

## مطالعه آزمایشگاهی رفتار خستگی قیر و مخلوط آسفالتی حاوی نانورس به

### روش‌های جاروب- زمان، کرنش و تیر خمشی

محسن عموزاده عمرانی (مسئول مکاتبات)، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد سوادکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، سوادکوه، ایران

**E-mail: m\_amouzadeh@yahoo.com**

رضوان باباگلی، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران

مجید سلیمانپور، گروه مهندسی عمران، واحد آیت الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۱

دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۷

#### چکیده

مقاومت در برابر خستگی یک مخلوط آسفالتی، توانمندی مخلوط در مقابل بارهای خمشی تکراری بدون شکست است. هدف از انجام این تحقیق، بررسی رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی مصالح آهکی، گرانیتی و نانوافزودنی رس می‌باشد. قیر مورد استفاده در این مطالعه، قیر ۶۰/۷۰ است، که نانوافزودنی‌ها به میزان وزنی ۳،۰ و ۶ درصد به قیر اضافه شدند. در این تحقیق، آزمایش جاروب- زمان در کرنش‌های ۲ و ۳/۵ و ۵ درصد با استفاده از آزمایش رتومتر برش دینامیکی انجام شد. آزمایش جاروب- کرنش نیز جهت ارزیابی خصوصیات خطی و غیرخطی قیر انجام شد. بر روی نمونه‌های آسفالتی، آزمایش مدول برجهندگی و کشش غیرمستقیم انجام شد. همچنین تست خستگی خمش چهارنقطه‌ای به منظور بررسی رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی صورت پذیرفت. سطوح کرنش بارگذاری مورد استفاده در این تحقیق شامل ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میکروکرنش می‌باشند. همچنین کلیه تست‌های خستگی در دو دمای متوسط ۱۵ و ۲۵ درجه سانتیگراد صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که با افزودن نانو مواد به قیر، حد ویسکوالاستیک خطی با افزایش مدول برشی کاهش یافت. نتایج بیانگر آن است که افزودن نانورس به قیر و مخلوط آسفالتی سبب افزایش عمر خستگی نمونه‌های آسفالتی در تمامی سطوح کرنش می‌گردد. همچنین، با افزایش دمای آزمایش از ۱۵ به ۲۵ درجه سانتیگراد، عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی افزایش می‌یابد.

واژه های کلیدی: تست خمش چهارنقطه‌ای، خستگی، مخلوط آسفالتی، مصالح سیلیسی، نانورس

## ۱. مقدمه و ادبیات پژوهش

ترکهای خستگی یکی از خرابی‌های اصلی و سازه‌ای در روسازی‌های آسفالتی به شمار می‌روند. کنترل و محدود نمودن این ترکها در طول دوره بهره برداری از روسازی یک چالش اساسی برای متخصصین روسازی است. عوامل بسیاری بر مقاومت خستگی آسفالت تاثیرگذارند. برخی از این عوامل شامل ویژگی‌های رفتاری آسفالت طراحی شده، شرایط آب و هوایی منطقه، شرایط ترافیکی شامل نوع وسایل نقلیه، وزن محورها و سرعت حرکت آنهاست (Planche et al, 2004). در بین عوامل فوق‌الاصلاح و ارتقای ویژگی‌های رفتاری مخلوط آسفالتی به عنوان یکی از عوامل اصلی تاثیر گذار بر عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی همواره مورد توجه محققین بوده است. تلاش اصلی در اکثر تحقیقات انجام شده معطوف به استفاده از افزودنی‌هایی جهت افزایش انعطاف پذیری قیر مورد استفاده و افزایش مقاومت کششی آسفالت بوده است.

در طبقه بندی عملکرد قیر ارائه شده به روش Superpave، ضرب مدول مختلط ( $G^*$ ) در زاویه فاز ( $\delta$ ) به عنوان معیاری برای تعیین مقاومت قیر در برابر شکست خستگی در نظر گرفته شده است. بر اساس این معیار، ضرب این پارامترها باید کمتر از ۵۰۰۰ کیلو پاسکال باشد (Planche et al, 2004). چرخه‌های بارگذاری محدود و نرسیدن به شکست خستگی واقعی، از کاستی‌های اصلی این معیار است که از پیش‌بینی دقیق رفتار خستگی قیر برای سیکل‌های بارگذاری بالاتر جلوگیری می‌کند (Johnson et al, 2010). نتایج تحقیق حاکی از ارتباط ضعیف بین شکست قیر برآورد شده با این معیار و نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های خستگی مخلوط آسفالتی است (Martoon et al, 2008). علاوه بر این، این روش برای بررسی پاسخ خستگی قیرهای اصلاح شده نامناسب گزارش شده است. بر اساس گزارش NCHRP459، ضرایب همبستگی بین پارامتر خستگی قیر Superpave و عمر خستگی مخلوط آسفالتی بین ۸/۵۹ تا ۲۳/۲۳ درصد متغیر بود که از نظر آماری

ناچیز بود (Bahia et al, 2001). به همین دلیل، روش‌های دیگری برای بررسی و تعیین عمر خستگی انواع قیر ارائه شده است. در بین این روش‌ها، روش‌های جاروب زمانی (TS) و جاروب دامنه خطی (LAS) مهم‌ترین تکنیک‌هایی بودند که در مطالعات تحقیقاتی قبلی مورد توجه قرار گرفته‌اند (Johnson et al, 2010). در طی یک تحقیق، رابطه بین رفتارهای خستگی پنج نوع قیر اصلاح شده با پلیمر و مخلوط آسفالتی حاوی قیرهای مشابه به ترتیب با استفاده از آزمون خستگی مخلوط آسفالتی LAS و فشار کشش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج، نشان‌دهنده همبستگی ضعیفی (۱۳،۲۴-۱۹،۵۹٪) بین عمر خستگی قیر و مخلوط آسفالتی (Zhou et al, 2013) بود.

در تحقیق دیگری، تأثیر دما بر رفتار خستگی قیر با استفاده از آزمون TS بررسی شد. همانطور که در دمای ۵ درجه سانتیگراد برای همه قیرها از دست رفتن چسبندگی بین صفحات DSR و قیر به جای خرابی نمونه قیر رخ داد، مشخص شد که خرابی خستگی منسجم در طول آزمایش TS زمانی که مدول برشی بین ۶ تا ۵۰ مگاپاسکال باشد، رخ می‌دهد. در مقادیر کمتر جریان پلاستیک غالب بود؛ درحالی‌که، در مقادیر بین ۶ تا ۱۰ مگاپاسکال خرابی قیر با جریان متوسط مشاهده شد (Safaei et al, 2014). تحقیقات بیشتر برای بررسی مناسب بودن تست TS برای شناسایی دقیق خستگی قیر انجام شد. همچنین گزارش شد که در مقادیر مدول کمتر از ۵ مگاپاسکال، لبه‌های بیرونی نمونه قیر می‌تواند ناپایدار شده و شروع به جریان کند. اثر لبه می‌تواند خود را به صورت افت مدول نشان دهد که از آسیب خستگی قابل تشخیص نیست (Johnson et al, 2010; Martoon et al, 2008; Bahia et al, 2001; Zhou et al, 2013).

چندین روش را می‌توان برای کاهش خرابی خستگی آسفالت مورد استفاده قرار داد. در میان این روش‌ها، اصلاح قیر یکی از محبوب‌ترین روش‌هایی است که برای افزایش عمر روسازی استفاده می‌شود (Hamed et al, 2010). اخیراً به دلیل چندین مزیت فنی، استفاده از نانو مواد در مخلوط‌های آسفالتی یکی از فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال شانزدهم / شماره سوم (۶۴) / بهار ۱۴۰۴

## مطالعه آزمایشگاهی رفتار خستگی قیر و مخلوط آسفالتی حاوی نانوس به روش های جاروب- زمان، کرنش و تیر خمشی

دربار خستگی یک مخلوط آسفالتی، توانمندی مخلوط در مقابل بارهای خمشی تکراری بدون شکست است.

قیرهای معمولی مورد استفاده در ساخت روسازی، عملکرد مناسب به منظور مقاومت در برابر بار و ترافیک سنگین و همچنین شرایط محیطی مختلف را ندارند. بدین منظور افزودنی-ها، راه حلی مناسب به منظور غلبه بر کاستی های خرابی روسازی و به تبع آن بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی می باشند. دلایل زیادی برای استفاده از افزودنی ها وجود دارد که مهمترین آنها شامل بدست آوردن ترکیب نرم تر در دمای پایین سرویس و در نتیجه کاهش ترک خوردگی دمایی، حصول ترکیب سفت تر در دمای بالا و کاهش شیارشدگی، افزایش دوام و مقاومت مخلوط آسفالتی، بهبود مقاومت خستگی مخلوط و کاهش ضخامت ساختار روسازی می باشند. امروزه استفاده از مواد افزودنی جهت بهبود خواص آسفالت ها از اهمیت بالایی برخوردار شده است. نانوس ها نیز از جمله افزودنی های نوینی می باشند که در این پژوهش به آن پرداخته شده است.

خرابی خستگی از جمله خرابی های بسیار مهم در روسازی های آسفالتی می باشد. ترک های خستگی تحت تأثیر بسیاری از عوامل؛ مانند، ساختار روسازی، بارگذاری و شرایط محیطی قرار دارند و عملکرد کششی در زیر لایه آسفالت به شدت بر عمر خستگی لایه های آسفالتی تأثیر می گذارد. جلوگیری از ایجاد این پدیده در مخلوط های آسفالتی از اهمیت بالایی برخوردار می باشد. مواد بسیاری برای اصلاح خواص قیر وجود دارند که پلیمرها و نانو مواد از مهمترین آنها می باشند. در این پژوهش، به بررسی نقش نانو رس در خصوصیات خستگی مخلوط آسفالتی پرداخته خواهد شد.

روسازی انعطاف پذیر بزرگراه بیش از ۹۰٪ از روسازی های ملی در اکثر کشورها را تشکیل می دهد. روسازی انعطاف پذیر از مخلوط آسفالت گرم (که مخلوطی از دانه بندی خوب دانه بندی شده همراه با یک چسباننده مواد برای ارائه یک ساختار پایدار برای عبور وسایل نقلیه)، تشکیل شده است و به طور مداوم با

جذاب ترین گزینه هاست. با این حال، استفاده از چنین مواد افزودنی پیچیدگی رفتار مواد را افزایش می دهد. نتایج نشان داد که عملکرد پاسخ این مواد کاملاً به نوع و کمیت افزودنی و آزمایش بستگی دارد.

نانو ماده به ماده ای اطلاق می شود که اندازه آن حداقل در یک بعد کمتر از ۱۰۰ نانومتر باشد (Stroev et al, 2005). نانو خاک رس یکی از نانو موادی است که به طور گسترده در مخلوط های آسفالتی استفاده شده است. ذرات رس دارای ساختار پوسته پوسته و لایه ای هستند که از سیلیس چهار وجهی و کانی های آلومینا هشت وجهی تشکیل شده است. سطح ویژه بسیار زیاد به دلیل ساختار پوسته پوسته است که یکی از ویژگی های بارز ذرات رس می باشد. چندین یون بار منفی روی سطح این ذرات وجود دارد. با این حال، وجود یون های مثبت بین این ذرات، انسجام بین آنها را ایجاد می کند. مواد نانو رس از طریق فرآیند جداسازی تولید می شوند که به خاک ریزدانه با سطح ویژه بالا و واکنش پذیری قابل توجه با مواد پلیمری مانند قیر دست می یابند. مطالعات، ذرات نانو رس را به عنوان مؤثرترین افزودنی هایی که می توانند بر خواص مخلوط قیر و آسفالت تأثیر بگذارند، پیشنهاد کردند (Fang et al, 2013; Liu et al, 2012; Jasso et al, 2013). نانو رس ها دارای ساختار لایه ای سیلیکات هستند که برای اصلاح مواد پلیمری مناسب است (Ramadan et al, 2010).

خرابی در روسازی های انعطاف پذیر در اثر عوامل مختلفی چون ترک ناشی از خستگی و یا شیار شدگی روی می دهد. عامل شیارشدگی در اثر عبور بارهای بیش از توان روسازی و در دماهای بالا رخ می دهد، اما ترک های خستگی معمولاً در اثر تعداد سیکل های متوالی زیاد چرخهای وسایل نقلیه حاصل می شوند. ترک های مربوط به خستگی در مقادیر زیاد در رویه های آسفالتی دیده می شوند. خستگی عبارت است از پدیده شکست بر اثر تکرار بار ناشی از تناوب دینامیکی بار که ممکن است حتی کمتر از مقاومت نهایی استاتیکی مخلوط آسفالت باشد. مقاومت

آسفالت حاوی قیر اصلاح نشده و اصلاح شده با نانوذرات انجام دادند. نتایج نشان داده است که نانوذرات می‌توانند خواص قیر مانند سفتی و مقاومت پیری را بهبود بخشند و زاویه فاز را در مقایسه با خواص آسفالتی و آسفالت غیر اصلاح شده؛ مانند، سختی، مدول انعطاف پذیر و مقاومت کششی غیر مستقیم بهبود بخشند.

روحیت و رانجیتا (Rohith and Ranjitha, 2013) آزمایشی جهت بررسی عملکرد مخلوط آسفالت با استفاده از zycosoil به عنوان یک عامل ضد عریان شدگی با سنگ آهک و سنگ گرانیت انجام دادند. نتایج نشان داد که عمر خستگی به دلیل تشکیل یک لایه نازک هیدروفوبیک در مجموع افزایش یافت و پوشش جامد با زایکوسیل باعث افزایش مقدار پرکننده و کاهش مقدار فضای خالی در مخلوط آسفالت شد. بررسی سختی و ویژگی مارشال نمونه‌های آسفالت گرم مخلوط تولید شده در ۱۵۵ درجه سانتی گراد، ۱۳۰ درجه سانتی گراد و ۱۱۵ درجه سانتیگراد و در مقایسه با نمونه‌های آسفالت گرم مخلوط که حاوی نانومواد زیکوترم تولید شده در ۱۳۰ درجه سانتی گراد و ۱۱۵ درجه سانتی گراد است، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقاومت مارشال با افزودن ۰/۱٪ از نانومواد زیکوترم بهبود یافته است. مطالعه دیگری توسط یاو و همکاران در مخلوط‌های قیر و آسفالت اصلاح شده با نانوسلیکا در ۴٪ و ۶٪ نسبت به وزن قیر، انجام شد و ویژگی‌های قیر و مخلوط آسفالت اصلاح شده با نانومواد توسط تست‌های مختلف (مانند RV<sup>۴</sup> ویسکوزیته چرخشی، DSR<sup>۵</sup> رنومتر برشی دینامیکی، رنومتر خمشی<sup>۵</sup> BBR، فتروسکوپ مادون قرمز تبدیل فوریه<sup>۶</sup> FTIR، SEM<sup>۷</sup> اسکن میکروسکوپ الکترونی، آنالیز شیار مخلوط آسفالت<sup>۸</sup> APA، مدول دینامیکی<sup>۹</sup> DM<sup>۹</sup> و عدد روانی<sup>۱۰</sup> FN) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که خصوصیات ضد پیر شدگی، شیارشدگی و خستگی عملکرد ترک خوردگی آسفالت اصلاح شده با نانوسیلیکا افزایش یافته است و افزودن نانوسیلیکا در مخلوط آسفالت کنترل به طور قابل توجهی موجب

مشکلات مختلف خرابی مواجه می‌گردد. این خرابی‌ها ممکن است از آسفالت گرم یا از لایه‌های زیرزمینی مانند خرابی‌های اساس، زیراساس یا بستر سبب شود.

اعتقاد بر این است که رطوبت و آب یکی از بزرگترین عوامل است، که تأثیر معکوس بر عملکرد مخلوط آسفالت گرم دارد. این موضوع، سبب کاهش عملکرد کلی مخلوط و همچنین افزایش پتانسیل شیارشدگی، کاهش عمر خستگی و سرعت بخشیدن به پتانسیل خرابی مخلوط می‌شود.

تاکنون تلاش‌ها و تحقیقات مختلفی بر روی استفاده از پودرها و افزودنی‌های میکرو جهت رفع مشکل شد که رضایتمندی را برای مهندسين و مدیران ارشد راه نداشت. بنابراین حل مشکلات در سطح نانو ضروری شد. از آنجایی که قیر خود تأثیر زیادی بر خصوصیات مخلوط دارد و قیر در اکثر پالایشگاه‌ها در فرآیند ثانویه تولید می‌شود، می‌توان گفت که این عنصر محصول جانبی است.

خصوصیات فناوری نانو، ایجاد مواد، دستگاه‌ها و سیستم‌های جدید در سطح مولکولی است، که با تعاملات اتمی و مولکولی به شدت تحت تأثیر خواص ماکروسکوپی مواد (Frag et al, 2013) قرار دارد. در سال‌های اخیر، فناوری نانو به تدریج در زمینه آسفالت اصلاح شده گنجانده شده است (Ameri et al, 2013). در دهه گذشته یا بیشتر، فناوری نانو به عنوان راه حل بالقوه به شدت بهبود عملکرد و دوام مواد ساختمانی ظاهر شد (Shafabakhsh et al, 2014). برای نشان دادن بسیاری از برنامه‌های کاربردی آینده، محققان مجموعه‌ای از تلاش‌های مثبت و موثر را در زمینه آماده‌سازی آسفالت اصلاح شده برای نشان دادن مکانیزم اصلاح و بهبود عملکرد انجام داده‌اند. برخی از تحقیقات نشان داد که ترک خوردگی خستگی، شیارشدگی و مقاومت در برابر رطوبت آسفالت‌ها و مخلوط‌ها با افزودن نانومواد بهبود می‌یابند (You et al, 2011). جهرمی و همکاران (Jahromi et al, 2009) آزمایش‌های رنولوژیکی مقایسه‌ای را در مورد قیر و تست‌های مکانیکی در مخلوط‌های

آزمایش های مختلف برای بررسی عملکرد خستگی مخلوط های آسفالت وجود دارد. در میان آنها، تیرخستگی چهار نقطه ای و کشش غیرمستقیم به طور گسترده ای مورد استفاده قرار می گیرند و در این مطالعه برای بررسی اثر دو نوع افزودنی نانو در بهبود وضعیت خستگی استفاده شد.

خواص نانو رس به عنوان نانو تکنولوژی جدید بتن آسفالت در طول سال ها، با افزایش بار ترافیکی و تعداد وسایل نقلیه سنگین، بسیاری از روسازی ها به علت سازه ای یا عملکردی، حتی اگر به مدت طولانی طراحی شده اند، پیش از موعد از بین می روند. کاربرد تکرار بارهای ترافیکی می تواند آسیب ساختاری به آسفالت ایجاد کند که می تواند باعث تغییر شکل دائمی شود به ویژه در طول مسیر چرخ ها. علاوه بر این، عوامل محیطی همچون دما و رطوبت نیز می توانند تاثیر قابل ملاحظه ای روی مواد روسازی و بستر روسازی داشته باشند که بر عملکرد تاثیر می گذارد. دو راه وجود دارد که درجه حرارت می تواند روی روسازی ها تاثیر بگذارد. اول، دما بر رئولوژیک (تغییر شکل و ویژگیهای جریان) قیر تاثیر می گذارد و دوم، تغییرات درجه حرارت باعث انبساط و انقباض مخلوط می شود (Polacco et al, 2008). یکی دیگر از عواملی که باید مورد توجه قرار گیرد در معرض نور خورشید قرار داشتن روسازی است، که باعث می شود سطح روسازی به سرعت پیر شود و سطح روسازی شکننده تر و سخت تر شود.

به دلیل خرابی و افزایش عمر مفید جاده طراحی شده، لایه های مخلوط آسفالتی باید با توجه به خواص عملکرد مانند مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی، خستگی، سایش، پیری و غیره بهبود یابد. به تازگی، جایگزینی مواد صنعتی به عنوان یک اصلاح کننده برای تغییر خواص آسفالت به منظور کاهش هزینه های چرخه عمر و به دست آوردن مزایای زیست محیطی مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از نانوذرات می تواند مدول پیچیده برشی را افزایش داده و زاویه فاز قیر پایه را کاهش دهد (Teizer et al,

افزایش مدول دینامیکی، عدد روانی و مقاومت شیارشدگی مخلوط آسفالت می شود. کاربرد فناوری نانو، بر خواص مخلوط آسفالت و قیر، دارای مزایای زیادی از جمله بهبود ثبات ذخیره سازی در آسفالت اصلاح پلیمر، افزایش مقاومت در برابر پیرشدگی UV<sup>11</sup>، کاهش حساسیت رطوبتی، بهبود خواص مخلوط آسفالت در دمای پایین، بهبود دوام آسفالت، صرفه جویی در انرژی و هزینه، کاهش نیازهای تعمیر و نگهداری است.

در تحقیق دیگری اثر نانومواد زیگوترم در دو روش مختلف اصلاح با دو نوع سنگ آهک و بازالت بر عملکرد مخلوط آسفالت تولید شده مورد ارزیابی قرار گرفت. اثربخشی استفاده از نانومواد زیگوترم بر روی خواص حجمی مخلوط آسفالت گرم مانند مقاومت مارشال، روانی، درصد فضای خالی، فضای خالی مصالح سنگی و حفره های پر شده از آسفالت در مخلوط مورد ارزیابی قرار گرفت. مقاومت مخلوط آسفالت مخلوط به آسیب ناشی از رطوبت مورد بررسی قرار گرفت. خصوصیات رئولوژیکی قیر حاوی زیگوترم نیز ارزیابی شد.

#### ۱-۱ تاثیر نانو ذرات در خستگی مخلوط بتن آسفالتی

##### گرم

خرابی خستگی در مخلوط آسفالتی به طور کلی ناشی از بارگذاری تکراری است که معمولاً در محدوده دمای متوسط حدود ۵ تا ۳۰ درجه سانتیگراد رخ می دهد. در روسازی های آسفالتی، بارهای چرخ های خودرو، زمینه هایی از تنش های کششی را در زیر لایه آسفالتی ایجاد می کنند که باعث تشکیل ریز ترک می شوند. این میکروارگانیزم ها در اثر بارهای تکراری بارگذاری شده به سمت سطوح روسازی به سوی بالا می روند (Xiao et al, 2009). کاربرد نانوذرات جهت اصلاح قیر در حال افزایش است و مطالعات بسیاری انجام شده است که جنبه های گوناگون عملکرد قیر و مخلوط آسفالت را بررسی می کند. علاوه بر این، مقایسه بین انواع مختلف مواد افزودنی نانوذرات و افزودنی های نانوذرات و پلیمرها نیز انجام شده است. با این حال، تحقیقات در مورد عمر خستگی نانوذرات وجود ندارد.

می‌توان گفت که در فرکانس پایین، هر دو عملکرد قیر و نانوذرات قابل توجه هستند و در فرکانس بالا، قیر تمایل بیشتری نسبت به نانوذرات دارند. صاحب الزمانی و همکاران (Sahebozamani et al, ۱۳۹۷) در پژوهشی به مقایسه خواص عملکردی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با قیر پلیمری و گرانول خشک پلیمری پرداختند. چندین سال است که برای تولید مخلوط‌های آسفالتی با مقاومت بهتر در برابر شیارشدگی، ترک‌های خستگی و ترک‌های حرارتی از قیرهای اصلاح شده با پلیمر استفاده شده است. برای تولید قیرهای اصلاح شده با پلیمر با خصوصیات مهندسی مطلوب، تجهیزات و فناوری‌هایی مورد نیاز هستند که ممکن است همواره در دسترس نباشد. طی سالهای اخیر، جهت تسهیل استفاده از پلیمر در مخلوط‌های آسفالتی، یک روش نوین به صنعت راهسازی معرفی شده است. در این پژوهش، گرانول پلیمری متشکل از ۴۰٪ استارین بوتادین استارین (SBS)<sup>۱۴</sup> را می‌توان در حین فرایند تولید آسفالت در کارخانه آسفالت بدون نیاز به هر گونه تجهیزات خاص به طور مستقیم به داخل میکسر اضافه نمود. با استفاده از این روش، استفاده از پلیمرها را می‌توان حتی برای پروژه‌های کوچک تسهیل کرده و توسعه داد. هرچند، با توجه به نوظهور بودن این فناوری، جهت ارزیابی اثربخشی آن تحقیقات بیشتری مورد نیاز است. در این مقاله، سختی و خصوصیات مقاومتی بتن آسفالتی در برابر ترک‌های حرارتی، ترک‌های خستگی، شیارشدگی در مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با گرانول‌های پلیمر قیری و مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با قیر خالص و قیر اصلاح شده با پلیمر، مورد مقایسه قرار گرفته اند. همچنین اثر پیرشدگی ناشی از اکسیداسیون بلند مدت بر روی سختی و مقاومت مخلوط‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که بهبود خواص عملکردی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با گرانول پلیمری دارای نتایج مشابهی در مقایسه با مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده از قیر اصلاح شده با پلیمر SBS است. جلیلی و همکاران (Jalili et al, 1396)، در پژوهشی به تحلیل

(2012). علاوه بر این، افزودن نانوذرات باعث آسیب رطوبتی آسفالت می‌شود (Yasmin et al, 2003).

## ۲-۱ عملکرد نانورس در مخلوط آسفالتی

نانورس یکی از فناوری‌های نانو است که در آن رس ممکن است به ساختن ساختارهای رسوبی با مونومرهای آلی و پلیمر تبدیل شود. در تحقیقی که توسط جهرمی انجام شد، (Jahromi et al, 2009) از قیر خالص ۶۰/۷۰ با دو نوع مختلف نانوذرات شامل کلویسیت A ۱۵ و نانوفیل ۱۵ استفاده شد. نتایج نشان داد که اصلاح آسفالت نانو در افزایش مقاومت و مقاومت سایشی کمک می‌کند. یافته‌ها نشان داد که ذرات نانوفیل در مقایسه با ذرات کلویسیت کوچکتر هستند. حد پلاستیک موجود در نانورس نشان می‌دهد که یک ماده ویژه‌ای است. بنابراین، درصد کم نانوذره در قیر، منجر به تغییر در پارامترهای رئولوژیکی، کاهش نفوذ و انعطاف پذیری و همچنین افزایش نقطه نرمی و مقاومت در برابر پیری می‌شود. زارع شهابادی (Zare Shahabadi et al, 2010) مطالعه روی دو نوع رس، بتونیتی (BT)<sup>۱۲</sup> و بتونیتی اصلاح شده ارگانیک (OBT)<sup>۱۳</sup> را انجام داده است. نتایج نشان داد که افزودن BT و OBT، سبب افزایش ویسکوزیته و مدول برشی پیچیده و کاهش زاویه فاز و بهبود مقاومت به تغییر شکل در مقایسه با آسفالت غیر اصلاح شده نشان داده شده است. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که نانوذرات می‌توانند خواص‌هایی نظیر پایداری، مدول برجهنگی و مقاومت کششی غیر مستقیم را بهبود بخشند و در نتیجه عملکرد برتر در مقایسه با قیر بدون تغییرات تحت خزش دینامیکی بهبود می‌یابند. با این حال، آنها دریافتند که نانوذرات به نظر نمی‌رسد تاثیرات مثبتی بر رفتار خستگی در دماهای پایین داشته باشند.

ژانپینگ و همکاران (Zhanping et al, 2011) دریافتند که با افزایش فرکانس تا ۱۰۰ هرتز (یا زمان بارگذاری ترافیک)، مولکولهای نانو در نقش بار برش در مقایسه با فرکانس پایین یا افزایش بار ترافیکی نقش کمتری دارند، جایی که اثر مولکولهای نانوذره شروع به تبدیل شدن به برجسته شدن می‌کنند. بنابراین،

## مطالعه آزمایشگاهی رفتار خستگی قیر و مخلوط آسفالتی حاوی نانورس به روش‌های جاروب- زمان، کرنش و تیر خمشی

سرعت و دانه بندی وابسته است. همچنین مخلوط‌های ریزدانه در مرحله اول بارگذاری در مقابل هر دو محور، رفتار مقاوم‌تری در برابر ترک خوردگی از خود نشان داد، اما در مرحله دوم بارگذاری، رفتار دانه بندی تابعی از نوع محور عبوری می‌باشد. عامری و همکاران (Ameri et al, 1395)، به بررسی اثر افزودنی نانورس بر رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی از طریق تحلیل ضریب آسیب معادل پرداختند. خستگی ناشی از بارگذاری تکراری ترافیک، به عنوان یکی از حالت‌های اصلی خرابی در روسازی‌های آسفالتی در نظر گرفته می‌شود. افزودن نانورس به قیر، به دلیل سطح تماس فوق العاده زیاد مواد نانو، باعث افزایش ویسکوزیته قیر و کاهش شیار شدگی آسفالت می‌شود، از این رو در این تحقیق سعی شده است که با استفاده از دو نوع نانورس مونت موریلونیت اثر نانورس بر رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی در دماهای میانی و پایین بررسی شود. به این منظور نمونه‌هایی با درصد افزودنی ۶،۴،۲ درصد با استفاده از دستگاه آلتراسونیک به قیر ۷۰-۶۰ مصرفی اضافه شد و آزمایش‌های مدول برجهنگی و تیرچه خمشی چهار نقطه ای در دو دمای ۵ و ۲۵ درجه سانتی گراد بر روی مخلوط‌های ساخته شده صورت پذیرفت. نتایج نشانگر افزایش مدول برجهنگی به ازای افزایش درصد نانورس در قیر در هر دو دمای انجام آزمایش است. عمر خستگی و انرژی تلف شده در آزمایش تیرچه خمشی در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد افزایش می‌یابد؛ در حالی که، در دمای پایین کاهش پیدا کرده است. با توجه به ضریب آسیب محاسبه شده در آزمایش تیر خمشی، استفاده از افزودنی نانورس به طور متوسط سبب کاهش ۱۵٪ ضریب آسیب در دماهای متوسط شده و برای بیش از ۲٪ افزودنی تغییرات محسوسی در ضریب آسیب مشاهده نشده است. در دمای پایین، عملکرد ضعیف این افزودنی باعث افزایش ۳۰٪ ضریب آسیب می‌شود، بنابراین استفاده از این افزودنی در مناطق سردسیر به هیچ عنوان توصیه نمی‌شود.

رفتار خستگی مخلوط آسفالتی داغ اصلاح شده توسط ترکیب نانوسیلیس و پلیمر استایرن بوتادین استایرن پرداخته است. دستیابی به مخلوط آسفالتی اصلاح شده‌ای که بتواند در برابر خستگی عملکرد مناسبی داشته باشد، همواره مورد توجه محققان بوده است. بنابراین هر ساله اصلاح‌کننده‌های مختلفی به منظور اصلاح قیر و مخلوط آسفالتی برای رفع این مشکلات و خرابی‌ها معرفی می‌گردد. دو نوع اصلاح‌کننده‌ای که در سالیان اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است، پلیمرهای ترموپلاستیک-الاستومری و نانو مواد است. بنابراین در این پژوهش تلاش شده است با کاربرد ترکیب نانوسیلیس و پلیمر استایرن بوتادین استایرن، عملکرد خستگی مخلوط آسفالتی مورد تحلیل قرار گیرد. طبق این پژوهش، افزودن نانوسیلیس به مخلوط آسفالتی اصلاح شده با پلیمر استایرن بوتادین استایرن منجر به بهبود عملکرد در برابر خستگی مخلوط آسفالتی و بهبود مدول برجهنگی و مقاومت در برابر شرایط آب و هوایی گردید. فدایی و همکاران (Fadaei et al, 1396)، به اثر ترکیبی نوع محور، دانه‌بندی و سرعت بر رفتار خستگی مخلوط آسفالتی با استفاده از آزمون خمش نیم دایره (SCB<sup>15</sup>) پرداختند. یکی از راه‌های شناخت پارامترهای تاثیرگذار بر رفتار مخلوط آسفالتی، انطباق شرایط آزمایش با شرایط واقعی می‌باشد. با توجه به اینکه وسایل نقلیه دارای محورهای مختلفی هستند و هر محور الگوی بارگذاری مشخصی بر روسازی اعمال می‌کند، بنابراین الگوی بارگذاری یکی پارامترهایی است که در آزمایشات آسفالت کمتر به آن توجه شده است. این مطالعه با استفاده از آزمون خمش نیم دایره و بارگذاری تکرار شونده به بررسی رفتار ترک خوردگی و خستگی مخلوط آسفالتی، تحت الگوی‌های بارگذاری معادل محورهای منفرد و دوتایی در سرعت و دانه‌بندی مختلف می‌پردازد. برای تحلیل نتایج از دو مرحله بارگذاری در نمودار بازشدگی ترک - سیکل عبوری استفاده شده است. نتایج نشان داد که در هر دو مرحله از بارگذاری رفتار خستگی مخلوط آسفالتی تحت عبور هر یک از محورهای منفرد و دوتایی به

هدف اصلی این تحقیق، بررسی رفتار خستگی قیرهای اصلاح شده با نانو با استفاده از آزمون جاروی زمانی بود. ابتدا آزمون جاروب- کرنش برای تعیین حدود رفتار ویسکوالاستیک خطی و غیرخطی قیر اصلاح شده انجام شد. همچنین برای تعیین خصوصیات رئولوژیکی پایه قیرهای مورد مطالعه، آزمون جاروب- فرکانس انجام شد. پس از آن، اثر نانو افزودنی‌ها بر عمر خستگی قیر اصلاح شده با استفاده از آزمون جاروب زمانی در سطوح کرنش اولیه ۲، ۳/۵ و ۵ درصد با استفاده از پارامترهای متداول و متفاوت انرژی تلف شده مورد بررسی قرار گرفت. همچنین جهت بررسی تاثیر نانورس بر خصوصیات خستگی مخلوط آسفالتی، آزمون مقاومت کششی غیرمستقیم، مدول برجهندگی و تیر خمشی چهار نقطه‌ای بر روی نمونه‌های مخلوط آسفالتی انجام پذیرفت.

## ۲. روش پژوهش

### ۲-۱ مواد و مصالح

#### ۲-۱-۱ مصالح سنگی

مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق، از نوع مصالح سیلیسی و آهکی می‌باشد و دانه بندی آن از نوع ۱۹-۰ می‌باشد. مصالح سنگی آهکی مطابق با دانه بندی شماره ۴ نشریه ۲۳۴ در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته شد. در جدول ۱ دانه بندی مصالح مورد استفاده در این تحقیق ارائه شده است.

به منظور بررسی کفایت و مرغوبیت مصالح سنگی آزمایشات شکستگی مصالح سنگی، افت وزنی در مقابل سولفات سدیم، تطویل و تورق، افت وزنی در مقابل سایش به روش لوس انجلس و سایر استانداردها صورت پذیرفت که در جدول ۲ ارائه شده است. جدول ۳ مشخصات شیمیایی مصالح سنگی را نشان می‌دهد.

جدول ۱. دانه بندی مصالح سنگی

الک (mm)	حد بالا و پایین	عبوری (%)
۱۹	۱۰۰	۱۰۰

در تحقیقی که توسط مونتر و همکاران انجام شد (Monteiro et al, 2023)، تاثیر پیرشدگی بر قیر حاوی درصدهای ۲ و ۴٪ نانورس نسبت به وزن قیر مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمایشات رئولوژیکی قیر مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد افزودن نانورس سبب بهبود مقاومت در برابر پیرشدگی قیر گردید و در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت خستگی قیر افزایش می‌یابد.

در تحقیقی که توسط پاترا و همکاران انجام شد (Patra et al, ۲۰۲۲)، تاثیر نانورس بر خصوصیات عملکردی قیر مورد ارزیابی قرار گرفت. مونتومریلونیت به میزان ۳ الی ۶ درصد وزنی قیر استفاده شد. آزمایشات جاروب دما و LAS جهت بررسی خصوصیات خستگی قیر انجام شد. روند پارامترهای عملکرد حاکی از بهبود قابل توجه مقاومت در برابر شیارشدگی و ترک خوردگی خستگی است. علاوه بر این، درصد بهینه NC شده به میزان ۴.۵٪ بود که در آن قیر بهبود قابل توجهی در مقاومت در برابر شیار شدن، خستگی و پیری در دمای بالا نشان داد بدون اینکه بر خاصیت پایداری ذخیره سازی تأثیر بگذارد.

در تحقیقی که توسط Josphi nel eel a و همکاران انجام شد (Josphi nel eel a et al, ۲۰۲۳)، تاثیر نانورس بنتونیتی بر عملکرد مخلوط آسفالتی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مخلوط های حاوی نانورس مقاومت بالاتری در برابر خستگی و شیارشدگی از خود نشان دادند.

غدیر و همکاران (Qadir et al, 2024) تاثیرات اصلاح الکتروفیلیک بر نانورس لایه ای را مورد ارزیابی قرار دادند. این مطالعه نشان داد که نانو خاک رس خام پس از اصلاح الکتروفیلیک از طریق روش اشباع مرطوب، سازگاری شیمیایی با قیر را نشان داد. قیر اصلاح شده ONC خواص رئولوژیکی، ترکیب همگن و پایداری ذخیره سازی بهتری نسبت به طبیعت آبدوست داشت. مخلوط های تهیه شده با ONC مقاومت بهتری در برابر شیار شدن، خستگی و حساسیت به رطوبت نشان دادند.

## مطالعه آزمایشگاهی رفتار خستگی قیر و مخلوط آسفالتی حاوی نانورس به روش‌های جاروب-زمان، کرنش و تیر خمشی

می‌باشد. در سال‌های اخیر استفاده از مصالح در مقیاس نانو افزایش یافته است. با کوچک شدن ابعاد یک ماده، عموماً برخی از خواص مکانیکی مواد بهبود می‌یابد. دانشمندان برای تعریف علم و فناوری نانو، به صورت قراردادی محدوده ۱ تا ۱۰۰ نانومتر را به عنوان محدوده نانومتری تعریف کردند. نانومواد مورد استفاده در این تحقیق شامل نانورس ( $NC^{16}$ ) می‌باشند.

نانورس‌ها، مواد بسیار ریز دانه‌ای می‌باشند که اندازه ذرات آن‌ها کمتر از ۵ بوده و با چنین ابعادی خیلی فعال هستند. نانورس در دسته بندی‌های مختلفی قرار می‌گیرند.

نانورس به مقدار ۰، ۲، ۴ و ۶ درصد وزنی نسبت به قیر ۶۰/۷۰ اضافه گردید که به منظور تمایز بین آن‌ها در تحلیل نتایج از این پس قیرها به صورت پایه و قیر حاوی نانوافزودنی رس به صورت،  $NC0\%$ ،  $NC2\%$ ،  $NC4\%$  و  $NC6\%$  نامگذاری گردیدند.

الک (mm)	حد بالا و پایین	عبوری (%)
۱۲/۵	۹۰-۱۰۰	۹۶
۴/۷۵	۴۴-۷۴	۵۷
۲/۳۶	۲۸-۵۸	۴۲
۰/۳	۵-۲۱	۱۵
۰/۰۷۵	۲-۱۰	۵

### ۲-۱-۲ قیر

قیر در مخلوط بتن آسفالتی به عنوان عامل چسباننده بین مصالح سنگی می‌باشد. قیر مورد استفاده در این تحقیق قیر ۶۰/۷۰ شرکت نفت تهران می‌باشد که مشخصات آن در جدول ۴ قابل مشاهده می‌باشند.

### ۲-۱-۳ نانورس

به منظور اصلاح قیر روش‌های متفاوتی وجود دارند که یکی از مهمترین آنها، افزودن نانومواد به قیر به منظور تغییر خواص آن

جدول ۲. مشخصات فیزیکی مصالح مصرفی

ویژگی	استاندارد	نتایج مصالح آهکی	نتایج مصالح سیلیسی
سایش لس آنجلس (%)	AASHTO-T96	۲۱	۲۴
جذب رطوبت (%)	AASHTO-T96	۱/۷	۱/۸
درصد شکستگی در دو وجه (%)	ASTM-D5821	۹۵	-
افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (%)	AASHTO-T104	۰/۱۵	۲/۴
سنگدانه‌های پهن و دراز (%)	ASTM D4791	۲	-

جدول ۳. مشخصات شیمیایی مصالح مصرفی

درصد اکسید									نوع مصالح سنگی
TiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	MnO	
۰/۱۰۸	۱۷/۵۲	۲/۱۱	۰/۹۴	۰/۰۸	۰/۶۶	۰/۷۵	۴۳/۰۱	۰/۰۴۶	آهکی
۱/۵۹۸	۳۵/۱۵	۱۸/۷۱	۲/۷۴	۰/۲۷	۰/۱۴	۷/۶	۲۵/۵۷	۰/۳۰۵	سیلیسی

جدول ۴. مشخصات قیر ۶۰/۷۰

پارامتر	استاندارد ASTM	محدوده قابل قبول	نتیجه
درجه نفوذ در ۲۵° سانتیگراد (۰.۱ mm)	D5	۷۰-۶۰	۶۴
نقطه نرمی (°C)	D36	۵۴-۴۵	۵۱
انگمی در ۲۵ درجه سانتیگراد (cm)	D113	+۱۰۰	۱۱۲

پارامتر	استاندارد ASTM	محدوده قابل قبول	نتیجه
نقطه اشتعال (°C)	D99	+۲۳۲	۲۹۸
وزن مخصوص در ۲۵ درجه سانتی گراد	D70	-	۱/۰۱۶
حلالیت در تری کلرو اتیلن (%)	D2042	>۹۸	۹۸/۹
ویسکوزیته کینماتیکی	D2170	-	۳۵۶

## ۲-۲ آماده سازی نمونه

به منظور انتخاب روش اختلاط مناسب، چندین مرجع مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس ادبیات، توزیع همگن نانو افزودنی به عنوان یکی از پارامترهای اصلی موثر بر خواص نهایی قیر اصلاح شده و مخلوط آسفالتی در نظر گرفته می شود (Kavussi et al, 2016; Ashish et al, 2016; Li et al, 2007). افزایش دمای اختلاط، مدت زمان اختلاط و سرعت چرخش میکسر پارامترهای اصلی موثر بر کیفیت مخلوط قیر-افزودنی هستند. از طرف دیگر افزایش بیش از حد زمان و دمای اختلاط می تواند باعث پیری زودرس قیر شود. پروتکل اختلاط پس از ارزیابی دقیق تحقیقات گذشته و انجام چندین آزمون و خطا انتخاب شد. در این تحقیق، نانو رس با استفاده از میکسر برش بالا در دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲۵ دقیقه در ۴۰۰۰ دور در دقیقه با قیر پایه مخلوط شد. در پایان فرآیند اختلاط، درجه نفوذ قیر اندازه گیری شد. بر این اساس، درجه نفوذ قیرهای حاوی ۲، ۴ و ۶ درصد وزنی نانورس به ترتیب ۶۱، ۵۷ و ۵۴ درجه نفوذ است.

به منظور تعیین قیر بهینه در نمونه های مخلوط آسفالتی از روش طرح اختلاط مارشال در این تحقیق استفاده شده است. این مرحله شامل گرم کردن مصالح و قیر در دمای مورد نظر و سپس اختلاط آنها با یکدیگر می باشد. مصالح سنگی گرمخانه قرار داده شدند و سپس با قیر داغ مخلوط شدند. در این روش نمونه های

استوانه ای به قطر و ارتفاع ۱۰/۶ سانتیمتر و ۶/۲۵ سانتیمتر تهیه می شود.

عمل تراکم با استفاده از چکش ۴/۵ کیلوگرمی و ارتفاع مشخص صورت می پذیرد. نمونه های آسفالتی با درصد مقادیر مختلف قیر از ۳/۵ درصد تا ۶ درصد ساخته شدند. میزان درصد قیر بهینه با توجه به ۶ کمیت فضای خالی مخلوط، استقامت مارشال، وزن مخصوص، فضای خالی پر شده با قیر روانی و فضای خالی مصالح سنگی تعیین گردیدند.

مقدار قیر بهینه با کنترل نتایج با معیارهای فنی نشریات برای مخلوط آسفالتی گرانیته بدون افزودنی برابر با ۵/۱ درصد بدست آمد که نتایج در جدول ۵ ارائه شده است.

تهیه نمونه های تیرچه خمشی چهارنقطه ای مطابق با استاندارد AASHTO T321-14 صورت پذیرفت. متراکم کننده مالشی به منظور تراکم دال آسفالتی مورد استفاده قرار گرفت. در ابتدا قیر و سنگدانه ها داغ می گردند و سپس با یکدیگر مخلوط می گردند. پس از آن بلافاصله با استفاده از متراکم کننده مالشی، تراکم صورت می پذیرد و دالهای بتنی تهیه می گردند. دال بتنی پس از تراکم به تیرچه هایی به ابعاد ۳۸۰×۶۰×۵۵ میلیمتر بریده شدند. در این پژوهش عمر خستگی تیرچه ها در ۳ سطح کرنش ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ میکروکرنش، دماهای ۱۵ و ۲۵ درجه سانتیگراد و فرکانس ۱۰ هرتز مورد بررسی قرار گرفتند. تیرچه ها پیش از شروع تست خستگی حداقل به مدت ۵ ساعت در اتاقک حرارتی دستگاه<sup>۱۷</sup> UTM در دماهای ۱۵ و ۲۵ درجه سانتیگراد قرار داده شدند.

جدول ۵. مشخصات تعیین قیر بهینه مصالح مخلوط آسفالتی بدون افزودنی

کمیت	مقدار	حداقل	حداکثر
درصد فضای خالی	۴	۳	۵
استحکام مارشال	۹۹۵	۸۰۰	-
روانی آسفالت بر حسب میلیمتر	۲/۷	۲	۳/۵
درصد فضای خالی پر شده با قیر (VFA)	۷۳	۶۰	۷۵
درصد فضای مصالح سنگی (VMA)	۱۵/۲	۱۳	-

### ۲-۳ برنامه آزمایشگاهی

#### ۲-۳-۱ آزمایش پایه‌ای قیر

خواص فیزیکی متداول قیر پایه و قیر اصلاح‌شده با نانورس با آزمایش‌های مختلف از جمله، نقطه نرمی و درجه نفوذ ارزیابی شدند. نقطه نرمی قیر مطابق با ASTM - D36 تعیین شد. درجه نفوذ می‌تواند نشان‌دهنده سختی قیر باشد، که مطابق با ASTM D5 انجام شد. تست ویسکوزیته با استفاده از ویسکومتر چرخشی بروکفیلد برای اندازه‌گیری ویسکوزیته قیرهای اصلاح‌نشده و اصلاح شده در دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد مطابق با استاندارد ASTM - D 4402 انجام شد.

#### ۲-۳-۲ رئومتر برش دینامیکی

به منظور مشخص کردن ویژگی‌های اساسی رئولوژیکی قیر، تست DSR انجام شد. این تست می‌تواند به درستی رفتار الاستیک و ویسکوز قیر را در دماهای متوسط تا دماهای بالا توصیف کند. مدول مرکب ( $G^*$ ) و زاویه فاز ( $\delta$ ) پارامترهای اصلی ویسکوالاستیک هستند که در این تست اندازه‌گیری می‌شوند. پارامتر  $G$  اطلاعاتی را در مورد مقاومت قیر به تغییر شکل هنگامی که در معرض بار برشی قرار می‌گیرد، فراهم می‌کند. پارامتر  $d$  تاخیر زمانی بین تنش‌های برشی اعمال‌شده و پاسخ‌های کرنش برشی را نشان می‌دهد. تحلیل این دو پارامتر می‌تواند رفتار قیر مانند پتانسیل شیارشدگی را پیش‌بینی کند. پارامتر  $G^* / \sin \delta$  که پارامتر شیارشدگی نامیده می‌شود مقاومت شیارشدگی قیر را نشان می‌دهد. نمونه‌های قیر با ضخامت ۱ میلی‌متر و قطر ۲۵ میلی‌متر با فرکانس ۱۰ rad / s

و در دمای ۴۶، ۵۲، ۵۸، ۶۴، ۷۰ و ۷۶ درجه سانتی‌گراد با توجه به روش آزمون استاندارد ASTM - D ۷۱۷۵، تست شدند. مقدار  $G^* / \sin \delta$  برای قیرهای پیرنشده توصیه می‌شود که با توجه به استاندارد، ASTM - D ۷۱۷۵ بیش از ۱ کیلو پاسکال باشد. پارامتر  $G^* \cdot \sin \delta$  که پارامتر خستگی نامیده می‌شود مقاومت خستگی قیر را نشان می‌دهد. اغلب آزمایش بر روی قیرهایی که قبلاً توسط آزمایش RIFO پیرشدگی کوتاه مدت بر روی آنها انجام شده و سپس تحت آزمایش پیرشدگی بلندمدت PAV قرار می‌گیرند، انجام می‌پذیرد. مقدار پارامتر  $G^* \cdot \sin \delta$  باید کمتر از ۵۰۰۰ کیلو پاسکال باشد.

#### ۲-۳-۳ آزمایش جاروب فرکانس

به منظور ارائه خواص رئولوژیکی قیرهای مورد مطالعه، آزمون جاروب فرکانسی در چهار دمای ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درجه سانتی‌گراد با استفاده از دستگاه DSR انجام شد. تغییرات در خواص رئولوژیکی پایه شامل مدول مختلط با استفاده از این آزمون تعیین شد.

#### ۲-۳-۴ آزمایش جاروب کرنش

آزمون جاروب کرنش برای تعیین مرز بین رفتار ویسکوالاستیک خطی و غیرخطی قیرها انجام شد. این آزمایش در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد، فرکانس ۱۰ هرتز و سطوح کرنش ۰٫۱ تا ۲۰ درصد برای قیرهای پایه و نانو اصلاح شده انجام شد. طبق متون، حد رفتار ویسکوالاستیک خطی قیر در سطح کرنش است که در آن مدول برشی ۵ درصد در مقایسه با مقدار مدول برشی اولیه

کاهش می‌یابد (Anderson et al, 1994; Petersen et al, 1994).

### ۲-۳-۵ آزمایش جاروب زمان

به منظور بررسی رفتار خستگی قیر، روش‌های مختلفی ارائه شده است. تست TS یکی از روش‌هایی است که در ادبیات برای بررسی رفتار خستگی قیرها استفاده شده است. آزمون TS روشی مناسب برای بررسی رفتار قیر بر اساس رویکرد انرژی استهلاک شده است. همانطور که توسط NCHRP گزارش شده است، این روش به نتایج قابل اعتماد با انطباق بالا با شرایط واقعی منجر شد. در این تحقیق قیرهای پایه و نانو اصلاح شده با ابعاد ۲ میلی متر ضخامت و ۸ میلی متر قطر تهیه شد. سپس تست TS در کرنش‌های اولیه ۲، ۵/۵ و ۵ درصد در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد و بارگذاری سینوسی با فرکانس ۱۰ هرتز انجام شد. برای هر نوع آزمون و شرایط از دو تکرار استفاده شد و میانگین نتایج در آنالیز در نظر گرفته شد. پس از محاسبه میانگین نتایج، ضریب تغییرات ( $CV^{18}$ ) محاسبه شد. حداکثر مقدار CV قابل قبول برابر با ۱۰ درصد انتخاب شد.

همانطور که قبلاً ذکر شد جریان پلاستیک به عنوان یکی از مسائل اصلی مربوط به آزمایش TS در نظر گرفته می‌شود. به منظور کاهش خطای ناشی از چنین پدیده‌ای، سطح نمونه‌ها در پایان هر آزمون به طور دقیق کنترل می‌شد. شکست خستگی در آزمایش TS زمانی شروع می‌شود که ترک‌های لبه‌ای که ترک‌های محیطی هستند از حاشیه نمونه شروع می‌شوند و به سمت مرکز نمونه منتشر می‌شوند. آزمایش برای نمونه‌هایی که به جریان پلاستیک مشکوک بودند تکرار شد.

سپس مفاهیم مختلف رویکرد انرژی تلف شده و رابطه بین این پارامترها و عمر خستگی مورد بررسی قرار گرفته است. هنگامی که یک ماده تحت بارگذاری خارجی قرار می‌گیرد، ناحیه زیر منحنی تنش-کرنش نشان دهنده مقدار انرژی ذخیره سازی است. در یک ماده غیر الاستیک، از آنجایی که منحنی‌های بارگیری و تخلیه با یکدیگر مطابقت ندارند، بنابراین مقداری انرژی ذخیره

شده در طول فرآیند تخلیه می‌شود. این پدیده هیسترزیس نامیده می‌شود. همچنین، ناحیه بین حلقه پسماند تنش-کرنش انرژی تلف شده در طول هر چرخه بارگذاری را مجدداً نشان می‌دهد. در یک ماده ویسکوالاستیک معادله (۱) برای به دست آوردن انرژی تلف شده در هر چرخه استفاده می‌شود.

$$W = \pi \cdot \epsilon^2 \cdot G^* \cdot \sin(\phi) \quad (1)$$

که در آن، W انرژی تلف شده (Pa)، مدول مختلط (Pa)  $G^*$ ،  $\epsilon$  سطح کرنش (%،) و  $\phi$  زاویه فاز (درجه) است.

اگرچه روش‌های مرسوم در تعیین عمر خستگی برای بررسی عملکرد مخلوط‌های قیر و آسفالت مناسب هستند، اما تصویر روشنی از مکانیسم آسیب‌ها و خرابی‌های وارده به مصالح ارائه نمی‌دهند. برخلاف این روش‌ها، مفهوم انرژی تلف شده ارتباط نزدیکی با آسیب‌های ناشی از چرخه بارگذاری روی قیر، مخلوط آسفالتی و مفهوم خستگی دارد.

### ۲-۳-۶ آزمایش کشش غیر مستقیم

در آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم، یک نمونه استوانه‌ای به صورت قطری بارگذاری می‌شود. آزمایش کشش غیر مستقیم برای تعیین مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی و پیش بینی ظهور ترک‌ها در مخلوط آسفالتی استفاده می‌شود. همچنین می‌توان از این آزمایش برای ارزیابی عمر خستگی نیز استفاده کرد. آزمایش کششی غیر مستقیم براساس آیین نامه ASTM D6931-12 با نرخ ثابت ۵۰/۸ میلی‌متر بر دقیقه و دمای ۲۰ درجه سانتیگراد انجام شد. مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌ها با استفاده از معادله زیر تعیین شده است:

$$ITS = (2P_{max}) / \pi D t \quad (2)$$

که ITS: مقاومت کششی نمونه‌ها بر حسب  $kPa$ ،  $P_{max}$  بار اعمالی در زمان شکست بر حسب  $kN$ ، D قطر نمونه‌ها بر حسب میلی‌متر، t ارتفاع نمونه‌ها براساس میلی‌متر می‌باشد.

انرژی شکست و مقاومت کششی به عنوان دو پارامتر به طور همزمان برای ارزیابی رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. انرژی شکست به عنوان کار انجام شده

## مطالعه آزمایشگاهی رفتار خستگی قیر و مخلوط آسفالتی حاوی نانوس به روش‌های جاروب- زمان، کرنش و تیر خمشی

مقاومت خستگی تیرها براساس آزمایش تیر خمشی چهار نقطه- ای براساس آیین نامه AASHTO T321-07 ارزیابی شده است. هدف از این آزمایش تعیین عمر خستگی تیرها در سطوح کرنش مختلف می‌باشد.

آزمایش خستگی می‌تواند هم در شرایط تنش ثابت و کرنش ثابت انجام شود. در حالت تنش ثابت، شکست نمونه بلافاصله بعد از شروع ترک تعریف می‌شود. در حالت کرنش ثابت، شکست نمونه زمانی که مدول سختی آن به نصف مدول اولیه آن می‌رسد، تعریف می‌گردد. این معیار براساس آیین نامه AASHTO-T321 استفاده شده است.

تمامی نمونه‌ها در سطح کرنش ثابت ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ میکرو استرین با بارگذاری سینوسی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. آزمایش در دمای ثابت ۲۰ درجه سانتیگراد انجام شده است. نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت قبل از آزمایش در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد قرار گرفته‌اند تا به دمای مذکور برسند. فرکانس بارگذاری ۱۰ هرتز می‌باشد.

مدول سختی براساس نیرو و جابه جایی اندازه‌گیری شده بعد از ۵۰ سیکل براساس معادلات زیر محاسبه شده است:

$$\varepsilon = \frac{12\delta h \times 10^6}{3(G_0^2 - 4G_1^2)} \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{G_0 P}{Bh^2} \quad (6)$$

$$S = \frac{1000\sigma}{\varepsilon} \quad (7)$$

که  $\varepsilon$  حداکثر کرنش اعمال شده بر تیر،  $\delta$  تغییر شکل ماکزیمم در وسط تیر (میلیمتر)،  $G_0$  طول خارجی گیج (۳۵۵/۵ میلیمتر)،  $G_1$  طول داخلی گیج (۱۱۸/۵ میلیمتر)،  $\sigma$  حداکثر تنش کششی (کیلوپاسکال)،  $P$  حداکثر نیرو (کیلو نیوتن)،  $B$  میانگین عرض تیر (میلیمتر)،  $S$  مدول سختی تیر (مگا پاسکال).

آزمایش خستگی تا زمانی که مدول سختی به نصف مقدار اولیه خود برسد، ادامه می‌یابد. بعد از آزمایش عمر خستگی تیرها، عمر خستگی مخلوط با معادله زیر محاسبه گردیده است:

جهت ایجاد یک ترک که برابر است با سطح زیر منحنی بار- تغییر شکل شکست نمونه تعریف می‌گردد. برای محاسبه چگالی انرژی شکست از آزمایش کشش غیر مستقیم، انرژی شکست بر حجم مخلوط تقسیم می‌گردد. چگالی انرژی شکست براساس معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$FE = \frac{\int_0^{\delta_{max}} P(\delta) d\delta}{V} \quad (3)$$

که  $FE$  چگالی انرژی شکست (MPa)،  $P$  بار (N)،  $V$  حجم نمونه ( $mm^3$ )،  $\delta$  تغییر شکل می‌باشد.

### ۲-۳-۷ مدول برجهندگی

آزمایش مدول برجهندگی در دماهای پایین بنحوی مرتبط با ترک خوردگی حرارتی می‌باشد. تحقیقات متعددی نشان داده است که مخلوط‌های سخت تر در دماهای پایین تر بیشتر مستعد ترک خوردگی حرارتی می‌باشند. برای تعیین مدول برجهندگی از استاندارد ۱۹۹۵-۱-۱۳-۲۸۹۱ AS استفاده شده است. ابتدا نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در محفظه دستگاه در دمای  $25^\circ C$  قرار داده شده‌اند. شکل بارگذاری نیمه سینوسی، مدت اعمال بار ۰/۱ ثانیه، زمان استراحت ۰/۹ ثانیه و ضریب پواسون ۰/۳۵ فرض گردیده است. در این آزمایش به ازای هر مخلوط، ۳ نمونه آسفالتی تهیه و روی هر نمونه ۵ پالس تکرار شده است و میانگین نتایج به وسیله دستگاه نمایش داده شده است. مدول برجهندگی براساس معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$M_r = \frac{P(\vartheta + 0.2734)}{\delta t} \quad (4)$$

$M_r$  = مدول برجهندگی (مگا پاسکال)

$P$  = بار تکراری (نیوتن)

$V$  = نسبت پواسن

$t$  = ضخامت نمونه (میلی متر)

$H$  = تغییر شکل افقی برگشت پذیر (میلی متر)

$V$  = تغییر شکل قائم برگشت پذیر (میلی متر)

### ۲-۳-۸ آزمایش تیر خمشی چهار نقطه‌ای خستگی

و آزمایش نقطه نرمی قیر پس از اضافه کردن نانورس در شکل ۱ نشان داده شده است.

طبق نتایج بدست آمده از آزمایش تعیین درجه نفوذ قیر مشاهده می‌شود که با اضافه کردن ۲، ۴ و ۶ درصد نانو رس، کاهش درجه نفوذ مشاهده می‌گردد. اما در آزمایش نقطه نرمی با افزودن ۲، ۴ و ۶ درصد نانورس، افزایش نقطه نرمی نسبت به نمونه شاهد بدست آمده است. در واقع افزودن نانورس سبب سفت تر شدن قیر می‌گردد. شکل ۲ نتایج ویسکوزیته قیر قبل از پیرشدگی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، افزودن نانورس به قیر سبب افزایش ویسکوزیته قیر می‌گردد. افزودن نانورس سبب سخت شدن قیر می‌گردد و در نتیجه ویسکوزیته افزایش می‌یابد. شکل ۳ نتایج ویسکوزیته قیر بعد از پیرشدگی نشان می‌دهد. پیرشدگی قیر سبب سخت شدن بیشتر قیر می‌گردد که در نتیجه ویسکوزیته قیر افزایش می‌یابد.

$$N_f = a\varepsilon^{-b} \quad (8)$$

که  $N_f$  تعداد سیکل بارگذاری تا خستگی،  $\varepsilon$  دامنه کرنش مورد استفاده در آزمایش خستگی،  $a$  و  $b$  ضرایب ثابت می‌باشند. انرژی تلف شده در هر سیکل بارگذاری و انرژی تلف شده تجمعی به ترتیب با استفاده از معادله‌های (۹) و (۱۰) محاسبه می‌شوند:

$$D = \pi \varepsilon \sigma \sin(360f\varphi) \quad (9)$$

که  $D$  انرژی تلف شده ( $J/m^3$ )،  $f$  فرکانس بارگذاری (هرتز)،  $\varphi$  تأخیر زمانی (ثانیه) می‌باشد.

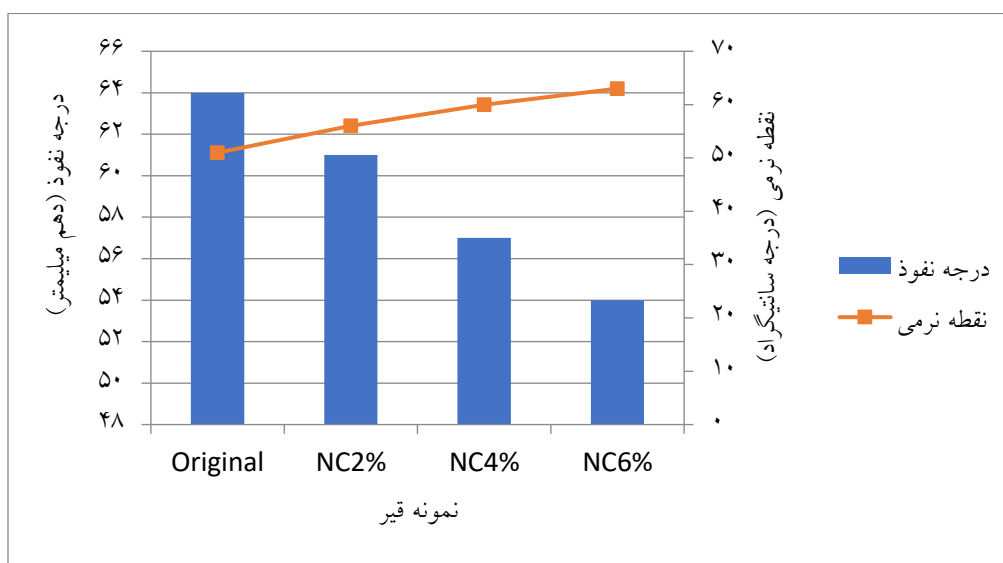
$$W = \sum_{i=1}^{i=n} D_i \quad (10)$$

که  $W$  انرژی شکست تجمعی ( $J/m^3$ )،  $D_i$  انرژی شکست سیکل  $i$  ام.

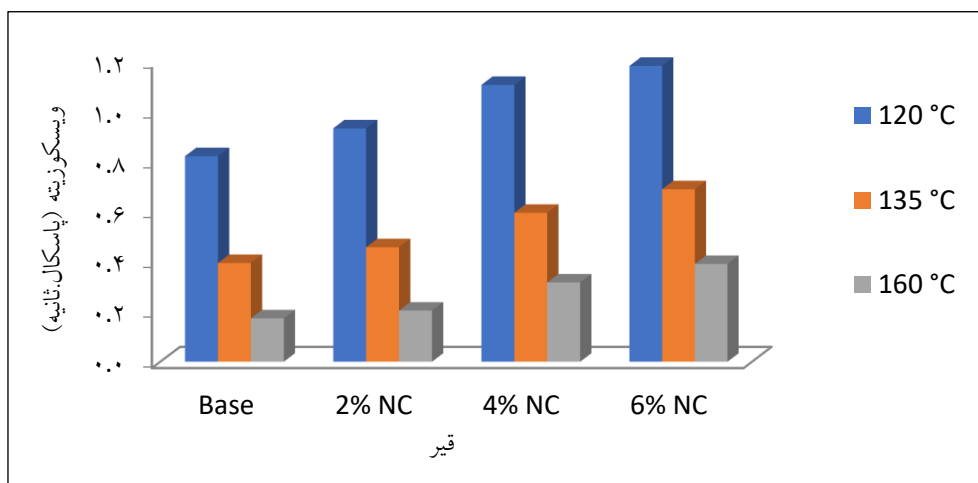
### ۳. نتایج و بحث

#### ۳-۱ نتایج آزمایش درجه نفوذ و نقطه نرمی قیر

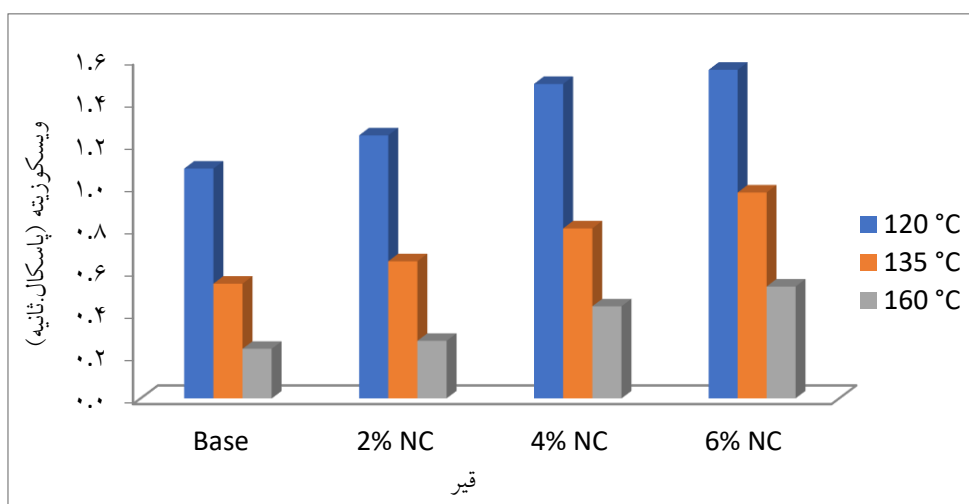
قیر مورد استفاده در این پژوهش از نوع قیر ۶۰-۷۰ بوده که با مواد نانو رس اصلاح گردید. نتایج حاصل از آزمایش درجه نفوذ



شکل ۱. نتایج درجه نفوذ و نقطه نرمی قیر پس از افزودن نانو رس



شکل ۲. نتایج ویسکوزیته قبل از پیرشدگی

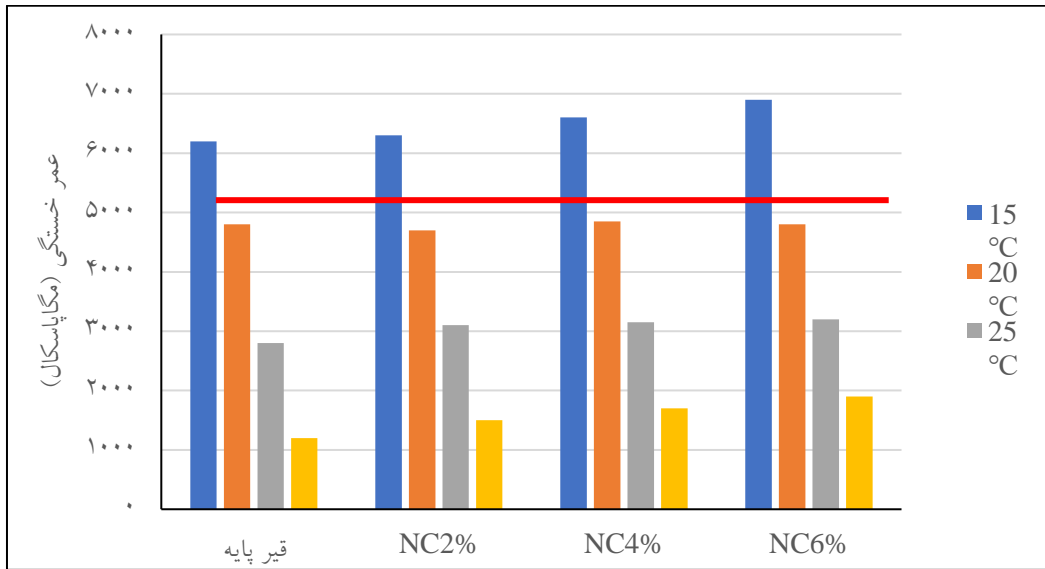


شکل ۳. نتایج ویسکوزیته بعد از پیرشدگی

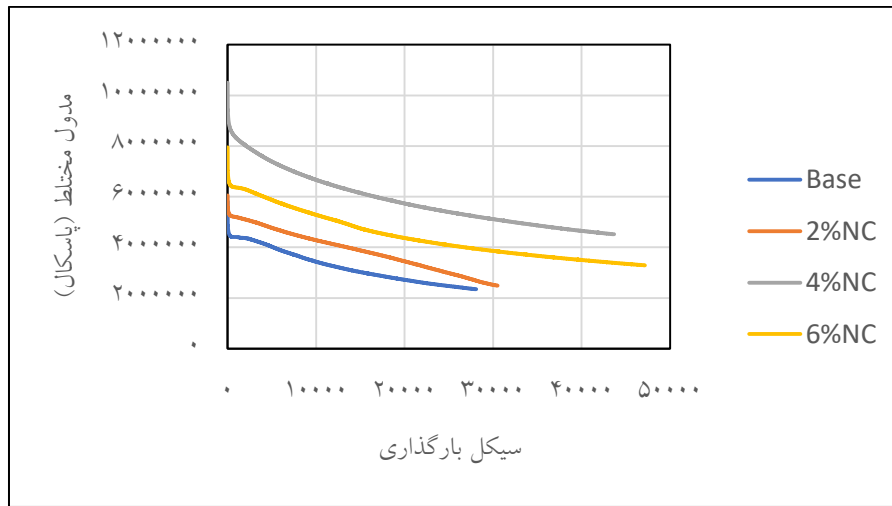
نمونه‌ها این معیار را در دمای ۱۵ درجه سانتیگراد برآورده نکرده- اند. همانطور که قبلاً ذکر شد، چندین مطالعه تحقیقاتی رابطه ضعیفی بین پارامتر خستگی Superpave و عمر خستگی مخلوط آسفالتی گزارش کرده‌اند (Planche et al, 2004; Johnson et al, 2010; Martono et al, 2008; Bahia et al, 2001).

شکل ۵، روند تغییرات مدول مختلط در مقابل چرخه‌های بارگذاری را در آزمایش TS نشان می‌دهد که در کرنش اولیه ۵ درصد برای قیر پایه و برخی از نمونه‌های اصلاح شده انجام شد.

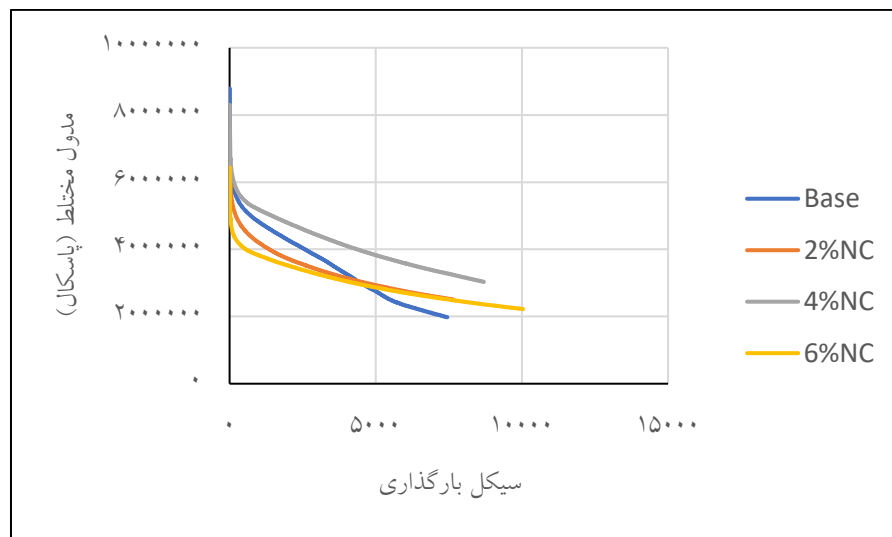
پارامتر  $G. \sin \delta$  برای اهداف مشخصات Superpave برای محدود کردن مقدار کل انرژی تلف شده و در نتیجه به حداقل رساندن ترک ناشی از خستگی انتخاب شد. پارامتر خستگی Superpave برای تمام انواع قیر و دماهای آزمایش تعیین شد. نتایج به دست آمده در شکل ۴ نشان داده شده است. براساس مشخصات Superpave پارامتر خستگی باید کمتر از ۵۰۰۰ کیلو پاسکال باشد. این معیار با خط قرمز افقی نشان داده شده است. مطابق شکل در دمای ۳۰ و ۲۵ و ۲۰ درجه سانتیگراد همه نمونه‌ها این معیار را برآورده کرده‌اند. در مقابل هیچ یک از



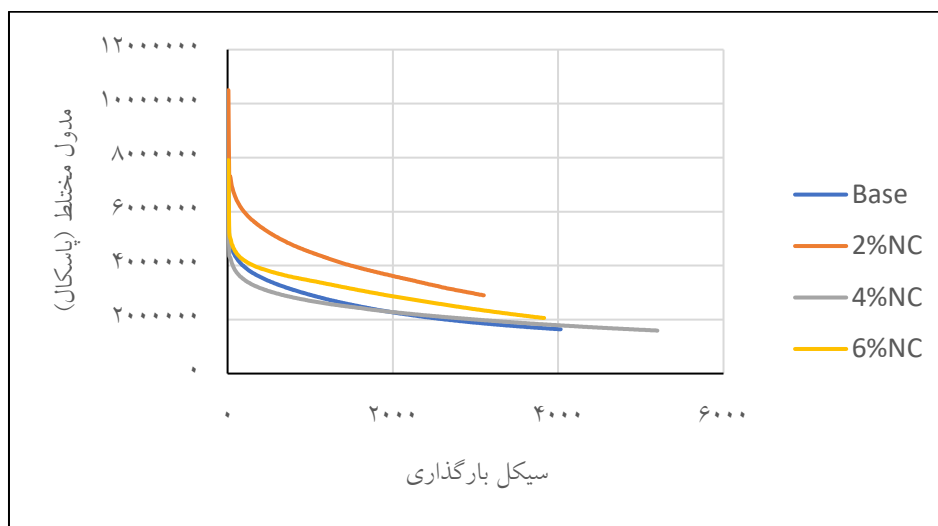
شکل ۴. نتایج عمر خستگی قیرها



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۵. مدول مختلط در برابر سیکل بارگذاری در آزمایش جاروب زمان در کرنش های مختلف: الف) ۲٪ ب) ۳/۵٪ ج) ۵٪

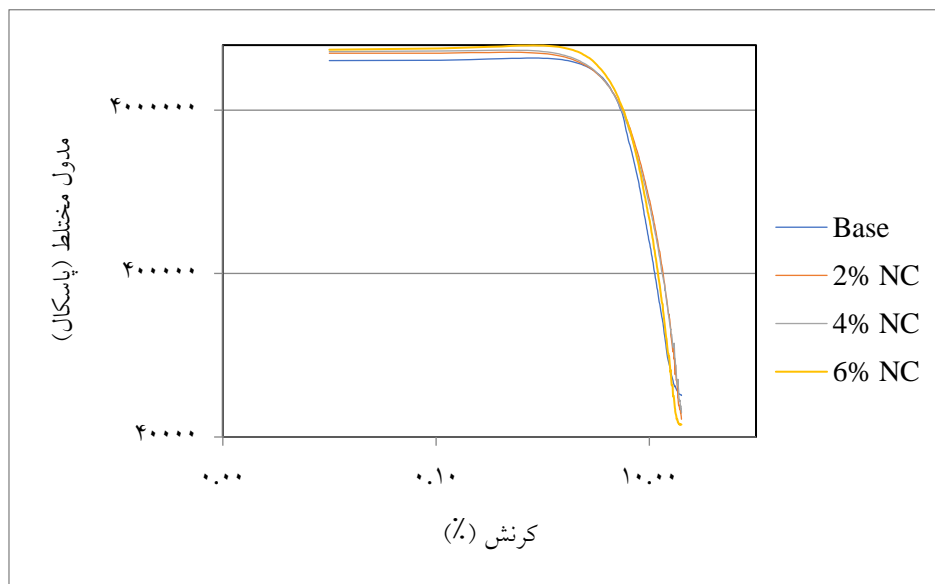
نتایج نشان دهنده کاهش حد LVE با افزایش درصد NC بود. این کاهش برای قیر حاوی ۲، ۴ و ۶ درصد نانورس به ترتیب برابر با ۴۶، ۳۴ و ۵۹ درصد می باشد. در واقع، ۶ درصد نانورس بیشترین کاهش را در حد LVE ایجاد کرد. بین سختی قیر و حد LVE رابطه معنی داری وجود داشت. حد LVE با کاهش درجه نفوذ و افزایش مدول برشی اولیه نمونه مرتبط کاهش یافت. نتایج مشابهی توسط سایر محققان برای قیرهای اصلاح شده حاوی پلیمر SBS و نانولوله های کربنی به دست آمد. (Santagata et al, 2015; Singh et al, 2016)

جدول ۶. حد ناحیه ویسکوالاستیک خطی و مدول برش اولیه برای

قیرهای مختلف مورد مطالعه

نوع قیر	کرنش حد LVE (%)	G0 (مگاپاسکال)
قیر پایه	۲/۰۱	۸/۱۶
۲٪NC	۱/۸۸	۸/۳۲
۴٪NC	۱/۰۹	۹/۵۶
۶٪NC	۰/۸۱	۱۱/۵

نتایج آزمایش جاروب کرنش برای قیر اصلی و اصلاح شده انجام شده در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد و فرکانس ۱۰ هرتز را می توان در شکل ۶ مشاهده کرد. همانطور که مشاهده می شود، منحنی مدول تنش-کرنش از دو قسمت تشکیل شده است. قسمت اول قسمت خطی بود که در آن مقدار مدول برشی تقریباً ثابت و مستقل از سطح کرنش می باشد. در بخش دوم رفتار غیرخطی می باشد. با توجه به نوع قیر، سرعت تغییرات مدول برشی متغیر است. نقطه ای که این دو قسمت از هم جدا می شوند به عنوان نقطه انتقال از ناحیه ویسکوالاستیک خطی (LVE) <sup>۱۹</sup> به ناحیه ویسکوالاستیک غیرخطی (NLVE) <sup>۲۰</sup> در نظر گرفته می شود. جدول ۶، حد ناحیه LVE و مدول برش اولیه (G0) را برای مخلوط های مختلف قیر نشان می دهد. همانطور که در ادبیات تعریف شده است، حد منطقه LVE با در نظر گرفتن سطح کرنشی که در آن مدول برشی به میزان ۵٪ در مقایسه با مقدار مدول برشی اولیه کاهش می یابد، تعیین شد.



شکل ۶. نتایج مدول مختلط نمونه‌ها

رس در ساختار نانورس که به طور تصادفی در قیر پراکنده شده- اند نقش عنصر تقویت کننده را ایفا می‌کنند. این ذرات رس به صورت یک سیستم فتر مانند به یکدیگر متصل می‌شوند. این زنجیره مولکولی منعطف در طول پیشرفت ترک در آزمایش خستگی کشیده شد و باعث جذب انرژی تغییر شکل و در نتیجه عمر خستگی طولانی‌تر شد. نتایج مشابهی توسط سایر محققین در این موضوع بدست آمده است ( Shafabakhsh et al, 2017; Jahromi et al, 2017; Azarhoosh et al, 2017).

جدول ۸ زاویه تماس قیرهای حاصل از آزمایش افت سسی و انرژی چسبندگی را نشان می‌دهد که دو برابر کل  $SFE$  بدست آمده از معادله ۱۱ است.

$$\Gamma = \Gamma^{LW} + 2\sqrt{\Gamma^+ \Gamma^-} \quad (11)$$

زاویه تماس بین قیر و یک حلال با پارامترهای شناخته شده  $SFE$  نشانه ای از ترشوندگی قیر است. براساس جدول ۷، مشهود است که با افزودن نانو خاک رس و نانو آلومینا به قیر، زوایای تماس برای هر سه حلال کاهش می‌یابد که ترشوندگی قیر را بهبود می‌بخشد. انرژی چسبندگی قیرهای  $NC6\%$  و  $NA6\%$  به ترتیب  $33.82$  و  $34.92 \text{ ergs/cm}^2$  بود که بزرگتر از قیر پایه بود. این نشان دهنده افزایش مقاومت قیرهای اصلاح

فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال شانزدهم / شماره سوم (۶۴) / بهار ۱۴۰۴

### ۲-۳ نتایج عمر خستگی

یک معیار مرسوم برای تعیین عمر خستگی قیر در روش کرنش ثابت، کاهش  $50\%$  درصدی مدول برشی اولیه است. همانطور که قبلاً ذکر شد، این معیار عمر خستگی به عنوان  $Nf$  تعریف شده است. با توجه به تعریف  $Nf$ ، داده‌های عمر خستگی در جدول ۷ ارائه شده است.

همانطور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، در مقایسه با قیر پایه، عمر خستگی با افزودن نانو رس به قیر افزایش یافت. این عمر خستگی طولانی مدت با افزایش سطح نانو مواد افزایش یافته است، به طوری که  $6\% NC$  بالاترین عمر خستگی را داشت. افزودنی‌های مورد مطالعه موادی در مقیاس نانو با سطح ویژه بالا هستند. این خاصیت اتم‌های بیشتری را در سراسر سطح نانو مواد تامین می‌کند و تمایل به واکنش با مواد دیگر مانند قیر همراه با چسبندگی مناسب را افزایش می‌دهد. افزودن  $2\% NC$  به قیر پایه در سطوح کرنش ۲،  $3/5$  و  $5\%$  منجر به طولانی شدن عمر خستگی از  $1850$ ،  $5200$  و  $23650$  سیکل به  $2150$ ،  $5530$  و  $27480$  سیکل شد. این مقادیر به ترتیب با افزایش  $16$ ،  $6$  و  $16$  درصدی عمر خستگی مطابقت دارند. برای  $6\% NC$  و در همان سطوح کرنش، به ترتیب  $56$ ،  $66$  و  $79\%$  افزایش عمر خستگی نسبت به قیر پایه مشاهده شد. به دلیل مورفولوژی خاص، ذرات

## مطالعه آزمایشگاهی رفتار خستگی قیر و مخلوط آسفالتی حاوی نانوس به روش های جاروب- زمان، کرنش و تیر خمشی

شده در برابر گسیختگی چسبندگی است. براساس ادبیات، بهبود رفتار چسبندگی در قیرهای اصلاح شده حاوی نانو افزودنی ها، عمر خستگی طولانی مدتی را در این نوع قیرها ایجاد می کند. افزایش چسبندگی در قیرهای اصلاح شده نشان دهنده افزایش یکپارچگی قیر و مولکول های نانو افزودنی است که مقاومت قیر اصلاح شده را در برابر اثرات مضر بارگذاری های مکرر افزایش می دهد.

در ابتدا فرض بر این بود که  $DE$  کل در هر چرخه باعث خرابی و آسیب به مواد تحت بارگذاری می شود. مطالعات بیشتر نشان داد که کل  $DE$  در هر سیکل بارگذاری باعث خرابی نمی شود و بخشی از این انرژی به شکل انرژی حرارتی و تغییر شکل پلاستیک تلف می شود. برای این منظور، مفهوم نسبت تغییرات انرژی تلف شده ( $RDEC$ )<sup>۳۳</sup> برای بررسی رفتار خستگی مخلوط های آسفالتی ارائه شد. این پارامتر را می توان با معادله ارائه شده محاسبه کرد (۱۲) (Shen et al, 2007; Shen et al, 2006).

$$RDEC = \frac{DE_{n+1} - DE_n}{DE_n} \quad (12)$$

که در آن:  $RDEC$  نسبت تغییرات انرژی تلف شده در هر چرخه است،  $DE_n$  نشان دهنده انرژی تلف شده در چرخه  $n$  و  $DE_{n+1}$  نشان دهنده انرژی تلف شده در چرخه  $n+1$  است. در شکل ۸ می توان تغییرات  $RDEC$  در برابر چرخه بارگذاری را برای نمونه  $NC6\%$  در سطح کرنش  $2\%$  مشاهده کرد. همانطور که در این شکل مشاهده می شود، منحنی رفتارهای متفاوتی را در مراحل اول و دوم نشان می دهد. نکته قابل توجه در این شکل قسمت دوم است که شامل یک منطقه تقریباً هموار است که به مرحله فلات معروف است. در طی این مرحله درصد ثابتی از انرژی وارد شده به شکست نمونه تبدیل می شود. در مرحله دوم مقدار فلات ( $PV$ )<sup>۳۴</sup> همانطور که توسط معادله ارائه شده محاسبه می شود. (۱۳) (Shen et al, 2007).

$$PV = \frac{1 - (1 + \frac{100}{N_f})^k}{100} \quad (13)$$

که در آن  $PV$  مقدار فلات است که با منحنی  $RDEC$  در مرحله دوم این منحنی همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است محاسبه می شود،  $N$  نشان دهنده عمر خستگی قیر براساس  $50\%$  کاهش در مدول برشی اولیه است و  $k$  نشان دهنده شیب توان منحنی سیکل بارگذاری به انرژی تلف شده می باشد.

جدول ۷. عمر خستگی نمونه ها در آزمایش جاروب زمان

نوع قیر	سطوح کرنش		
	۵٪	۳.۵۰٪	۲٪
قیر اصلی	۱۸۵۰	۵۲۰۰	۲۳۶۵۰
۲٪NC	۲۱۵۰	۵۵۳۰	۲۷۴۸۰
۴٪NC	۲۷۷۰	۷۶۸۰	۳۹۶۹۰
۶٪NC	۲۹۰۰	۸۶۳۰	۴۲۴۱۰
۲٪NA	۲۱۶۰	۸۱۵۰	۳۵۷۸۰
۴٪NA	۳۱۱۰	۹۶۲۰	۴۰۹۱۰
۶٪NA	۳۲۷۰	۹۸۷۰	۴۵۴۲۰

جدول ۸. زاویه تماسی و انرژی چسبندگی قیر

نوع قیر	قیر پایه	۲٪ NC	۴٪NC	۶٪NC
زاویه تماسی	آب	۱۰۴.۷۲	۱۰۳.۶۹	۱۰۲.۶۶
دیودومتان	۸۸.۰۸	۸۷.۰۲	۸۵.۹۶	
اتیلن گلیکول	۷۷.۲۵	۷۶.۲۳	۷۵.۱۹	
انرژی چسبندگی	۲۹.۴۲	۳۰.۸۸	۳۲.۳۴	۳۳.۸۲

از آنجایی که قیر دارای رفتار ویسکوالاستیک است، منحنی بارگذاری مطابق با منحنی باربرداری مطابق با یک ماده الاستیک نیست. به این ترتیب بخشی از انرژی تلف می شود که باعث ایجاد خرابی در ماده می شود. شکل ۷ نمونه ای از منحنی انرژی اتلاف شده ( $DE$ )<sup>۳۳</sup> را بر حسب چرخه بارگذاری برای قیر پایه در سطح کرنش  $5\%$  نشان می دهد. نتایج نشان داد که یک رابطه توانی بین  $DE$  و سیکل بارگذاری وجود دارد.

در تست خستگی کنترل شده با کرنش، تنش اعمالی با افزایش سیکل‌های بارگذاری کاهش می‌یابد. بنابراین، برای رسیدن به نقطه شکست واقعی زمان بسیار زیادی طول می‌کشد. براساس تحقیقات قبلی، قیرها تا ۹۰ برابر بیشتر از مخلوط‌های آسفالتی در برابر کرنش مقاومت می‌کنند. بنابراین، معیارهای متعددی تعریف شده‌اند که

می‌توانند عمر خستگی قیر را در مدت زمان آزمایش بسیار پایین‌تر تخمین بزنند. عمر خستگی براساس کاهش ۵۰ درصدی مدول برشی اولیه یک روش سنتی برای تخمین عمر خستگی قیر است.

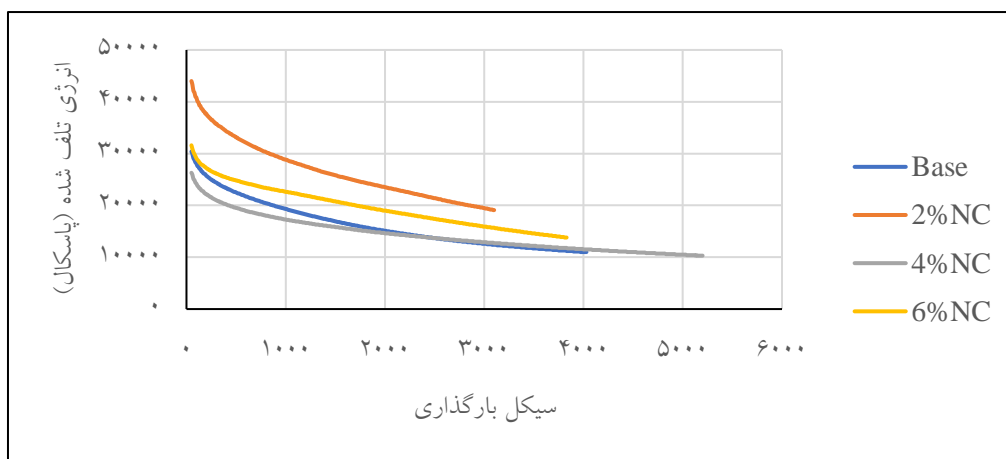
یکی دیگر از معیارهای ارائه شده توسط Bonetti و همکاران، پارامتر NP20 است.

معادله (۱۴) پارامتر نسبت انرژی تلف شده ( $DER^{25}$ ) را ارائه می‌دهد که کاربردهای متعددی در تحلیل رفتار خستگی قیرها و مخلوط‌های آسفالتی داشت (Shen et al, 2006).

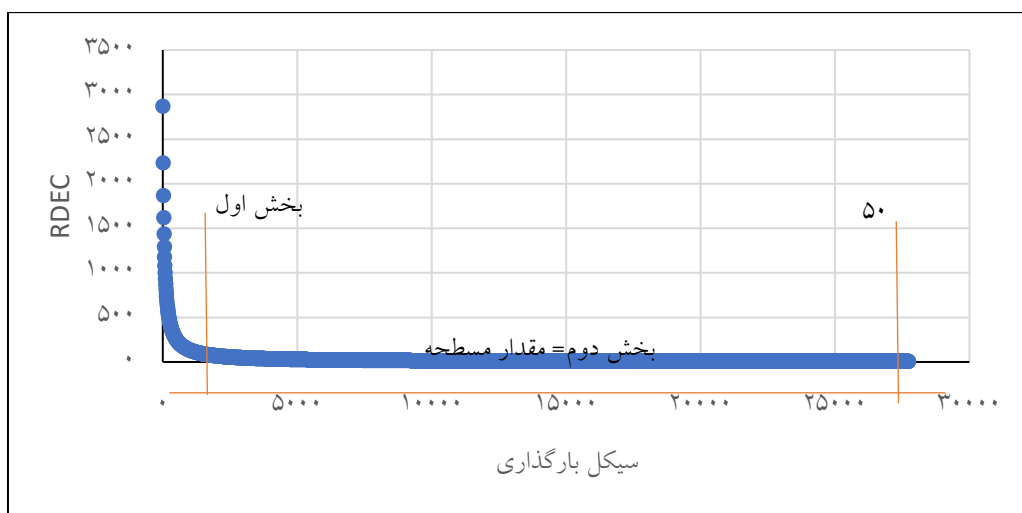
$$DER = \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{W_n} \quad (14)$$

که در آن  $W_i$  انرژی تلف شده در چرخه  $i$  و  $W_n$  نشان دهنده انرژی تلف شده در چرخه  $n$  (Pa) است.

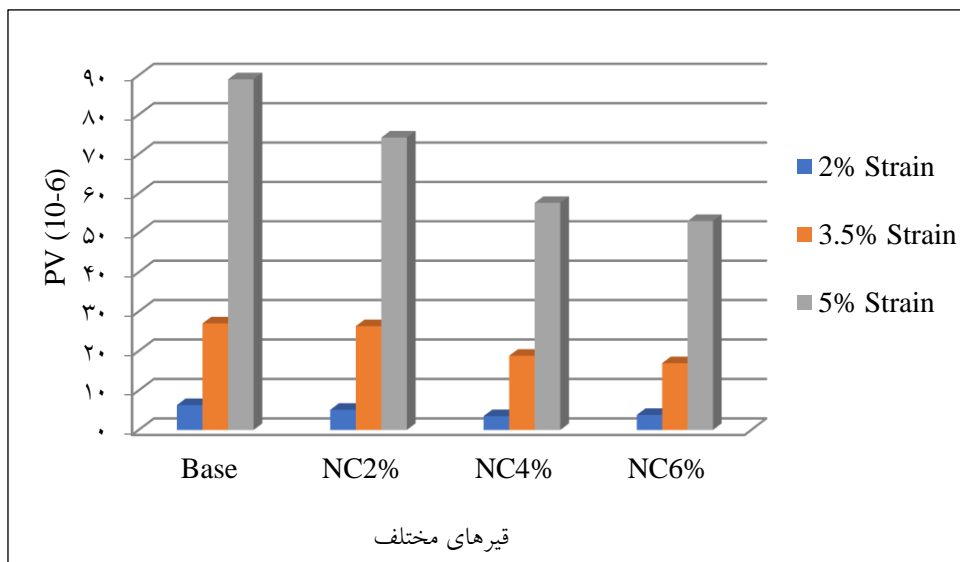
در واقع، مقدار DER مجموع انرژی تلف شده از چرخه بار ۱ تا  $n$  بر انرژی تلف شده در چرخه بار  $n$  است. شکل ۱۰ نمونه‌ای از منحنی DER را برای نمونه NC ۲٪ در کرنش اولیه ۲٪ نشان می‌دهد.



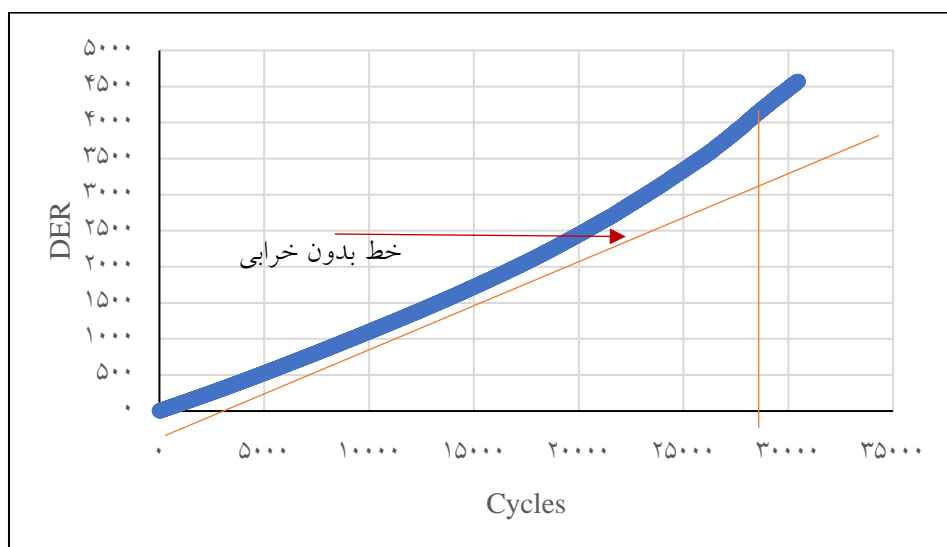
شکل ۷. نمودار انرژی تلف شده در برابر سیکل بارگذاری برای قیرهای مختلف



شکل ۸. منحنی نسبت تغییرات در انرژی تلف شده برای نمونه ۲٪ نانورس در کرنش ۲٪



شکل ۹. مقادیر مسطحه برای قیرهای اصلاح شده مختلف



شکل ۱۰. منحنی DER را برای نمونه NC ۲٪ در کرنش اولیه ۲٪

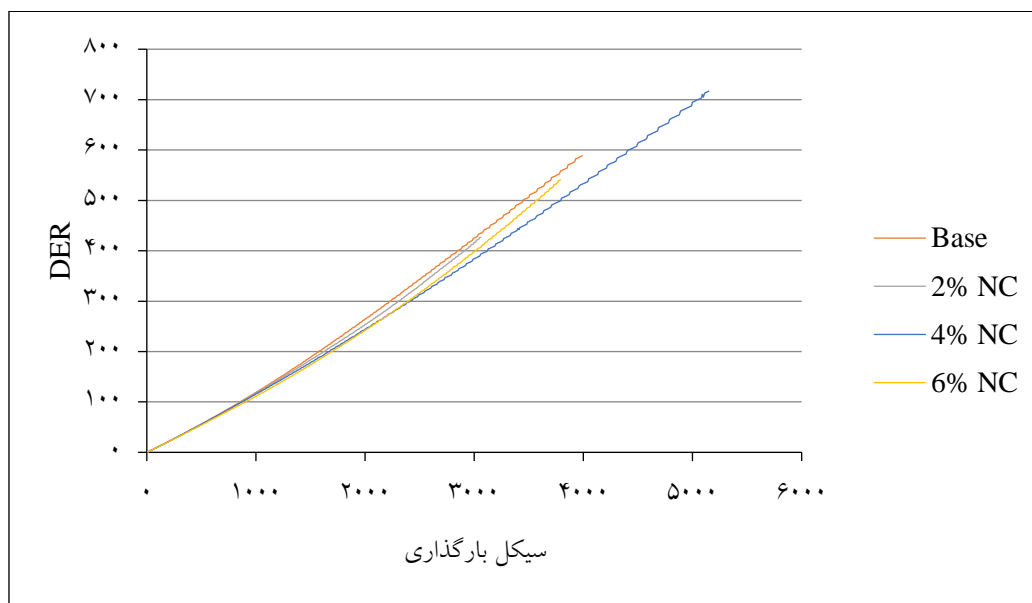
نمایانگر قسمت سالم است، منحنی‌ها تقریباً با هم همپوشانی دارند. با افزایش چرخه‌های بارگذاری و پیشرفت آسیب در نمونه‌های قیر، منحنی‌های DER از خط سالم منحرف شده و تا حد زیادی می‌توان آنها را از یکدیگر متمایز کرد.

شکل ۱۲ بین عمر خستگی قیرهای مختلف با در نظر گرفتن تعاریف  $N_f$  و  $N_{p20}$  مقایسه می‌کند. همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، عمر خستگی تعریف شده توسط همه معیارها با ترکیب نانو افزودنی‌ها افزایش یافت. با این حال، برای تمام انواع قیر و سطوح کرنش، عمر خستگی تعیین شده با استفاده از

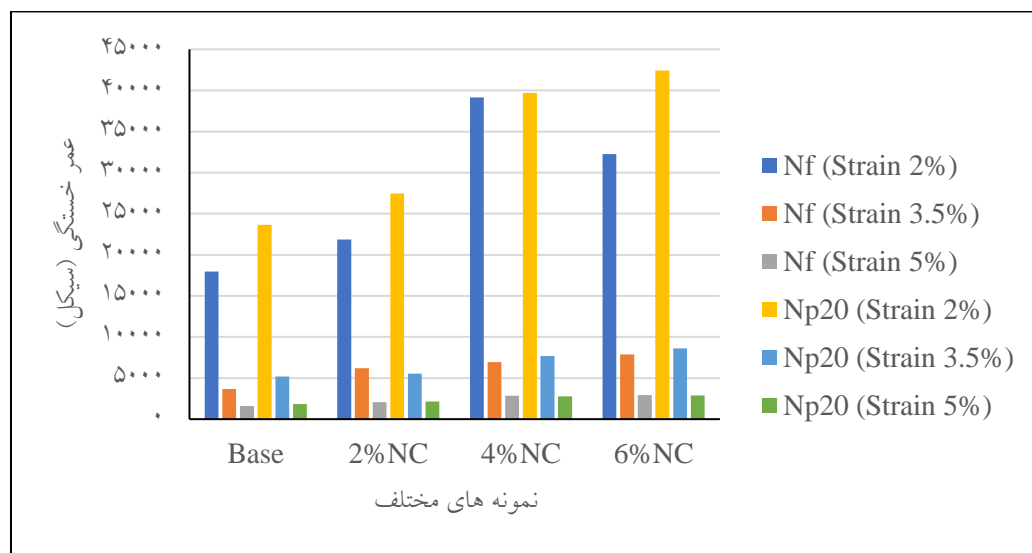
مطابق شکل ۱۱، در ابتدای منحنی DER، مقدار انرژی تلف شده با افزایش چرخه بار ثابت می‌ماند که نشان دهنده عدم آسیب در نمونه قیر است. پس از یک چرخه بارگذاری قابل توجه، منحنی از خط سالم منحرف می‌شود که نشان دهنده شروع آسیب در نمونه است. NP20 به تعداد چرخه‌های بارگذاری اشاره دارد که در آن انحراف منحنی DER از خط آسیب دیده به ۲۰٪ می‌رسد. شکل ۱۱ منحنی چرخه بارگذاری DER را برای قیرهای مختلف مورد مطالعه در سطح کرنش اولیه ۲٪ نشان می‌دهد. براساس شکل و توضیحات قبلی، در ابتدای منحنی‌ها که

al, 2016; Bonnetti et al, 2002; Ricardi et al, (2017).

روش انرژی تلف شده (Np20) کمتر از روش مرسوم کاهش ۵۰ درصدی مدول برشی اولیه (Nf) بود. نتایج مشابهی توسط سایر محققین در این موضوع بدست آمده است (Wang et



شکل ۱۱. نسبت انرژی تلف شده برای نمونه‌های مختلف



شکل ۱۲. مقایسه عمر خستگی نمونه‌های مختلف به روش Nf و Np20

نانورس نسبت داد. این موضوع سبب افزایش خواص چسبندگی قیر و بهبود قفل و بست سنگدانه‌ها به یکدیگر می‌گردند و باعث بهبود خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی می‌گردند. اضافه کردن نانورس به قیر سبب ایجاد شبکه دوبعدی در قیر

### ۳-۳ آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

شکل ۱۳ نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، افزایش نانورس سبب افزایش مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی می‌شود. این افزایش مقاومت کششی را می‌توان به ریزی و سطح ویژه بالایی مواد

## مطالعه آزمایشگاهی رفتار خستگی قیر و مخلوط آسفالتی حاوی نانورس به روش‌های جاروب- زمان، کرنش و تیر خمشی

درجه اسیدیته باید به‌عنوان نسبت جزء اسیدی ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ) به قلیایی (عمدتاً  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  و  $\text{K}_2\text{O}$ ) بیان شود. میل ترکیبی کلی سنگدانه‌ها برای قیر با درجه قلیائیت (نسبت  $\text{CaO/SiO}_2$ ) ارزیابی می‌شود. بنابراین، طبق جدول ۳، نسبت  $\text{CaO/SiO}_2$  بالاتر برای سنگدانه‌های آهکی ( $2,493$ ) نسبت به سنگدانه‌های سیلیسی ( $0,209$ ) سنگ آهکی را به‌عنوان یک سنگدانه قلیایی مشخص می‌کند و بنابراین، برای تضمین چسبندگی لازم با قیرهای ضعیف اسیدی مناسب است. در صورت عدم وجود رطوبت کربوکسیلیک اسیدهای موجود در قیر تمایل به ایجاد پیوند با اکسیدهای فلزی (مانند  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) در سطوح سنگدانه سیلیسی دارند که سپس به راحتی با آب از بین می‌روند. بنابراین، مقادیر بیشتر اکسیدهایی مانند  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  و  $\text{Al}_2\text{O}_3$  در سنگدانه‌های سیلیسی می‌تواند به احتمال بیشتری برای حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی این مواد منجر شود. تحقیقات گذشته نتایج مشابهی را در استفاده از مصالح آهکی و سیلیسی و هم چنین افزودنی نانورس نشان داده اند (Omar et al, 2021; Morshed et al, 2021; Ameli et al, 2020).

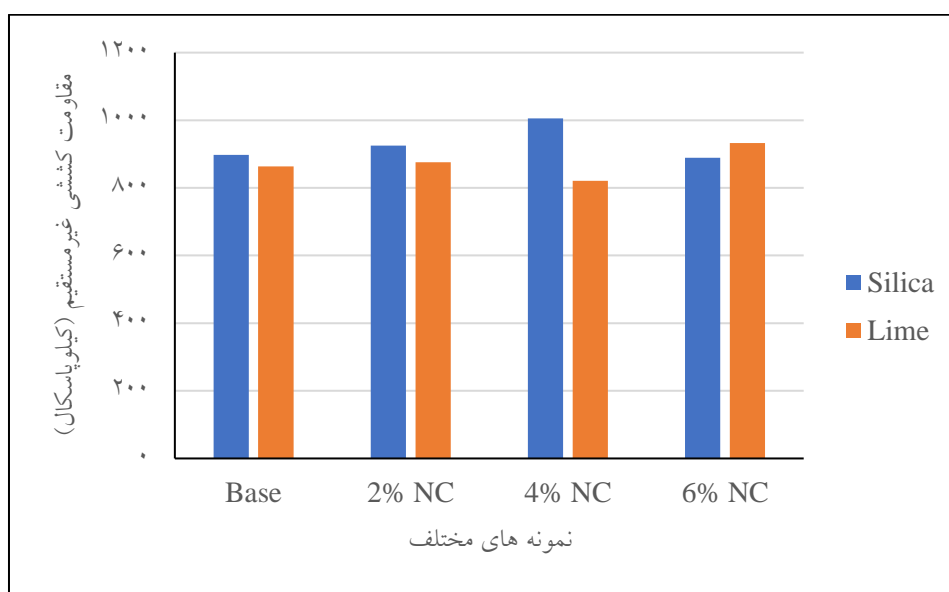
همچنین شکل ۱۴ نتایج مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی نانورس را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد در مخلوط‌های آسفالتی ساخت شده با مصالح سیلیسی، افزودن ۲٪ نانورس سبب افزایش مدول برجهندگی نمونه‌ها می‌گردد. با افزایش درصد بیشتر نانورس، مقادیر مدول برجهندگی کاهش می‌یابد. هم چنین در مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با مصالح آهکی، با افزایش نانورس تا ۴٪ مقادیر مدول برجهندگی نمونه‌ها کاهش می‌یابد و با اضافه نمودن ۶٪ نانورس، مقادیر مدول برجهندگی افزایش می‌یابد.

می‌گردد. صفحات نانورس در بین ساختار پلیمری قیر جای می‌گیرد و با تقویت شبکه قیر مقاومت قیر را افزایش می‌دهد. ساختار مورفولوژی صفحه رس در ساختار نانورس که به صورت تصادفی در محیط قیر پخش می‌شوند، سبب تسلیح آن می‌گردند. این ذرات رس به صورت فنر به یکدیگر اتصال پیدا کرده و زنجیره مولکولی انعطاف پذیری تشکیل می‌دهند که سبب جذب انرژی تغییر شکل و در نتیجه افزایش مقاومت کششی می‌گردند.

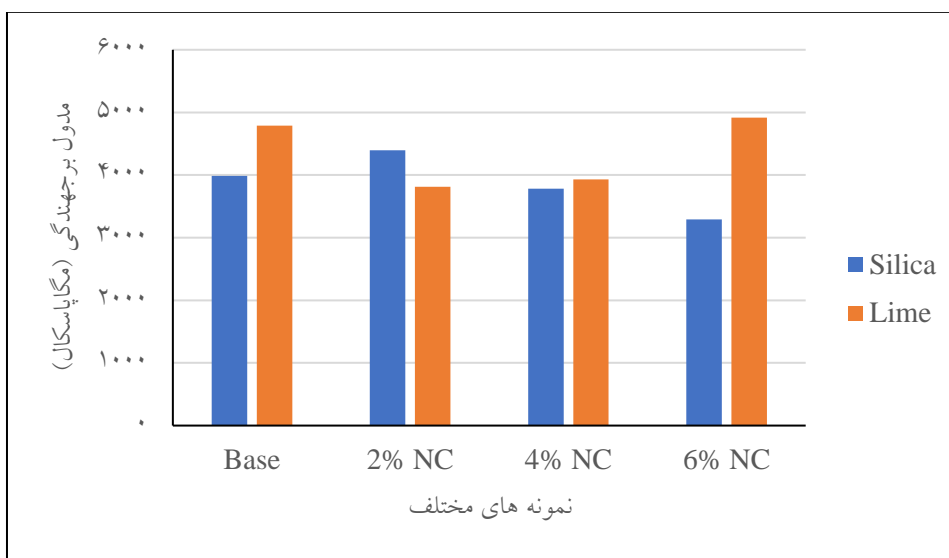
با توجه به نتایج مقاومت کششی نمونه‌های حاوی مصالح سیلیسی کمتر از مصالح آهکی می‌باشد.

بسیاری از تحقیقات نقش خصوصیات شیمیایی، کانی‌شناسی و مورفولوژی سنگدانه‌ها را بر خرابی‌های روسازی از جمله آسیب رطوبتی ناشی از کنده شدن سنگدانه‌ها تایید می‌کنند. نوع سنگدانه بر روی انرژی سطحی و واکنش‌های شیمیایی و در نتیجه موقعیت و مقدار پیوند یون فلز تاثیر می‌گذارد (Jamieson et al. 1995, Hefer and little 2005).

مفاهیم پیوند شیمیایی به‌عنوان درجه اسیدی بیان می‌شود و نشان می‌دهد که پیوند بین دو فاز اسیدی و قلیایی قوی‌تر از پیوند دو اسید یا دو قلیایی است. بر این اساس، هر چه تفاوت درجه اسیدیته بیشتر باشد، پیوندهای بین دو فاز قوی‌تر می‌شود. حتی اگر قیر خنثی یا دارای گروه‌های اسیدی یا قلیایی باشد، در اکثر مطالعات به‌عنوان یک فاز اسیدی در نظر گرفته می‌شود، زیرا دارای یون هیدرونیوم متراکم است و بنابراین pH آن کمتر از ۷ در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، سنگدانه‌های قلیایی باید پیوند قوی‌تری با قیر داشته باشند. با فرض اینکه pH آب ۷ و قیر کمتر از ۷ باشد، سنگدانه‌های اسیدی آبدوست در نظر گرفته می‌شوند و آب می‌تواند قیر را از سطح سنگدانه پاک کند. اکثر سنگدانه‌ها دارای هر دو ویژگی اسیدی و قلیایی هستند، بنابراین



شکل ۱۳. نتایج مقاومت کششی نمونه‌های مختلف



شکل ۱۴. نتایج مدول برجهنگی نمونه‌های مختلف

### ۳-۴ آزمایش خستگی مخلوط آسفالتی

ترک‌های ناشی از خرابی خستگی یکی از رایج‌ترین خرابی‌ها در روسازی‌های آسفالتی هستند. محققین روش‌های مختلفی برای ارزیابی عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی ارائه کرده‌اند. یکی از مهم‌ترین خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی که در طراحی روسازی انعطاف‌پذیر مورد استفاده قرار می‌گیرد، مقاومت آن در برابر پدیده خستگی می‌باشد. در این تحقیق معیار خرابی خستگی

براساس معیار رایج کاهش ۵۰ درصدی در مدول سفتی اولیه می‌باشد.

در شکل ۱۵ تغییرات مدول سفتی نسبت به سیکل‌های بارگذاری در کرنش ۸۰۰ میکروکرنش برای مخلوط آسفالتی قابل مشاهده می‌باشد.

مطابق شکل ۱۵، نمودار مدول سفتی به سیکل بارگذاری از سه بخش تشکیل شده است. بخش اول که در آن نرخ افت مدول سفتی زیاد می‌باشد، سپس نرخ افت سفتی کاهش می‌یابد. این

## مطالعه آزمایشگاهی رفتار خستگی قیر و مخلوط آسفالتی حاوی نانورس به روش های جاروب- زمان، کرنش و تیر خمشی

کرده و زنجیره مولکولی انعطاف پذیری تشکیل می دهند که در هنگام پخش ترک در تست خستگی، قابلیت کششی داشته و سبب جذب انرژی تغییر شکل و در نتیجه افزایش عمر خستگی می گردند.

افزودن ۳ و ۶ درصد نانورس سبب افزایش ۲۹ و ۵۸ درصدی مخلوط های این نوع مصالح در دمای ۱۵ درجه و ۲۷ و ۶۰ درصدی در دمای ۲۵ درجه نسبت به نمونه های شاهد می باشند. این خود نشان دهنده بهبود عملکرد مخلوط های حاوی نانورس در برابر سیکل های بارگذاری در تست خمشی است. نکته جالب آنکه با افزایش دمای در دستگاه از ۱۵ به ۲۵ درجه سانتیگراد، عمر خستگی تمامی مخلوط های آسفالتی افزایش می یابد. این را می توان به نرم تر شدن مخلوط در دماهای بالاتر نسبت داد که سبب آن می شود که در برابر سیکل های بارگذاری مقاومت بیشتری نمایند.

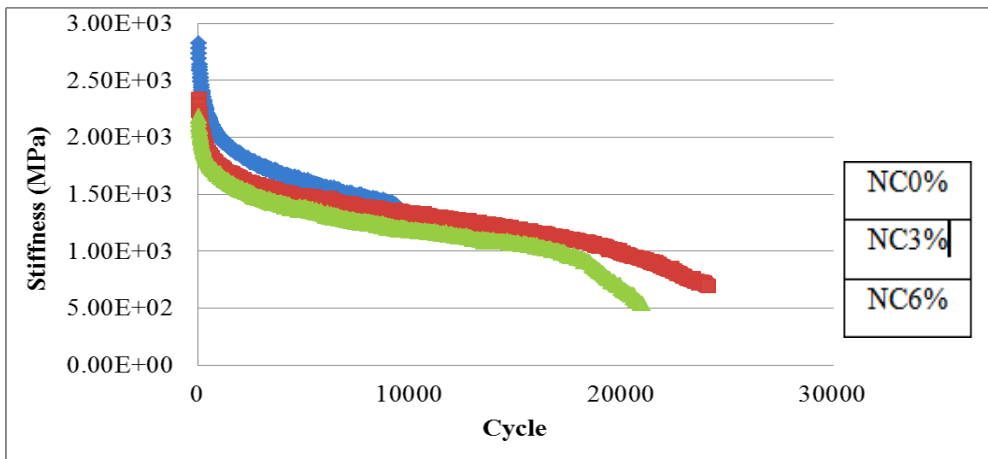
در شکل ۱۷ مقادیر مختلف عمر خستگی قیر با مقادیر مختلف نانورس در سطح کرنش ۶۰۰ قابل مشاهده می شود. همان گونه که از شکل ۱۷ قابل مشاهده است، افزایش نانورس سبب افزایش عمر خستگی مخلوط های آسفالتی در آزمایش تیرچه خمشی می گردد. افزودن ۳ و ۶ درصد نانورس سبب افزایش ۳۷ و ۷۶ درصدی مخلوط های این نوع مصالح در دمای ۱۵ درجه و ۳۴ و ۵۸ درصدی در دمای ۲۵ درجه نسبت به نمونه های شاهد می باشند. این خود نشان دهنده بهبود عملکرد مخلوط های حاوی نانورس در برابر سیکل های بارگذاری در تست خمشی است. در این سطح کرنش نیز با افزایش دمای در دستگاه از ۱۵ به ۲۵ درجه سانتیگراد، عمر خستگی تمامی مخلوط های آسفالتی افزایش می یابد.

بخش نشان دهنده تغییر شکل ترک های ریز در آسفالت و به هم پیوستن این ریزترک ها به یکدیگر می باشد. در بخش سوم که مجددا نرخ کاهش مدول سفتی افزایش یافته و در آن نرخ رشد ترک ها تسریع می گردد. در انتهای فاز سوم شکست کامل نمونه اتفاق می افتد.

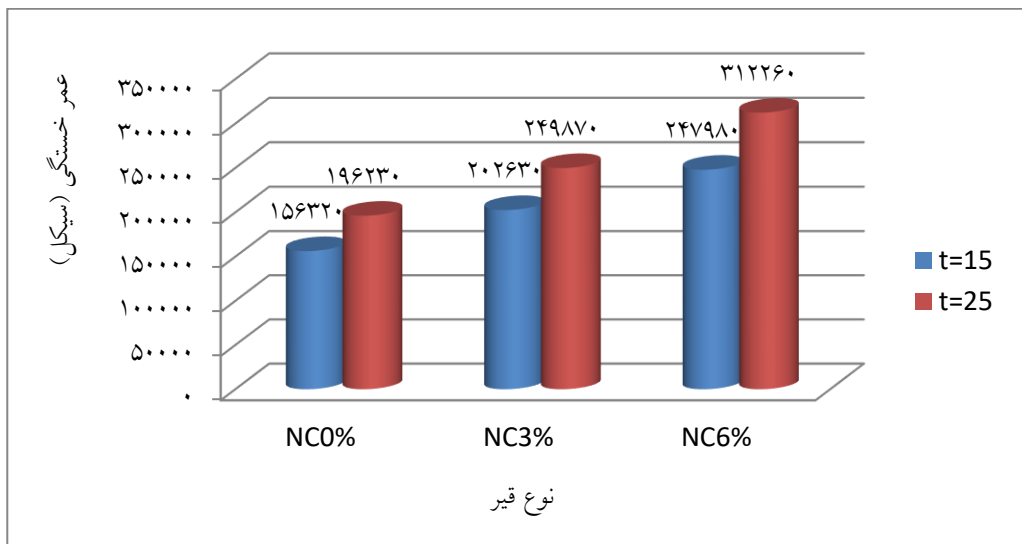
به منظور بررسی عمر خستگی مخلوط های آسفالتی مورد مطالعه و اثر نانورس بر آنها از آزمایش خرابی خستگی چهار نقطه ای استفاده گردید. تست ها در دو دمای ۱۵ و ۲۵ درجه سانتیگراد و فرکانس بار گذاری ۱۰ هرتز و سطوح مورد مطالعه در این تحقیق ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میکروکرنش می باشد. در شکل ۱۶ مقادیر مختلف عمر خستگی قیر با مقادیر مختلف نانورس در سطح کرنش ۴۰۰ قابل مشاهده می باشد.

همانگونه که از شکل ۱۶ قابل مشاهده است، افزایش نانورس سبب افزایش عمر خستگی مخلوط های آسفالتی در آزمایش خستگی چهار نقطه ای می شود. نانومواد به دلیل ریزی و سطح ویژه بالایی که دارند، باعث افزایش خواص چسبندگی قیر و بهبود قفل و بست سنگدانه ها به یکدیگر می گردند و باعث بهبود خصوصیات مکانیکی مخلوط های آسفالتی می گردند. افزایش عمر خستگی مخلوط های آسفالتی اصلاح شده با نانورس را می توان به علت ایجاد شبکه دو بعدی دانست. صفحات نانورس با قرار گرفتن در میان ساختار پلیمری قیر، باعث تقویت شبکه قیر گشته و تا اندازه ای مقاومت قیر در برابر گسترش ترک را افزایش می دهد.

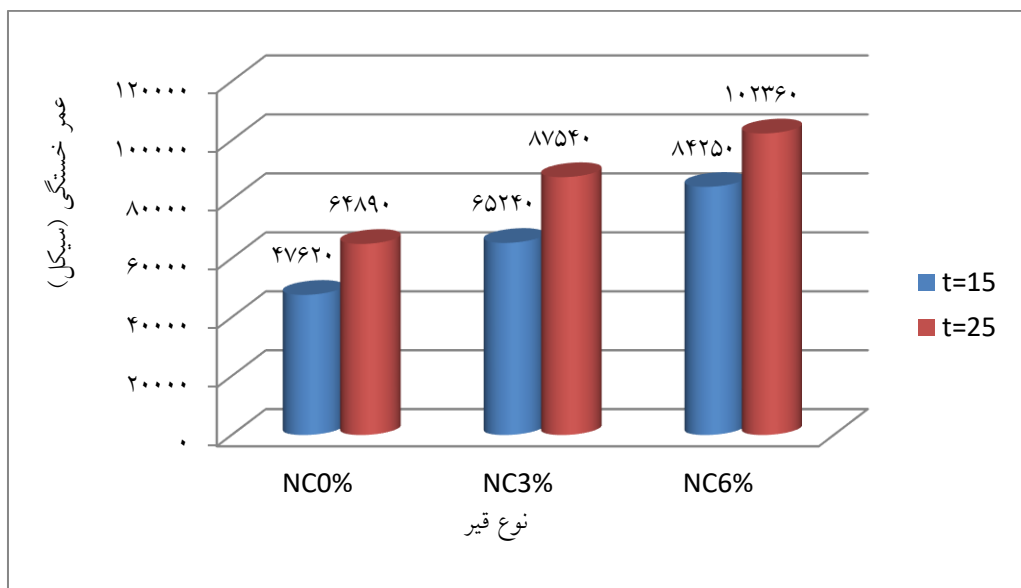
ساختار مورفولوژی صفحه رس در ساختار نانورس که به صورت تصادفی در محیط قیر پخش می شوند، سبب تسلیح آن می گردند. این ذرات رس به صورت فشرده به یکدیگر اتصال پیدا



شکل ۱۵. نتایج مدول سفتی به سیکل بارگذاری در کرنش ۸۰۰ میکروکرنش در دمای ۱۵ درجه سانتیگراد



شکل ۱۶. عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی در سطح کرنش ۴۰۰ میکروکرنش

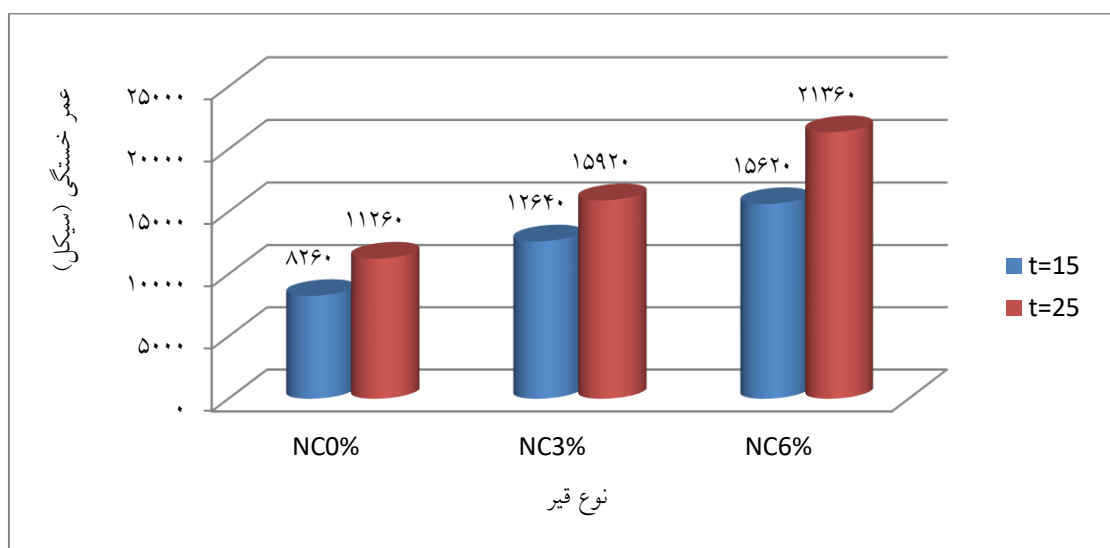


شکل ۱۷. عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی در سطح کرنش ۶۰۰ میکروکرنش

## مطالعه آزمایشگاهی رفتار خستگی قیر و مخلوط آسفالتی حاوی نانورس به روش های جاروب- زمان، کرنش و تیر خمشی

نکته حائز اهمیت در مشاهده شکل های ۱۶ تا ۱۸، کاهش عمر خستگی مخلوط های آسفالتی در تمامی دماها و مقادیر مختلف نانوافزودنی با افزایش سطح کرنش می باشد. در واقع افزایش سطح کرنش نشان دهنده افزایش بارگذاری وارده بر نمونه های مخلوط آسفالتی و به تبع آن کاهش عمر خستگی می گردد. روند مشابهی از تغییرات عمر خستگی نمونه ها در تحقیقات گذشته با اضافه نمودن نانورس مشاهده شده است (Ghanoon et al, 2020; Ezzat et al, 2020; Josphineleela et al, 2023; Wang et al, 2021).

در شکل ۱۸ مقادیر مختلف عمر خستگی قیر با مقادیر مختلف نانورس در سطح کرنش ۸۰۰ قابل مشاهده می باشد. در شکل ۱۸ نیز افزودن نانورس سبب افزایش عمر خستگی مخلوط های آسفالتی در آزمایش تیرچه خمشی می گردد. افزایش ۳ تا ۶ درصد نانورس سبب افزایش ۵۳ و ۸۸ درصدی مخلوط های این نوع مصالح در دمای ۱۵ درجه و ۴۱ و ۹۰ درصدی در دمای ۲۵ درجه نسبت به نمونه های شاهد می شود. این خود نشان دهنده بهبود عملکرد مخلوط های حاوی نانورس در برابر سیکل های بارگذاری در تست خمشی است.



شکل ۱۸. عمر خستگی مخلوط های آسفالتی در سطح کرنش ۸۰۰ میکروکرنش

مخلوط آسفالتی، آزمون های مقاومت کششی غیرمستقیم، مدول برجهنگی و تیر خمشی چهار نقطه ای بر روی نمونه های مخلوط آسفالتی انجام پذیرفت. سطوح کرنش بارگذاری مورد استفاده در این تحقیق شامل ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میکروکرنش می باشند. کلیه تست های خستگی در دو دمای متوسط ۱۵ و ۲۵ درجه سانتیگراد انجام شد. نتایج زیر حاصل شده است:

- طبق نتایج بدست آمده از آزمایش تعیین درجه نفوذ قیر، با اضافه کردن ۳ و ۶ درصد نانورس، کاهش درجه نفوذ مشاهده می گردد.

- در آزمایش نقطه نرمی با افزودن ۳ و ۶ درصد نانواهک رس، افزایش نقطه نرمی نسبت به نمونه شاهد بدست آمده

## ۴. نتیجه گیری

در این تحقیق، به بررسی رفتار خستگی قیرها و مخلوط های آسفالتی اصلاح شده با نانورس پرداخته شد. ابتدا آزمون جاروب-کرنش برای تعیین حدود رفتار ویسکوالاستیک خطی و غیرخطی قیر اصلاح شده انجام شد. سپس برای تعیین خصوصیات رئولوژیکی پایه قیرهای مورد مطالعه، آزمون جاروب-فرکانس انجام شد. پس از آن، اثر نانوافزودنی ها بر عمر خستگی قیر اصلاح شده با استفاده از آزمون جاروب زمانی در سطوح کرنش اولیه ۲، ۳/۵ و ۵ درصد با استفاده از پارامترهای متداول و متفاوت انرژی تلف شده مورد بررسی قرار گرفت. همچنین جهت بررسی تاثیر نانورس بر خصوصیات خستگی

سبب آن می‌شود که در برابر سیکل‌های بارگذاری مقاومت بیشتری نمایند.

• افزودن ۳ و ۶ درصد نانورس سبب افزایش ۳۷ و ۷۶ درصدی عمر خستگی مخلوط‌های حاوی این نوع مصالح در دمای ۱۵ درجه و ۳۴ و ۵۸ درصدی در دمای ۲۵ درجه در سطح کرنش ۶۰۰ میکرواسترین نسبت به نمونه‌های شاهد می‌شود. این، نشان دهنده بهبود عملکرد مخلوط‌های حاوی نانورس در برابر سیکل‌های بارگذاری در تست خمشی خستگی است.

• افزایش ۳ و ۶ درصدی نانورس سبب افزایش ۵۳ و ۸۸ درصدی عمر خستگی مخلوط‌های حاوی این نوع مصالح در دمای ۱۵ درجه و ۴۱ و ۹۰ درصدی در دمای ۲۵ درجه در سطح کرنش ۸۰۰ میکرواسترین نسبت به نمونه‌های شاهد می‌شود. این خود نشان دهنده بهبود عملکرد مخلوط‌های حاوی نانورس در برابر سیکل‌های بارگذاری در تست خمشی خستگی است. بنابراین عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی در تمامی دماها و مقادیر مختلف نانوافزودنی، با افزایش سطح کرنش، کاهش می‌یابد. در واقع افزایش سطح کرنش نشان دهنده افزایش بارگذاری وارد بر نمونه‌های مخلوط آسفالتی و به تبع آن کاهش عمر خستگی است.

## ۵. پی‌نوشت‌ها

1. Time sweep
2. Linear amplitude sweep
3. Dynamic Shear Rheometer
4. Rotational viscosity
5. Bending beam rheometer
6. Fourier-transform infrared spectroscopy
7. Scanning electron microscopy
8. Asphalt pavement analyzer
9. Dynamic modulus
10. Flow number
11. Ultra violet
12. Bentonite
13. Organically bentonite
14. Styrene-butadiene-styrene

است. در واقع افزودن نانورس سبب سفت‌تر شدن قیر می‌گردد.

• نمودار مدول سفتی به سیکل بارگذاری از سه بخش تشکیل شده است. بخش اول که در آن نرخ افت مدول سفتی زیاد می‌باشد؛ در بخش دوم نرخ افت سفتی کاهش می‌یابد. این بخش نشان‌دهنده تغییر شکل ترک‌های ریز در آسفالت و به هم پیوستن این ریزترک‌ها به یکدیگر می‌باشد. در بخش سوم مجدداً نرخ کاهش مدول سفتی افزایش یافته و در آن نرخ رشد ترک‌ها تسریع می‌گردد. در انتهای فاز سوم، شکست کامل نمونه اتفاق می‌افتد.

• افزایش نانورس سبب افزایش عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی در آزمایش خستگی چهارنقطه‌ای می‌شود. نانومواد به دلیل ریز بودن و سطح ویژه بالایی که دارند، باعث افزایش خواص چسبندگی قیر و بهبود قفل و بست سنگدانه‌ها به یکدیگر می‌شوند و باعث بهبود خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی می‌گردند. افزایش عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با نانورس را می‌توان به علت ایجاد شبکه دویبعدی دانست. صفحات نانورس با قرار گرفتن در میان ساختار پلیمری قیر، باعث تقویت شبکه قیر شده و تا اندازه‌ای مقاومت قیر در برابر گسترش ترک را افزایش می‌دهد.

• افزودن ۳ و ۶ درصد نانورس به ترتیب سبب افزایش ۲۹ و ۵۸ درصدی عمر خستگی مخلوط‌های حاوی این نوع مصالح در دمای ۱۵ درجه و ۲۷ و ۶۰ درصدی در دمای ۲۵ درجه در سطح کرنش ۴۰۰ میکرواسترین نسبت به نمونه‌های شاهد می‌شوند. این خود نشان دهنده بهبود عملکرد مخلوط‌های حاوی نانورس در برابر سیکل‌های بارگذاری در تست خمشی خستگی است.

• با افزایش دمای دستگاه از ۱۵ به ۲۵ درجه سانتیگراد، عمر خستگی تمامی مخلوط‌های آسفالتی افزایش می‌یابد. این را می‌توان به نرم‌تر شدن مخلوط در دماهای بالاتر نسبت داد که

– Ameri, M., Kouchaki, S. and Roshani, H. (2013) Laboratory Evaluation of the Effect of Nano-Organosilane Anti- Stripping Additive on the Moisture Susceptibility of HMA Mixtures under Freeze-Thaw Cycles. *Construction and Building Materials*, 48, 1009-1016.

– Ameli, Alireza, Rezvan Babagoli, Mohammad Khabooshani, Ramin AliAsgari, and Farhang Jalali. "Permanent deformation performance of binders and stone mastic asphalt mixtures modified by SBS/montmorillonite nanocomposite." *Construction and Building Materials* 239 (2020): 117700.

– Anderson DA, Christensen DW, Bahia H, Dongre R, Sharma M, Antle CE. Binder characterization and evaluation, volume 3: physical characterization. Strategic Highway Research Program, National Research Council, Report No. SHRP-A-369, 1994.

– Ashish PK, Singh D, Bohm S. Evaluation of rutting, fatigue and moisture damage performance of nanoclay modified asphalt binder. *Constr Build Mater* 2016;113:341–50.

– Bahia H, Hanson DI, Zeng M, Zhai H, Khatri MA, and Anderson RM. Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design. NCHRP Report 459: Transportation Research Board, Washington D.C., USA, 2001.

– Bonnetti KS, Nam K, Bahia H. Measuring and defining fatigue behavior of asphalt binders. *Transport Res Record: J Transport Res Board* 2002;1810(5):33–43.

– Ezzat, Helal, Sherif El-Badawy, Alaa Gabr, Saaid Zaki, and Tamer Breakah. "Predicted performance of hot mix asphalt modified with nano-montmorillonite and nano-silicon dioxide based on Egyptian conditions." *International Journal of Pavement Engineering* 21, no. 5 (2020): 642-652.

15. Semi-Circular Bend Test

16. Nanoclay

17. Universal testing machine

18. Covariance

19. Linear Viscoelastic

20. Non-Linear Viscoelastic

21. Surface free energy

22. Dissipated energy

23. Ratio of Dissipated energy change

24. Plateau value

25. Dissipated energy ratio

## ۶. مراجع

– جلیلی مجدی، امیر، (۱۳۹۶). تحلیل رفتار خستگی مخلوط آسفالتی داغ اصلاح شده توسط ترکیب نانوسیلیس و پلیمر استایرن بوتادین استایرن. دومین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران، معماری و مدیریت بحران، تهران، دانشگاه علامه مجلسی.

– صاحب الزمانی، سید حمیدرضا؛ علوی، سید محمد ضیاء؛ فرزانه، اورنگ. (۱۳۹۷). مقایسه خواص عملکردی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با قیر پلیمری و گرانول خشک پلیمری، پژوهشنامه حمل و نقل ۱۵(۳).

– عامری، محمود؛ روح الامینی، حامد؛ وامق، مصطفی؛ بمانا، کیوان. (۱۳۹۵). بررسی اثر افزودنی نانورس بر رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی از طریق تحلیل ضریب آسیب معادل. فصلنامه مهندسی حمل و نقل ۷(۴).

– فدایی، محمد و علیرضا سرکار. (۱۳۹۶). اثر ترکیبی نوع محور، دانه‌بندی و سرعت بر رفتار خستگی مخلوط آسفالتی با استفاده از آزمون خمش نیم دایره (SCB). اولین کنفرانس بین المللی پیشرفت‌های نوین در مهندسی عمران، آمل. دانشگاه شمال - معاونت فرهنگی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری.

- Josphineleela, R., G. Diwakar, T. Senthilnathan, Hanumant Sharan Singh, KR Senthil Kumar, and M. Anusuya. "Experimental study on the effects of modification with nanoclay on the properties of an SMA mixture." *Materials Today: Proceedings* (2023).
- Kavussi A, and Barghabany P. Investigating fatigue behavior of nanoclay and nano hydrated lime modified bitumen using las test. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016; 28 (3).
- Liu G, Wu S, van de Ven M, Molenaar A, Besamusca J. Characterization of organic surfactant on montmorillonite nanoclay to be used in bitumen. *J Mater Civ Eng* 2010; 22(8):794–9.
- Li H, Zhang MH, Ou JP. Flexural fatigue performance of concrete containing nano-particles for pavement. *Int J Fatigue* 2007; 29(7):1292–301.
- Martono W. Fatigue of asphalt binders - investigation of edge effect phenomenon and development of surrogate test. Phd thesis, University of Wisconsin-Madison, USA, 2008.
- Monteiro, Liniker, Taher Baghaee Moghaddam, Mohammad Shafiee, and Leila Hashemian. "Investigating the Addition of Organomontmorillonite Nanoclay and Its Effects on the Performance of Asphalt Binder." *Journal of Materials in Civil Engineering* 35, no. 8 (2023): 04023267.
- Morshed, MM Tariq, and Zahid Hossain. "Analysis of Rheological Properties and Moisture Resistance of Nanoclay-Modified Asphalt Binders." In *Sustainable Environment and Infrastructure: Proceedings of EGRWSE 2019*, pp. 293-300. Springer International Publishing, 2021.
- Fang, C., Yu, R., Liu, S. and Li, Y. (2013) Nano Materials Applied in Asphalt Modification: A Review. *Journal of Materials Science and Technology*, 29, 589-594.
- Fang, Changqing, Ruien Yu, Shaolong Liu, and Yan Li. "Nanomaterials applied in asphalt modification: a review." *Journal of Materials Science & Technology* 29, no. 7 (2013): 589-594.
- Ghanoon, Seyed Alireza, Javad Tanzadeh, and Mehrnaz Mirsepahi. "Laboratory evaluation of the composition of nano-clay, nano-lime and SBS modifiers on rutting resistance of asphalt binder." *Construction and Building Materials* 238 (2020): 117592.
- Hefer, A. and Little, D., 2005. Adhesion in bitumen-aggregate system and quantification of the effects of the water on the adhesive bond, Report No. ICAR/505-1, Texas Transportation Institute, The Texas A&M University.
- Jahromi, S.G. and Khodaii, A. (2009) Effects of Nanoclay on Rheological Properties of Bitumen Binder. *Construction and Building Materials*, 23, 2894-2904.
- Jamieson, I.L., Moulthrop, J.S., and Jones, D.R., 1995. SHRP results on binder-aggregate adhesion and resistance to stripping. In: *Asphalt Yearbook*. London: Institute of Asphalt Technology, 17–21.
- Johnson CJ. Estimating asphalt binder fatigue resistance using an accelerated test method. Phd thesis, University of Wisconsin-Madison, USA, 2010.
- Jasso, Martin, Dusan Bakos, Jiri Stastna, and Ludovit Zanzotto. "Conventional asphalt modified by physical mixtures of linear SBS and montmorillonite." *Applied Clay Science* 70 (2012): 37-44.

- (Cloisite 30B). *Appl Clay Sci* 2010; 47(3-4):196-202.
- Rohith, N. and Ranjitha, J. (2013) A Study on Marshall Stability Properties of Warm Mix Asphalt Using Zycotherm a Chemical Additive. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2, 808-813.
- Seif, Mohammadreza, and Mohammad Molayem. "Estimation of Fatigue Life of Asphalt Mixtures in Terms of Fatigue Life of Asphalt Binders Using the Rate of Dissipated Energy Change Approach." *Journal of Materials in Civil Engineering* 34, no. 8 (2022): 04022185.
- Safaei F, and Hintz C. Investigation of the effect of temperature on asphalt binder fatigue. in: *Proc., 12th Int. Society for Asphalt Pavements (ISAP) Conf*, 1491-1500, 2014.
- Santagata E, Baglieri O, Tsantili L, Chiappine G. Fatigue properties of bituminous binders reinforced with carbon nanotubes. *Int J Pavement Eng* 2015;16(1):80-90.
- Singh D, Sawant D. Understanding effects of RAP on rheological performance and chemical composition of SBS modified binder using series of laboratory tests. *Int J Pavement Res Technol* 2016;9(3):178-89.
- Shafabakhsh, Gh., Mirabdolazimi, S.M. and Sadeghnejad, M. (2014) Evaluation the Effect of Nano-TiO<sub>2</sub> on the Rutting and Fatigue Behavior of Asphalt Mixtures. *Construction and Building Materials*, 54, 566-57.
- Shen S, and Carpenter SH. Dissipated energy concepts for HMA performance: fatigue and healing. Report No. 29, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA: Federal Aviation Administration, 2007.
- Omar, Hend Ali, Herda Yati Katman, Munder Bilema, Mohamed Khalifa Ali Ahmed, Abdalrhman Milad, and Nur Izzi Md Yusoff. "The effect of ageing on chemical and strength characteristics of nanoclay-modified bitumen and asphalt mixture." *Applied Sciences* 11, no. 15 (2021): 6709.
- Patra, Sidharth Kumar, Mahabir Panda, Aditya Kumar Das, and Prasanta Kumar Bhuyan. "Performance evaluation of surface-treated montmorillonite nanoclay-modified bitumen binder at high-and intermediate-temperature conditions." *Road Materials and Pavement Design* 24, no. 5 (2023): 1330-1352.
- Petersen JC, Robertsen RE, Branthaver JF, Harnsberger PM, Duvall JJ, Kim SS, Anderson DA, Christiansen DW, Bahia H. Binder characterization and evaluation, volume 1. Strategic Highway Research Program, National Research Council, Report No. SHRP-A-367, 1994.
- Polacco G, Kriz P, Filippi S, Stastna J, Biondi D و Zanzotto L. (2008). Rheological properties of asphalt/SBS/clay blends. in *EUROPEAN POLYMER JOURNAL*. *EUROPEAN POLYMER JOURNAL*; 44, 11; 3512-3521.
- Planche JP, Anderson DA, Gauthier G, Li Hir YM, Martin D. Evaluation of fatigue properties of bituminous binders. *J Mater Struct* 2004; 37: 356-9.
- Qadir, Farhan, and Imran Hafeez. "Effect of impregnated organophilic (hydrophobic) nano clay on asphalt binder properties and performance." *Construction and Building Materials* 419 (2024): 135577.
- Ramadan AR, Esawi AMK, Gawad AA. Effect of ball milling on the structure of Na +-montmorillonite and organo-montmorillonite

Modified with Nano Silica. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25, 1619-1630.

– Yang, J. and Tigheb, S. (2013) A Review of Advances of Nanotechnology in Asphalt Mixtures. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 96, 1269-127.

– Yasmin A. ،Abot J.L و Daniel I.M. (2003) Processing of clay/epoxy nanocomposites by shear mixing. McCormick School of Engineering and Applied Science, Northwestern University, 2137Tech Drive, Evanston, IL 60208, USA.

– Zhanping Y. Beale M.J. ،Foley J.M. ،Roy S. ، Odegard G.M. ،Dai Q و Goh S.W. (2011). Nanoclay-modified asphalt materials: Preparation and characterization. in *CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS* ; 25 , 2 ; 1072-1078.

– Zare Shahabadi, A., Shokuhfar, S., Ebrahimi Nejad. (2010) “Preparation and rheological characterization of asphalt binders reinforced with layered silicate nanoparticles”. *Construction and Building Materials*; 24:pp.1239-1244.

– Zhou F, Mogawer W, Hongsheng L, Andriescu A, Copeland A. Evaluation of fatigue tests for characterizing asphalt binders. *J Mater Civ Eng* 2013; 25: 610–7.

– Shen S, Airey GD, Carpenter SH. A dissipated energy approach to fatigue evaluation. *Road Mater Pavement Design* 2006; 7(1):47–69.

– Stroeve P, Ke C. *Polymer-Layered Silicate and silica nanocomposites*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers; 2005.

– Teizer J. ،Venugopal M. ،Teizer W. and Felkl J. (2012). Nanotechnology and Its Impact on Construction: Bridging the Gap Between Researchers and Industry Professionals. *Journal of Construction Engineering and Management* 138(5):594-604.

– Wang C, Zhang H, Castorena C, Zhang J, Kim YR. Identifying fatigue failure in asphalt binder time sweep tests. *Constr Build Mater* 2016; 121: 535–46.

– Wang, Riran, Mingjing Yue, Yuchao Xiong, and Jinchao Yue. "Experimental study on mechanism, aging, rheology and fatigue performance of carbon nanomaterial/SBS-modified asphalt binders." *Construction and Building Materials* 268 (2021): 121189.

– Xiao, F., Jordan, J., and Amir Khanian, S. N. (2009). “Laboratory investigation of moisture damage in warm mix asphalt containing moist aggregate.” *Transportation Research Record* 2126, Transportation Research Board, Washington, DC, 115–124.

– You, Z., Mills-Beale, J., Foley, J.M., Roy, S., Odegard, G.M., Dai, Q. and Goh, S.W. (2011) Nanoclay-Modified Asphalt Materials: Preparation and Characterization. *Construction and Building Materials*, 25, 1072-1078.

– Yao, H., You, Z., Li, L., Lee, C., Wingard, D., Yap, Y., Shi, X. and Goh, S. (2013) Rheological Properties and Chemical Bonding of Asphalt

## مطالعه آزمایشگاهی رفتار خستگی قیر و مخلوط آسفالتی حاوی نانوس به روش های جاروب- زمان، کرنش و تیر خمشی

محسن عموزاده عمرانی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را از دانشگاه مازندران و درجه کارشناسی ارشد خود را در رشته مهندسی عمران- راه و ترابری از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. سپس موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی عمران- راه و ترابری از دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان، تکنولوژی قیر و آسفالت، روسازی بتنی و ترافیک است و در حال حاضر، عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه آزاد اسلامی مازندران می باشد.



رضوان باباگلی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را از دانشگاه علم و صنعت ایران و درجه کارشناسی ارشد خود را در رشته مهندسی عمران- راه و ترابری از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. سپس موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی عمران- راه و ترابری از دانشگاه علم و صنعت ایران گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان، تکنولوژی قیر و آسفالت و روسازی بتنی است و در حال حاضر، عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه علم و فناوری مازندران می باشد.



مجید سلیمانپور، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را از دانشگاه آزاد اسلامی واحد چالوس و درجه کارشناسی ارشد خود را در رشته مهندسی عمران- راه و ترابری از دانشگاه آزاد اسلامی واحد آیت ا... آملی اخذ نمود. زمینه پژوهشی مورد علاقه ایشان، روسازی آسفالتی است و در حال حاضر، عضو سازمان نظام مهندسی ساختمان مازندران و فعال در حوزه ساختمان می باشد.

