

ارزیابی آزمایشگاهی ترک خوردگی حرارتی در قیر و مخلوط آسفالتی اصلاح شده با نانوسیلیکا

غلامعلی شفافبخش*، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

سما محمدنجفی، دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

مانا معتمدی، دکتری راه و ترابری، آخیز گستر تمیم ایرانیان، آمل

Email: ghshafabakhsh@semnan.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۵ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۱۵

چکیده

اصلاح قیر با استفاده از افزودنی‌ها یکی از راه‌های بهبود خصوصیات و مشخصات عملکردی قیر و مخلوط آسفالتی می‌باشد. نانومواد از جمله جدیدترین فناوری‌هاست که در علوم مختلف به سرعت در حال پیشرفت است. مزایای فراوان این فناوری سبب گردیده که محققان حوزه روسازی آن را در بهبود خصوصیات مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار دهند. ترک خوردگی حرارتی یکی از متداول‌ترین خرابی‌ها در راه‌ها می‌باشد. با توجه به وجود ارتباط خرابی خستگی و شیارشدگی در قیر و مخلوط آسفالتی در دماهای میانی و زیاد و فقدان مطالعات در زمینه ترک خوردگی حرارتی در دمای کم، ارزیابی ارتباط بین پارامترهای ترک خوردگی حرارتی در قیر و مخلوط آسفالتی حائز اهمیت می‌باشد. بدین منظور، از آزمایش رئومتر تیرچه خمشی (BBR) برای قیرها و آزمایش نیم‌دایره خمشی (SCB) برای آسفالت استفاده شد. هدف این تحقیق، بررسی رفتار قیر و مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با نانوسیلیکا می‌باشد. نتایج حاکی از بهبود مقاومت مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با نانواکسید سیلیکا در برابر ترک خوردگی و مدول برجهنگی حدود $1/6$ و $1/4$ برابر بود. شاخص مرتبط با حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی نیز حدود 7% نسبت به نمونه شاهد افزایش داشت. با این حال، نتایج آزمایش قیر حاکی از کاهش عملکرد قیرهای اصلاح‌شده با نانوسیلیکا در دماهای کم می‌باشد. نتایج چقرمگی در آزمایش SCB برای مخلوط آسفالتی با نتایج آزمایش BBR در قیر همخوانی دارد. پیوندهای کششی آزمایش FTIR و افزایش سفتی در مخلوط آسفالت از عوامل تأثیرگذار بر بهبود رفتار قیرهای اصلاح‌شده با نانوسیلیکا نسبت به نمونه شاهد می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: نانوسیلیکا، مخلوط آسفالتی، ترک خوردگی حرارتی، خمش نیم‌دایره، رئومتر تیرچه خمشی

۱. مقدمه

فالچتو و همکاران (۲۰۱۸) در تحقیقات خود به این نتیجه دست یافتند که ترک‌های حرارتی یکی از رایج‌ترین خرابی‌های روسازی‌های آسفالتی می‌باشند، که این نوع خرابی، عملکرد سازه‌ای و کیفی روسازی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. میرسیار (۲۰۱۷) به طور کلی، به این نتیجه دست یافت که ریزترک‌ها تحت تأثیر شرایط مختلف آب‌وهوایی و تردد بارهای ترافیکی ایجاد می‌شوند. با تکرار بارهای ترافیکی، ریزترک‌ها انتشار یافته و ترک‌های بزرگتر را تشکیل می‌دهند. یکی از اصلی‌ترین اجزای آسفالت، قیر است. شفابخش و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهش‌های خود به این نتیجه دست یافتند که بهبود و اصلاح خصوصیات و ضعف‌های ساختاری قیر تأثیر به‌سزایی در افزایش مقاومت روسازی نسبت به شرایط مختلف از قبیل تغییرات آب‌وهوایی و عبور و مرور وسایل نقلیه سنگین دارد. با توجه به رشد روز افزون نانومواد و خصوصیات عالی این مواد، استفاده از افزودنی‌های حوزه نانو به عنوان اصلاح‌کننده ساختار قیر در جهت بهبود خواص مخلوط‌های آسفالتی مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از نانومواد هزینه‌های مربوط به نگهداری جاده را کاهش داده و همینطور باعث افزایش عمر روسازی می‌شود. یائو و همکاران (۲۰۱۳) تحت پژوهش‌هایی دریافتند که فواید نانوسیلیکا شامل کاهش هزینه تولید، مساحت سطحی بزرگ، جذب قوی، توانایی پراکنش زیاد، خلوص شیمیایی و ثبات، بسیار عالی است. با داشتن این خواص سودمند، نانوسیلیکا پتانسیل خوبی برای استفاده به عنوان اصلاح‌کننده، برای تقویت و بهبود عملکرد آسفالت شامل مقاومت مکانیکی و دوام روسازی، دارد. در میان نانومواد، نانوسیلیکا به دلیل قیمت مناسب‌تر، در دسترس بودن، سازگاری با قیر و سازگاری با محیط‌زیست در این پژوهش انتخاب شده است.

هدف از این پژوهش، بررسی ترک‌خوردگی حرارتی در قیرهای شاهد اصلاح شده با نانوسیلیکا می‌باشد. بدین منظور، از آزمایش رئومتر تیرچه خمشی^۱ (BBR) استفاده شد. همچنین، برای بررسی حساسیت رطوبتی و ترک‌خوردگی حرارتی از آزمایش کشش غیرمستقیم^۲ (ITS) و خمش نیم‌دایره^۳ (SCB) استفاده شد. یافتن ارتباط میان پارامترهای ترک‌خوردگی حرارتی در قیر و مخلوط‌های آسفالتی، از اهداف دیگر این پژوهش می‌باشد. برای بررسی بیشتر، نتایج حساسیت رطوبتی و مدول برجهنگی آسفالت نیز مورد توجه قرار گرفت.

۲. پیشینه تحقیق

بیلدیریم (۲۰۰۷) تحقیقاتی در زمینه استفاده از نانوسیلیکا که باعث بهبود عملکرد قیر در دماهای زیاد و میانی شده، انجام داده است. نتایج آزمایش روی قیر نشان می‌دهد که نانوسیلیکا باعث بهبود خواص شیارشدگی و ترک‌های ناشی از خستگی قیر می‌گردد. اصلاح قیر به منظور کاهش خرابی در مخلوط‌های آسفالتی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. فنگ (۲۰۱۳) در سال‌های اخیر، پژوهش‌هایی در زمینه اصلاح قیر با نانومواد انجام داده است. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که نانوسیلیکا تأثیر مثبتی بر بازگشت کرنش داشته و حداکثر ریکاورری برای قیر اصلاح شده با ۲٪ نانوسیلیکا اتفاق افتاده است. همچنین، مصرف نانوسیلیکا در قیر و مخلوط آسفالتی باعث افزایش خاصیت الاستیک، کاهش زاویه فاز و افزایش خاصیت الاستیک، و افزایش مدول مختلط شده است. الحمالی و همکاران (۲۰۱۵)، اثر بازدارندگی خوب نانوسیلیکا در برابر واکنش‌های اکسیداسیون را بررسی کرده است. تحقیقات پلاسی و همکاران (۲۰۱۵) نشان داد که مدول برشی قیر پایه با افزایش درصد نانوسیلیکا از ۲ درصد به ۶ درصد، افزایش می‌یابد. شفابخش و

³- Semi Circular Bending Test

¹- Bending Beam Rheometer

²- Indirect Tensile Strength

کردند. نتایج تحقیق آنها نشان‌دهنده تأثیر زیاد عوامل ذکر شده بر مقاومت شکست آسفالت بود. به طور کلی، مقدار فاکتور شدت تنش برای مصالح با دانه‌بندی ریزتر کمتر از مقدار متناظر آن در مصالح با دانه‌بندی درشت‌تر بود. همچنین، با افزایش درصد قیر، فاکتور شدت تنش در نمونه‌ها کاهش یافت. السیفی و همکاران (۲۰۱۲) مقاومت شکست و ترک‌خوردگی برخی مخلوط‌های آسفالتی را با استفاده از آزمایش SCB مورد ارزیابی قرار دادند. هسلت (۲۰۱۸) تأثیر پنج شاخص مختلف شامل انرژی شکست، شاخص انعطاف‌پذیری ایلینویز، شاخص چقرمگی، تحمل کرنش شکست و شاخص مقاومت ترک‌خوردگی را جهت شناسایی و رتبه‌بندی مخلوط‌های آسفالتی و تغییرات آنها با دمای آزمایش و نرخ بارگذاری بررسی کرد. به این منظور، نتایج آزمایش‌های SCB برای پنج مخلوط آسفالتی مختلف، حاوی مقادیر متفاوت آسفالت بازیافتی و قیر با درجات عملکردی مختلف، در چهار دمای متفاوت و ترکیبات گوناگون نرخ بارگذاری مورد ارزیابی قرار گرفتند. محاسبه شاخص شکست بر اساس جابجایی‌های بازشدگی دهانه ترک به عنوان راهکاری مناسب برای تمایز عملکرد ترک‌خوردگی مخلوط‌ها پیشنهاد گردید. جیانگ و همکاران (۲۰۱۸) مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر مشخصات زمان - دما را بر اساس نتایج آزمایش خمش نیم‌استوانه مورد مطالعه قرار دادند و از خروجی‌های آزمایش خستگی SCB به منظور بررسی ویژگی‌های عملکردی خستگی مخلوط‌ها بر اساس توسعه جابجایی‌ها و مصرف انرژی در فازهای بارگذاری سیکلیک استفاده کردند. در تحقیق ایشان، نتایج تأثیر نرخ بارگذاری و دما بر مقاومت آسفالت نشان داده شد و همچنین ارتباط واضح میان نرخ بارگذاری و مقاومت بیان گردید. با افزایش نرخ بارگذاری، مقاومت ابتدا سریعاً افزایش یافته و سپس از نرخ افزایش آن کاسته می‌شود. ساها و بیلگیری (۲۰۱۷) رابطه‌ای میان شکست استاتیکی و دینامیک مخلوط‌های

همکاران (۲۰۱۹) به ارزیابی مقاومت در برابر شیارشدگی و خستگی قیرهای اصلاح شده و همچنین بررسی تأثیر افزودنی نانوسیلیکا بر مدول سفتی مخلوط آسفالتی پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که نانوسیلیکا قادر خواهد بود خصوصیات حرارتی مخلوط آسفالتی را تا حدی بهبود بخشد. نظری و همکاران (۲۰۱۸) بیان کردند که عمر خستگی قیر اصلاح‌شده با نانوسیلیکا نسبت به نانوتیتانیوم اکسید و نانوکلسیم کربنات افزایش بیشتری داشته و افزودن ۴ درصد نانوسیلیکا به قیر منجر به افزایش عمر خستگی می‌شود. آزمون SCB برای اولین بار توسط چانگ و کوروپو (۱۹۸۴) برای تعیین سختی شکست نمونه‌های سنگ پیشنهاد شد. تا قبل از این پژوهش، تهیه نمونه‌های مورد نیاز برای تعیین سختی شکست مصالح فلزی بر اساس استانداردهای مربوطه، امری دشوار و پرهزینه بود. از سوی دیگر، به دلیل ضعف مصالحی مانند سنگ، بتن و، سرامیک در برابر کشش، برای انجام آزمایش سختی شکست، نیاز بود تا این مصالح از طریق بارگذاری فشاری دچار شکست کششی شوند. از این رو چانگ و کوروپو (۱۹۸۴) برای حل این مشکل پیشنهاد کردند تا برای تعیین سختی شکست این مصالح از نمونه‌های نیم‌دایره‌ای شکل که در لبه صاف آن دارای یک ترک از قبل تعبیه شده می‌باشد، تحت بارگذاری خمش سه نقطه‌ای استفاده شود. به دلیل هندسه پیچیده نمونه‌های نیم‌دایره، ارائه یک راه حل تحلیلی برای تعیین فاکتور شدت تنش در آنها کار دشواری است. از این رو، چانگ و کوروپو (۱۹۸۴) یک راه حل عددی را برای بازه محدودی از متغیرها، شامل ابعاد نمونه و طول ترک ارائه کردند. بهبهانی و همکاران (۲۰۱۳) در یک تحقیق آزمایشگاهی، به بررسی تأثیر مشخصات آسفالت بر مقاومت ترک‌خوردگی آن با استفاده از آزمون SCB پرداختند. آنها تأثیر عوامل مختلف از جمله اندازه سنگدانه‌ها، نوع سنگدانه، درصد قیر و فضای خالی را بر مقاومت ترک‌خوردگی آسفالت در دمای 15°C - مطالعه

و نانوسیلیکا بوده است که در ادامه مشخصات آنها بیان گردیده است.

۳-۱. مصالح سنگی

برای تهیه نمونه‌های مخلوط آسفالتی در این تحقیق، از حد وسط دانه‌بندی شماره ۴ مخلوط‌های آسفالتی توپیر آیین‌نامه روسازی راه‌های آسفالتی ایران (نشریه ۲۳۴) استفاده شده است. حدود این دانه‌بندی در جدول ۱ ارائه شده است.

آسفالتی به منظور پیش‌بینی عملکرد مکانیکی آنها ارائه کردند و پدیده گسترش ترک را جهت توجیه فرایند ترک خوردن پیشنهاد نمودند. نتایج آزمایش‌های SCB نشان داد که نوع رده‌بندی قیر تأثیر قابل توجهی بر مقاومت شکست و عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی دارد.

۳. مواد و مصالح مصرفی

مصالح استفاده شده برای ساخت نمونه‌های آسفالتی در این پژوهش، شامل یک نوع قیر و یک نوع مصالح سنگی

جدول ۱. دانه‌بندی پیوسته مخلوط آسفالت گرم مربوط به قشر توپکا

| اندازه الک | ۲۵ میلی‌متر (اینچ) | ۱۹ میلی‌متر (۳/۴ اینچ) | ۱۲/۵ میلی‌متر (۱/۲ اینچ) | ۹/۵ میلی‌متر (۳/۸ اینچ) | ۴/۷۵ میلی‌متر (شماره ۴) | ۲/۳۶ میلی‌متر (شماره ۸) | ۰/۳ میلی‌متر (شماره ۵۰) | ۰/۰۷۵ میلی‌متر (شماره ۲۰۰) |
|-------------|--------------------|------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|
| درصد | - | ۱۰۰ | ۹۵ | - | ۵۹ | ۴۳ | ۱۳ | ۶ |
| وزنی رد شده | - | ۱۰۰ | ۹۵ | - | ۵۹ | ۴۳ | ۱۳ | ۶ |

۳-۲. قیر

که درجه عملکردی معادل قیر مذکور با توجه به دسته‌بندی سوپریو (PG۵۸-۲۲) می‌باشد. مشخصات قیر مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۲ آمده است.

قیر مورد استفاده در تحقیق حاضر از نوع قیر با درجه نفوذ ۸۵/۱۰۰ تولید پالایشگاه نفت جی اصفهان می‌باشد،

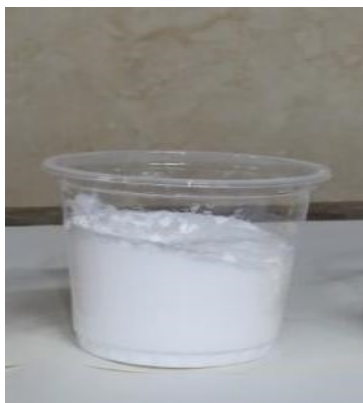
جدول ۲. مشخصات قیر ۱۰۰-۸۵ به کار رفته در ساخت نمونه‌ها

| آزمایش | درجه نفوذ ۰/۱ (میلی‌متر) | نقطه نرمی (سلسیوس) | شکل‌پذیری (سانتی‌متر) | درجه اشتعال (سلسیوس) |
|--------------|--------------------------|--------------------|-----------------------|----------------------|
| نتیجه آزمایش | ۸۸ | ۴۶/۶ | ۱۰/۶ | ۲۳۵ |

۳-۳. نانوسیلیکا

است. نانوسیلیکای مورد استفاده در این تحقیق از شرکت US آمریکا تهیه شده است. شکل و مشخصات نانوسیلیکای مصرفی به ترتیب در شکل ۱ و جدول ۳ ارائه شده و ترکیبات تشکیل‌دهنده آن در جدول ۴ شرح داده شده است.

نانوسیلیکا به طور گسترده در صنعت پلیمر برای کاهش پیری و افزایش خواص فیزیکی و مکانیکی مواد پایه مانند سفتی، دوام، مقاومت و پایداری حرارتی استفاده شده



شکل ۱. نانوسیلیکای مصرفی در این پژوهش

جدول ۳. مشخصات نانوسیلیکا

| مقدار | خصوصیات |
|---------------------------|-------------|
| ۹۹٪ | خلوص |
| ۱۱-۱۳ nm | اندازه ذرات |
| ۲۰۰ m ² /g | سطح مخصوص |
| سفید | رنگ |
| < ۰/۱۰ gr/cm ³ | چگالی ظاهری |
| ۲/۴ gr/cm ³ | چگالی حقیقی |

جدول ۴. ترکیبات تشکیل دهنده نانوسیلیکا

| SiO ₂ | Ti | Ca | Na | Fe |
|------------------|---------|--------|--------|---------|
| >۹۹% | <۱۲۰ppm | <۲۰ppm | <۵۰ppm | <۲۰۰ppm |

از کلوخه شدن و چسبیدن نانومواد به پره‌های دستگاه، نانوسیلیکا مرحله به مرحله به قیر افزوده شده است.

۴-۲. ساخت نمونه آسفالتی

به منظور انجام آزمایش خمش نیم‌دایره، نمونه‌ها با استفاده از روش ژیراتوری ساخته شدند. نمونه‌ها با ضخامت حدود ۲۵ میلی‌متر برش داده شدند. سپس در وسط نمونه ناچی به ضخامت ۱ میلی‌متر و طول ۱۵ میلی‌متر ایجاد شد.

۴. ساخت نمونه و برنامه آزمایشگاهی

۴-۱. ساخت نمونه‌های قیری

در این پژوهش، دو نوع قیر شاهد و قیر حاوی نانوسیلیکا مورد استفاده قرار گرفت. نانوسیلیکای تهیه شده در این پژوهش در سه مقدار (۳، ۵ و ۷ درصد وزنی قیر) به مدت نیم ساعت در دمای ۱۶۰ درجه سلسیوس و با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه با قیر توسط دستگاه مخلوط-کن برشی با دور زیاد^۱ مخلوط شده است. برای جلوگیری

^۱- High shear

۳-۴. آزمایش قیر

می‌کند. همانند اثر انگشت، ساختار مولکولی مواد نیز کاملاً منحصر به فرد می‌باشد.

۱-۳-۴. آزمایش طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون

قرمز (FTIR)

۲-۳-۴. آزمایش BBR

قیرها در دمای کم بسیار سفت هستند و نمی‌توان مشخصات آن‌ها را توسط دستگاه رئومتر برشی دینامیک (DSR) با اطمینان اندازه‌گیری کرد. در دماهای کم، محققین دستگاه رئومتر تیرچه خمشی را مطابق روش‌های ASTM D6648 برای اندازه‌گیری مقدار خیز یا افت خزشی قیر تحت بار ثابت به کار می‌برند. دستگاه مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۲ آمده است.

برای مطالعه ساختار مولکولی از آزمایش FTIR استفاده شد. طیف‌سنج مادون قرمز فوریه یک ابزار قدرتمند در شناسایی گروه‌های مختلف عملکردی در قیر است. با توجه به جذب متفاوت مادون قرمز توسط پیوندهای شیمیایی مختلف در دستگاه FTIR، این آزمون برای تجزیه و تحلیل اجزای عملکردی قیرها مورد استفاده قرار گرفت. طیف مورد نظر (IR) از نمونه عبور کرده، بخشی از آن توسط نمونه جذب و بخشی دیگر از آن عبور



شکل ۲. دستگاه BBR مورد استفاده در این پژوهش

۴-۴. آزمایش مخلوط

حساسیت به رطوبت، از آزمایش کششی لاتمن اصلاح شده (AASHTO T283) استفاده شد. مطابق شکل ۳، هر دو گروه نمونه‌ها برای انجام مقاومت کششی غیرمستقیم تحت بارگذاری با نرخ ثابت (۵۰ min/mm) قرار گرفته و مقدار نیروی لازم برای شکستن نمونه اندازه‌گیری می‌شود. شاخص TSR از تقسیم مقدار نیرو در نمونه‌ها در حالت اشباع به حالت خشک به دست می‌آید. حداقل مقدار TSR باید ۸۰ درصد باشد.

۱-۴-۴. حساسیت رطوبتی

حضور رطوبت در مخلوط آسفالتی باعث کاهش چسبندگی بین مصالح سنگی و قیر شده و در نتیجه موجب تنزل به هم پیوستگی مخلوط می‌شود و ظرفیت باربری روسازی آسفالتی را کاهش می‌دهد. برای ارزیابی



شکل ۳. آزمایش ITS

مطابق شکل ۴ قرار گرفته و نمودار تغییر شکل نمونه در هر سیکل رسم می‌شود. آزمایش مدول برجهندگی قطری طبق استاندارد ASTM D4123-82 با بارگذاری تکراری انجام می‌شود.

۴-۲-۴. مدول برجهندگی

یکی دیگر از آزمایش‌های تعیین حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، آزمایش تعیین مدول است. در این آزمایش، نمونه استوانه‌ای معمولاً تحت ۵۰ تا ۲۰۰ بار گذاری قطری



شکل ۴. آزمایش مدول برجهندگی

نیرو-جابجایی حاصل از انجام آزمایش‌ها ثبت گردید. پارامترهای شکست و نحوه انجام آزمایش بر مبنای AASHTO TP 105 صورت می‌گیرد. نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در دمای منفی ۱۵ درجه سلسیوس، سپس در یک محل نگهداری می‌شوند. سپس بار مونوتونیک با جابجایی $0/3$ میلی‌متر بر دقیقه تا شکست نمونه به آن اعمال می‌شود.

۴-۳-۴. آزمایش شکست خمشی نیم‌دایره (SCB)

آزمایش بارگذاری خمشی نمونه نیم‌دایره‌ای (SCB) یکی از آزمایش‌های رایج مکانیک شکست می‌باشد که در آن مطابق شکل ۵، نمونه نیم‌دایره‌ای ترک‌دار در معرض بارگذاری خمشی سه نقطه‌ای قرار می‌گیرد. در نهایت، نمودار



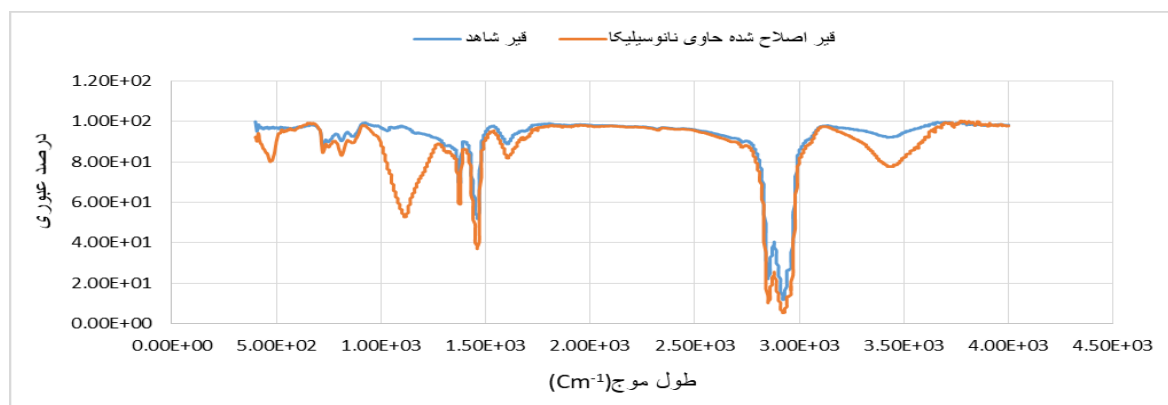
شکل ۵. آزمایش SCB

به منظور بررسی عملکرد شیمیایی قیر حاوی نانوسیلیکا، آزمایش FTIR روی نمونه‌ها صورت گرفت. نتایج این آزمایش در شکل ۶ آمده است.

۵. نتایج و تحلیل یافته‌ها

۵-۱. آزمایش‌های قیر

۵-۱-۱. تحلیل آزمایش FTIR

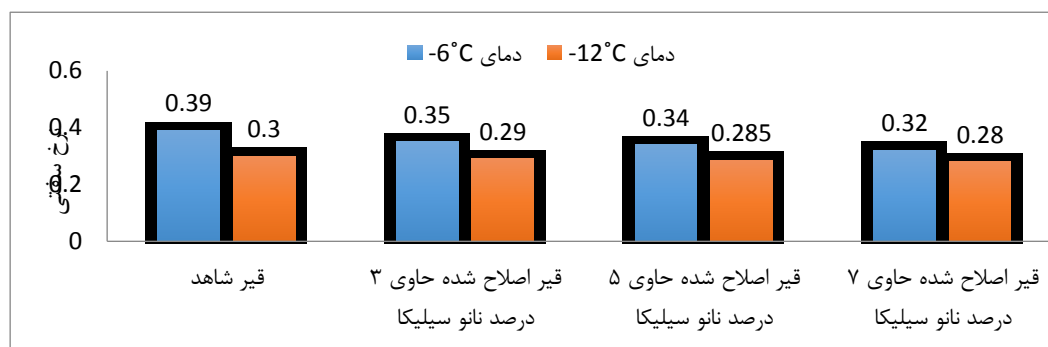


شکل ۶. آزمایش FTIR برای نمونه شاهد و اصلاح شده با نانوسیلیکا

این آزمایش در دو دمای ۶- و ۱۲- درجه سلسیوس انجام شد. نتایج نرخ سفتی در شکل ۷ نمایش داده شده است. با افزودن مقادیر مختلف نانوسیلیکا به قیر، نرخ سفتی قیر دچار تغییر شده و مقدار آن با افزایش درصد نانوسیلیکا، کاهش می‌یابد. همانگونه که مشاهده می‌شود، مقدار نرخ سفتی در قیر شاهد بیشتر از قیر اصلاح شده با نانوسیلیکا می‌باشد.

سه گروه مشخص برای نانوسیلیکا وجود دارد که این گروه‌ها در قیر شاهد وجود ندارد. نوار جذبی ناحیه cm^{-1} (1115^1) تأییدی بر وجود گروه Si-O-Si در ترکیب است و ارتعاشات کششی متقارن گروه نیز در ناحیه cm^{-1} (473) و 744 ظاهر شدند.

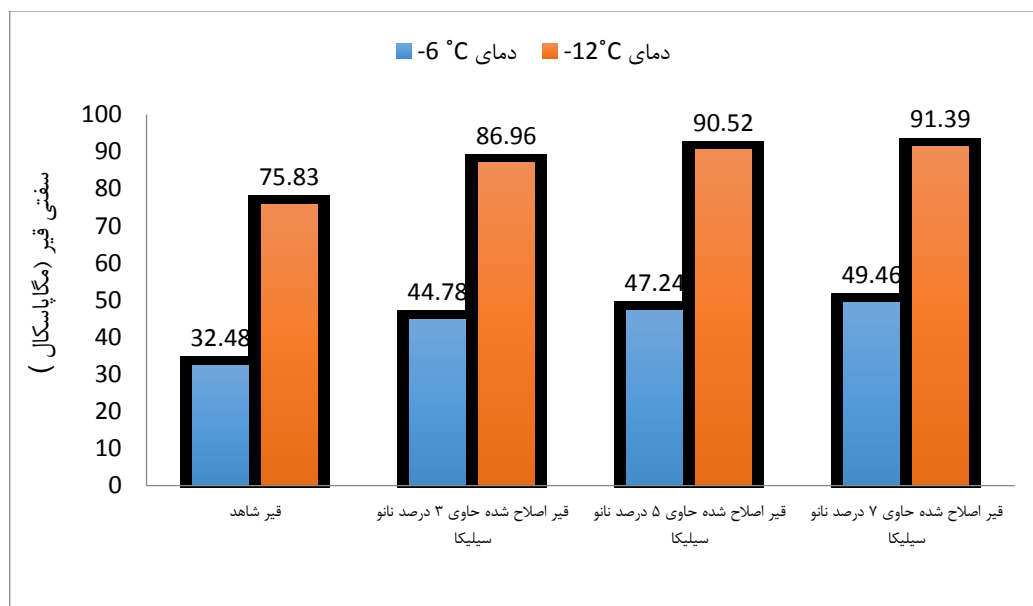
۵-۱-۲. نتایج آزمایش BBR



شکل ۷. تغییرات نرخ سفتی خزشی قیر در نمونه‌های شاهد و اصلاح شده

افزودن ۰.۵٪ نانوسیلیکا به قیر شاهد این میزان به ۹۰/۵۲ مگاپاسکال می‌رسد و همچنین زمانی که ۰.۷٪ نانوسیلیکا به قیر افزوده شود، این مقدار به ۹۱/۳۹ مگاپاسکال افزایش می‌یابد. با افزایش میزان نانوسیلیکا، مقدار سفتی خزشی قیر نیز افزایش می‌یابد.

مطابق شکل ۸، نتایج نشان می‌دهد که بعد از افزودن مقادیر مختلف نانوسیلیکا، سفتی خزشی قیر افزایش می‌یابد. میزان سفتی قیر شاهد ۷۵/۸۳ مگاپاسکال می‌باشد. زمانی که ۰.۳٪ نانوسیلیکا به قیر شاهد اضافه شود میزان سفتی خزشی ۸۶/۹۶ مگاپاسکال می‌شود. حال، با



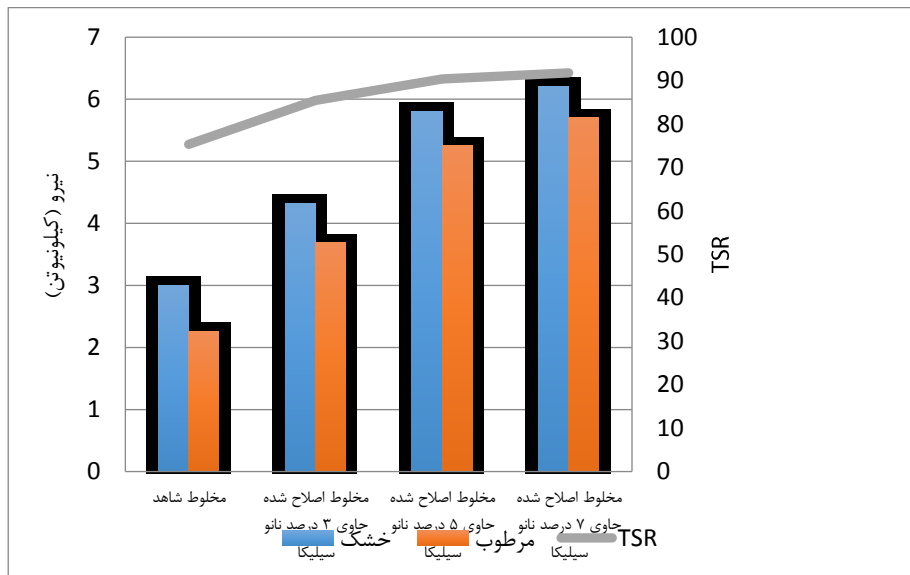
شکل ۸. سفتی خزشی قیر در نمونه‌های شاهد و اصلاح شده

عملکرد دمای کم در نمونه‌های قیری حاوی نانوسیلیکا نامناسب بود. نانوسیلیکا با افزایش سفتی و کاهش m -value، قیرها را مستعد ترک خوردگی می‌کند. به علت افزایش پتانسیل ترک خوردگی، قیرهای حاوی نانوسیلیکا در عملکرد دمای کم ضعف داشتند. اصلاح قیر با نانوسیلیکا موجب کاهش یک درجه گرید عملکرد نسبت به قیر شاهد شد.

۲-۵. مخلوط آسفالتی

۲-۵-۱. ارزیابی حساسیت رطوبتی

طبق آزمایش‌های انجام شده، با افزودن نانوسیلیکا، میزان حساسیت رطوبتی مخلوط کاهش می‌یابد. در شکل ۹، میزان تغییرات حساسیت رطوبتی با توجه به افزایش میزان نانوسیلیکا به مخلوط آسفالتی نشان داده شده است.



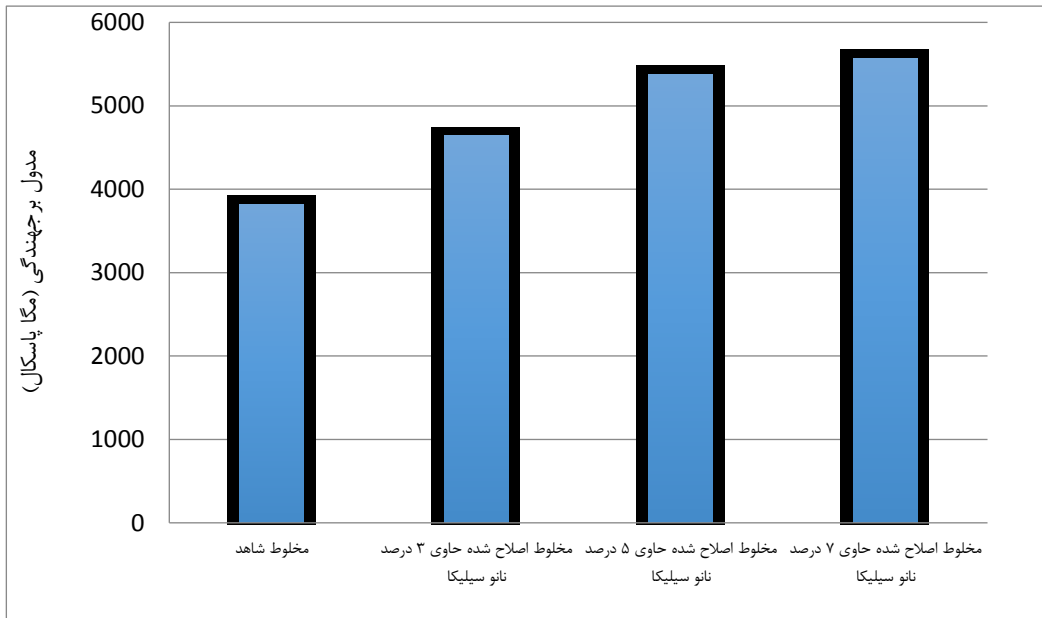
شکل ۹. مقدار نیرو در حالت تر و خشک و شاخص TSR نمونه‌های شاهد و اصلاح شده

آنجا که مدول برجهندگی در تعیین ضخامت آسفالت تأثیر مستقیم دارد، می‌توان با افزایش مدول برجهندگی از ضخامت آسفالت کاست. برای قیر شاهد، میزان مدول برجهندگی مخلوط ۳۸۲۲ مگاپاسکال می‌باشد. وقتی که ۳٪ نانوسیلیکا افزوده شود، میزان مدول به ۴۶۴۵ مگاپاسکال می‌رسد. هرچقدر که میزان نانوسیلیکای افزوده شده بیشتر شود و به ۵٪ برسد، میزان مدول برجهندگی به ۵۳۷۸ مگاپاسکال می‌رسد، همچنین، زمانی که میزان نانوسیلیکا به ۷٪ برسد، میزان مدول برجهندگی ۵۵۷۰ مگاپاسکال می‌شود. از آنجا که نانوسیلیکای مورد استفاده در این پژوهش دارای سطح ویژه بسیار زیاد است، در نتیجه باعث ایجاد شبکه‌هایی در نانوسیلیس می‌شود که افزایش سفتی به همراه کشش زیاد منجر به بهبود عملکرد قیر و مخلوط آسفالتی می‌شود. ذرات نانوسیلیکا در شبکه قیر پخش و باعث مسلح شدن قیر شده‌اند که تغییرات در شبکه قیر می‌تواند باعث افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر تغییر شکل‌های الاستیک و افزایش مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی شود.

نسبت مقاومت کششی به عنوان شاخص کمی حساسیت رطوبتی در نظر گرفته می‌شود. هرچه این عدد به یک نزدیکتر باشد حساسیت به رطوبت کمتر است. این نسبت در شکل ۹ برای نمونه‌های عادی و نمونه‌های اصلاح شده با نانوسیلیکا مورد مقایسه قرار گرفته است. همانطور که مشاهده می‌شود، این نسبت در حالت اصلاح شده نسبت به حالت عادی افزایش یافته است. نمونه حاوی ۷ درصد نانوسیلیکا بهترین عملکرد را در این زمینه داشت.

۲-۲-۵. مدول برجهندگی

مقادیر مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزودن نانوسیلیکا به مقدار ۳، ۵ و ۷ درصد، مقدار مدول برجهندگی افزایش می‌یابد. مدول برجهندگی یکی از پارامترهای مهم در سازوکار طراحی روسازی است، افزایش مدول برجهندگی می‌تواند باعث کنترل ترک‌های ناشی از بارگذاری در دماهای میانی شود و همچنین از

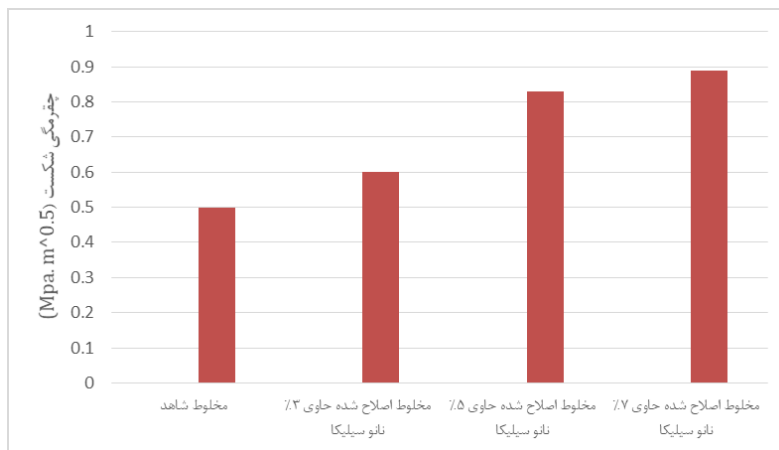


شکل ۱۰. مدول برجهنگی نمونه‌های شاهد و اصلاح شده

شکل ۱۱ آمده است. زمانی که نمونه شاهد داشته باشیم میزان چقرمگی در کمترین حالت خود و میزان تقریبی $(\text{Mpa} \cdot \text{m}^{0.5})$ ۰/۵ قرار دارد. در قیر اصلاح شده حاوی ۳٪ نانو سیلیکا، این عدد حدوداً به $(\text{Mpa} \cdot \text{m}^{0.5})$ ۰/۶ می‌رسد. اگر میزان نانو سیلیکا به ۵٪ برسد چقرمگی به $(\text{Mpa} \cdot \text{m}^{0.5})$ ۰/۸۳ می‌رسد. وقتی میزان نانو سیلیکا به ۷٪ می‌رسد میزان چقرمگی $(\text{Mpa} \cdot \text{m}^{0.5})$ ۰/۸۹ می‌شود. مقدار بهینه نانو سیلیکا با توجه به تغییر کم در درصد ۵ تا ۷ و بحث اقتصادی، می‌تواند در این آزمایش ۵ درصد وزنی قیر باشد.

۵-۲-۳. نتایج آزمایش SCB

چقرمگی شکست، خاصیتی از ماده‌ی دارای ترک است که مقاومت آن را در برابر رشد ترک نشان می‌دهد. معمولاً هر چه میزان پارامتر چقرمگی شکست بیشتر باشد، آن ماده بهتر می‌تواند در برابر رشد ترک و بارهای وارده مقاومت کند. آزمایش بارگذاری خمشی نیم‌دایره‌ای از آزمایش‌های رایج مکانیک شکست می‌باشد، که در آن نمونه نیم‌دایره‌ای ترک‌دار در معرض بارگذاری خمشی سه نقطه قرار می‌گیرد. چقرمگی از پارامترهای مهم در تحلیل آزمایش شکست می‌باشد. نمودار چقرمگی در



شکل ۱۱. چقرمگی شکست (KIC) نمونه‌های شاهد و اصلاح شده

۳-۵. ارتباط میان پارامترها

ارتباط بین پارامترهای سفتی و نرخ سفتی قیر با مدول برجهندگی مخلوط و سفتی قیر و نرخ سفتی قیر با حساسیت رطوبتی مخلوط معنی دار می‌باشد. همچنین، میان پارامترهای سفتی و نرخ سفتی قیر با چقرمگی شکست در مخلوط آسفالتی ارتباط معنی داری وجود دارد. همچنین، نتایج حاکی از ارتباط مناسب تر سفتی خزشی با چقرمگی در مقایسه با نرخ سفتی خزشی با چقرمگی می‌باشد.

با توجه به جمع‌شدگی و کاهش جابجایی در نمونه ۷ درصد می‌توان این طور استنباط کرد که افزودن نانو تا لحظه شکست، مقاومت نمونه را افزایش می‌دهد. ولی از منظر انرژی، با ترد شدن مخلوط که در نتیجه سفتی زیاد قیر به وجود آمد، قفل و بست میان مخلوط و قیر کاهش یافته و در واقع سرعت انتشار ترک در نمونه افزایش می‌یابد که این نتیجه در آزمایش BBR نیز مشهود است و ارتباط مناسبی وجود دارد.

جدول ۵. ارتباط میان پارامترهای مورد مطالعه در این پژوهش

| متغیر ۱ (X) | متغیر ۲ (Y) | رابطه | R ² |
|-------------|---------------|-------------------------|----------------|
| سفتی | مدول برجهندگی | $Y = 100/43X + 486/24$ | ۰/۹۱۸۱ |
| نرخ سفتی | مدول برجهندگی | $Y = -26154X + 14008$ | ۰/۹۳۸ |
| سفتی | مدول برجهندگی | $Y = 0/9711X + 43/493$ | ۰/۹۷۸۴ |
| نرخ سفتی | مدول برجهندگی | $Y = -247/66X + 172/4$ | ۰/۹۵۸۷ |
| سفتی | چقرمگی | $Y = -5/7692X + 2/7242$ | ۰/۸۴۱ |
| نرخ سفتی | چقرمگی | $Y = 0/0214X - 0/226$ | ۰/۷۶۷۸ |

می‌رسد. در دمای ۱۲- درجه سلسیوس، این میزان در مخلوط شاهد از ۰/۳ به ۰/۲۸ در مخلوط اصلاحی با ۷٪ نانوسیلیس می‌رسد. سفتی خزشی با افزایش نانومواد به قیر افزایش می‌یابد. بدین شکل که در مخلوط شاهد، در دمای ۶- درجه سلسیوس، این میزان ابتدا ۳۲/۴۸ مگاپاسکال است که در نهایت به میزان ۴۹/۴۶ مگاپاسکال در مخلوط اصلاح شده با ۷٪ نانوسیلیکا می‌رسد.

✓ نمونه‌های آسفالتی با مصالح اصلاح شده با نانوسیلیس نسبت به نمونه‌های آسفالتی شاهد مدول برجهندگی بیشتری دارد. بدین ترتیب که در مخلوط شاهد این میزان ابتدا عدد ۳۸۰۰ مگاپاسکال را به طور تقریبی نمایش می‌دهد. اما در مخلوط اصلاح شده با ۷٪ نانوسیلیکا این میزان تقریباً به ۵۷۰۰ مگاپاسکال می‌رسد.

۶. نتیجه گیری

ترک‌های برودتی از مهم‌ترین ترک‌ها به شمار می‌روند. شرایط آب‌وهوایی سرد و عبور و مرور روزافزون وسایل نقلیه باعث گسترش این ترک‌ها می‌گردد. در این پژوهش، مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی داغ اصلاح شده با نانواکسید سیلیکا مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، از نمونه‌های شاهد و نیز نمونه‌های اصلاح شده با درصدهای مختلفی از نانوسیلیکا استفاده گردید. نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر خلاصه می‌گردد:

✓ با افزودن نانوسیلیکا به مخلوط آسفالتی، میزان نرخ سفتی قیر کاهش می‌یابد. بدین صورت که این میزان در دمای ۶- درجه سلسیوس از ۰/۳۹ در مخلوط شاهد به ۰/۳۲ در مخلوط اصلاحی با ۷٪ نانوسیلیکا

- ✓ با توجه به جمع‌شدگی و کاهش جابجایی در نمونه ۷ درصد می‌توان این طور استنباط کرد که افزودن نانو تا لحظه شکست مقاومت نمونه را افزایش می‌دهد؛ ولی از منظر انرژی، با ترد شدن مخلوط که در نتیجه سفتی زیاد قیر به وجود آمد، قفل و بست میان مخلوط و قیر کاهش یافته و در واقع سرعت انتشار ترک در نمونه افزایش می‌یابد که این نتیجه در آزمایش BBR نیز مشهود است و ارتباط مناسبی وجود دارد.
- ✓ نمونه‌های آسفالتی با مصالح اصلاح‌شده با نانوسیلیس نمایانگر این موضوع است که حساسیت رطوبتی مخلوط شاهد، میزان TSR به‌طور تقریبی ۷۰ درصد می‌باشد. حال، هرچه میزان نانوسیلیس افزوده شده به مخلوط بیشتر شود، عدد TSR افزایش یافته و در نهایت که ۷٪ نانوسیلیس به مخلوط اضافه می‌شود، این مقدار به ۹۰ درصد می‌رسد.

۷. مراجع

- AASHTO T283. 2003. "Resistance of compacted hot-mix asphalt (HMA) to moisture-induced damage". AASHTO, USA.
- AASHTO TP 105-13. 2013. "Standard method of test for determining the fracture energy of asphalt mixtures using the semicircular bend (SCB) geometry". AASHTO Provisional Standards, American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Alhamali, D. I., Yusoff, N. I. M., Wu, J., Liu, Q. and Albrka, S. I. 2015. "The effects of nano silica particles on the physical properties and storage stability of polymer-modified bitumen". J. Civ. Eng. Res., 5(4A): 11-16.
- ASTM D4123-82. 2003. "Indirect tension test for resilient modulus of bituminous mixtures". ASTM Book of Standards, Vol. 04.03, USA.
- ASTM D6648. 2016. "Standard test method for determining the flexural creep stiffness of asphalt binder using the bending beam rheometer (BBR)". ASTM International.
- Behbahani, H., MohammadAliha, M. R., Fazaeli, H. and Rezaifar, M. H. 2013. "Effect of characteristic specifications on fracture toughness of asphalt concrete materials". Proceedings of the 13th International Conference on Fracture, Beijing, China, pp. 16-21.
- Chong, K. P. and Kuruppu, M. D. 1984. "New specimen for fracture toughness determination for rock and other materials". Int. J. Fracture, 26: 59-62.
- Elseifi, M. A., Mohammad, L. N., Ying, H. and Cooper III, S. 2012. "Modeling and evaluation of the cracking resistance of asphalt mixtures using the semi-circular bending test at intermediate temperatures". Road Mater. Pavement Design, 13(S1): 124-139.
- Falchetto, A. C., Moon, K. H., Wang, D., Riccardi, C. and Wistuba, M. P. 2018. "Comparison of low temperature fracture and strength properties of asphalt mixture obtained from IDT and SCB under different testing configurations". Road Mater. Pavement Design, 19(3): 591-604.
- Fang, C., Yu, R., Liu, S. and Li, Y. 2013. "Nanomaterials applied in asphalt modification: A review". J. Mater. Sci. Technol., 29(7): 589-594.
- Haslett, K. E. 2018. "Evaluation of cracking indices for asphalt mixtures using SCB tests at different temperatures and loading rates". Master Thesis, University of New Hampshire, Durham.
- Jiang, J., Ni, F., Dong, Q., Wu, F. and Dai, Y. 2018. "Research on the fatigue equation of asphalt mixtures based on actual stress ratio using semi-circular bending test". Constr. Build. Mater., 158: 996-1002.
- Journal No. 234. "Asphalt pavement regulations of Iranian roads".
- Massoud Palassi, Saeed Sadeghpour Galooyak, Ahmad Goli, and Hossein Zanjirani Farahani. "Performance evaluation of nano-silica modified bitumen." International Journal of Transportation Engineering (IJTE) 3, no. 1 (2015).
- Mirsayar, M. M. 2017. "On the low temperature mixed mode fracture analysis of asphalt binder- Theories and experiments". Eng. Fract. Mech., 186: 181-194. doi: 10.1016/j.engfracmech.2017.10.010.
- Nazari, H. 2018. "Improving aging resistance and fatigue performance of asphalt binders using inorganic nanoparticles". Constr. Build. Mater., 170: 591-602.
- Saha, G. and Biligiri, K. P. 2017. "State-dynamic response analyses through semi-circular bending test: Fatigue life prediction of asphalt mixtures". Constr. Build. Mater., 150: 664-672.

- Shafabakhsh, G. A., Motamedi, M., Firouznia, M. and Isazadeh, M. 2019. "Experimental investigation of the effect of asphalt binder modified with nanosilica on the rutting, fatigue and performance grade". *Petrol. Sci. Technol.*, 37(13): 1495-1500.
- Sadeghpour Galooyak, S., Palassi, M., Goli, A. and Zanjirani Farahani, H. 2015. "Performance evaluation of nano-silica modified bitumen". *Int. J. Transport. Eng.*, 3(1): 55-66.
- Yao, H., You, Z., Li, L., Lee, C. H., Wingard, D., Yap, Y. K., Shi, X. and Goh, S. W. 2013. "Rheological properties and chemical bonding of asphalt modified with nanosilica". *J. Mater. Civ. Eng.*, 25(11): 1619-1630.
- Yildirim, Y. 2007. "Polymer modified asphalt binder". *Constr. Build. Mater.*, 21(1): 66-72.