهد در سطوح پایین تنش تغییر شکل در قیر به‌صورت الاستیک می‌باشد ولی با افزایش تنش مقادیر برگشت‌پذیری به شکل قابل‌توجهی کاهش می‌یابد و قیر دچار تغییر شکل پلاستیک می‌شود. به‌طورکلی، اصلاح قیر لاستیکی با نانو رس بهبود قابل‌توجهی بر رفتار برگشت‌پذیری قیر ایجاد کرده است. این در حالی است که باوجود تأثیر مثبت نانو رس در اصلاح خصوصیات شیارشدگی قیرهای لاستیکی، ولی افزایش مقدار آن از ۳ به ٦ تأثیر بسزایی بر شاخص شیارشدگی، خصوصیات ویسکوالاستیک غیرخطی و خاصیت الاستیک قیرها نداشته است. در حالی است که این تأثیر برای مقادیر ۳ و ٤ درصد نانو رس کاملاً مشهود است. به‌عبارت‌دیگر با افزایش سطح تنش و تشدید احتمال خرابی، اصلاح قیرهای لاستیکی با نانو رس به‌طور قابل‌توجهی مقاومت شیارشدگی روسازی را بهبود می‌بخشند.

٤-۲- نتایج آزمایش خزش دینامیکی

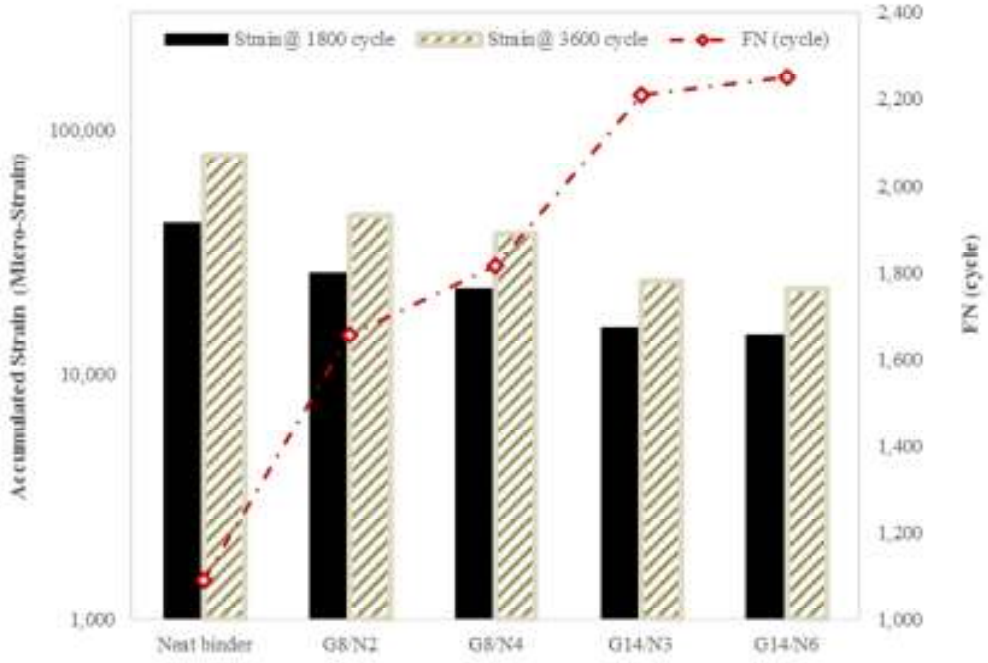
نتایج نمودار کرنش تجمعی در شکل ۵ نشان می‌دهد استفاده از قیرهای لاستیکی اصلاح‌شده با نانو رس به‌طور قابل‌توجهی تغییر شکل دائمی آسفالت را کاهش و مقاومت شیارشدگی را بهبود پیدا می‌بخشد. همچنین بررسی تأثیر مقدار نانو رس بر مقدار شیارشدگی نشان می‌دهد که افزایش درصد آن تأثیر مستقیمی با افزایش مقاومت آسفالت در برابر خرابی شیارشدگی دارد. به‌طوری‌که نرخ کرنش بین سیکل‌های ۱۸۰۰ و ۳٦۰۰ در مخلوط شاهد حدود ۹۰ درصد می‌باشد. این در حالی است که برای مخلوط‌های حاوی قیرهای G8/N2، G8/N4، G14/N3 و G14/N6 این شاخص به ترتیب برابر ۷۱، ٦۷، ۵۵ و ٤۹ می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود کمترین تغییر شکل و نرخ کرنش مربوط به مخلوط حاوی قیر لاستیکی با ٦ درصد نانو رس است. درحالی‌که بر اساس نتایج، افزایش درصد نانو رس از ٤ به ٦ درصد تنها ٦ درصد نرخ کرنش را کاهش داده و با وجود روند مثبت، ولی مقدار این تأثیر ناچیز می‌باشد. مقایسه کرنش‌های انتهایی سیکل‌های ۱۸۰۰ و ۳٦۰۰ و عدد روانی مخلوط‌های آسفالتی تحت تأثیر استفاده از قیر لاستیکی اصلاح‌شده با نانو رس در شکل ٦ نشان می‌دهد که افزایش درصد پودر لاستیک به ۸ و ۱٦ درصد به‌مراتب تأثیر بیشتری نسبت به افزایش درصد نانو رس داشته است. دلیل عملکرد بهتر پودر لاستیک نسبت به نانو رس بر عملکرد شیارشدگی می‌تواند ناشی از تشکیل شبکه پلیمری و

سنتزی لاستیک و موقعیت فضایی اتم‌های احاطه‌شده اطراف زنجیره C-CL و C-H در ساختار پودر لاستیک باشد. به‌طوری‌که افزودن پودر لاستیک به قیر علاوه بر افزایش آسفالتن و سختی، موجب تشکیل زنجیره پلیمری و افزایش شدت پیوند C=C کششی در قیر می‌شود (Savrık, Balköse, Ulutan, & Ülkü, 2010). درحالی‌که پخش صفحات نانو رس و نفوذ آن‌ها در فضای مولکول‌های سنگین قیر و لاستیک موجب افزایش مقاومت برشی و چسبندگی و مسلح کردن قیر می‌شود. به‌طوری‌که در هنگام اعمال تنش‌های فشاری سیکلی در هر پالس، بخش از انرژی توسط تغییر شکل‌های ارتجاعی و بخش دیگر از طریق تغییر شکل‌های غیر ارتجاعی و ماندگار برشی، پخش و استهلاک می‌شوند. مقایسه نمونه‌ها نشان می‌دهد به ترتیب مخلوط‌های حاوی قیر G14/N6، G14/N3، G8/N4 و G8/N2 با افزایش ۱۰٦، ۱۰۲، ٦٦ و ٥۱ درصد عدد روانی دارای بهترین مقاومت شیارشدگی می‌باشد. بررسی تأثیر افزایش نانو رس نشان می‌دهد که افزایش ۲ به ٤ درصد آن در قیر حاوی ۸ درصد لاستیک موجب افزایش ۱٤/٥ درصد عدد روانی شده است. درحالی‌که افزایش ۳ به ٦ درصد نانو ماده در قیر حاوی ۱٤ لاستیک تنها ٤ درصد عدد روانی را افزایش داده است.

شکل ٤. بررسی تأثیر نانو رس بر خاصیت برگشت‌پذیری قیرهای لاستیکی در سطوح تنش
الف) ۰/۱ کیلو پاسکال . ب) ۳/۲ کیلو پاسکال



شکل ۵. نمودار کرنش تجمعی آزمایش خزش دینامیکی برای مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده



شکل ٦. کرنش‌های انتهایی سیکل‌های ۱۸۰۰ و ۳٦۰۰ و عدد روانی مخلوط‌های آسفالتی تحت تأثیر استفاده از قیر لاستیکی اصلاح‌شده با نانو رس

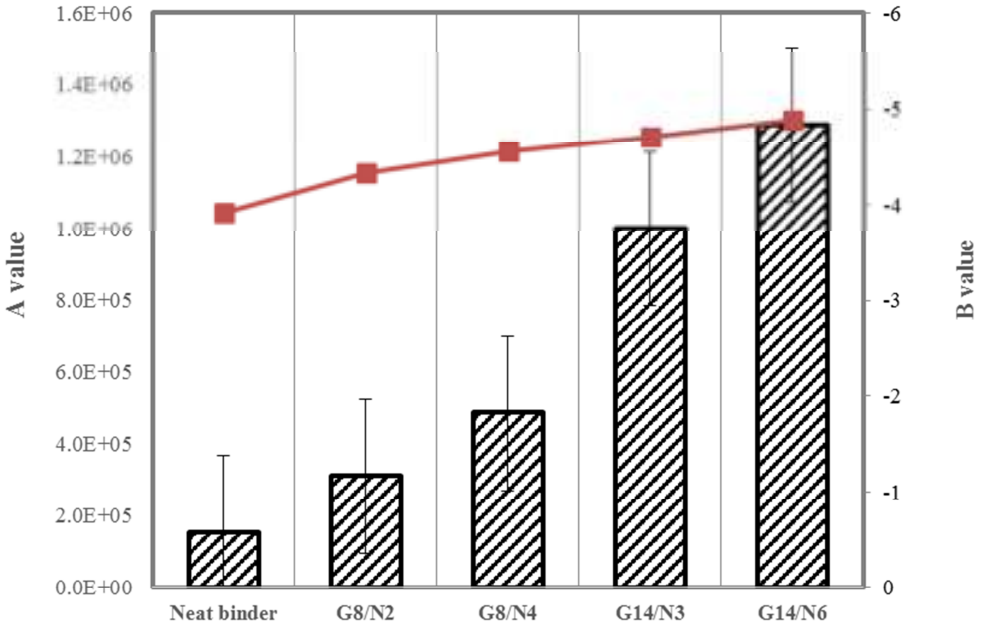
٤-۳- نتایج آزمایش جاروب دامنه خطی (LAS)

به‌منظور بررسی رفتار خستگی قیرهای خالص و لاستیکی تحت تأثیر نانو رس از آزمایش LAS در شکل ۷ استفاده‌شده است. بررسی تأثیر افزودنی‌ها در سطح کرنش ۱ درصد نشان می‌دهد اصلاح قیر لاستیکی با نانو رس به‌طور قابل‌توجهی عمر خستگی را بهبود می‌دهد و نمونه G14/N6 با افزایش ۷٤۳ درصد خستگی نسبت به قیر اصلاح‌نشده، بهترین عملکرد خستگی را در سطح کرنش ۱ درصد دارد. درحالی‌که بررسی هرکدام از افزودنی‌ها نشان می‌دهد تأثیر افزایش درصد پودر لاستیک از افزایش درصد نانو رس بیشتر می‌باشد. بررسی تأثیر افزودنی‌ها بر خصوصیات خستگی قیر در سطح کرنش ۲/۵ نشان می‌دهد، باوجود تأثیر مثبت پودر لاستیک ولی مقدار بهبود خستگی کاهش‌یافته است. درحالی‌که تأثیر نانو رس بر افزایش مقاومت خستگی همچنان مثبت بوده است و روندی مشابه با سطح کرنش ۱ درصد دارد. ارزیابی تأثیر افزودنی‌ها بر مقاومت خستگی در سطوح کرنش بیشتر از ۵ درصد نشان می‌دهد تأثیر مثبت پودر لاستیک بر عملکرد خستگی به‌شدت کاهش‌یافته است. درحالی‌که نانو رس همچنان با تأثیر مثبت بر عمر خستگی، دارای روندی افزایش مشابه با سطوح کرنش پایین می‌باشد. با بررسی تأثیرپذیری رفتار خستگی قیرهای اصلاح‌شده از سطوح کرنش در شکل ۸ به نظر می‌رسد ناشی از رفتار دوگانه شبکه پلیمری ناشی از پودر لاستیک و تأثیرپذیری بالای این شبکه از سطوح کرنش باشد. به‌طوری‌که وجود شبکه قدرتمند و سه‌بعدی پلیمری در قیرهای لاستیکی در سطوح کرنش پایین موجب افزایش عمر خستگی قیرها می‌شود. درحالی‌که با افزایش سطح کرنش، شبکه پلیمری موجود در قیرها دچار لغزش و درنهایت گسیختگی می‌شود. از طرفی، افزودن پودر لاستیک با جذب فاز روغنی و مواد سبک قیر، موجب افزایش درصد آسفالتین قیر و سختی قیر می‌شود. از طرفی مقایسه افزایش درصد نانو رس از ۳ به ٦ درصد در قیر حاوی ١٤ پودر لاستیک به‌غیراز کرنش ۱ درصد، در سایر سطوح کرنش تأثیر منفی داشته است و موجب کاهش عمر خستگی شده است. با توجه به نتایج، در سطوح کرنش زیر ۵ درصد قیر لاستیکی حاوی ١٤ درصد پودر لاستیک و ۳ درصد نانو رس به دلیل تشکیل نانو کامپوزیت و افزایش فاصله بین لایه‌های ناشی از تعامل مولکولی در هنگام اختلاط نانو رس با قیر، بهترین عملکرد خستگی را داشته است. درحالی‌که با افزایش سطح کرنش، تأثیر پودر لاستیک و نانو رس به دلیل گسیخته شدن شبکه پلیمری کاهش‌یافته است. این اتفاق با نتایج انیش و همکاران (Ashish et al., 2017) در تأثیرپذیری عمر خستگی قیرهای حاوی نانو رس از سطح کرنش همخوانی دارد.

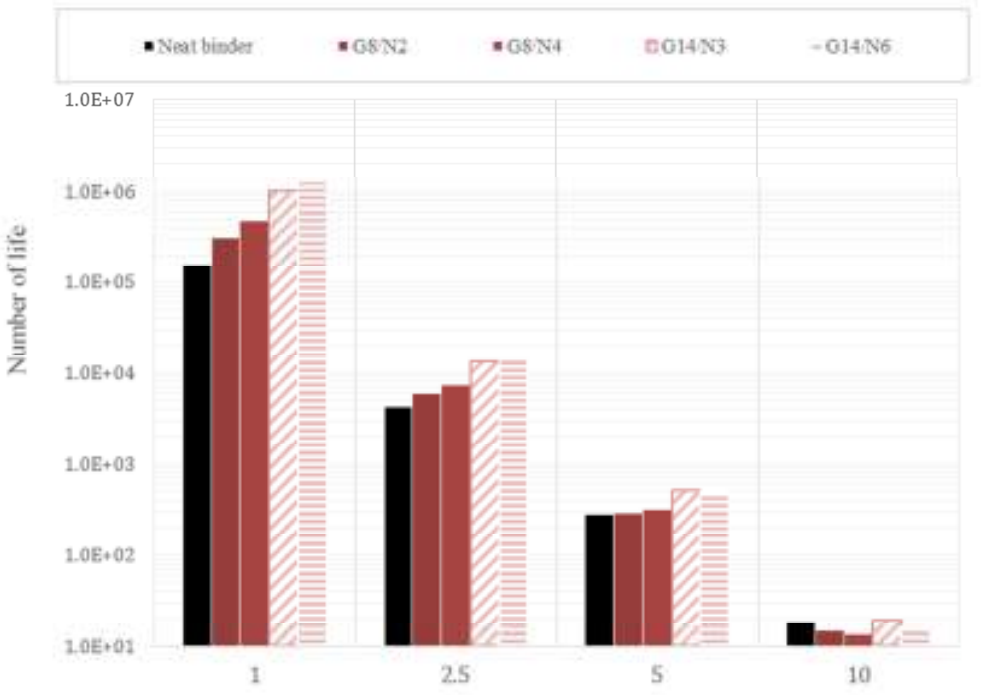
٤-٤- نتایج آزمایش تیر خمشی چهار نقطه

شکل ۹ تأثیر پیرشدگی و افزودنی‌های موردبررسی را بر سختی اولیه و عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، به‌طورکلی پیرشدگی در همه نمونه‌ها موجب افزایش سختی اولیه مخلوط آسفالتی می‌شود. این موضوع ناشی از تبدیل فاز روغنی قیر به آسفالتن و افزایش سختی ناشی از اکسیداسیون می‌باشد. همچنین، استفاده از قیرهای اصلاح‌شده با افزایش ویسکوزیته قیر و سختی بخش ماستیک مخلوط، موجب افزایش سختی اولیه نمونه‌های آسفالتی شده است. بررسی تأثیر قیرهای اصلاح‌شده بر عمر خستگی آسفالت نشان می‌دهد در مخلوط‌های حاوی قیر لاستیکی ۸ درصد، افزایش نانو رس از ۲ به ٤ درصد موجب افزایش ٢٤ درصد عمر خستگی شده است. درحالی‌که افزایش نانو رس از ٤ به ٦ در قیر حاوی ١٤ پودر لاستیک، نه‌تنها تأثیر مثبت نداشته است بلکه موجب کاهش عمر خستگی و تضعیف عملکرد آسفالت شده است. به‌طوری‌که برحسب نتایج به‌دست‌آمده نمونه G14/N3 حاوی ١٤ درصد پودر لاستیک و ۳ درصد نانو رس با افزایش ۱۹۵ درصد خستگی نمونه‌های پیر نشده نسبت به نمونه شاهد، بیشترین طول عمر را داشته است.

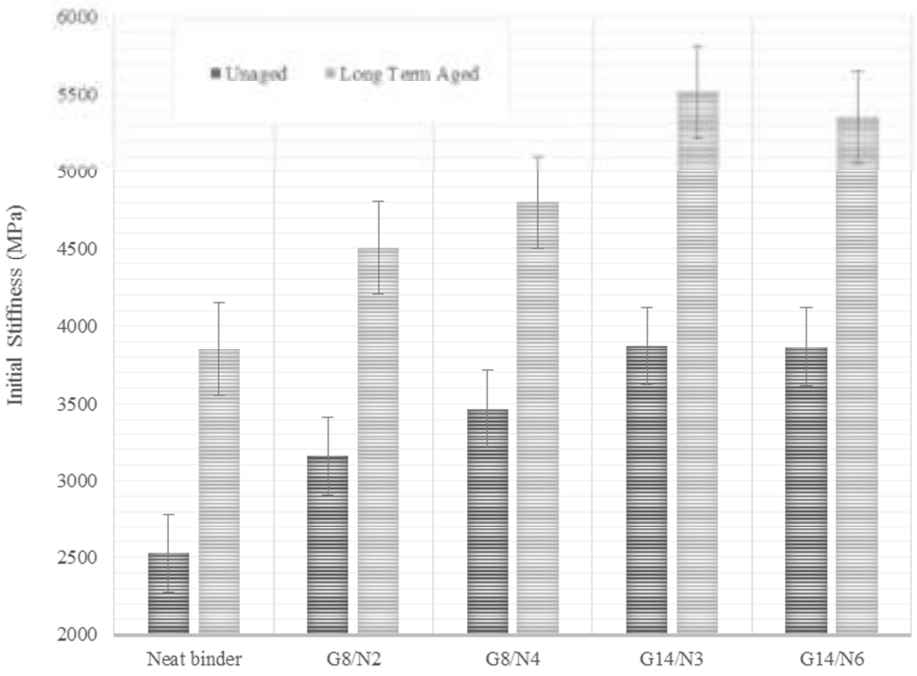
همچنین، بررسی تأثیر پیرشدگی بر عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی در شکل ۱۰ نشان می‌دهد که پیرشدگی با تأثیر منفی بر رفتار آسفالت، موجب کاهش قابل‌توجه عمر خستگی می‌شود. این در حالی است که مقایسه رفتار قیرهای اصلاح‌شده و خالص تحت تأثیر پیرشدگی متفاوت است.



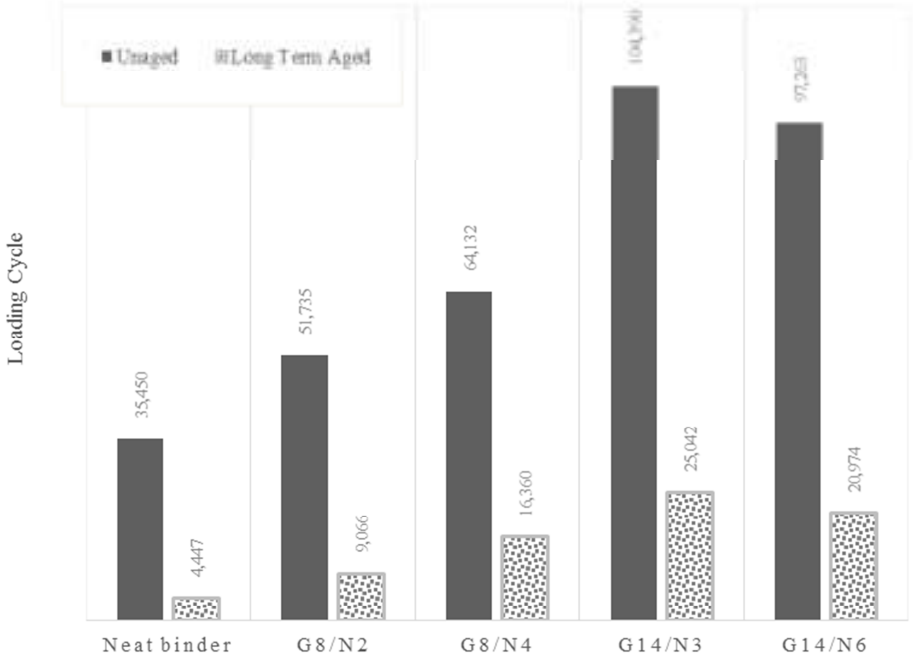
شکل ۷. مقادیر پارامترهای ویسکوالاستیک به دست آمده از آزمایش LAS



شکل ۸. مقایسه عمر خستگی قیرهای اصلاح‌شده تحت تأثیر سطوح کرنش مختلف



شکل ۹. مقایسه سختی اولیه مخلوط‌های آسفالتی تحت تأثیر پیرشدگی



شکل ۱۰. مقایسه عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده تحت تأثیر سطوح پیرشدگی

به‌طوری‌که پیرشدگی در مخلوط‌های آسفالتی خالص در حدود ۸۸ درصد عمر خستگی را کاهش داده است. این در حالی است که پیرشدگی در مخلوط‌های حاوی قیرهای G8/N4، G14/N6 و G14/N3 با بهترین عملکرد به ترتیب عمر خستگی را ٦٦، ۷٦ و ۷۸ درصد کاهش داده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود باوجود تأثیر منفی پیرشدگی بر رفتار خستگی، نانو رس با تأثیرگذاری مثبت روند کاهش را کند کرده است و موجب بهبود مقاومت پیرشدگی آسفالت شده است. درواقع علاوه بر این نانو رس موجب افزایش عمر خستگی آسفالت می‌شود، با کاهش حساسیت نسبت به پیرشدگی، عملکرد مخلوط‌های آسفالتی پیر شده را در برابر خستگی بهبود می‌بخشد.

۵-نتیجه‌گیری

هدف از این مطالعه ارزیابی درصدهای مختلف نانو رس برای اصلاح خصوصیات عملکردی قیرهای لاستیکی می‌باشد. بر همین اساس، برای بررسی رفتار خستگی و شیارشدگی قیرها و مخلوط‌های آسفالتی از آزمایش‌های پیشرفته LAS، MSCR تیر خمشی چهار نقطه و خزش دینامیکی استفاده شد. نتایج حاصل از این مطالعه به‌صورت زیر می‌باشد:

-نتایج آزمایش MSCR نشان داد نانو رس با افزایش پراکندگی ذرات پودر لاستیک در قیرهای لاستیکی باعث بهبود عملکرد خصوصیات رئولوژیکی قیر و بهبود مقاومت شیارشدگی می‌شود. همچنین، تأثیر قیرهای لاستیکی اصلاح‌شده با نانو رس در سطوح تنش بالا و در معرض آسیب‌های شدید، بسیار بیشتر می‌باشد.

-نتایج آزمایش خرش دینامیکی نشان داد، باوجود تأثیر مثبت نانو رس در اصلاح خصوصیات شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی، ولی افزایش درصد آن از ٤ به ٦ درصد تأثیر قابل‌توجهی نداشته است و تنها ٤ درصد عدد روانی را بهبود بخشیده است.

-نتایج آزمایش LAS نشان داد، اصلاح قیر لاستیکی با نانو رس به‌طور قابل‌توجهی عمر خستگی را بهبود می‌دهد و نمونه حاوی ١٤ درصد پودر لاستیک و ٤ درصد نانو رس با افزایش ۷٤۳ درصد خستگی نسبت به قیر اصلاح‌نشده، بهترین عملکرد خستگی را در سطح کرنش ۱ درصد دارد.

-نتایج آزمایش تیر خمشی چهار نقطه نشان داد، افزایش درصد نانو رس در قیرهای لاستیکی تا ٤ درصد موجب اصلاح رفتار خستگی مخلوط آسفالتی می‌شود، درحالی‌که افزایش نانو رس به ٦ درصد، نه‌تنها تأثیر مثبت نداشته است بلکه موجب کاهش عمر خستگی و تضعیف عملکرد آسفالت می‌شود.

-آزمایش تیر خمشی چهار نقطه نشان داد مخلوط حاوی قیر اصلاح‌شده با ١٤ درصد پودر لاستیک و ۳ در نانو رس با افزایش ۱۹۵ درصد خستگی نمونه‌های پیر نشده نسبت به نمونه شاهد، بیشترین طول عمر را داشته است.

-باوجود تأثیر منفی پیرشدگی بر طول عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی، ولی استفاده از نانو رس در قیرهای لاستیکی موجب بهبود مقاومت پیرشدگی و درنتیجه کاهش تأثیر منفی پیرشدگی بر رفتار خستگی شده است.

٦- مراجع

-Airey, G., (2004), "Styrene butadiene styrene polymer modification of road bitumens", Journal of Materials Science, 39(3), pp.951-959 .

-Ameri, M., Mirzaiyan, D., & Amini, A., (2018), "Rutting Resistance and Fatigue Behavior of Gilsonite-Modified Asphalt Binders", Journal of Materials in Civil Engineering, 30(11), 04018292 .

-Amini, A., Ziari, H., & Goli, A., (2018), "Investigating the performance of rubberised binders used in Iran based on multiple stress creep recovery and performance grading systems", Road materials and pavement design, 19(4), pp.803-818 .

-Ashish, P. K., Singh, D., & Bohm, S., (2017), "Investigation on influence of nanoclay addition on rheological performance of asphalt binder", Road materials and pavement design, 18(5), pp.1007-1026 .

-Ghanoon, S. A., Tanzadeh, J., & Mirsepahi, M. (2020), "Laboratory evaluation of the

-Viscione, N., Presti, D. L., Veropalumbo, R., Oreto, C., Biancardo, S. A., & Russo, F., (2021), "Performance-based characterization of recycled polymer modified asphalt mixture", Construction and Building Materials, 310, 125243.
-Yılmaz, B., & Gürbüz, H. E., (2021), "Rheological and morphological evaluation of nanoclay modified asphalt binder", Construction and Building Materials, 313, 125479 .
-Yu, J., Ren, Z., Yu, H., Wang, D., Svetlana, S., Korolev, E. Guo, F., (2018), "Modification of asphalt rubber with nanoclay towards enhanced storage stability", Materials, 11(11), 2093.
-Yu, J., Yu, X., Gao, Z., Guo, F., Wang, D., & Yu, H., (2018), "Fatigue resistance characterization of warm asphalt rubber by multiple approaches", Applied Sciences, 8(9), 1495 .
-Ziari, H., Amini, A., & Goli, A., (2020), "Investigation of blending conditions effect on GTR dissolution and rheological properties of rubberized binders", Construction and Building Materials, 242, 117828 .
-Ziari, H., Amini, A., Goli, A., & Mirzaiyan, D. (2018), "Predicting rutting performance of carbon nano tube (CNT) asphalt binders using regression models and neural networks", Construction and Building Materials, 160, pp.415-426 .
-Ziari, H., Goli, A., & Amini, A., (2016a), "Effect of crumb rubber modifier on the performance properties of rubberized binders", Journal of Materials in Civil Engineering, 28(12), 04016156 .
-Ziari, H., Goli, A., & Amini, A., (2016b), "Effect of Crumb Rubber Modifier on the Performance Properties of Rubberized Binders", Journal of Materials in Civil Engineering, 04016156 .
-Ziari, H., Nasiri, E., Amini, A., & Ferdosian, O., (2019), "The effect of EAF dust and waste PVC on moisture sensitivity, rutting resistance, and fatigue performance of asphalt binders and mixtures", Construction and Building Materials, 203, pp.188-200 .
composition of nano-clay, nano-lime and SBS modifiers on rutting resistance of asphalt binder", Construction and Building Materials, 238, 117592.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117592.
-Goli, A., Ziari, H., & Amini, A., (2017), "Influence of carbon nanotubes on performance properties and storage stability of SBS modified asphalt binders", Journal of Materials in Civil Engineering, 29(8), 04017070 .
-Han, L., Zheng, M., Li, J., Li, Y., Zhu, Y., & Ma, Q., (2017), "Effect of nano silica and pretreated rubber on the properties of terminal blend crumb rubber modified asphalt, Construction and Building Materials, 157, pp.277-291.
-Mousavinezhad, S. H., Shafabakhsh, G. H., & Jafari Ani, O., (2019), "Nano-clay and styrene-butadiene-styrene modified bitumen for improvement of rutting performance in asphalt mixtures containing steel slag aggregates, Construction and Building Materials, 226, pp.793-801.
doi: org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.252.
-Presti, D. L., (2013), "Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixtures: a literature review", Construction and Building Materials, 49, pp.863-881.
-Ren, Z., Zhu, Y., Wu, Q., Zhu, M., Guo, F., Yu, H., & Yu, J., (2020), "Enhanced storage stability of different polymer modified asphalt binders through nano-montmorillonite modification", Nanomaterials, 10(4), pp.641.
-Saboo, N., & Sukhija, M., (2021), "Effect of analysis procedures in linear amplitude sweep test on the fatigue resistance of nanoclay-modified asphalt binders", Journal of Materials in Civil Engineering, 33(1), 04020417 .
-Savrık, S. A., Balköse, D., Ulutan, S., & Ülkü, S., (2010), "Characterization of poly (vinyl chloride) powder produced by emulsion polymerization", Journal of thermal analysis and calorimetry, 101(2), pp.801-806 .
-Tang, J., Zhu, C., Zhang, H., Xu, G., Xiao, F., & Amirkhanian, S., (2019), "Effect of liquid ASAs on the rheological properties of crumb rubber modified asphalt, Construction and Building Materials, 194, pp.238-246 .

Evaluation of the Simultaneous Effect of GTR and Nano-Clay on the Performance Properties of Asphalt Binders and Mixtures

Amir Amini, Postdoctoral Researcher, Department of Civil Engineering,
Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
Mahdi Khezri, M.Sc., Grad., Department of Business Management,
Islamic Azad University of Yazd, Yazd, Iran.
Farzad Dadkhah, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering,
Islamic Azad University of Tiran, Isfahan, Iran.
Ahmad Safari Mohammadi, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering,
Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

E-mail: amini.amir68@gmail.com

Received: September 2022- Accepted: February 2023

ABSTRACT
Despite the significant advantages of rubber powder in the pavement industry, but the significant increase in viscosity and storage stability problems of rubberized binders has led to the implementation limitations of this technology. Accordingly, various methods have been proposed to improve the technical and performance properties of rubberized binders as a complementary additive. The aim of this study was to improve the fatigue and rutting performance of rubberized binders and mixtures using nano-clay. In order to achieve the set goals, rubber binder containing 8% and 14% were modified with 2 to 6% nanoclay values using linear amplitude sweeping (LAS), Multiple Stress Creep Recovery (MSCR), Four points bending beam and dynamic creep tests were investigated. The results of MSCR and dynamic creep showed that the addition of nanoclay up to 4% had a significant effect on increasing the rutting strength and reducing the permanent deformation, but increasing it to 6% reduced its ascending trend. Also, the results of the four-point beam test showed that, due to the positive effect of nanoclay on improving fatigue life and aging resistance, the mixture containing modified binder with 14% rubber powder and 3% nanoclay increased 195% fatigue life compared to the control specimen. In general, the simultaneous study of fatigue and rutting behavior showed that the simultaneous use of 4% nanoclay and 14% rubber powder had the best effect on asphalt performance.

Keywords: Asphalt Mixture, Nano-Modified Rubberized Binder, Fatigue Life, Rutting Resistance, Four-Point Bending Beam