



Semnan University



Research Article

Performance Evaluation of Nano Silica Used in Asphalt Mixture: Focus on the Content and Aging of Recycled Asphalt Pavement

Esmail Taheri ^a, Gholamali Shafabakhsh ^{b*}, Mostafa Sadegnejad ^c

^a Ph.D. Candidate, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, I. R. Iran.

^b Professor, Department of Road and Transportation, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, I. R. Iran.

^c Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Guilan, Rasht, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2025-05-24

Revised: 2025-07-25

Accepted: 2025-07-26

Keywords:

Effect of aging,
Nano-SiO₂,
Moisture damage,
Fatigue performance,
Fracture resistance.

ABSTRACT

Incorporating recycled asphalt pavement (RAP) into asphalt mixtures is a common practice for sustainability. However, aging and hardening of the RAP binder can compromise performance. Aged RAP is stiffer, less flexible, and more prone to cracking. This research investigates the combined effects of RAP content, RAP age, and nano-silica (SiO₂) addition on asphalt performance, focusing on fracture resistance, fatigue resistance, and moisture susceptibility. Asphalt mixtures containing 25%, 50%, and 75% RAP were evaluated using RAP aged 5 and 10 years. Nano-SiO₂ was incorporated at 0%, 1%, 1.5%, and 2%. Performance evaluations included semi-circular bending test for fracture resistance, indirect tensile fatigue test for fatigue resistance, and tensile strength ratio (TSR) test for moisture susceptibility. The findings indicated that nano-SiO₂ significantly enhanced fracture and fatigue resistance, especially at lower RAP content. At 25% RAP, 1.5% and 2% nano-SiO₂ improved both fracture and fatigue resistance by 15%-20%. Notable enhancements were observed for mixtures with 50% and 75% RAP, with optimal results at 2% nano-silica. Furthermore, nano-SiO₂ improved moisture resistance, increasing TSR values above 80%. Nano-silica effectively mitigated aging effects, particularly in mixtures with higher RAP content. Based on this analysis, utilizing 25%-50% RAP combined with 1.5% nano-SiO₂ is advisable for producing high-performance asphalt mixtures.

* Corresponding author.

E-mail address: ghshafabakhsh@semnan.ac.ir



مقاله پژوهشی

ارزیابی استفاده از نانو سیلیس در عملکرد مخلوط آسفالتی با تمرکز بر درصد مصرفی و میزان عمر پیرشدگی آسفالت بازیافتی

اسماعیل طاهری^۱، غلامعلی شفافبخش^{۲*}، مصطفی صادق‌نژاد^۳

^۱ دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

^۲ استاد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

^۳ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۰۳	استفاده از آسفالت بازیافتی (RAP) به دلیل پیرشدگی قیر می‌تواند عملکرد مخلوط را کاهش دهد.
بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۰۳	این پژوهش، اثر هم‌زمان مقدار RAP، عمر RAP و نانو سیلیس (SiO_2) را بر مقاومت در برابر شکست، خستگی و حساسیت رطوبتی بررسی می‌کند. مخلوط‌های آسفالتی با ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد RAP با عمرهای ۵ و ۱۰ سال آزمایش شدند. همچنین، نانو سیلیس در مقادیر صفر، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد وزنی به قیر اضافه شد. از آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای برای مقاومت ترک‌خوردگی، آزمایش بارگذاری مکرر کششی غیرمستقیم برای عملکرد خستگی و آزمایش TSR برای حساسیت رطوبتی به‌کار گرفته شدند. نتایج نشان داد که نانو سیلیس، به‌ویژه در مخلوط‌های با RAP کمتر، مقاومت در برابر ترک‌خوردگی و خستگی را بهبود می‌بخشد. در نمونه‌های دارای ۲۵ درصد RAP، افزودن ۱/۵ و ۲ درصد نانو سیلیس، مقاومت شکست و خستگی را ۱۵ تا ۲۰ درصد افزایش داد. در مخلوط‌های دارای ۵۰ و ۷۵ درصد RAP، بهترین نتایج در غلظت ۲ درصد نانو سیلیس مشاهده شد. نانو سیلیس حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی را نیز کاهش داد و TSR را به بیش از ۸۰ درصد رساند و از طرفی اثرات پیرشدگی را کاهش داد. به طور کلی، برای دستیابی به مخلوط‌های آسفالتی با عملکرد بالا، استفاده از ۲۵ تا ۵۰ درصد RAP همراه با ۱/۵ درصد نانو سیلیس توصیه می‌شود.
واژه‌های کلیدی:	
اثر پیرشدگی،	
نانو سیلیس،	
خرابی رطوبتی،	
عملکرد خستگی،	
مقاومت شکست.	

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: ghshafabakhsh@semnan.ac.ir

استناد به این مقاله: طاهری، اسماعیل، شفافبخش، غلامعلی و صادق‌نژاد، مصطفی. (۱۴۰۴). ارزیابی استفاده از نانو سیلیس در عملکرد مخلوط آسفالتی با

تمرکز بر درصد مصرفی و میزان عمر پیرشدگی آسفالت بازیافتی. مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، ۱۱(۳)، ۱-۲۰

<https://doi.org/10.22075/jtie.2025.37817.1724>

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱. مقدمه

روسازی آسفالتی یکی از پرکاربردترین مصالح در ساخت و نگهداری راه‌ها است. با این حال، به دلیل قرار گرفتن مداوم در معرض عوامل محیطی مانند تغییرات دما، رطوبت و بارهای ترافیکی سنگین، مخلوط‌های آسفالتی معمولاً با مشکلاتی نظیر ترک‌خوردگی، آسیب رطوبتی و خستگی مواجه می‌شوند (ماهپور و همکاران، ۲۰۲۲؛ خدادادی و همکاران، ۲۰۲۲). این مسائل می‌توانند منجر به کاهش دوام سازه روسازی، افزایش هزینه‌های تعمیر و کاهش عمر مفید آن شوند (شفابخش و احمدی، ۲۰۱۹؛ شفابخش و سجادی، ۲۰۱۸). به‌منظور مقابله با این چالش‌ها، صنعت آسفالت همواره در حال بررسی روش‌هایی برای بهبود عملکرد و افزایش عمر مخلوط‌های آسفالتی از طریق اصلاحات مختلف است (شفابخش و همکاران، ۲۰۲۰؛ شفابخش و احمدی، ۲۰۱۶). در این میان، استفاده از آسفالت بازیافتی^۱ (RAP) و افزودنی‌های نوآورانه نظیر نانومواد به عنوان راهکارهای مفید مطرح شده‌اند (چن و همکاران، ۲۰۲۱؛ زومانیس و همکاران، ۲۰۲۳). ماده RAP به دلیل مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی، به یکی از اجزای مهم در ساخت روسازی آسفالتی تبدیل شده است (پورانیان و شیشه‌بر، ۲۰۱۹). این ماده شامل مصالح فرآوری‌شده‌ای است که از قیر و سنگدانه‌های بازیافتی از روسازی‌های قدیمی تشکیل شده و مجدداً در مخلوط‌های آسفالتی جدید مورد استفاده قرار می‌گیرد (ماهپور و همکاران، ۲۰۲۳؛ خدادادی و همکاران، ۲۰۲۱؛ فخری و همکاران، ۲۰۲۰). استفاده از RAP نه تنها منابع طبیعی را حفظ می‌کند، بلکه میزان ضایعات را کاهش داده و منجر به مدیریت پایدارتر روسازی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود (آنتونیس و همکاران، ۲۰۱۶؛ لی و همکاران، ۲۰۲۴).

با این حال، RAP به دلیل منابع متنوع و دپوهای مختلف، دارای تغییرات قابل‌توجهی در خصوصیات خود است که باعث می‌شود دسترسی به مواد با کیفیت یکنواخت برای آزمایش‌ها تقریباً غیرممکن باشد (کولبرت و یو، ۲۰۱۱؛ کیان و همکاران، ۲۰۲۰). علاوه بر این، استفاده از مقادیر زیاد RAP در مخلوط‌های آسفالتی چالش‌هایی ایجاد می‌کند که عمدتاً ناشی از حضور قیر پیرشده در RAP است (یو و همکاران، ۲۰۲۰). قیر پیرشده معمولاً سخت‌تر و شکننده‌تر از قیر تازه بوده و می‌تواند تأثیر منفی بر عملکرد مخلوط آسفالتی بگذارد (ایسلام و همکاران، ۲۰۲۴؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۲۰). قیر موجود در RAP با افزایش سفتی، انعطاف‌پذیری مخلوط را کاهش داده و احتمال ترک‌خوردگی را افزایش می‌دهد (دبارما و همکاران، ۲۰۲۰؛ سینگ و گیریمات، ۲۰۱۶؛ آنتونیس و همکاران، ۲۰۱۹). بنابراین، بهبود ویژگی‌های مخلوط‌های آسفالتی با درصد زیاد RAP برای اطمینان از دوام و عملکرد مناسب آن‌ها امری ضروری است (خدادادی و همکاران، ۲۰۲۰؛ خدادادی و همکاران، ۲۰۲۱).

مطالعات مختلفی تأثیر RAP بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی را بررسی کرده‌اند (هو و همکاران، ۲۰۲۴). به عنوان مثال، باسونی و همکاران (۲۰۱۴) خواص مکانیکی مخلوط‌های حاوی مقادیر مختلف RAP را بررسی کرده و دریافتند که با افزایش مقدار RAP، مقاومت خستگی کاهش و سختی مخلوط افزایش می‌یابد. همچنین، لی و همکاران (۲۰۱۸) اثرات RAP بر رفتار ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی را مورد مطالعه قرار داده و نشان دادند که RAP پیرشده تأثیر منفی بر مقاومت شکست مخلوط دارد. در حالی که مزایای استفاده از RAP واضح است، عامل سن RAP نیز نقش مهمی در عملکرد مخلوط‌های آسفالتی ایفا می‌کند. با این حال، تحقیقات کمتری به بررسی تأثیر تفاوت بین RAP با سن ۵ سال و ۱۰ سال

1- Reclaimed asphalt pavement

پرداخته‌اند و تنها مطالعات محدودی این تفاوت‌ها را بررسی کرده‌اند (آنجل و هاگنر، ۲۰۲۴؛ وو و همکاران، ۲۰۱۷). با افزایش سن RAP، میزان سختی و شکنندگی آن افزایش می‌یابد، که بررسی نحوه تغییر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی با سنین مختلف RAP را ضروری می‌سازد (لیو و همکاران، ۲۰۲۴). پرادهان (۲۰۲۳) نشان داد که مخلوط‌های حاوی RAP قدیمی‌تر به دلیل افزایش پیرشدگی و سخت‌شدگی قیر، مقاومت کمتری در برابر ترک‌خوردگی دارند. یکی از راهکارهای پیشنهادی برای کاهش اثرات منفی RAP پیرشده، استفاده از نانومواد است (ژو و همکاران، ۲۰۲۴؛ موسوی راد و همکاران، ۲۰۲۲) در این میان، نانو سیلیس (SiO_2) به عنوان یک افزودنی مؤثر مورد توجه قرار گرفته است (کامبوزیا و همکاران، ۲۰۲۱؛ شفابخش و همکاران، ۲۰۲۰) این ماده به دلیل ابعاد نانومتری و سطح ویژه زیاد، با قیر در سطح مولکولی تعامل داشته و می‌تواند اثرات منفی پیرشدگی را کاهش دهد، به‌ویژه در مخلوط‌هایی که حاوی RAP هستند (البیاتی و همکاران، ۲۰۲۴؛ ژو و همکاران، ۲۰۲۴) مطالعات نشان داده‌اند که نانو سیلیس با بهبود خواص چسبندگی قیر، کاهش اثرات پیرشدگی و افزایش مقاومت مخلوط در برابر ترک‌خوردگی و خستگی، عملکرد مخلوط‌های آسفالتی را ارتقا می‌بخشد (شفابخش و همکاران، ۲۰۱۵؛ لیو ویلاکورتا و وارگاس نوردبک، ۲۰۱۹) به عنوان مثال، آدامو و همکاران (۲۰۱۸) نشان دادند که افزودن نانو سیلیس به قیر، مقاومت خستگی مخلوط‌های آسفالتی را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. همچنین، میرعبدالعظیمی و همکاران (۲۰۲۱) نقش نانو سیلیس را در بهبود مقاومت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی بررسی کرده و نشان دادند که این ماده می‌تواند آسیب‌های ناشی از رطوبت را کاهش دهد. علاوه بر این، شفابخش و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که نانو سیلیس عملکرد

مخلوط‌های آسفالتی را در دماهای کم بهبود می‌بخشد. با وجود مطالعات متعددی که تأثیر میزان RAP و پیرشدگی آن را بر مخلوط‌های آسفالتی بررسی کرده‌اند و تحقیقات جداگانه‌ای که به نقش نانو سیلیس پرداخته‌اند، پژوهش‌های اندکی به بررسی هم‌زمان این سه عامل پرداخته‌اند. تعداد کمی از مطالعات، اثرات ترکیبی میزان RAP، سن RAP و افزودن نانو سیلیس را به‌صورت جامع و از طریق آزمون‌های مختلف عملکردی مانند مقاومت شکست، مقاومت خستگی و حساسیت رطوبتی ارزیابی کرده‌اند. علاوه بر این، تأثیر سن RAP در این زمینه همچنان کمتر بررسی شده است و شکاف علمی در درک نقش نانو سیلیس در کاهش اثرات منفی RAP با درصد بالا و پیرشدگی RAP وجود دارد. از این رو، هدف این مطالعه، ارائه یک ارزیابی جامع از اثرات ترکیبی مقدار RAP (۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد)، سن RAP (۵ سال و ۱۰ سال) و مقدار نانو سیلیس (صفر، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد) بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی است. این تحقیق بر شاخص‌های کلیدی عملکرد از جمله مقاومت شکست (با استفاده از آزمون نیم‌دایره خمشی)، مقاومت خستگی (با استفاده از آزمون کشش غیرمستقیم) و حساسیت رطوبتی (با استفاده از آزمون مقاومت کشش غیرمستقیم) تمرکز دارد. هدف نهایی این پژوهش، دستیابی به درک جامع از نحوه تعامل این عوامل و تعیین ترکیب بهینه RAP و نانو سیلیس برای دستیابی به مخلوط‌های آسفالتی با عملکرد بالا است.

۲. مواد و مصالح

۲-۱. افزودنی‌ها

نانو دی‌اکسید سیلیکون (SiO_2) از دو عنصر سیلیکون و اکسیژن تشکیل شده است و ساختاری مشابه مولکول آب دارد (شو و همکاران، ۲۰۱۰). نانو سیلیکا به دلیل دارا بودن سطح ویژه بالا، نرخ واکنش‌پذیری بالایی

دارد. از این رو، در صنعت بتن یکی از پرکاربردترین مواد محسوب شده و نقش مهمی در افزایش چسبندگی و پرکنندگی بتن‌های با عملکرد بالا ایفا می‌کند (شو و همکاران، ۲۰۱۶). در این پژوهش، بر اساس یافته‌های مطالعات پیشین، مقدار بهینه نانو دی‌اکسید سیلیکون برای تأثیر قابل توجه آن بر فرآیند پیرشدگی قیر، ۱/۵ درصد انتخاب شده است (چراغیان و ویستوبا، ۲۰۲۱؛ شفابخش و همکاران، ۲۰۲۰). ویژگی‌های این ماده در جدول ۱ ارائه شده است. اگرچه انتخاب ۱/۵٪ نانو سیلیس در ابتدا بر اساس مطالعات قبلی بود، اما این مقدار مصرف در کنار سایر مقادیر (۱٪ و ۲٪) در تحقیق حاضر به صورت تجربی ارزیابی شد. نتایج عملکردی این پژوهش نیز نشان داد که بهینه بودن این مقدار مصرف نه تنها توسط ادبیات قبلی، بلکه توسط شواهد تجربی این مطالعه نیز پشتیبانی می‌شود. از این-رو، علاوه بر مقدار بهینه پیشنهادی ادبیات فنی، به منظور بررسی تغییرات عملکرد قیر اصلاح شده، دو درصد دیگر از نانو SiO_2 (۱ و ۲ درصد) نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

جدول ۱. ویژگی‌های نانو سیلیس استفاده شده در این

مطالعه	
مقدار	مشخصه
SiO_2	فرمول شیمیایی
2.4	وزن مخصوص (g/cc)
80	اندازه ذرات (Nm)
سفید	رنگ
کروی	مورفولوژی
160	سطح ویژه (m^2/g)
<0.2	جذب آب (%)
99.9	درجه خلوص (%)

این نانومواد می‌توانند به صورت ذرات پودری خشک یا به صورت معلق در یک مایع محلول آزاد شوند. با توجه به شرایط آزمایش‌ها، حلال مورد استفاده در این پژوهش باید در دماهای پایین و متوسط به خوبی در قیر حل شود، نرخ تبخیر بالایی داشته باشد و تأثیر قابل توجهی بر خواص مکانیکی قیر نگذارد. علاوه بر این، حلال انتخابی باید در دمای محیط ویسکوزیته پایینی داشته باشد تا توزیع یکنواخت نانومواد در قیر تضمین شود. برخی از حلال‌ها مانند نفت سفید (Kerosine) و وارسل (Warsel)، ترپانتین (Turpentine) و استون (Acetone) دارای این ویژگی‌ها هستند (شفابخش و همکاران، ۲۰۲۱؛ شفابخش و همکاران، ۲۰۲۰). در این پژوهش، مطابق با مطالعات پیشین، از حلال نفت سفید برای پراکندگی نانومواد در قیر استفاده شده است. انتخاب نفت سفید به دلیل مقرون به صرفه بودن، دسترسی آسان و ماهیت نفتی آن صورت گرفته است، زیرا این ویژگی‌ها اثرات نامطلوب بر ساختار شیمیایی قیر را به حداقل می‌رساند. در این پژوهش، برای اطمینان از تبخیر کامل نفت سفید، پس از اختلاط نانوسیلیس با قیر، نمونه‌ها در دمای ثابت ۱۶۰ درجه سلسیوس به مدت ۳۰ دقیقه تحت شرایط اختلاط یکنواخت (با همزن مکانیکی) قرار گرفتند تا امکان تبخیر کامل حلال فراهم شود.

۲-۲. قیر

در این پژوهش، از قیری با درجه نفوذ ۷۰/۶۰ (با PG 64-16) استفاده شده است. مشخصات این قیر در جدول ۲ ارائه شده است.

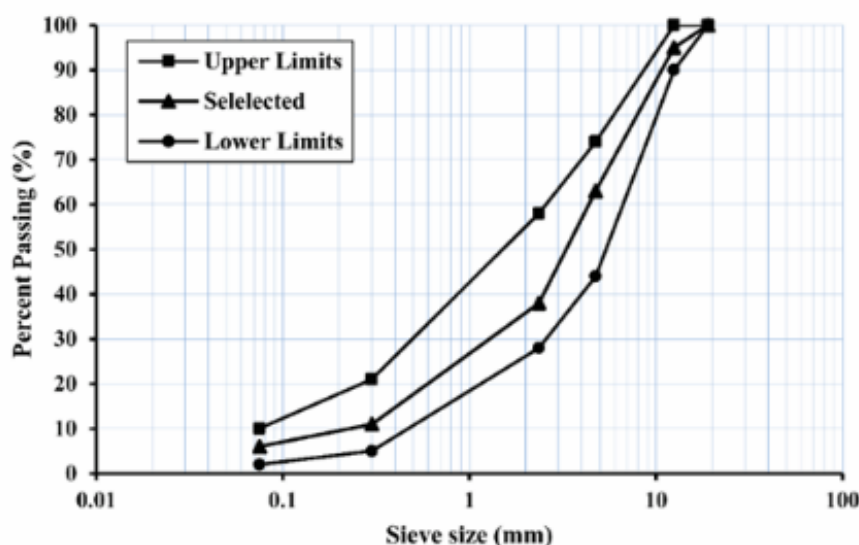
جدول ۲. مشخصات قیر خالص مورد استفاده

مقدار	استاندارد	مشخصه
1.03	ASTM D-70	وزن مخصوص (گرم بر سانتی متر مکعب)
65	ASTM D5-73	نفوذ (۱۰۰ گرم، ۵ ثانیه، ۲۵ درجه سلسیوس)

۲-۳. مصالح سنگی

در این پژوهش، از مصالح سنگی آهکی برای ساخت مخلوط آسفالتی استفاده شد. برای این منظور منحنی دانه‌بندی شکل ۱ با حداکثر اندازه سنگدانه ۱۹ میلی متر در نظر گرفته شد.

51	ASTM D36-76	نقطه نرمی (درجه سلسیوس)
283	ASTM D92-78	نقطه اشتعال (درجه سلسیوس)
431	ASTM D4402	ویسکوزیته در ۱۳۵ درجه سلسیوس
>100	ASTM D113-79	شکل پذیری (۲۵ درجه سلسیوس، ۵ سانتی متر در دقیقه)
0.74	ASTM D1754-78	



شکل ۱. دانه‌بندی مصالح سنگی مورد استفاده در این مطالعه

افزودن نانوسیلیس بر خواص مکانیکی مورد ارزیابی قرار گیرد. این درصد قیر برای مخلوط های آسفالتی اصلاح شده نیز اعمال شد. دو نوع RAP با سنین مختلف ۵ و ۱۰ سال با سه قسمت ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد برای ساخت انواع دیگر مخلوط استفاده شد. لازم به ذکر است که محتوای قیر بهینه مواردی از جمله RAP بر اساس آزمایش استخراج و پروتکل مربوط به طراحی مخلوط برای روسازی آسفالت بازیافتی تعیین شد. سیستم برچسب گذاری برای انواع مختلف مخلوط، همانطور که در جدول ۳ نشان داده شده است، در نظر گرفته شد.

۳. روش آزمایش

۳-۱. طرح اختلاط

مطابق با استاندارد ASTM D1559 (۱۹۸۹) محدوده درصد قیر ۴ تا ۶ درصد برای تهیه نمونه های مارشال استفاده شد. برای فشردن سازی این نمونه ها، ۷۵ ضربه برای شبیه سازی بار ترافیک سنگین اعمال شد. در نهایت، میزان بهینه قیر برای مخلوط آسفالت شاهد ۴/۶ درصد تعیین شد. در این پژوهش، برای حفظ ثبات و فراهم کردن امکان مقایسه مستقیم بین عملکرد مخلوط های مختلف درصد قیر مخلوط شاهد برای سایر ترکیبات بدون RAP نیز حفظ شده است تا تنها تأثیر

جدول ۳. نام گذاری انواع مخلوط های آسفالتی									
نام نمونه	RAP پنج ساله (%)	RAP ده ساله (%)	درصد وزنی SiO2	درصد بهینه فیر					
C-N0	0	0	0	4.6	RB50-N1.5	0	50	1.5	3.8
C-N1	0	0	1	4.6	RB50-N2	0	50	2	3.8
C-N1.5	0	0	1.5	4.6	RB75-N0	0	75	0	3.4
C-N2	0	0	2	4.6	RB75-N1	0	75	1	3.4
RA25-N0	25	0	0	4.0	RB75-N1.5	0	75	1.5	3.4
RA25-N1	25	0	1	4.0	RB75-N2	0	75	2	3.4
RA25-N1.5	25	0	1.5	4.0					
RA25-N2	25	0	2	4.0					
RA50-N0	50	0	0	3.4					
RA50-N1	50	0	1	3.4					
RA50-N1.5	50	0	1.5	3.4					
RA50-N2	50	0	2	3.4					
RA75-N0	75	0	0	2.8					
RA75-N1	75	0	1	2.8					
RA75-N1.5	75	0	1.5	2.8					
RA75-N2	75	0	2	2.8					
RB25-N0	0	25	0	4.2					
RB25-N1	0	25	1	4.2					
RB25-N1.5	0	25	1.5	4.2					
RB25-N2	0	25	2	4.2					
RB50-N0	0	50	0	3.8					
RB50-N1	0	50	1	3.8					

۲-۳. تست خمش نیم دایره

آزمایش خمش نیم دایره ای^۱ یا همان (ASTM) SCB، با هدف ارزیابی مقاومت در برابر شکست مخلوط های آسفالتی با تعیین نرخ آزادسازی انرژی کرنش بحرانی انجام می شود. این پارامتر، مقدار بحرانی انتگرال J_c ، نامیده می شود و همانطور که در معادله (۱) نشان داده شده است، تحت تأثیر نرخ تغییر انرژی کرنش در هر عمق بریدگی (dU/da) قرار می گیرد. این مقدار انرژی کرنش مصرف شده در طول تشکیل یک سطح شکسته در مخلوط آسفالت را منعکس می کند. مقادیر J_c بالاتر نشان دهنده چقرمگی بیشتر در مقاومت در برابر ترک و انتشار ترک است.

$$J_c = -\frac{1}{t} \times \left(\frac{dU}{da} \right) \quad (1)$$

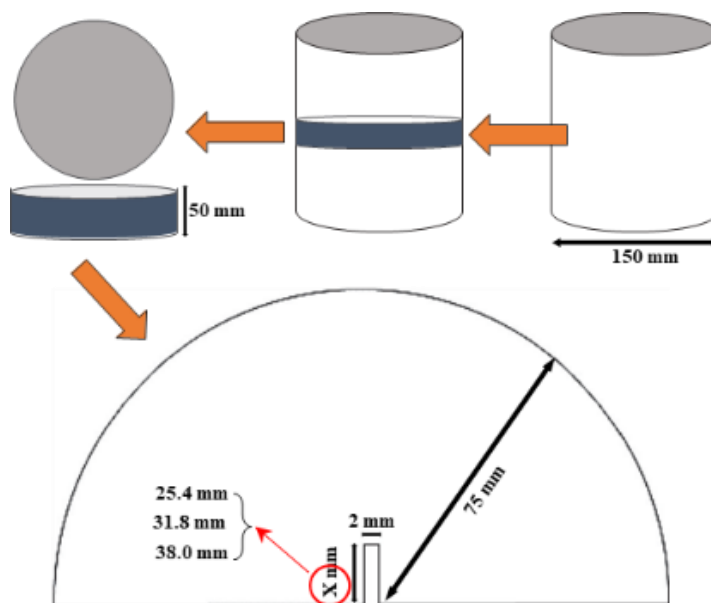
که در آن، J_c نشان دهنده نرخ آزادسازی انرژی کرنش بحرانی در واحدهای kJ/m^2 ، b ضخامت نمونه بر حسب متر، a عمق بریدگی بر حسب متر و U انرژی کرنش تا شکست در $kN-m$ یا kJ است.

به منظور محاسبه J_c ، از نمونه هایی با سه عمق شکاف مختلف استفاده می شود. پیکربندی تست خمشی سه نقطه ای و ابعاد نمونه معمولی آزمایش SCB در

1 - semi-circular bending

محاسبه dU/da از نظر ریاضی با دو نقطه نیز ممکن است، اما به کارگیری سه نقطه امکان اجرای رگرسیون خطی فراهم می‌کند که منجر به کاهش خطای برآورد شیب و افزایش پایداری و دقت مقدار نهایی J_c خواهد شد.

شکل ۲ نشان داده شده است. عمق بریدگی $۲۵/۴$ ، $۳۱/۸$ و ۳۸ میلی‌متر معمولاً بر اساس نسبت ' a/r_d ' انتخاب می‌شود. برای افزایش دقت در محاسبه نرخ تغییر انرژی کرنش نسبت به عمق بریدگی (dU/da)، از نتایج سه عمق بریدگی مختلف استفاده شد. اگرچه



شکل ۲. مراحل آماده‌سازی نمونه برای تست SCB

استاندارد اصلاح‌شده لاتمن AASHTO T283 (استاندارد آشتو، ۲۰۰۷) انجام شد. نمونه‌ها به دو گروه شرایطدار و بدون شرایط تقسیم شدند، که نمونه‌های شرایطدار یک چرخه یخ‌زدن-ذوب را طی کردند. پس از آن، دوام رطوبتی نمونه‌ها با محاسبه نسبت استحکام کششی^۲ یا همان TSR ارزیابی شد، همان‌طور که در معادله (۲) نشان داده شده است:

$$TSR = \frac{ITS_{Conditioned}}{ITS_{Unconditioned}} \times 100 \quad (2)$$

استحکام کششی غیرمستقیم نمونه‌های تحت شرایط بدون شرایط به ترتیب با نام‌های $ITS_{Conditioned}$ و $ITS_{Unconditioned}$ شناخته می‌شوند. حداکثر بار وارد بر نمونه با نماد P نشان داده می‌شود. در حالی که قطر و

نمونه‌های SCB تحت نرخ تغییرشکل ثابت سر متقاطع $۰/۵$ میلی‌متر در دقیقه قرار می‌گیرند و به‌طور یکنواخت روی دستگاه UTM بارگذاری می‌شوند تا زمانی که شکست رخ دهد. در طول آزمایش، داده‌های بار و تغییرشکل به‌طور پیوسته ثبت می‌شوند و برای تولید مجموعه‌ای از منحنی‌های بار در مقابل تغییرشکل استفاده می‌شوند، که از آن‌ها مقدار بحرانی J_c با استفاده از معادله (۱) تعیین می‌شود.

۳-۳. آزمایش دوام رطوبتی

بررسی حساسیت رطوبتی در نمونه‌های مارشال که دارای ۷٪ فضای هوایی بودند، با استفاده از آزمایش مقاومت کشش غیرمستقیم^۱ یا همان ITS مطابق

2 - Tensile strength ratio

1 - Indirect tensile strength

نتایج عملکرد خستگی مخلوط‌های کنترل و اصلاح‌شده با آزمایش ITF ارزیابی می‌شود. علاوه بر این، یک تحلیل آماری برای انواع مختلف مخلوط‌ها انجام خواهد شد تا مهم‌ترین پارامترها در طول این اصلاح شناسایی شوند.

۴-۱. نتایج آزمایش SCB

مقدار بحرانی J-integral برای ارزیابی مقاومت در برابر شکست مخلوط‌های آسفالتی در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، با در نظر گرفتن درصد‌های مختلف RAP، سن‌های مختلف RAP و درصد‌های Nano-SiO₂ به کار گرفته شد. نتایج شکست در سه عمق شکاف ۲۵/۴، ۳۱/۸ و ۳۸/۰ میلی‌متر برای محاسبه این شاخص برای هر نوع مخلوط استفاده شد که نتایج آن در شکل ۳ نشان داده شده است. میله‌های خطای موجود در شکل بیانگر انحراف معیار از میانگین سه تکرار هستند و نشان می‌دهند که تغییرات مشاهده‌شده ناشی از تأثیر افزودنی‌ها بوده و از خطای آزمایشگاهی تأثیر نپذیرفته است.

ضخامت نمونه به ترتیب با نمادهای d و t نمایش داده می‌شوند.

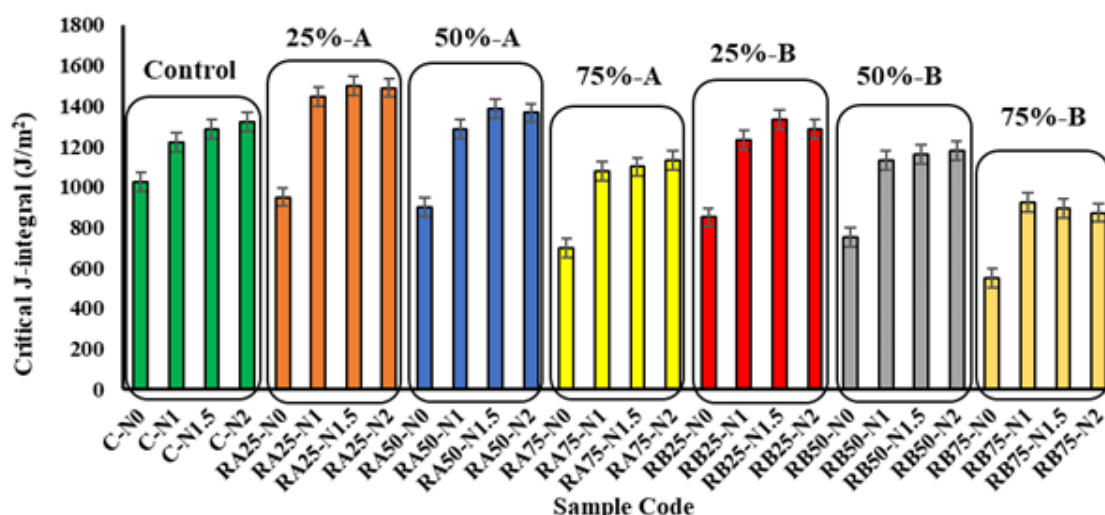
۴-۳. آزمایش بارگذاری خستگی

طول عمر خستگی مخلوط‌های آسفالت با استفاده از آزمایش خستگی کششی غیرمستقیم^۱ یا همان ITF ارزیابی شد. این روش بارهای فشاری عمودی را به یک نمونه استوانه‌ای (با فضای خالی ۴٪) اعمال می‌کند که تنش‌های کششی یکنواختی را در طول صفحه عمودی قطری ایجاد می‌کند. به این ترتیب، تنش‌ها و کرنش‌های کششی افقی ایجاد می‌شود که منجر به شکست خستگی تحت بارگذاری‌های مکرر می‌گردد. طول عمر خستگی به عنوان تعداد دوره‌های بارگذاری مورد نیاز برای رسیدن به شکست تعریف می‌شود، همان‌طور که در استاندارد EN 12697-24 (استاندارد اروپایی، ۲۰۰۴) مشخص شده است. آزمایش‌ها در سه سطح ثابت تنش ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ کیلوپاسکال و دمای ۲۰ درجه سلسیوس با فرکانس بارگذاری نیمه‌سینوسی ۲ هرتز (۰/۱ ثانیه بارگذاری، ۰/۴ ثانیه استراحت) انجام شد. همان‌طور که در معادله (۳) نشان داده شده است، رابطه بین تنش کششی (σ_t) و تعداد دوره‌های بارگذاری تا شکست (N_f) از طریق تحلیل رگرسیون تعیین شد.

$$N_f = K_1 \left(\frac{1}{\sigma_t} \right)^{K_2} = K_1 (\sigma_t)^{-K_2} \quad (3)$$

۴. نتایج

این بخش، ابتدا پتانسیل فرآیند اصلاح قیر توسط نانومواد را برای ارزیابی مقاومت در برابر ترک خوردگی مخلوط‌ها در طول آزمایش SCB بررسی می‌کند. سپس دوام رطوبتی انواع مختلف مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از آزمایش ITS بررسی خواهد شد. در نهایت،



شکل ۳. نتایج J-integral برای مخلوط‌های مختلف در دمای ۲۵ درجه سلسیوس

مقاومت در برابر شکست به‌طور قابل توجهی بهبود یافت، به‌طوری که مخلوط‌های نوع RAP-A با سن ۵ سال اصلاح‌شده با نانومواد، بیشترین افزایش را در حدود ۳۵-۴۵ درصد نسبت به مخلوط کنترلی نشان دادند. مخلوط‌های نوع RAP-B با سن ۱۰ سال اصلاح‌شده با نانومواد، نیز عملکرد بهتری نسبت به نمونه کنترلی داشتند، اگرچه میزان بهبود کمتر و در حدود ۲۰-۳۰ درصد بود.

با افزایش میزان RAP به ۵۰٪، کاهش جزئی در مقاومت شکست نسبت به مخلوط‌های حاوی ۲۵٪ RAP مشاهده شد. با این وجود، مقاومت شکست در مخلوط‌های نوع A اصلاح‌شده با نانومواد، همچنان حدود ۲۵-۳۵ درصد بیشتر از نمونه کنترلی باقی ماند، در حالی که مخلوط‌های نوع B اصلاح‌شده با نانومواد، تنها بهبودی جزئی در حدود ۱۰-۱۵ درصد نشان دادند. با افزایش میزان RAP به ۷۵٪، کاهش چشمگیری در مقاومت شکست رخ داد، به‌ویژه در مخلوط‌های نوع B اصلاح‌شده با نانومواد، که مقدار مقاومت آن‌ها ۱۰-۱۵ درصد کمتر از مخلوط کنترلی شد. در مقابل، مخلوط‌های نوع A اصلاح‌شده با نانومواد، هرچند تحت تأثیر قرار گرفته‌اند، اما مقاومت شکست آن‌ها در

مخلوط کنترلی (آسفالت خالص بدون RAP) مقدار مقاومت در برابر شکست متوسطی به میزان 1027 J/m^2 نشان می‌دهد. این مقدار به عنوان مبنایی برای ارزیابی عملکرد مخلوط‌های اصلاح‌شده با نانومواد و همچنین RAP در نظر گرفته خواهد شد. افزودن ۱، ۱/۵ و ۲ درصد از نانومواد به ترتیب باعث افزایش ۲۵ و ۲۸ درصدی در مقادیر J-integral نسبت به نمونه شاهد اصلاح‌نشده (C-N0) شده است.

اکنون اثر افزودن درصدهای مختلف RAP و همچنین انواع آن (۵ سال و ۱۰ سال) بر عملکرد مخلوط آسفالتی ارزیابی می‌گردد.

استفاده از RAP با مقادیر ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد، باعث شده تا مقاومت در برابر شکست مخلوط‌های آسفالتی کاهش یابد. این موضوع به میزان پیرشدگی قیر موجود در مخلوط‌های حاوی RAP مربوط می‌شود که هر چه سن RAP بالا رفته و یا درصد استفاده از آن افزایش یافته، مقاومت در برابر شکست نیز کاهش یافته است.

افزودن RAP در کنار نانومواد، تأثیر قابل توجهی بر مقاومت در برابر شکست داشت، که این تأثیر بسته به میزان و سن RAP متغیر بود. در ترکیب ۲۵٪ از RAP،

سطحی مشابه یا کمی بالاتر از نمونه کنترلی (حدود ۵-۱۰ درصد افزایش) حفظ شد. این نتایج نشان‌دهنده تأثیر منفی مقادیر بالای RAP بر مقاومت شکست، به‌ویژه در صورت استفاده از RAP اصلاح‌شده با نانومواد، با سن بیشتر است.

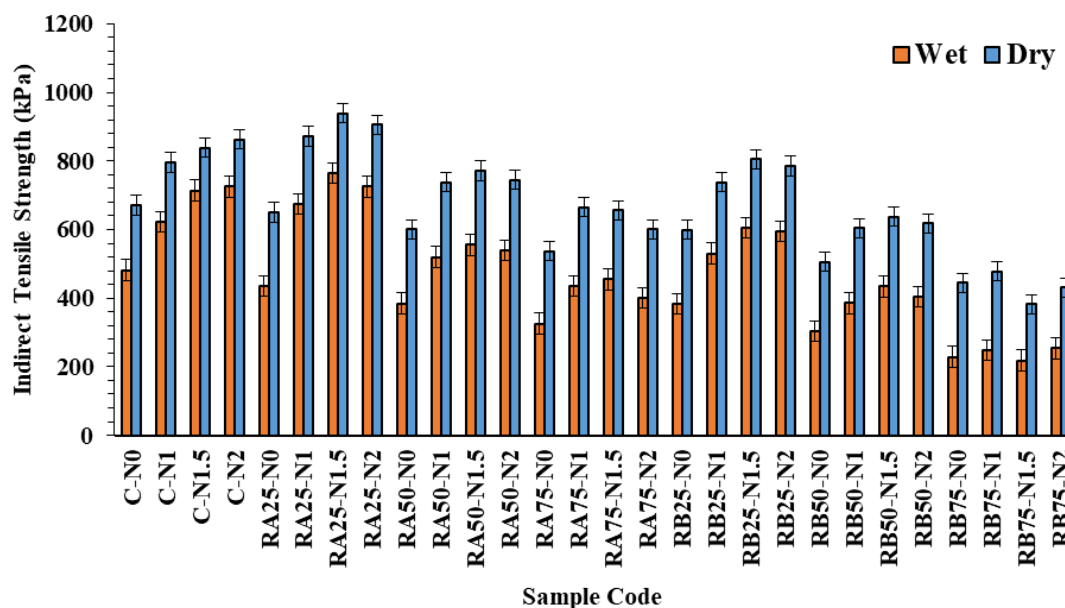
حال، می‌توان اثر افزودن درصدهای مختلف نانومواد در عملکرد مخلوط آسفالتی را به صورت مجزا ارزیابی نمود.

افزودن نانو SiO_2 تأثیر قابل‌توجهی در بهبود مقاومت شکست در تمامی درصدهای RAP و انواع آن نشان داد. این بهبود در مخلوط‌های حاوی RAP با میزان کمتر (یعنی ۲۵٪ و ۵۰٪) بیشتر مشهود بود. به‌عنوان مثال، در ۲۵٪ از RAP، افزایش میزان SiO_2 از صفر به ۱-۲ درصد موجب افزایش ۴۰-۴۵ درصد در مقاومت شکست شد. در ترکیب ۵۰٪ از RAP، این بهبود کمی کمتر، اما همچنان قابل‌توجه بود و در محدوده ۲۵ الی ۳۵٪ قرار داشت. حتی در ۷۵٪ از RAP (که به‌طور کلی کاهش مقاومت شکست مشاهده شد) افزودن نانو SiO_2 اثرات منفی استفاده از مقادیر زیاد از RAP را کاهش داده و موجب بهبود چشمگیر در مقایسه با مخلوط مشابه اصلاح‌نشده آن شده است. اثر نانو SiO_2 ، به‌ویژه در مخلوط‌های نوع B مفید بوده، زیرا کاهش مقاومت شکست ناشی از پیرشدگی مواد RAP را بیشتر جبران کرده است. علت این امر را می‌توان به صورت زیر توضیح داد.

افزایش مشاهده‌شده در مقاومت در برابر شکست، به‌ویژه در مخلوط‌های حاوی RAP قدیمی‌تر (نوع B)، را می‌توان به ویژگی‌های منحصربه‌فرد نانوسیلیس نسبت داد. نانوسیلیس به دلیل سطح ویژه و واکنش‌پذیری بالا، می‌تواند با ترکیبات قطبی اکسیدشده در قیر پیرشده واکنش دهد و به‌طور بالقوه به بازیابی جزئی انعطاف‌پذیری و کاهش شکنندگی کمک کند (دای و همکاران، ۲۰۲۳). علاوه بر این، ذرات کروی فوق‌العاده ریز نانوسیلیس ممکن است به پر کردن ریزحفره‌ها و اصلاح ریزساختار ماتریس قیر کمک کنند (رهمواتی و همکاران ۲۰۲۱) و منجر به بهبود توزیع تنش و چسبندگی بهتر بین قیر و سنگدانه‌های RAP شوند. این مکانیسم‌ها می‌توانند نقش جبرانی نانوسیلیس را در کاهش اثرات منفی RAP پیرشده توضیح دهند.

۴-۲. نتایج حساسیت رطوبتی

مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) مخلوط‌های آسفالتی تحت شرایط خشک و مرطوب ارزیابی شد که نتایج آن در شکل ۴ نمایش داده شده است. میله‌های خطای موجود در این شکل بیانگر انحراف معیار از میانگین سه تکرار می‌باشند. این نتایج تأثیر درصد RAP، سن RAP و مقدار نانو SiO_2 را بر ITS نشان می‌دهد و دیدگاه‌های مهمی درباره حساسیت به رطوبت و استحکام کلی مخلوط‌ها ارائه می‌کند.



شکل ۴. نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های مختلف

به‌ویژه در مخلوط‌های نوع A، که در آن مقدار ITS در شرایط خشک تقریباً ۱۰-۱۵ درصد بیشتر از مقدار مخلوط کنترلی بود.

در ۷۵٪ از RAP، کاهش قابل‌توجهی در مقدار ITS در هر دو شرایط خشک و مرطوب مشاهده شد، به‌طوری‌که مقادیر ITS در مخلوط‌های نوع B حدود ۱۰-۲۰ درصد کمتر از مقدار مخلوط کنترلی شد. این کاهش نشان‌دهنده تأثیرات منفی درصد بالای RAP و مواد RAP با عمر زیاد بر مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی است.

افزودن نانو SiO_2 تأثیر مثبتی بر افزایش مقدار ITS در تمامی سطوح RAP و شرایط مختلف داشت. در مخلوط‌های دارای ۲۵٪ از RAP، افزودن ۲٪ نانو SiO_2 موجب افزایش ۱۵-۲۰٪ مقدار ITS در شرایط خشک و ۱۰-۱۵ درصد در شرایط مرطوب نسبت به مخلوط‌های بدون این افزودنی شد. روند مشابهی در مخلوط‌های دارای ۵۰٪ RAP مشاهده شد، که در آن مقدار ITS در هر دو شرایط تقریباً ۱۰-۱۵ درصد افزایش یافت.

مخلوط کنترلی (C) در هر دو شرایط خشک و مرطوب مقادیر متوسطی از مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) را نشان داد. به‌طوری‌که مقدار ITS در شرایط خشک تقریباً ۴۰-۵۰ درصد بیشتر از شرایط مرطوب بود. این مقایسه پایه‌ای، حساسیت ذاتی آسفالت به رطوبت را بدون افزودنی‌های RAP یا نانو SiO_2 نشان می‌دهد.

افزودن RAP تأثیر قابل‌توجهی بر ITS داشت و این تأثیر بسته به درصد و سن RAP متغیر بود. در ۲۵٪ از RAP، مقدار ITS در شرایط خشک برای نوع A- حدود ۲۰-۲۵ درصد و برای نوع RAP-B حدود ۱۰-۱۵ درصد نسبت به مخلوط کنترلی افزایش یافت. در شرایط مرطوب، این بهبود کمتر بود و افزایش ۱۰-۱۵ درصد برای نوع A و ۵ الی ۱۰٪ برای نوع B مشاهده شد.

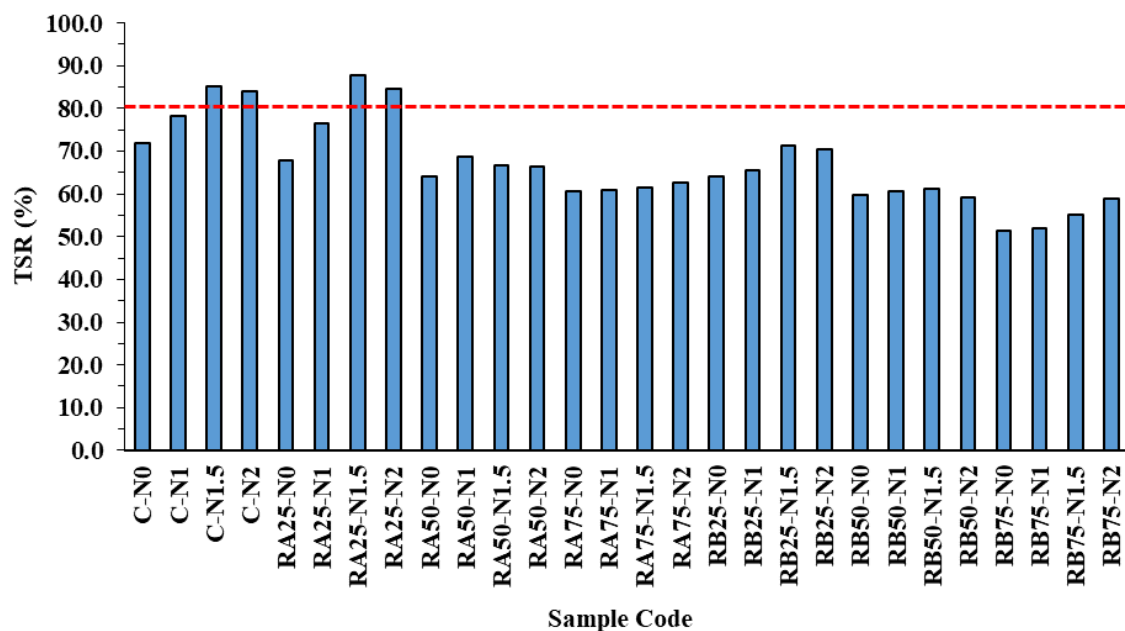
با افزایش درصد RAP به ۵۰٪، مقدار ITS در هر دو شرایط خشک و مرطوب نسبت به مخلوط‌های دارای ۲۵٪ از RAP اندکی کاهش یافت. با این حال، مقادیر RAP همچنان بالاتر از مخلوط کنترلی بود،

(TSR) به عنوان یک معیار قابل اعتمادتر در ارزیابی حساسیت مخلوط‌ها به رطوبت در نظر گرفته شد. نتایج مربوط به TSR در شکل ۵ ارائه شده است که دیدگاه عمیق‌تری نسبت به تأثیر میزان RAP و افزودنی نانو SiO_2 بر دوام مخلوط‌های آسفالتی در برابر رطوبت ارائه می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، نتایج TSR دیدگاه ارزشمندی در مورد عملکرد مخلوط‌های مختلف، از جمله مخلوط کنترلی، مخلوط‌های حاوی مقادیر مختلف RAP، سن RAP و تأثیر افزودن نانو SiO_2 ارائه می‌دهد.

در مخلوط‌های دارای ۷۵ درصد RAP، افزودن نانو SiO_2 کاهش مقدار ITS را جبران کرد و تا ۱۰-۱۵ درصد از مقاومت از دست‌رفته را در هر دو شرایط بازیابی نمود. این بهبود به‌ویژه در مخلوط‌های نوع B قابل‌توجه بود، به‌طوری که مقدار ITS در شرایط مرطوب به مقادیر مخلوط کنترلی نزدیک شد یا حتی از آن فراتر رفت.

با این حال، اتکا صرف به مقادیر ITS در شرایط خشک و مرطوب ممکن است ارزیابی جامعی از عملکرد مخلوط‌های آسفالتی، به‌ویژه مقاومت آن‌ها در برابر آسیب‌های ناشی از رطوبت، ارائه ندهد. برای بررسی دقیق‌تر، نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم



شکل ۵. نتایج TSR برای انواع مختلف مخلوط

افزایش، پتانسیل نانو SiO_2 در بهبود مقاومت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی بدون RAP را نشان می‌دهد و امکان دستیابی به حد توصیه‌شده ۸۰٪ برای TSR را فراهم می‌کند.

برای مخلوط‌های حاوی RAP، نتایج TSR بسته به

مخلوط کنترلی (C) مقادیر TSR در محدوده ۷۰-۸۵ را نشان داد که افزودن نانو SiO_2 تأثیر مثبتی بر آن داشت. به‌طور خاص، مخلوط کنترلی بدون نانو مقدار TSR حدود ۷۰٪ داشت، که با افزایش درصد نانو SiO_2 به ۱/۵٪ و ۲٪، مقدار آن به بیش از ۸۰٪ رسید. این

برای تمام مخلوط‌ها زیر آستانه ۸۰٪ قرار گرفت، که نشان‌دهنده افزایش حساسیت به آسیب‌های ناشی از رطوبت بود. با این حال، افزودن نانو SiO_2 این کاهش را کاهش داد و مخلوط‌های حاوی ۱/۵٪ و ۲٪ نانو SiO_2 تا ۱۰٪ بازیابی در مقادیر TSR داشتند. با این حال، تنها تعداد معدودی از مخلوط‌های ۷۵٪ از RAP نوع A توانستند مقادیر TSR خود را به ۶۰٪ یا بالاتر برسانند.

این نتایج، تأثیر نانو SiO_2 را در کاهش آسیب‌های ناشی از رطوبت، به‌ویژه در مخلوط‌هایی با RAP کمتر یا مواد RAP جوان‌تر نشان می‌دهد.

۳-۴. نتایج بارگذاری خستگی

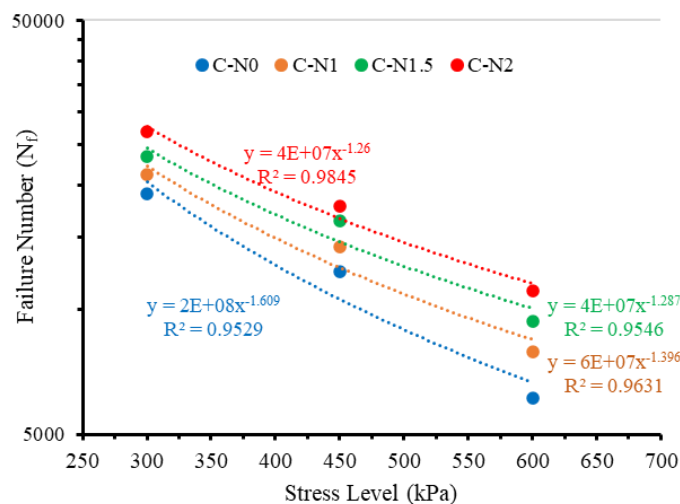
آزمایش ITF روی انواع مختلف مخلوط‌ها برای بررسی عملکرد خستگی ترکیبات مختلف RAP و نانومواد در دمای میانه 20°C با استفاده از دستگاه UTM طبق استاندارد EN 12697-24 انجام شد. نمودار وهلر (Wohler diagram) برای یافتن پارامترهای مرتبط با معادله خستگی ترسیم شد. نتایج این آزمایش در شکل ۶ نشان داده شده است و مربوط به مخلوط‌هایی است که فاقد مواد RAP هستند.

مقدار و سن RAP متفاوت بود. در ۲۵٪ از RAP، مقادیر TSR در محدوده ۷۵-۸۵ درصد قرار داشت. مخلوط‌های دارای RAP نوع A مقادیر TSR کمی بالاتر از مخلوط‌های دارای RAP نوع B نشان دادند، که نشان‌دهنده مقاومت رطوبتی بهتر در مواد RAP با سن کمتر است.

افزودن نانو SiO_2 مقدار TSR را بیشتر بهبود بخشید، به‌طوری که در مخلوط‌های دارای ۱/۵٪ و ۲٪ نانو SiO_2 ، بدون توجه به نوع RAP مقدار TSR به‌طور پیوسته بیشتر از حد ۸۰٪ باقی ماند.

با افزایش میزان RAP به ۵۰٪، مقادیر TSR به طور قابل توجهی کاهش یافت و در بیشتر مخلوط‌ها در بازه ۶۰-۷۰ درصد باقی ماند. مخلوط‌های حاوی RAP نوع A عملکرد بهتری نسبت به مخلوط‌های حاوی RAP نوع B داشتند، به ویژه زمانی که نانو SiO_2 به آن‌ها افزوده شد. به طور خاص، افزودن ۲٪ نانو SiO_2 مقادیر TSR مخلوط‌های حاوی ۵۰٪ از RAP را ۵-۱۰ درصد بهبود داد و برخی مخلوط‌ها را به آستانه ۸۰٪ نزدیک کرد.

در ۷۵٪ از RAP، مقادیر TSR کاهش بیشتری را نشان داد، به ویژه در مخلوط‌هایی که از RAP نوع B استفاده می‌کردند. در غیاب نانو SiO_2 ، مقادیر TSR

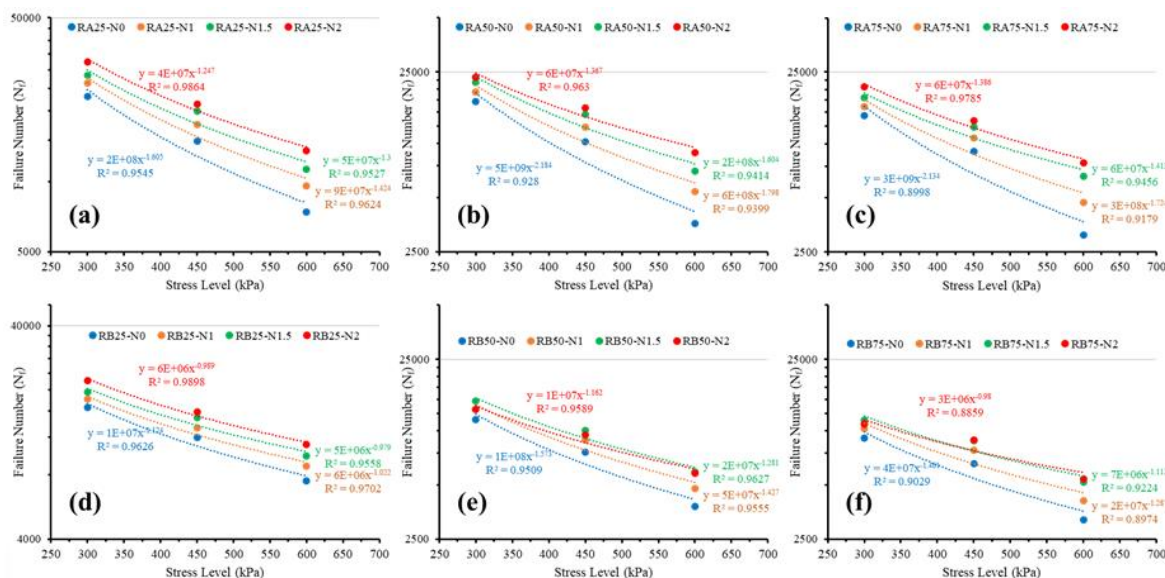


شکل ۶. نمودار وهلر برای مخلوط‌های آسفالتی بدون RAP

چشمگیری عملکرد خستگی مخلوط‌های آسفالت را بهبود می‌بخشد.

علاوه بر این، نتایج نمودار وهلر برای مخلوط‌هایی که حاوی RAP هستند در شکل ۷ نمایش داده شده است.

این شکل تعداد خرابی را در مقابل سطح تنش اعمال شده برای مخلوط‌هایی که فاقد RAP هستند نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که نمونه کنترلی بدون هیچ ماده اصلاح‌کننده‌ای، کمترین N_f را در تمامی سطوح تنش دارد، که نشان‌دهنده مقاومت ضعیف آن است. علاوه بر این، افزودن نانو SiO_2 به طور



شکل ۷. نمودار وهلر برای مخلوط‌های آسفالتی حاوی: (a) RAP-A 25٪، (b) RAP-A 50٪، (c) RAP-A 75٪، (d) RAP-B 25٪، (e) RAP-B 50٪، (f) RAP-B 75٪

همچنین، واضح است که افزایش سطح تنش اعمالی، باعث کاهش عمر خستگی می‌شود. با این حال، ضروری است تا نگاه عمیق‌تری برای استخراج معادله خستگی برای هر نوع مخلوط به کار گرفت تا بتوان به قضاوت بهتر و دقیق‌تری دست یافت. در جدول ۴، پارامترهای عملکرد خستگی K1 و K2 برای مخلوط‌های آسفالتی مختلف خلاصه شده است و بینش‌هایی در مورد تأثیر RAP، میزان پیرشدگی RAP و اصلاح نانو SiO_2 بر عمر خستگی ارائه می‌دهد. روندهایی که در معادله خستگی مشاهده می‌شود، یافته‌های مهمی را در مورد تعادل بین بهبود عملکرد و پتانسیل به‌کارگیری مصالح به همراه دارد.

نتایج شکل ۷ نشان می‌دهند که برای هر درصد RAP، عملکرد خستگی مخلوط بستگی به تأثیر اصلاح قیر دارد. استفاده از RAP 25٪ نوع A باعث بهبود قابل توجهی در عملکرد خستگی در تمامی سطوح تنش و روش‌های اصلاح قیر می‌شود. به طور خاص، در این درصد (25٪) RAP، افزودن 2٪ نانومواد بهترین عملکرد را در مقایسه با سایر درصدها نشان می‌دهد. با این حال، مقادیر بالاتر از RAP نوع A روند کاهشی در عملکرد خستگی را نشان می‌دهند. به طور کلی، نتایج شکل ۷ نشان می‌دهند که RAP نوع A عملکرد بهتری نسبت به RAP نوع B دارد. علاوه بر این، برای درصدهای بالای RAP نوع B (50٪ و 75٪)، مقدار بهینه اصلاح قیر برابر با 1/5٪ مشاهده می‌شود.

جدول ۴. اطلاعات مربوط به معادله خستگی برای مخلوط‌های آسفالتی مختلف

نام نمونه	نوع RAP	درصد وزنی RAP	درصد وزنی SiO2	ضریب K1 معادله خستگی	ضریب K2 معادله خستگی
C-N0	A	0	0	2E+08	-1.609
C-N1		0	1	6E+07	-1.396
C-N1.5		0	1.5	4E+07	-1.287
C-N2		0	2	4E+07	-1.260
RA25-N0		25	0	2E+08	-1.605
RA25-N1		25	1	9E+07	-1.424
RA25-N1.5		25	1.5	5E+07	-1.300
RA25-N2		25	2	4E+07	-1.247
RA50-N0		50	0	5E+09	-2.184
RA50-N1		50	1	6E+08	-1.798
RA50-N1.5		50	1.5	2E+08	-1.604
RA50-N2		50	2	6E+07	-1.367
RA75-N0		75	0	3E+09	-2.134
RA75-N1		75	1	3E+08	-1.724
RA75-N1.5		75	1.5	6E+07	-1.413
RA75-N2		75	2	6E+07	-1.386
RB25-N0	B	25	0	1E+07	-1.124
RB25-N1		25	1	6E+06	-1.022
RB25-N1.5		25	1.5	5E+06	-0.979
RB25-N2		25	2	6E+06	-0.989
RB50-N0		50	0	1E+08	-1.573
RB50-N1		50	1	5E+07	-1.427
RB50-N1.5		50	1.5	2E+07	-1.281
RB50-N2		50	2	1E+07	-1.162
RB75-N0		75	0	4E+07	-1.461
RB75-N1		75	1	2E+07	-1.287
RB75-N1.5		75	1.5	7E+06	-1.113
RB75-N2		75	2	3E+06	-0.98

می‌باشد. مطابق این توضیحات، ارزیابی عملکرد خستگی مخلوط‌های مختلف و بر اساس داده‌های جدول ۴، به شرح زیر است:

مخلوط کنترل (C-N0) به عنوان یک نقطه مرجع عمل می‌کند که مقاومت خستگی مشخصی را تحت سطوح تنش پایین، متوسط و بالا نشان می‌دهد. با این حال، عملکرد آن با افزایش سطوح تنش به سرعت کاهش می‌یابد و به همین دلیل به عنوان مرجع برای ارزیابی تغییرات مورد استفاده قرار می‌گیرد. افزودن RAP عملکرد خستگی را در سطوح تنش پایین بهبود می‌بخشد؛ اما در سطوح تنش بالاتر یک سازگاری را نشان می‌دهد. برای مخلوط‌هایی با ۲۵٪ از RAP، پارامترهای K1 و K2 حدود ۱۵٪-۲۰٪ بهبود یافته‌اند که نشان‌دهنده افزایش مقاومت به خستگی است. این در حالیست که با افزایش سطح تنش، افزایش جزئی در K1 و K2 (تا ۱۰٪) رخ داده و نشان‌دهنده کاهش سریعتر عملکرد است. در ۵۰٪ از RAP، کاهش در K1 و K2 به طور قابل توجهی مشهود می‌شود و به ۳۵٪ می‌رسد، و این همراه با کاهش ۱۵٪-۲۰٪ در K1 و K2 است که نشان‌دهنده کاهش سریع عمر خستگی تحت تنش‌های بالا می‌باشد. مخلوط‌هایی با ۷۵٪ از RAP کمترین مقادیر K1 و K2 را دارند که کاهش آن‌ها تا ۵۰٪ می‌رسد و این امر کارایی آن‌ها را در شرایط شدید محدود می‌کند.

افزایش سن RAP تأثیر زیادی بر عملکرد خستگی دارد. استفاده از RAP ده ساله نوع B منجر به کاهش ۱۰-۱۵٪ در پارامترهای K1 و K2 نسبت به RAP پنج ساله نوع A می‌شود که تأثیر منفی افزایش سفتی و شکنندگی را نشان می‌دهد. علاوه بر این، مقادیر K1 و K2 برای مخلوط‌های RAP که ۱۰-۲۰ درصد کاهش می‌یابد که دوام آن‌ها را تحت تنش بیشتر کاهش می‌دهد. به عنوان مثال، طبق جدول ۴، مخلوط نوع B با ۷۵٪ از RAP بدترین عملکرد خستگی را نشان می‌دهد

به طور کلی، افزایش مقدار K1 نشان‌دهنده‌ی افزایش مقاومت اولیه مخلوط در برابر شروع خرابی خستگی است. در حالی که کاهش مقدار مطلق K2 (یعنی کاهش شیب منحنی خستگی در مقیاس لگاریتمی) نشان‌دهنده‌ی کاهش حساسیت به تنش اعمالی و افزایش دوام نمونه در برابر بارگذاری مکرر

جدول ۵. نتایج ANOVA برای انرژی شکست

Source of Variation	Between Groups	Within Groups	Total
Sum of Squares (SS)	123456	7964	131420
Degrees of Freedom (df)	3	9	12
Mean Square (MS)	61728	1327	-
F-value	18.62	-	-
P-value	0.003	-	-

بر اساس نتایج جدول ANOVA، مقدار F محاسبه شده برابر با ۱۸/۶۲ بوده و P-value برابر با ۰/۰۰۳ به دست آمده است. چون $P\text{-value} < 0.05$ ، تفاوت بین گروه‌ها از نظر آماری در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار است. این نتایج بیانگر آن است که افزودن نانوسیلیس تأثیر چشمگیری بر بهبود مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی دارد. سایر مشخصه‌های مقاومتی مخلوط آسفالتی نیز کنترل و بررسی گردید که نتیجه فوق را در بر داشت.

۵. نتیجه‌گیری

این پژوهش، اثر افزودن نانو SiO_2 بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی حاوی RAP با دو سطح پیرشدگی (۵ و ۱۰ سال) را بررسی کرد. هدف، شناسایی ترکیب‌های بهینه برای بهبود مقاومت در برابر ترک، دوام رطوبتی و عملکرد خستگی بود. آزمایش‌های SCB، ITS و ITF همراه با تحلیل‌های آماری برای ارزیابی این ویژگی‌ها به کار رفتند. مهم‌ترین نتایج به صورت زیر خلاصه می‌شوند:

- افزودن ۲۵٪ RAP نوع A بهترین بهبود (۳۰-۲۵ درصد) در مقاومت شکست نسبت به مخلوط کنترل ایجاد کرد، در حالی که ۲۵٪ RAP نوع B تنها ۱۵-۱۰ درصد افزایش داشت. در ۵۰٪ RAP، مقاومت نوع A همچنان ۱۵-۲۰ درصد بالاتر از مخلوط کنترل بود، ولی در ۷۵٪ RAP، به‌ویژه نوع B، کاهش محسوس مشاهده شد.

که با مقدار پایین K1 و مقدار منفی بالای K2 مشخص می‌شود، که نشان‌دهنده عملکرد ضعیف آن است. افزودن نانو سیلیس نشان‌دهنده توانایی قابل توجهی در بهبود عملکرد خستگی است، به‌ویژه زمانی که با RAP ترکیب شود. مخلوط‌های اصلاح شده با ۱٪ نانو سیلیس بهبود ۱۰-۱۵٪ در K1 و K2 نشان می‌دهند و اثرات منفی محتوای بالای RAP یا پیرشدگی را تا حدی جبران می‌کنند. افزایش بیشتر در K1 و K2 باعث بهبود دوام در سطوح تنش بالاتر می‌شود. افزایش محتوای نانو سیلیس به ۱/۵ درصد بهبودهای قابل توجه‌تری ایجاد می‌کند، به‌طوری که K1 و K2 تا ۲۰-۳۰ درصد افزایش می‌یابند. بالاترین مقدار نانو سیلیس (۲٪) منجر به بهبودهای چشمگیری می‌شود، به‌طوری که K1 و K2 تا ۵۰٪ افزایش می‌یابد و مقاومت خستگی فوق‌العاده‌ای تحت شرایط تنش‌های مختلف ایجاد می‌کند. ترکیب RAP و نانو سیلیس مزایای هم‌افزایی نشان می‌دهد، به‌ویژه برای مخلوط‌های با محتوای متوسط، یعنی ۲۵ الی ۵۰٪ از RAP این مخلوط‌ها عملکرد خستگی متوازی را نشان می‌دهند که مقادیر بالای K1 و K2 مقاومت در برابر بارگذاری مکرر را تضمین می‌کند. برای مخلوط‌های با ۷۵٪ RAP، نانو سیلیس برخی از اثرات منفی را کاهش می‌دهد، اما سازش‌های ذاتی همچنان قابل توجه هستند و چالش‌های مربوط به محتوای زیاد RAP را نشان می‌دهند.

۴-۳. تحلیل آماری

به منظور بررسی معنی‌داری تغییرات ایجاد شده در نتایج حاصل از افزودن نانوسیلیس و RAP، از آزمون آنالیز واریانس یک‌طرفه^۱ استفاده شد. این تحلیل به عنوان مثال، برای نتایج انرژی شکست در مخلوط‌های مختلف در جدول ۵ نشان داده شده است.

۶. پیشنهاد برای مطالعات آینده

عملکرد برتر مقدار ۱/۵٪ نانوسیلیس در مقادیر مختلف RAP و سطوح مختلف پیرشدگی، سازگاری آن با سیستم قیر و مصالح سنگی مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد. با این حال، درصد بهینه ممکن است بسته به ویژگی‌های مواد پایه متفاوت باشد و مطالعات بیشتر برای منابع مختلف RAP و انواع قیر توصیه می‌شود. همچنین، با توجه به اینکه در این پژوهش، درصد قیر مخلوط‌های اصلاح‌شده با نانوسیلیس به صورت مجزا طراحی نشده است، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، درصد قیر بهینه برای این مخلوط‌ها با توجه به تأثیر نانومواد بر ویسکوزیته و تراکم‌پذیری، به صورت جداگانه تعیین گردد تا امکان ارزیابی دقیق‌تر عملکرد و مقایسه منصفانه‌تری با مخلوط شاهد فراهم شود.

۲- افزودن Nano-SiO₂ در تمام سطوح RAP مقاومت شکست را بهبود داد (۱۰-۲۵ درصد) و اثرات منفی پیرشدگی، به‌ویژه در RAP نوع B، را جبران کرد.

۳- TSR مخلوط کنترل ۷۰-۸۵ درصد بود. افزودن ۱/۵-۲ درصد نانو SiO₂ مقادیر TSR را به بالای ۸۰٪ رساند و مقاومت رطوبتی را بهبود داد.

۴- با افزایش محتوای RAP، TSR کاهش یافت (به‌ویژه در RAP ۷۵٪)، اما Nano-SiO₂ توانست این افت را تا حدود ۱۰٪ جبران کند.

۵- عملکرد خستگی با افزودن RAP ۲۵٪ در سطح تنش‌های پایین، ۱۵-۲۰ درصد بهبود یافت؛ ولی در ۵۰-۷۵ درصد RAP کاهش شدید K1 و K2 (تا ۵۰٪) و افت عمر خستگی مشاهده شد.

۶- RAP ده‌ساله نوع B افت بیشتری در K1 و K2 نسبت به RAP پنج‌ساله داشت. اما نانو SiO₂ (به‌ویژه در ۱/۵-۲ درصد) عملکرد خستگی را ۲۰-۵۰ درصد بهبود داد. ترکیب ۲۵-۵۰ درصد RAP با نانو SiO₂ بهترین تعادل بین مقاومت شکست، دوام رطوبتی و خستگی را ارائه داد.

۷. مراجع

- AASHTO. 2007. "Resistance of compacted bituminous mixture to moisture induced damage for superpave". Am. Assoc. State Highw. Transp. Off., Washington, DC. <https://doi.org/https://rosap.nhl.bts.gov/view/doit/37962>
- Adamu, M., Mohammed, B. S., Shafiq, N. and Shahir Liew, M. 2018. "Effect of crumb rubber and nano silica on the fatigue performance of roller compacted concrete pavement". Cogent Eng., 5: 1436027. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1436027>
- Albayati, A. H., Latief, R. H., Al-Mosawe, H. and Wang, Y. 2024. "Nano-additives in asphalt binder: Bridging the gap between traditional materials and modern requirements". Appl. Sci., 14: 3998. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app14103998>
- Anthonissen, J., Braet, J., et al. 2016. "Review and environmental impact assessment of green technologies for base courses in bituminous pavements". Environ. Impact Assess. Rev., 60: 139-147. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eiar.2016.04.005>
- Antunes, V., Freire, A. C. and Neves, J. 2019. "A review on the effect of RAP recycling on bituminous mixtures properties and the viability of multi-recycling". Constr. Build. Mater., 211: 453-469. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.258>
- ASTM, A. 1989. "Standard test method for resistance to plastic flow of bituminous mixtures using Marshall apparatus". <https://doi.org/https://www.astm.org/d1559-89.html>
- ASTM, D. 8044. 2016. "Standard test method for evaluation of asphalt mixture cracking resistance using the semi-circular bend test (SCB) at intermediate temperatures". Am. Soc. Test. Mater., West Conshohocken, PA, USA. <https://doi.org/https://www.astm.org/d8044-16.html>
- Basuony, A., Perraton, D. and Carter, A. 2014. "Laboratory study of the effect of RAP conditioning on the mechanical properties of hot mix asphalt containing RAP". Mater. Struct., 47: 1425-1450. <https://doi.org/https://doi.org/10.1617/s11527-013-0127-0>
- Chen, Y., Chen, Z., Xiang, Q., Qin, W. and Yi, J. 2021. "Research on the influence of RAP and aged asphalt on the performance of plant-mixed hot recycled asphalt mixture and blended asphalt". Case Stud. Constr. Mater., 15: e00722. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00722>

- Cheraghian, G. and Wistuba, M. P. 2021. "Effect of fumed silica nanoparticles on ultraviolet aging resistance of bitumen". *Nanomater.*, 11: 454. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/nano11020454>
- Colbert, B. and You, Z. 2011. "The properties of asphalt binder blended with variable quantities of recycled asphalt using short term and long term aging simulations". *Constr. Build. Mater.* 26: 552-557. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.057>.
- Dai, Y., Liang, W., Ye, D., Xie, S., et al. 2023. "Modification effects of nanosilica on asphalt binders: A review". *Nanotechnol. Rev.*, 12(1): 20230138. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2023-0138>
- Debbarma, S., Selvam, M. and Singh, S. 2020. "Can flexible pavements' waste (RAP) be utilized in cement concrete pavements: A critical review". *Constr. Build. Mater.*, 259: 120417. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117755>
- European Committee for Standardization. 2004. "EN 12697-24: Bituminous mixtures – test methods for hot mix asphalt – Part 24: Resistance to fatigue. Brussels. <https://doi.org/g/9780580757693>
- Fakhri, M., Shahebrahimi, E. and Khodadadi, M. 2020. "Evaluation of the effect of zycotherm on moisture susceptibility of warm mix asphalt containing crumb rubber". *Amirkabir J. Civ. Eng.*, 52: 641-654. <https://doi.org/https://doi.org/10.22060/ceej.2019.14814.5749>
- Hu, K., Zhou, J., Han, S., Chen, Y., et al. 2024. "Silane coupling agent enhances recycle aggregate/asphalt interfacial properties: An experimental and molecular dynamics study". *Mater. Today Commun.*, 39: 108681. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.108681>
- Islam, M. R., Salomon, D. and Wasiuddin, N. M. 2024. Investigation of oxidative aging of field-extracted asphalt binders at various conditions using carbonyl index". *Constr. Build. Mater.*, 415: 134969. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.134969>
- Kambooza, N., Saed, S. A. and Mousavi Rad, S. 2021. "Rheological behavior of asphalt binders and fatigue resistance of SMA mixtures modified with nano-silica containing RAP materials under the effect of mixture conditioning". *Constr. Build. Mater.*, 303: 124433. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124433>
- Khodadadi, M., Moradi, L., Dabir, B., Moghadas Nejad, F. and Khodaii, A. 2020. "Reuse of drill cuttings in hot mix asphalt mixture: A study on the environmental and structure performance". *Constr. Build. Mater.*, 256: 119453. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119453>
- Khodadadi, M., Khodaii, A., Absi, J., Tehrani, F.F. and Hajikarimi, P. 2021a. "An experimental length scale investigation on viscoelastic behavior of bituminous composites: Focusing on mortar scale". *Constr. Build. Mater.*, 308: 124766. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124766>
- Khodadadi, M., Azarhoosh, A. and Khodaii, A. 2021b. "Influence of polymeric coating the aggregate surface on moisture damage of hot mix asphalt". *Period. Polytech. Civ. Eng.*, 65: 376-384. <https://doi.org/https://doi.org/10.3311/PPci.14340>
- Khodadadi, M., Khodaii, A., Absi, J., Tehrani, F. F. and Hajikarimi, P. 2022. "Numerical and analytical length scale investigation on viscoelastic behavior of bituminous composites: Focusing on mortar scale". *Constr. Build. Mater.*, 350: 128775. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128775>
- Lei, B., Kong, L., Guo, Y., et al. 2024. "Optimizing decarbonation and sustainability of concrete pavement: A case study". *Case Stud. Constr. Mater.*, 21: e03574. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03574>
- Leiva-Villacorta, F. and Vargas-Nordbeck, A. 2019. "Optimum content of nano-silica to ensure proper performance of an asphalt binder". *Road Mater. Pavement Des.*, 20: 414-425. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1385510>
- Li, J., Ni, F. and Lu, Q. 2018. "Experimental investigation into the multiscale performance of asphalt mixtures with high contents of reclaimed asphalt pavement". *J. Mater. Civ. Eng.*, 30: 4018105. [https://doi.org/https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002269](https://doi.org/https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002269)
- Liu, H., Ju, Z., Lv, S., et al. 2024. "Laboratory aging method for simulating the extracted aged asphalt from reclaimed asphalt pavement". *Case Stud. Constr. Mater.*, 21:e03651. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03651>
- Mahpour, A., Khodadadi, M., Shahraki, M. and Moghadas Nejad, F. 2022. "Evaluation of moisture durability of modified asphalt mixture with nano-titanium dioxide using surface free energy method". *Amirkabir J. Civ. Eng.*, 54: 2831–2850. <https://doi.org/https://doi.org/10.22060/ceej.2021.19458.7180>
- Mahpour, A., Alipour, S., Khodadadi, M., Khodaii, A. and Absi, J. 2023. "Leaching and mechanical performance of rubberized warm mix asphalt modified through the chemical treatment of hazardous waste materials". *Constr. Build. Mater.*, 366: 30184. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130184>
- Mirabdolazimi, S. M., Kargari, A. H. and Pakenari, M. M. 2021. "New achievement in moisture sensitivity of nano-silica modified asphalt mixture with a combined effect of bitumen type and traffic condition". *Int. J. Pavement Res. Technol.*, 14: 105-115. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s42947-020-0043-y>
- Mousavi Rad, S., Kambooza, N., Anupam, K. and Saed, S. A. 2022. "Experimental evaluation of the fatigue performance and self-healing behavior of nanomodified porous asphalt mixtures containing RAP materials under the aging condition and freeze--Thaw cycle". *J. Mater. Civ. Eng.*, 34: 4022323. [https://doi.org/https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004488](https://doi.org/https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004488)

- Ongel, A. and Hugener, M. 2014. "Aging of bituminous mixes for rap simulation". *Constr. Build. Mater.* 68: 49-54. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.030>
- Pouranian, M. R. and Shishehbor, M. 2019. "Sustainability assessment of green asphalt mixtures: A review". *Environ.*, 6: 73. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/environments6060073>
- Pradhan, S. K. 2023. "Short-term and long-term aging effect of the rejuvenation on RAP binder and mixes for sustainable pavement construction". *Int. J. Transport. Sci. Technol.*, 12: 937-954. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijst.2022.09.005>
- Qian, Y., Guo, F., Leng, Z., Zhang, Y. and Yu, H. 2020. "Simulation of the field aging of asphalt binders in different reclaimed asphalt pavement (RAP) materials in Hong Kong through laboratory tests". *Constr. Build. Mater.*, 265: 120651. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120651>
- Rahmawati, C., Aprilia, S., Saidi, T., Aulia, T. B. and Hadi, A. E. 2021. "The effects of nanosilica on mechanical properties and fracture toughness of geopolymers cement". *Polym.*, 13(13): 2178. <https://doi.org/10.3390/polym1312178>
- Shafabakhsh, G. H. and Ani, O. J. 2015. "Experimental investigation of effect of Nano TiO₂/SiO₂ modified bitumen on the rutting and fatigue performance of asphalt mixtures containing steel slag aggregates". *Constr. Build. Mater.*, 98: 692-702. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.083>
- Shafabakhsh, G. and Ahmadi, S. 2016. "Evaluation of coal waste ash and rice husk ash on properties of pervious concrete pavement". *Int. J. Eng.*, 29: 192-201.
- Shafabakhsh, G. H. and Sajadi, S. R. 2018. "Evaluation of rheological behavior of bitumen modified with Nano Copper Oxide". *Int. J. Eng. Technol.*, 7: 13-18.
- Shafabakhsh, G. and Ahmadi, S. 2019. "Influences of surface characteristics and modified asphalt binders on interface shear strength". *Int. J. Eng.*, 32: 805-812. <https://doi.org/https://doi.org/0.5829/ije.2019.32.06.c.02>
- Shafabakhsh, G. H., Ani, O. J. and Mirabdolazimi, S. 2015. "Experimental investigation on rutting performance of microsilica modified asphalt mixtures". *Int. J. Eng. Res. Technol.*, 4: 371-378.
- Shafabakhsh, G. A., Sadeghnejad, M., Ahoor, B. and Taheri, E. 2020. "Laboratory experiment on the effect of nano SiO₂ and TiO₂ on short and long-term aging behavior of bitumen". *Constr. Build. Mater.*, 237: 117640. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117640>
- Shafabakhsh, G., Sadeghnejad, M. and Ebrahimnia, R. 2021. "Fracture resistance of asphalt mixtures under mixed-mode I/II loading at low-temperature: Without and with nano SiO₂". *Constr. Build. Mater.*, 266: 120954. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120954>
- Singh, D. and Girimath, S. 2016. "Influence of RAP sources and proportions on fracture and low temperature cracking performance of polymer modified binder". *Constr. Build. Mater.*, 120: 10-18. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.094>
- Wu, S., Zhao, Z., Xiao, Y., et al. 2017. "Evaluation of mechanical properties and aging index of 10-year field aged asphalt materials". *Constr. Build. Mater.*, 155: 1158-1167. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.102>
- Xu, Z., Wang, S. L. and Gao, H. W. 2010. "Effects of nano-sized silicon dioxide on the structures and activities of three functional proteins". *J. Hazard. Mater.*, 180: 375-383. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.04.042>
- Xu, Z., Zhou, Z., Du, P. and Cheng, X. 2016. "Effects of nano-silica on hydration properties of tricalcium silicate". *Constr. Build. Mater.*, 125: 1169-1177. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.003>
- Xu, X., Wei, L., Chen, J. and Rong, H. 2024. "Physical, rheological and micro characteristics of ARA/Nano-TiO₂ composite modified asphalt before and after short-term aging". *Mater. Today Commun.*, 39: 109097. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.109097>
- Yu, J., Guo, Y., Peng, L., Guo, F. and Yu, H. 2020. "Rejuvenating effect of soft bitumen, liquid surfactant, and bio-rejuvenator on artificial aged asphalt". *Constr. Build. Mater.*, 254: 119336. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119336>
- Zaumanis, M., Poulikakos, L., Arraigada, M., Kunz, B., et al. 2023. "Asphalt recycling in polymer modified pavement: A test section and recommendations". *Constr. Build. Mater.*, 409: 134005. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134005>
- Zhang, J., Sun, C., Li, P., et al. 2020. "Effect of different viscous rejuvenators on chemical and mechanical behavior of aged and recovered bitumen from RAP". *Constr. Build. Mater.* 239: 117755. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117755>
- Zhou, S., Yan, J., Shi, B., Li, S. and Ai, C. 2024. "Cost-effective enhancement of high viscosity modified bitumen anti-aging properties using organic layered double hydroxide/fume silica nanoparticles composite nanomaterials". *J. Clean. Prod.*, 459: 142538. <http://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142538>