

# تحلیل هم‌افزایی بیتوسل و نانوسیلیکا بر رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی در دمای پایین مبتنی بر آزمون ENDB

مقاله علمی - پژوهشی

\*محمود رضا کی‌منش (نویسنده مسئول)، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

محسن صادقیان، دانشجوی دکترا، گروه مهندسی عمران، گرایش راه و ترابری، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [mrkeymanesh@pnu.ac.ir](mailto:mrkeymanesh@pnu.ac.ir)

دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۰۲ - پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۲

صفحه ۵۶۴-۵۴۹

## چکیده

ترک‌خوردگی در دمای پایین یکی از مهم‌ترین خرابی‌های روسازی است که دوام مخلوط‌های آسفالتی را در مناطق سردسیر تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این پژوهش، اثرات منفرد و هم‌افزایی بیتوسل (به‌عنوان یک افزودنی پایه گوگردی) و نانوسیلیکا بر مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از آزمون خمش دیسک شیاردار لبه‌ای (ENDB) تحت بارگذاری‌های مودهای I، II و III مورد ارزیابی قرار گرفت. چهار نوع مخلوط شامل مخلوط شاهد، اصلاح‌شده با بیتوسل، اصلاح‌شده با نانوسیلیکا و مخلوط مرکب بیتوسل - نانوسیلیکا، در دماهای ۵-، ۱۰- و ۱۵- درجه سانتی‌گراد و نرخ‌های ۰.۵، ۱ و ۵ میلی‌متر بر دقیقه آزمایش شدند. در مجموع، ۳۲۴ نمونه ENDB به صورت سه‌تکراره آماده و آزمایش شدند نتایج نشان داد که مخلوط مرکب در مقایسه با مخلوط‌های حاوی هر یک از افزودنی‌ها به صورت منفرد، بیشترین مقاومت شکست را از خود نشان داد؛ به طوری که ضرایب شدت تنش آن در مقایسه با مخلوط شاهد و نسبت به دیگر مخلوط‌های حاوی افزودنی منفرد در تمامی مودهای I، II و III افزایش داشت. حداقل افزایش ضریب در مورد برش و بیشترین افزایش در مود پیچش مشاهده گردید. کاهش دما و افزایش نرخ بارگذاری موجب کاهش مقدار KC شد، در حالی که مخلوط مرکب کمترین حساسیت را نسبت به این شرایط نشان داد. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش تأیید می‌کند که استفاده همزمان از بیتوسل و نانوسیلیکا می‌تواند به‌طور مؤثری مقاومت شکست در دمای پایین را افزایش داده و شکنندگی مخلوط‌های آسفالتی را کاهش دهد.

واژه‌های کلیدی: ENDB، بیتوسل، نانوسیلیکا، ضریب شدت تنش، چقرمگی شکست

## ۱- مقدمه

رطوبت تسهیل شده، چسبندگی بین لایه‌ها کاهش می‌یابد و در نهایت عمر مفید روسازی کوتاه‌تر می‌شود. از این‌رو، ارزیابی رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی در دماهای پایین برای تضمین عملکرد پایدار و قابل‌اطمینان روسازی ضروری است. مکانیک شکست چارچوبی کارآمد برای ارزیابی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر تنش‌های ناشی از دماهای پایین

روسازی‌های آسفالتی در طول عمر بهره‌برداری خود در معرض تنش‌های محیطی و مکانیکی متغیر قرار دارند. در مناطق سردسیر، کاهش ناگهانی دما موجب انقباض حرارتی در قیر و مخلوط‌های آسفالتی شده و تنش‌های کششی در لایه سطحی روسازی ایجاد می‌کند. زمانی که این تنش‌ها از ظرفیت مقاومتی ماده فراتر رود، ترک‌های حرارتی آغاز شده و گسترش می‌یابند؛ در نتیجه، نفوذ

## ۲- پیشینه تحقیق

در سال‌های اخیر، مکانیک شکست به‌عنوان یک رویکرد پیشرفته برای تحلیل رفتار ترک‌خوردگی در مخلوط‌های آسفالتی مورد توجه گسترده قرار گرفته است. این رویکرد با تمرکز بر میدان‌های تنش و کرنش در نوک ترک، امکان ارزیابی دقیق‌تر مکانیزم‌های آغاز و گسترش ترک را در مواد ناهمگنی مانند آسفالت فراهم می‌کند. برای این منظور، پیکربندی‌های آزمایشگاهی مختلفی توسعه یافته‌اند که در میان آن‌ها، آزمون‌های خمشی شکست به‌طور گسترده برای تعیین پارامترهایی مانند ضریب بحرانی شدت تنش و انرژی شکست مورد استفاده قرار می‌گیرند (علیها، ۲۰۱۲). آزمون تیر دارای شیار لبه‌ای از سال ۱۹۹۴ به‌عنوان یکی از نخستین هندسه‌ها برای ارزیابی رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته است (جو و همکاران، ۲۰۲۱، لی و همکاران، ۱۹۹۵). تحقیقات نشان می‌دهد که چقرمگی شکست به‌دست‌آمده از آزمون SENB شاخص دقیق‌تری برای مقاومت ترک‌خوردگی نسبت به سیستم گریبندی PG ارائه می‌دهد (شاه، ۱۹۹۰، اندرسون و همکاران، ۲۰۰۱) و همچنین حساسیت کمتری نسبت به دما و نرخ بارگذاری در مقایسه با انرژی شکست دارد (اولد و همکاران، ۲۰۰۴). هندسه‌های اصلاح‌شده SENB نیز برای بررسی رفتار شکست در دماهای پایین و مطالعه اثر دما و نرخ بارگذاری بر پارامترهای شکست به کار رفته‌اند (چاپلکس و همکاران، ۲۰۰۶). نمونه فشاری کششی صفحه‌ای نیز کاربرد وسیعی برای ارزیابی چقرمگی شکست در مد I دارد. توسعه سیستم‌های گیرش بهبود یافته در آزمون DCT امکان تعیین دقیق مقدار  $K_{Ic}$  و تخمین ضریب شدت تنش و طول بحرانی ترک را فراهم کرده است (وانگ و همکاران، ۲۰۱۳، لینگ و همکاران، ۲۰۱۹، واگنر و همکاران، ۲۰۰۵). به دلیل عملکرد قابل‌اعتماد این آزمون تحت بارگذاری کششی، آزمون DCT به گزینه‌ای مناسب برای مطالعه ترک‌خوردگی دمای پایین در مخلوط‌های آسفالتی تبدیل شده است. نمونه خمشی نیم‌دایره‌ای نیز به‌دلیل آماده‌سازی ساده، امکان استفاده از مغزه‌های میدانی و کارایی بالا در ارزیابی رفتار شکست، به‌طور گسترده استفاده شده است (چانگ و همکاران، ۱۹۸۴). اگرچه آزمون SCB عمدتاً برای مد I مناسب است، اما در مدل‌سازی عددی، مطالعه رشد ترک خستگی و تعیین پارامترهای شکست نیز کاربرد دارد (شیو و وانگ، ۲۰۲۱، جو و همکاران، ۲۰۲۱). با این حال، ایجاد شرایط

فراهم می‌کند. این رویکرد با بهره‌گیری از مفاهیم تنش، کرنش و انرژی، ابزارهای تحلیلی لازم برای پیش‌بینی آغاز و رشد ترک را ارائه می‌دهد. در میان پیکربندی‌های مختلف آزمون شکست، آزمون خمشی دیسک دارای شیار کناری به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ زیرا امکان اعمال مدهای بارگذاری I (کششی)، II (برشی درون‌صفحه‌ای) و III (برشی خارج از صفحه) را فراهم کرده و شرایط تنش حاکم بر روسازی‌ها را به‌صورت واقع‌بینانه شبیه‌سازی می‌کند. در چارچوب مکانیک شکست خطی الاستیک، اگرچه رفتار غیرخطی در ناحیه نزدیک به نوک ترک نادیده گرفته می‌شود، این نظریه امکان تعریف معیارهای شکست مبتنی بر انرژی و تنش را فراهم می‌آورد. در رویکرد مبتنی بر انرژی، در مفهومی بنیادی برای تحلیل مواد شبه‌تردی مانند مخلوط‌های آسفالتی (بنهام و همکاران، ۱۹۸۹) رشد ترک زمانی آغاز می‌شود که نرخ آزادسازی انرژی کرنشی (G) به مقاومت شکست ماده (R) برسد یا از آن فراتر رود؛ در رویکرد مبتنی بر تنش نیز ضریب شدت تنش (K) برای مدهای مختلف شکست محاسبه می‌شود و شکست زمانی رخ می‌دهد که مقدار آن به‌ویژه  $K_{Ic}$  در مد کششی به مقدار بحرانی خود برسد (فاجار، ۲۰۰۹). به‌منظور کاهش ترک‌خوردگی در دماهای پایین، استفاده از اصلاح‌کننده‌های آسفالتی به‌طور گسترده مورد توجه قرار گرفته است. بیتوسل به‌عنوان افزودنی مبتنی بر گوگرد، با افزایش سختی مخلوط و تسهیل تشکیل شبکه‌های بلوری، مقاومت شکست را بهبود می‌بخشد. از سوی دیگر، نانوسیلیکا به دلیل سطح ویژه بالا و واکنش‌پذیری قابل توجه، موجب ارتقای خواص مکانیکی و حرارتی مخلوط شده و مقاومت آن را در برابر رطوبت افزایش می‌دهد. با وجود انجام پژوهش‌های متعدد درباره اثرات هر یک از این افزودنی‌ها به‌صورت مجزا، مطالعات محدودی به بررسی اثرات مقایسه‌ای و هم‌افزای آن‌ها بر رفتار شکست تحت شرایط بارگذاری مد مختلط و دماهای پایین پرداخته‌اند. از این رو، در این پژوهش تأثیر بیتوسل، نانوسیلیکا و کاربرد هم‌زمان آن‌ها بر رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از آزمون ENDB و بر پایه اصول مکانیک شکست مورد بررسی قرار گرفته است. هدف این مطالعه، فراهم‌سازی زمینه‌ای برای توسعه روسازی‌هایی با مقاومت بیشتر در برابر ترک‌خوردگی در دماهای پایین است.

تشدید می‌کند، در حالی که نرخ بارگذاری پایین امکان بازتوزیع تنش و افزایش مقاومت شکست را فراهم می‌کند (هیلتن و روکه، ۱۹۹۴).

نوع و ترکیب قیر نیز تأثیر قابل توجهی بر انرژی شکست و مقاومت به ترک خوردگی حرارتی دارد. استفاده از قیرهای اصلاح شده نشان داده است که مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر تنش‌های حرارتی را بهبود می‌بخشد (هوانگ و ژانگ، ۲۰۲۴). در میان اصلاح‌کننده‌های مختلف، نانوسیلیکا به دلیل توانایی در بهبود خواص رئولوژیکی قیر و تقویت پیوندهای ریزساختاری، سبب افزایش مقاومت کششی و مقاومت خستگی می‌شود (کیم و بوتلار، ۲۰۰۹). نانوسیلیکای آب‌دوست همچنین چسبندگی قیر-سنگدانه را بهبود داده و حساسیت رطوبتی را کاهش می‌دهد (موله نار، ۲۰۰۳، باهیا و همکاران، ۲۰۰۵). مواد ضد جداشدگی نیز استحکام کششی غیرمستقیم و نسبت مقاومت کششی را افزایش می‌دهند؛ به طوری که مصرف حدود ۰٫۳ تا ۰٫۵ درصد از این مواد می‌تواند ITS را بین ۲۰ تا ۳۰ درصد افزایش داده و مقدار TSR را از حدود ۷۰ درصد به حدود ۹۰ درصد برساند (ادواردز و آلامبول، ۲۰۰۶، حسین و همکاران، ۲۰۱۳).

افزودنی‌های گوگردی نیز برای بهبود عملکرد آسفالت، به ویژه در دماهای پایین، استفاده شده‌اند. این افزودنی‌ها با ایجاد تغییر در ساختار مولکولی قیر، سختی آن را در دماهای بالا افزایش داده و در عین حال انعطاف‌پذیری را در دماهای پایین حفظ می‌کنند (لیم و همکاران، ۱۹۹۴). مطالعات نشان داده‌اند که اصلاح‌کننده‌های گوگردی پارامترهای شکست را در مد I و مد مختلط II/I بهبود می‌بخشند؛ هرچند استفاده بیش‌ازحد آن‌ها ممکن است موجب افزایش رفتار ترد شود (لی و ماراستانو، ۲۰۱۰، کریم و همکاران، ۲۰۱۱). همچنین مخلوط‌های اصلاح شده با گوگرد حساسیت بیشتری به تمرکز تنش در شرایط بارگذاری برشی و پیچشی نشان می‌دهند (آیت‌اللهی و همکاران، ۲۰۱۳، المنصوب و همکاران، ۲۰۱۴، هی نین و همکاران، ۲۰۱۶).

در سال‌های اخیر، ترکیب اصلاح‌کننده‌های مختلف نیز بررسی شده است. به عنوان مثال، استفاده هم‌زمان از قیرهای پلیمری و مواد ضد جداشدگی موجب بهبود مقاومت رطوبتی و افزایش دوام روسازی شده است (السحیانی و مودایهیم، ۲۰۱۴). همچنین ترکیب الیاف با افزودنی‌های ضد جداشدگی سبب افزایش پایداری مکانیکی و کاهش احتمال جدایش می‌شود (زیاری و منیری، ۲۰۱۶). افزودنی‌های آسفالت گرم نیز در کنار مواد ضد

خالص مدهای II و III با هندسه SCB چالش‌برانگیز است. برای رفع این محدودیت‌ها، هندسه دیسک دارای شیار کناری (ENDB) توسعه یافت. این هندسه امکان ارزیابی رفتار شکست تحت مدهای مختلف بارگذاری یا شرایط مد مختلط را از طریق تنظیم زاویه بارگذاری، فاصله تکیه‌گاه یا هندسه شیار فراهم می‌کند (عبدالشافی و مجیدزاده، ۱۹۸۵). مطالعات نشان داده‌اند که ENDB قادر است اثرات دما، نرخ بارگذاری و ویژگی‌های مصالح را در میدان‌های تنشی پیچیده به‌طور مؤثر ثبت کند (چانگ و کوروپو، ۱۹۸۴). با این حال، تحقیقات آزمایشگاهی درباره رفتار شکست مد III و مدهای مختلط با استفاده از ENDB هنوز محدود است (لیدل و همکاران، پژوهش‌ها نشان می‌دهد که زاویه بارگذاری  $\beta = 0$  رفتار مد I تولید می‌کند (بهمنی و همکاران، ۲۰۱۷)، در حالی که افزایش این زاویه، حالت شکست را به تدریج به سمت مد III سوق می‌دهد؛ به طوری که معمولاً مقادیر  $\beta$  بین ۶۰ تا ۶۲٫۵ درجه سبب غلبه مد III می‌شوند (علیها و همکاران، ۲۰۱۵).

مطالعات مکانیک شکست تأیید کرده‌اند که ضریب شدت تنش شاخصی مؤثر برای ارزیابی مقاومت روسازی در برابر گسترش ترک بوده و رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی را به‌صورت دقیق توصیف می‌کند (مچی، ۱۹۷۶). به‌طور کلی، گسترش ترک در مکانیک شکست در سه مد اصلی طبقه‌بندی می‌شود: مد بازشدگی (Mode I)، مد برشی درون‌صفحه‌ای (Mode II) و مد پارگی خارج از صفحه (Mode III). در بسیاری از مسائل مهندسی، بارگذاری به‌صورت مد مختلط رخ می‌دهد؛ با این حال، بیشتر مطالعات شکست آسفالت تنها بر مد I متمرکز بوده‌اند، زیرا بررسی مدهای II و III نیازمند هندسه‌های پیچیده‌تری است (علیها و همکاران، ۲۰۱۶).

پژوهش‌ها نشان می‌دهد که الگوهای رشد ترک و توزیع تنش در مد II تفاوت قابل توجهی با مد I دارند و این موضوع بر پارامترهای شکست تأثیر می‌گذارد (ایم و همکاران، ۲۰۱۴). شرایط محیطی نیز نقش مهمی ایفا می‌کنند: در دمای پایین، مخلوط‌های آسفالتی رفتار تردتری نشان داده و مقاومت کمتری در برابر گسترش ترک دارند (وانگ و همکاران، ۲۰۲۰)، در حالی که در دمای بالا رفتار ویسکوالاستیک غالب شده، تمرکز تنش در نوک ترک کاهش یافته و مقاومت ترک خوردگی افزایش می‌یابد (لینگ و همکاران، ۲۰۱۹). نرخ بارگذاری نیز تأثیری مشابه دارد: نرخ بارگذاری بالا، رفتار ترد و رشد سریع ترک را

جداشدگی می‌تواند ضمن کاهش دمای تولید، مقاومت رطوبتی را افزایش دهند (ژانگ و هوانگ، ۲۰۱۶).

در مجموع، تلفیق نتایج آزمایشگاهی با تحلیل‌های مکانیک شکست، چارچوبی قدرتمند برای توسعه مدل‌های پیش‌بینی ترک‌خوردگی فراهم می‌کند و امکان طراحی روسازی‌های بادوام‌تر و مقرون‌به‌صرفه‌تر را مهیا می‌سازد (هیلز و ابراین، ۱۹۶۶). با وجود این پیشرفت‌ها، مطالعات اندکی به بررسی اثر هم‌افزای نانوسیلیکا و بیتوسل در بهبود مقاومت ترک‌خوردگی دمای پایین پرداخته‌اند. اغلب پژوهش‌های پیشین تنها بر اثرات جداگانه این افزودنی‌ها یا فقط بر مد شکست مد I تمرکز داشته‌اند، در حالی‌که شرایط مد مختلط (II و III) در روسازی‌های واقعی بسیار رایج است. از این رو، نیاز به یک مطالعه جامع برای بررسی اثرات هم‌زمان این دو اصلاح‌کننده بیش از پیش احساس می‌شود.

### ۳- مواد و روش تحقیق

#### ۳-۱- مصالح

در این پژوهش از یک قیر عملکردی با درجه‌بندی PG 70-10 استفاده شد. این قیر توسط پالایشگاه نفت جیران اردکان (استان یزد) تأمین شده و یکی از متداول‌ترین انواع قیر مورد استفاده در روسازی‌های راهسازی ایران به شمار می‌رود. وزن مخصوص قیر در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد برابر ۱,۰۱۶ بوده و خواص آن

با الزامات استانداردهای مرتبط برای سیستم درجه‌بندی PG مطابقت داشت. سنگدانه‌های شکسته از معدن ساغند استان یزد تهیه شدند. این سنگدانه‌ها عمدتاً از نوع آهکی بوده و اندازه اسمی بزرگ‌ترین سنگدانه ۱۲,۵ میلیمتر، مطابق با دانه‌بندی شماره ۴ در نشریه ۲۳۴ (آیین‌نامه روسازی ایران) انتخاب شد. دانه‌بندی مورد استفاده کلیه حدود تعیین‌شده برای مخلوط‌های آسفالتی متراکم را برآورده می‌کرد. بررسی‌های کانی‌شناسی (جدول ۱) نشان داد که سنگدانه‌ها عمدتاً آهکی با ترکیب کربناته متوسط هستند. مقدار بالای CaO ۴۳٪ همراه با میزان قابل توجه افت‌پخت حدود ۴۰٪، ماهیت کربناته سنگدانه‌ها را تأیید می‌کند. مقادیر بسیار پایین سیلیکا و آلومینا نیز نشان‌دهنده آهکی بودن سنگدانه‌ها با ناخالصی کم است؛ ویژگی‌ای که از نظر شیمیایی با سیستم‌های آسفالتی پایه‌آهکی سازگار بوده و معمولاً چسبندگی مطلوبی با قیر فراهم می‌آورد. به‌عنوان اصلاح‌کننده قیر، از یک افزودنی گوگردی اصلاح‌شده با نام بیتوسل استفاده شد. علاوه بر آن، نانوسیلیکا با خلوص ۹۹,۸ درصد و اندازه متوسط ذرات حدود ۱۵ نانومتر به‌عنوان یک تقویت‌کننده معدنی نانومقیاس به مخلوط افزوده شد. مقادیر مصرف افزودنی‌ها بر اساس درصد وزنی قیر تعریف شدند. بیتوسل با ۱۵ درصد وزنی قیر، نانوسیلیکا با ۰,۵ درصد وزنی قیر، ترکیب با ۱۵ درصد بیتوسل + ۰,۵ درصد نانوسیلیکا (بر اساس وزن قیر)

جدول ۱. مشخصات کانی‌شناسی مصالح سنگی

ردیف	جزء اکسیدی	نماد	نتیجه (%)
۱	دی‌اکسید سیلیسیم	SiO <sub>2</sub>	۲,۴
۲	اکسید آلومینیوم	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱,۲۲
۳	اکسید آهن (III) (اکسید فریک)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۴۸
۴	اکسید کلسیم	CaO	۴۳,۵
۵	اکسید منیزیم	MgO	۰,۵۴
۶	افت بر اثر کلسینه‌کردن (افت حرارتی)	L.O.I	۳۹,۲۴
۷	تری‌اکسید گوگرد	SO <sub>3</sub>	(تشخیص نیست قابل) n.d

#### ۳-۲- ساخت مخلوط آسفالتی و نمونه‌های آزمون

طرح اختلاط آسفالتی با استفاده از روش طرح اختلاط مارشال انجام شد. مقدار قیر بهینه برای مخلوط شاهد برابر ۵ درصد وزنی کل مخلوط تعیین گردید. خواص فیزیکی سنگدانه‌ها در جدول ۲ ارائه شده و خواص حجمی و مکانیکی مخلوط کنترل در

حالت بهینه در جدول ۳ گزارش شده است. بر اساس این طرح، چهار نوع مخلوط آسفالتی آماده‌سازی شد:

-مخلوط شاهد (بدون افزودنی)

-مخلوط اصلاح‌شده با بیتوسل (معادل ۱۵ درصد وزنی قیر)

نمونه مارشال دو نمونه دیسکی با ضخامت تقریباً ۳۰ میلی متر با استفاده از اره برش دقیق تهیه شد. سپس در میانه یکی از لبه‌های هر دیسک، یک پیش‌ترک (notch) با طول ۱۵ میلی متر و عرض کمتر از ۰٫۵ میلی متر توسط تیغه برش ظریف ایجاد گردید. هدف از ایجاد این پیش‌ترک، فراهم کردن شرایط مناسب برای شروع ترک در آزمون شکست خمشی دیسک دارای شیار کناری (ENDB) بود.

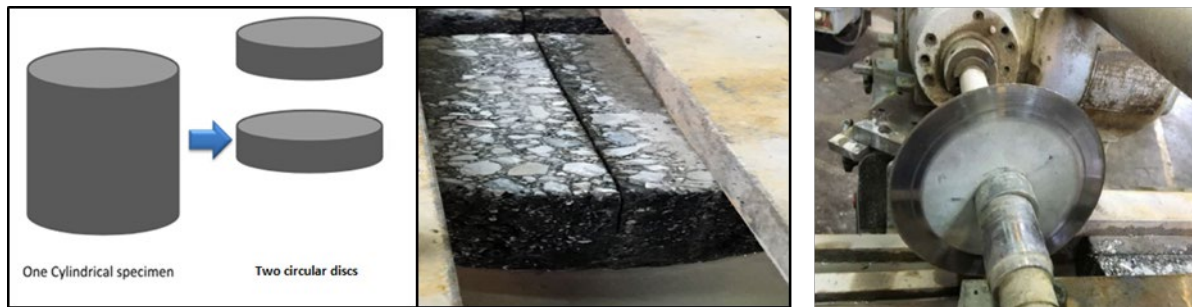
-مخلوط اصلاح‌شده با نانوسیلیکا (معادل ۰٫۵ درصد وزنی قیر)  
-مخلوط ترکیبی شامل بیتوسل و نانوسیلیکا به ترتیب با مقادیر ۱۵ درصد و ۰٫۵ درصد وزنی قیر  
برای هر نوع مخلوط، نمونه‌های استاندارد مارشال با قطر ۱۰۱٫۶ میلی متر و ارتفاع ۶۳٫۵ میلی متر ساخته شدند. عملیات تراکم با ۷۵ ضربه در هر طرف توسط چکش مارشال انجام گرفت تا چگالی مورد نیاز حاصل شود. پس از ساخت نمونه‌ها، از هر

جدول ۲. مشخصات فیزیکی سنگدانه‌ها

ردیف	ویژگی	مقدار
۱	وزن مخصوص ظاهری سنگدانه‌ها (Gsb)	۲٫۶۲۶
۲	وزن مخصوص مؤثر سنگدانه‌ها (Gse)	۲٫۶۵۴
۳	جذب قیر (Pba)	۰٫۲۴%
۴	درصد ذرات شکسته یک‌وجهی	۱۰۰%
۵	درصد ذرات شکسته دووجهی	۱۰۰%
۶	زاویه‌داری سنگدانه‌های ریزدانه	۴۲٫۷۰%

جدول ۳. خواص مخلوط آسفالتی بهینه

ردیف	ویژگی	مقدار
۱	درصد (مقدار) بهینه قیر	۵%
۲	قیر مؤثر (چسباننده مؤثر) (Pbc)	۴٫۷۶%
۳	وزن مخصوص ظاهری مخلوط متراکم‌شده (Gmb)	۲۳۵۷
۴	وزن مخصوص تئوری بیشینه (Gmm)	۲٫۴۵۶
۵	پایداری مارشال	۱۴۴۶ کیلوگرم
۶	روانی (جریان) مارشال	۲٫۷ میلی متر
۷	ضریب مارشال	۰٫۸۷
۸	درصد فضای خالی هوا در مخلوط متراکم‌شده (Va)	۴%
۹	فضای خالی در سنگدانه‌های معدنی (VMA)	۱۵%
۱۰	درصد فضای خالی پرشده با قیر (VFA)	۷۳%
۱۱	نسبت مقاومت کششی (TSR)	۰٫۷۶



شکل ۱. ساخت نمونه ENDB

### ۳-۳- محاسبه چقرمگی شکست

چقرمگی شکست ( $K$ ) یک پارامتر بنیادی است که میزان مقاومت یک ماده در برابر آغاز و انتشار ترک را نشان می‌دهد و با واحد پاسکال ضربدر ریشه متر ( $\text{Pa}\cdot\sqrt{\text{m}}$ ) بیان می‌شود. در مخلوط‌های آسفالتی شبه‌ترد، مقدار  $K$  تحت تأثیر مد بارگذاری، هندسه نمونه، طول اولیه ترک، دما، و نرخ بارگذاری قرار دارد. پس از هر آزمون ENDB، نمودار بار-جابجایی مورد تحلیل قرار گرفت تا بار بحرانی ( $P_c$ ) تعیین شود؛ سپس با استفاده از فرمول‌های استاندارد مکانیک شکست که به هندسه نمونه و نسبت طول ترک به ابعاد هندسی مانند شعاع دیسک ( $a/R$ ) بستگی دارند، چقرمگی شکست برای هر مود محاسبه می‌شود. چقرمگی شکست برای سه مد بارگذاری با استفاده از روابط (۱)، (۲ و ۳) محاسبه شد که در آن‌ها بار بحرانی ( $P_c$ )، ابعاد هندسی نمونه ENDB و ضریب‌های بدون بُعد هندسی لحاظ شده‌اند. پارامترهای مربوطه شامل موارد زیر هستند.

آزمون ENDB با ۳۲۴ نمونه (۴ مخلوط  $3 \times 3$  مود شکست  $3 \times 3$  دما  $3 \times 3$  نرخ بارگذاری  $3 \times 3$  تکرار) تهیه شد. مودهای شکست مورد بررسی شامل مود I کششی (بارگذاری عمود بر سطح ترک)، مود II برشی (بارگذاری در راستای عمود بر لبه ترک) و مود III پیچشی (بارگذاری در راستای موازی با لبه ترک و عمود بر صفحه دیسک) بودند. دماهای آزمون شامل ۵-، ۱۰- و ۱۵- درجه سانتی‌گراد و نرخ‌های بارگذاری شامل ۰٫۵، ۱ و ۵ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شدند. آزمون‌ها با استفاده از دستگاه تست یونیورسال (UTM) مجهز به سیستم کنترل دما انجام شد. منحنی‌های بار-جابجایی ثبت گردیدند تا پارامترهای لازم برای محاسبه چقرمگی شکست استخراج شوند. (شکل شماره ۱)

$$\text{Mode I - ENDB} \quad K_I^{ENDB} = \frac{6PS}{2Rt^2} \pi a Y_I^{ENDB}(\theta) \left( \frac{a}{t}, \frac{S}{R} \right) \quad (1)$$

$$\text{Mode II - ENDB} \quad K_{II}^{ENDB} = \frac{3PS_1S_2}{Rt^2(S_1+S_2)} \pi a Y_{II}^{ENDB}(\theta) \left( \frac{a}{t}, \frac{S}{R} \right) \quad (2)$$

$$\text{Mode III - ENDB} \quad K_{III}^{ENDB} = \frac{6PS}{2Rt^2} \cdot \pi a Y_{III}^{ENDB}(\theta) \left( \frac{a}{t}, \frac{S}{R}, \theta \right) \quad (3)$$

$P_c$ : بار بحرانی

$t$ : ضخامت نمونه

$R$ : شعاع نمونه

$a$ : طول اولیه ترک

YIII, YII, YI: ضریب‌های بی‌بُعد هندسی ویژه هر مد، که به نسبت  $a/R$  وابسته‌اند.

این ضریب‌های هندسی از راه‌حل‌های تحلیلی صحت‌سنجی شده به دست آمدند. مقادیر محاسبه‌شده KI و KII و KIII سپس به صورت آماری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند تا تأثیر نوع مخلوط، دمای آزمون و نرخ بارگذاری بر عملکرد شکست ارزیابی شود.

#### ۴- بحث و تحلیل داده‌ها

گردید. روند کاهش مشابهی در سایر مدهای شکست نیز مشاهده شد. در مد II، کاهش‌های ۶۹٪، ۴۸٫۵٪ و ۶۰٪ ثبت شد و در مد III میزان کاهش به ترتیب ۲٪، ۱۴٫۳٪ و ۱۷٫۳٪ بود. برای مخلوط‌های اصلاح‌شده نیز روند مشابهی مشاهده شد، هرچند شدت کاهش بسته به نوع مخلوط و مد شکست متفاوت بود. مقایسه مخلوط‌ها در تمامی نرخ‌های بارگذاری نشان داد که رتبه‌بندی مقاومت شکست در شرایط مختلف تقریباً ثابت باقی می‌ماند:

نمونه ترکیبی (بیتوسل + نانوسیلیکا) < نمونه نانوسیلیکا < نمونه بیتوسل < نمونه شاهد

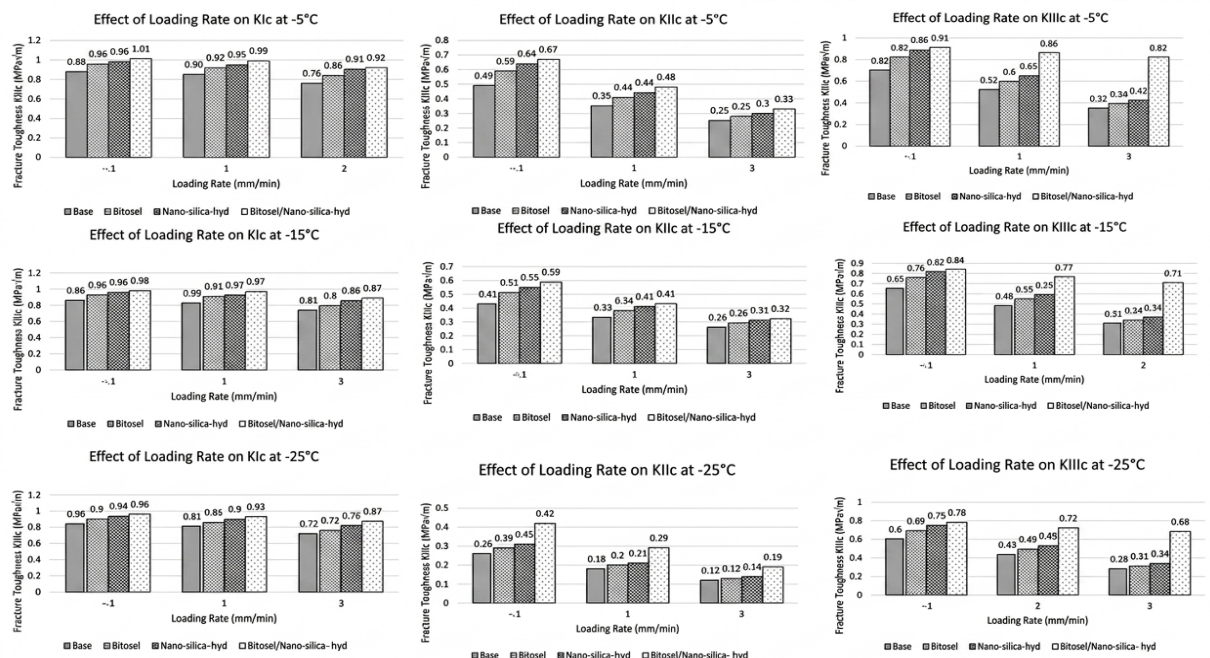
در میان مخلوط‌های مورد بررسی، مخلوط ترکیبی در تمامی مدهای شکست بالاترین مقادیر چقرمگی شکست را نشان داد. این عملکرد برتر را می‌توان به اثر هم‌افزایی میان بیتوسل و نانوسیلیکا نسبت داد. بیتوسل موجب ایجاد یک ساختار شبکه‌ای داخلی قوی‌تر در قیر می‌شود، در حالی‌که نانوسیلیکا پیوند میان قیر و سنگدانه‌ها را تقویت کرده و در نتیجه مقاومت شکست را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، مخلوط‌های حاوی نانوسیلیکا نسبت به مخلوط کنترل رفتار پایدارتر و مقاومت بیشتری در برابر انتشار ترک از خود نشان دادند.

این بخش به ارائه و تحلیل نتایج به‌دست‌آمده از آزمون‌های شکست ENDB می‌پردازد تا تأثیر نرخ بارگذاری، دما، مد شکست و نوع مخلوط آسفالتی بر رفتار شکست مخلوط‌ها ارزیابی شود. تحلیل‌ها بر روی چهار نوع مخلوط آسفالتی انجام گرفت که شامل مخلوط کنترل، مخلوط اصلاح‌شده با بیتوسل، مخلوط اصلاح‌شده با نانوسیلیکا، و مخلوط ترکیبی حاوی هر دو افزودنی بیتوسل و نانوسیلیکا بود.

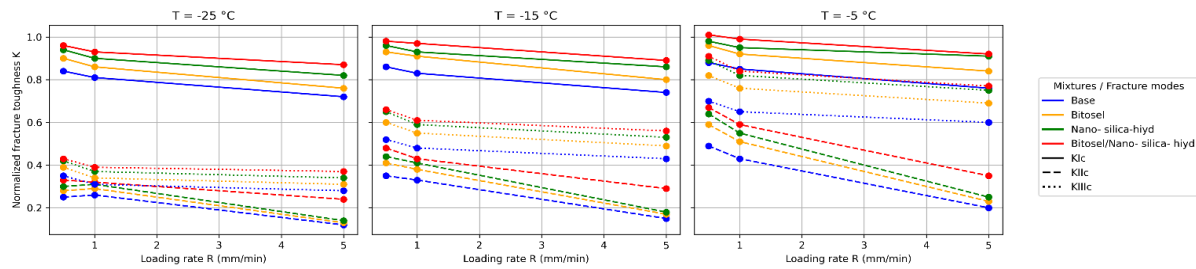
#### ۴-۱- تأثیر نرخ بارگذاری بر چقرمگی شکست

نرخ بارگذاری یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی است. این موضوع عمدتاً به ماهیت ویسکوالاستیک قیر مربوط می‌شود، که باعث می‌گردد پاسخ مکانیکی مخلوط به نرخ اعمال بار حساس باشد.

نتایج آزمایشگاهی نشان داد که افزایش نرخ بارگذاری از ۰٫۵ به ۵ میلی‌متر بر دقیقه موجب کاهش چقرمگی شکست در تمامی مخلوط‌ها و در همه مدهای شکست شد (شکل‌های شماره ۲ و ۳). برای مخلوط کنترل تحت بارگذاری مد I، افزایش نرخ بارگذاری در دماهای ۵-، ۱۵- و ۲۵- درجه سانتی‌گراد به ترتیب باعث کاهش ۱۳٫۶٪، ۱۳٫۹٪ و ۱۴٫۳٪ در مقادیر K<sub>IC</sub>



شکل ۲. اثر نرخ بارگذاری بر چقرمگی آسفالت در مود یک



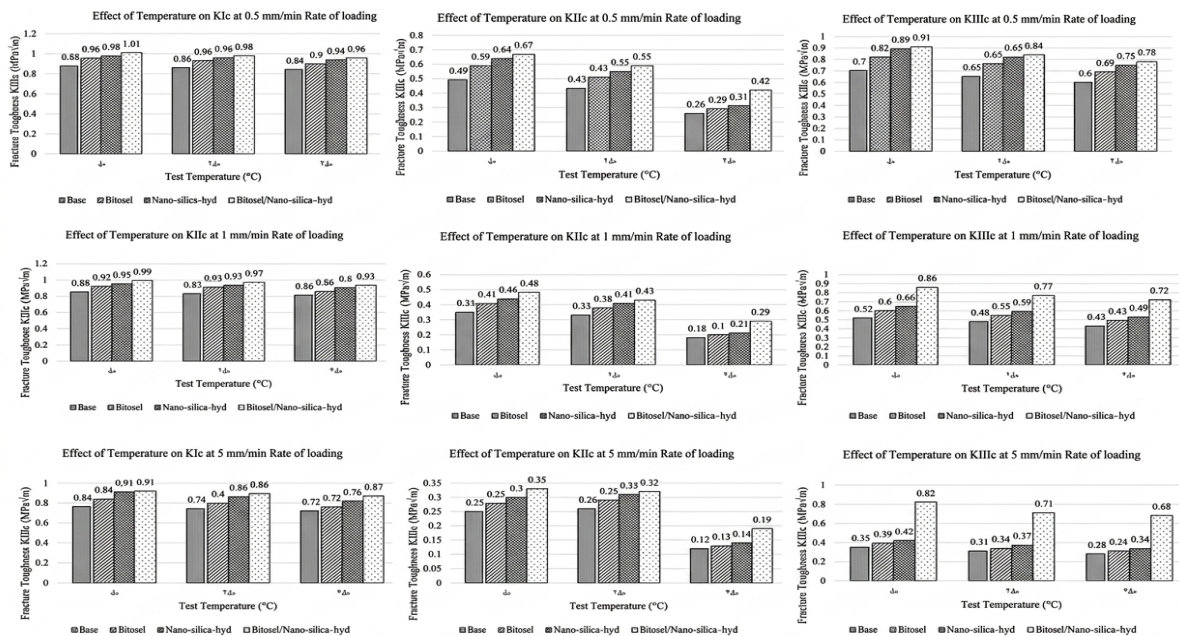
شکل ۳. اثر نرخ بارگذاری بر چقرمگی آسفالت در تمام مودها

مقادیر متوسط  $KC$  برای مخلوط‌های کنترل، اصلاح‌شده با بیتوسل، اصلاح‌شده با نانوسیلیکا و مخلوط ترکیبی به ترتیب ۲۷،۱٪، ۲۸،۴٪، ۲۶،۵٪ و ۲۳،۹٪ کاهش یافت. کاهش کمتر  $KC$  در مخلوط ترکیبی نشان می‌دهد که این مخلوط حتی در نرخ‌های بارگذاری بالاتر نیز ظرفیت باربری بالاتر و مقاومت بیشتری در برابر انتشار ترک از خود نشان می‌دهد. برای مخلوط کنترل تحت بارگذاری مد I با نرخ بارگذاری ۱ میلی متر بر دقیقه، کاهش دما باعث کاهش‌های ۴،۵٪، ۴،۷٪ و ۵،۳٪ در مقدار  $KIc$  شد. در مد II این کاهش‌ها به ترتیب ۳۸،۸٪، ۳۹،۵٪ و ۵۳،۸٪ بود، در حالی که مد III کاهش‌های ۵۰،۰٪، ۵۲،۳٪ و ۵۳،۳٪ را نشان داد. این روند در تمامی مخلوط‌ها مشاهده شد، اگرچه میزان کاهش بین آن‌ها متفاوت بود. (مطابق شکل ۴)

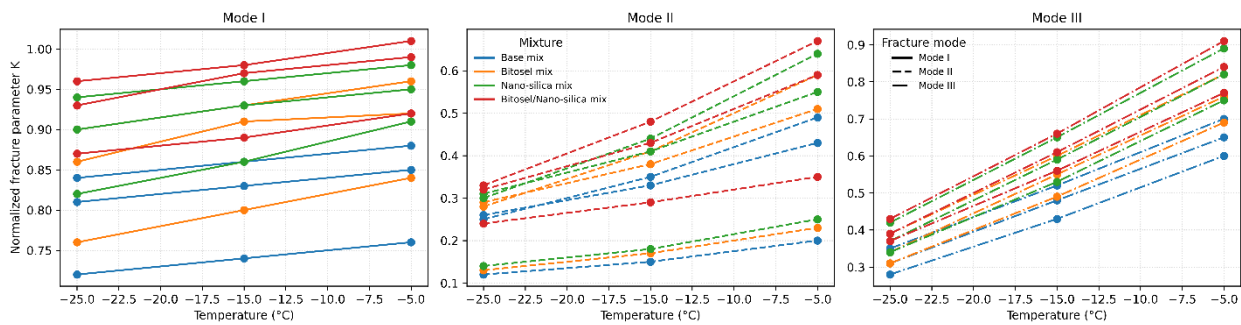
تحلیل چقرمگی شکست نرمال‌شده ( $KC$ ) نیز این یافته‌ها را تأیید کرد. با افزایش نرخ بارگذاری از ۰،۵ به ۵ میلی متر بر دقیقه، مقادیر متوسط  $KC$  برای مخلوط‌های کنترل، اصلاح‌شده با بیتوسل، اصلاح‌شده با نانوسیلیکا و مخلوط ترکیبی به ترتیب ۲۷،۱٪، ۲۸،۴٪، ۲۶،۵٪ و ۲۳،۹٪ کاهش یافت. کاهش کمتر  $KC$  در مخلوط ترکیبی نشان می‌دهد که این مخلوط حتی در نرخ‌های بارگذاری بالاتر نیز ظرفیت باربری بالاتر و مقاومت بیشتری در برابر انتشار ترک از خود نشان می‌دهد.

#### ۴-۲- تأثیر دما بر رفتار شکست

تحلیل چقرمگی شکست نرمال‌شده ( $KC$ ) نیز این یافته‌ها را تأیید کرد. با افزایش نرخ بارگذاری از ۰،۵ به ۵ میلی متر بر دقیقه،



شکل ۴. نمودار اثر دما بر چقرمگی مخلوط آسفالتی در مود یک



شکل ۵. نمودار اثر دما بر چقرمگی مخلوط آسفالتی در مود یک

ویسکوالاستیک قیر نسبت داده می‌شود؛ به طوری که با افزایش دما، قیر نرم‌تر و انعطاف‌پذیرتر شده و امکان جذب انرژی بیشتری را پیش از وقوع شکست برای مخلوط فراهم می‌کند. افزایش چقرمگی شکست در مدهای برشی (Mode II و Mode III) محسوس‌تر است. شیب تندتر مشاهده شده در مد III نشان می‌دهد که رفتار شکست پیچشی نسبت به تغییرات دما حساسیت بیشتری دارد.

در مقابل، افزایش نرخ بارگذاری از ۰٫۵ به ۵ میلی‌متر بر دقیقه موجب کاهش KC در تمامی مدهای شکست می‌شود. در نرخ‌های بارگذاری بالاتر، زمان کافی برای بازتوزیع تنش ویسکوالاستیک وجود ندارد که این امر باعث تسریع رشد ترک و کاهش مقاومت به شکست می‌شود. این اثر در مد II چشمگیرتر است که نشان‌دهنده حساسیت بالاتر شکست برشی نسبت به نرخ بارگذاری است. به طور کلی، مقادیر چقرمگی شکست از رابطه زیر تبعیت می‌کنند:

$$KIc > KIIC > KIICc$$

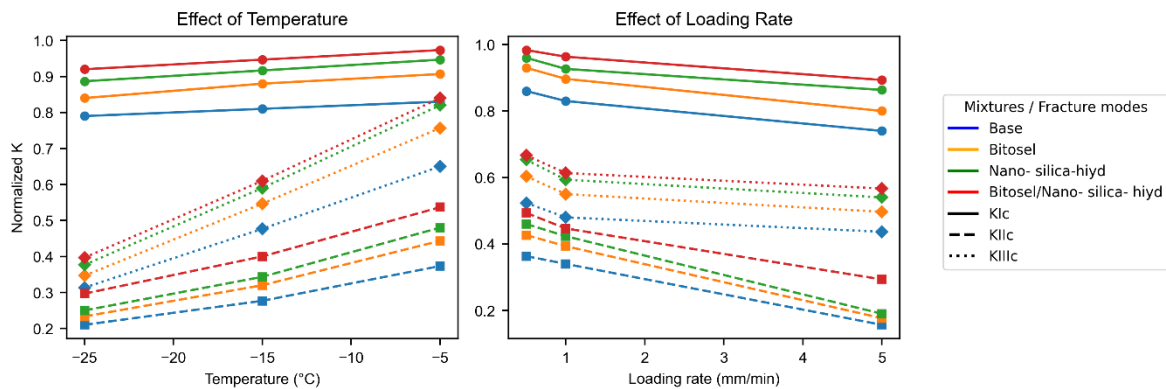
این الگو نشان می‌دهد که مخلوط آسفالتی تحت بارگذاری کششی (Mode I) بیشترین مقاومت و تحت برش درون‌صفحه‌ای (Mode II) کمترین مقاومت را از خود نشان می‌دهد. جدول شماره ۴ میانگین مقادیر چقرمگی شکست برای تمامی مخلوط‌ها را ارائه می‌دهد که نشان می‌دهد مخلوط ترکیبی در تمامی مدهای شکست بیشترین KC و مخلوط کنترل کمترین KC را دارا است.

همان‌گونه که در شکل ۵ نشان داده شده است، مخلوط ترکیبی بیشترین مقاومت را در برابر شروع و گسترش ترک از خود نشان داد. استفاده همزمان از بیتوسل و نانوسیلیکا موجب بهبود یکپارچگی ریزساختاری ماتریس آسفالتی، افزایش چسبندگی قیر-سنگدانه و تقویت مقاومت در برابر تنش‌های کششی، برشی و پیچشی می‌شود. همچنین، مخلوط‌های اصلاح‌شده با نانوسیلیکا به دلیل بهبود پیوندهای بین‌سطحی عملکرد بهتری نسبت به مخلوط کنترل داشتند. در تمامی دماها و نرخ‌های بارگذاری، ترتیب عملکرد مخلوط‌ها تقریباً ثابت باقی ماند:

نمونه ترکیبی (بیتوسل + نانوسیلیکا) < نمونه نانوسیلیکا < نمونه بیتوسل < نمونه شاهد  
میانگین کاهش KC بین دماهای -۵ تا -۲۵ درجه سانتی‌گراد برای مخلوط‌های کنترل، بیتوسل، نانوسیلیکا و ترکیبی به ترتیب ۲۷٫۷٪، ۲۸٫۹٪، ۲۶٫۷٪ و ۲۰٫۵٪ بود. کاهش کمتر در مخلوط ترکیبی نشان می‌دهد که این مخلوط در دماهای بسیار پایین، مقاومت شکست بالاتر و پایداری ساختاری بهتری را حفظ می‌کند.

#### ۴-۳- تأثیر مدها بر چقرمگی شکست

شکل شماره ۶ تأثیر دما و نرخ بارگذاری را بر چقرمگی شکست نرمال‌شده (KC) در سه مد شکست نشان می‌دهد. افزایش دما از -۲۵ تا -۵ درجه سانتی‌گراد باعث افزایش KC در تمامی مدهای شکست می‌شود. این رفتار عمدتاً به ماهیت



شکل ۶. اثر دما و نرخ بارگذاری درمودهای مختلف برچقرمگی نمونه‌های مختلف آسفالت

در مقایسه با مخلوط کنترل، مقادیر چقرمگی شکست در مد I برای مخلوط‌های بیتوسل، نانوسیلیکا و ترکیبی به ترتیب ۷,۵٪، ۱۱,۶٪ و ۱۴,۴٪ افزایش یافت. در مد II این افزایش‌ها به ترتیب ۱۲,۷٪، ۱۹,۴٪ و ۲۲٪ بود و در مد III نیز به ترتیب ۱۳,۷٪، ۱۹,۹٪ و ۳۰,۳٪ گزارش شد. این نتایج به وضوح نشان‌دهنده عملکرد برتر مخلوط ترکیبی است.

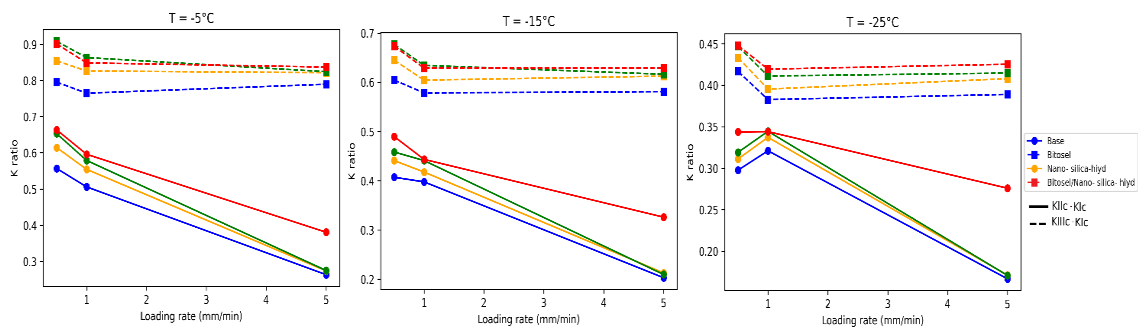
جدول ۴. مقایسه مقادیر میانگین چقرمگی شکست برای مودهای مختلف

K	شاهد	بیتوسل	نانوسیلیکا آبدوست	نمونه ترکیبی بیتوسل و نانو سیلیکا
KIc	۰,۸۱	۰,۸۸	۰,۹۲	۰,۹۵
KIIc	۰,۴۸	۰,۵۵	۰,۶۰	۰,۷۹
KIIC	۰,۳۰	۰,۳۵	۰,۳۷	۰,۴۱

#### ۴-۴- تحلیل شکست در شرایط مودهای ترکیبی KI/KI و KI/II

زیرنمودارها به دماهای -۵، -۱۵ و -۲۵ درجه سانتی‌گراد مربوط می‌شوند. افزایش نرخ بارگذاری از ۰,۵ به ۵ میلی‌متر بر دقیقه موجب کاهش محسوس  $K_{IIc}/K_{Ic}$  در تمامی مخلوط‌ها می‌شود که نشان‌دهنده کاهش مشارکت مد II (برشی) نسبت به مد I (کششی) و افزایش غلبه ترک‌خوردگی کششی در نرخ‌های بارگذاری بالاتر است. در مقابل، نسبت  $K_{IIIc}/K_{Ic}$  تنها تغییرات جزئی نشان می‌دهد که بیانگر حساسیت کمتر مد III نسبت به تغییرات نرخ بارگذاری است.

شکل شماره ۷ تأثیر نرخ بارگذاری را بر نسبت‌های چقرمگی شکست در شرایط مد مختلط، در سه دمای مختلف نشان می‌دهد. در این نمودارها، محور افقی نرخ بارگذاری (میلی‌متر بر دقیقه) و محور عمودی نسبت چقرمگی شکست (K ratio) را نمایش می‌دهد. خطوط پیوسته بیانگر  $K_{IIc}/K_{Ic}$  و خطوط نقطه‌چین نشان‌دهنده  $K_{IIIc}/K_{Ic}$  هستند. رنگ‌های مختلف به ترتیب نمایانگر مخلوط کنترل، مخلوط اصلاح‌شده با بیتوسل، مخلوط اصلاح‌شده با نانوسیلیکا و مخلوط ترکیبی هستند و

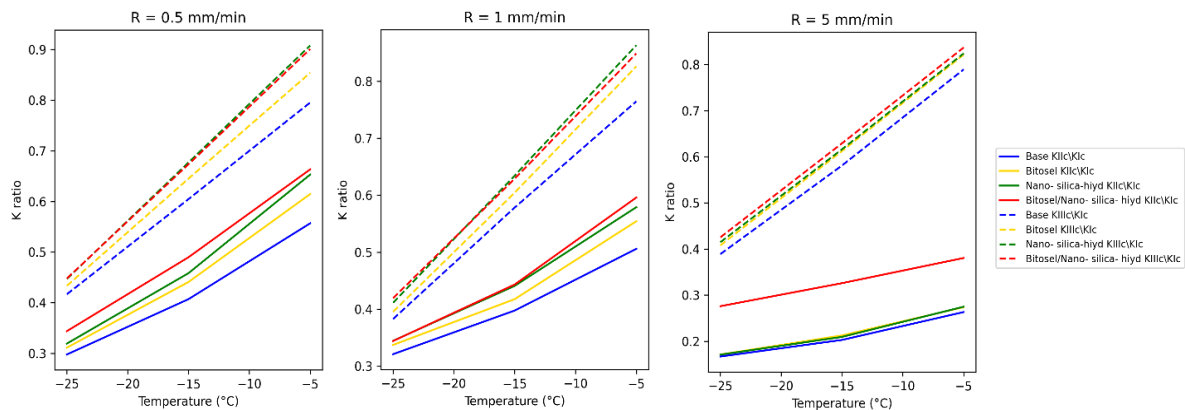


شکل ۷. اثر نرخ بارگذاری بر چقرمگی شکست در نسبت مودها

روند مشابهی برای نسبت  $K_{IIIc}/K_{Ic}$  نیز مشاهده می‌شود؛ با این حال مقدار آن همواره بیشتر از  $K_{IIc}/K_{Ic}$  باقی می‌ماند. این موضوع نشان می‌دهد که مخلوط‌ها مقاومت بیشتری در برابر شکست مد III (پارگی) نسبت به مد II (برش درون‌صفحه‌ای) دارند، که بیانگر آن است که انتشار ترک در مد III به انرژی شکست بیشتری نیاز دارد. از نظر نوع مخلوط، مخلوط کنترل کمترین نسبت‌های چقرمگی شکست را نشان می‌دهد، در حالی که مخلوط‌های اصلاح‌شده عملکرد بهتری دارند. در میان آن‌ها، مخلوط ترکیبی بیشترین مقادیر  $K_{IIc}/K_{Ic}$  و  $K_{IIIc}/K_{Ic}$  را نشان می‌دهد که بیانگر اثر تقویتی هم‌افزای بیتوسل و نانوسیلیکا است. به طور کلی، افزایش دما موجب افزایش سهم مدهای برشی و پارگی در رفتار شکست می‌شود، در حالی که افزایش نرخ بارگذاری سهم این مدها را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، افزودن اصلاح‌کننده‌ها به‌ویژه استفاده هم‌زمان از بیتوسل و نانوسیلیکا—به طور قابل توجهی مقاومت شکست در مدهای مختلط مخلوط‌های آسفالتی را بهبود می‌بخشد.

کاهش دما از ۵- به ۲۵- درجه سانتی‌گراد نیز باعث کاهش هر دو نسبت چقرمگی شکست می‌شود که این موضوع منعکس‌کننده افزایش تردی مخلوط آسفالتی و کاهش مقاومت آن در برابر تنش‌های برشی و پارگی در مقایسه با تنش‌های کششی است. به طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که نرخ بارگذاری و نوع افزودنی تأثیر قابل توجهی بر رفتار شکست در مدهای مختلط دارند، در حالی که استفاده هم‌زمان از بیتوسل و نانوسیلیکا موجب افزایش مقاومت شکست می‌شود.

شکل ۸ تغییرات نسبت‌های چقرمگی شکست را با دما در نرخ‌های بارگذاری ۰٫۵، ۱ و ۵ میلی‌متر بر دقیقه نشان می‌دهد. با افزایش دما از ۲۵- به ۵- درجه سانتی‌گراد، نسبت  $K_{IIc}/K_{Ic}$  در تمامی مخلوط‌ها افزایش می‌یابد. این روند را می‌توان به کاهش سختی مخلوط‌ها و افزایش توانایی ماده در تحمل تنش‌های برشی نسبت به تنش‌های کششی نسبت داد که در نتیجه سهم مد II در فرآیند شکست افزایش می‌یابد. این رفتار در تمامی نرخ‌های بارگذاری مشاهده می‌شود و در نرخ‌های بارگذاری پایین‌تر بارزتر است.



شکل ۸. اثر دما بر چقرمگی شکست در نسبت مودها

## ۵- نتیجه گیری

نانوسیلیکا به دلیل سطح ویژه بسیار بالا، تعاملات فیزیکی و شیمیایی در سطح قیر-سنگدانه را به طور چشمگیری تقویت کرده و منجر به بهبود چسبندگی و ایجاد ریزساختار متراکم تر می شود.

-افزودن بیتوسل موجب افزایش سفتی و یکپارچگی ساختاری ماتریس قیری می گردد، در حالی که نانوسیلیکا موجب بهبود پراکنش ذرات شده و انتقال تنش کارآمدتر در مقیاس میکرو را تسهیل می کند.

-حضور همزمان بیتوسل و نانوسیلیکا یک مکانیسم اصلاح هم افزای قوی ایجاد می کند؛ به طوری که چارچوب کریستالی بلوری بیتوسل با سطح بسیار فعال نانوسیلیکا تعامل داشته و ساختار داخلی مخلوط آسفالتی را به طور برجسته ای تقویت می کند.

-این بهبودهای ریزساختاری به صورت جمعی موجب ایجاد یک ساختار داخلی پایدارتر و یکپارچه تر در مخلوط ترکیبی شده و مقاومت آن را در برابر شروع و گسترش ترک تحت شرایط مختلف مکانیکی و محیطی افزایش می دهد.

### کاربردهای عملی و پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده

نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده همزمان از بیتوسل و نانوسیلیکا می تواند مقاومت شکست و دوام مخلوط های آسفالتی را، به ویژه در شرایط دمای پایین و نرخ های مختلف بارگذاری، به طور قابل توجهی بهبود بخشد. اثر ترکیبی ساختار کریستالی الیافی بیتوسل و سطح ویژه و واکنش پذیر بالای نانوسیلیکا موجب ایجاد ریزساختاری متراکم تر و پایدارتر در داخل مخلوط می شود که این امر مقاومت در برابر آغاز و گسترش ترک را افزایش می دهد. بنابراین، اصلاح هیبریدی با استفاده از بیتوسل و نانوسیلیکا می تواند به عنوان رویکردی مؤثر برای افزایش عمر بهره برداری روسازی و بهبود عملکرد سازه های بلندمدت روسازی های آسفالتی، به ویژه در مناطق دارای اقلیم سرد و شرایط محیطی سخت، در نظر گرفته شود. برای مطالعات آینده، پیشنهاد می شود عملکرد بلندمدت مخلوط های آسفالتی اصلاح شده با این ترکیب هیبریدی تحت شرایط واقعی ترافیکی و محیطی مورد ارزیابی قرار گیرد. در این راستا، توجه ویژه ای باید به بررسی رفتار خستگی، مقاومت در برابر آسیب رطوبتی،

رفتار شکست مخلوط های آسفالتی اصلاح شده با بیتوسل، نانوسیلیکا و ترکیب ترکیبی آن ها با استفاده از آزمایش شکست ENDB تحت شرایط بارگذاری مد I، مد II و مد III در دماها و نرخ های بارگذاری مختلف ارزیابی شد. بر اساس نتایج آزمایشگاهی، می توان جمع بندی های زیر را ارائه کرد:

-افزایش نرخ بارگذاری موجب کاهش چقرمگی شکست معادل (Kc) در تمامی مخلوط ها و مدهای شکست شد که بیانگر محدود بودن پاسخ ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی تحت بارگذاری سریع است. بیشترین حساسیت به نرخ بارگذاری در مد II مشاهده شد.

-مخلوط های اصلاح شده مقاومت شکست بالاتری نسبت به مخلوط کنترل نشان دادند. در میان آن ها، مخلوط ترکیبی بهترین عملکرد کلی را ارائه کرده و در برابر افزایش نرخ بارگذاری، پایداری بیشتری در چقرمگی شکست از خود نشان داد.

-کاهش دما به دلیل سفت شدن قیر و محدود شدن تغییر شکل پلاستیک در نوک ترک، چقرمگی شکست مخلوط ها را به طور قابل توجهی کاهش داد. در این شرایط، مخلوط ترکیبی مقاومت حرارتی بهتری در برابر ترک خوردگی نسبت به مخلوط کنترل از خود نشان داد.

-تحلیل چقرمگی شکست معادل نشان داد که مد II و مد III نسبت به تغییرات دما و نرخ بارگذاری حساسیت بیشتری دارند، در حالی که مد I کمترین حساسیت را نشان داد.

- عملکرد برتر مخلوط ترکیبی را می توان به اثر هم افزای نانوسیلیکا و بیتوسل نسبت داد. نانوسیلیکا بهبود تعامل قیر-سنگدانه و توزیع بهتر تنش را در مخلوط فراهم می کند، در حالی که بیتوسل موجب افزایش سفتی قیر و بهبود بازیابی الاستیک می شود.

به طور کلی، نتایج نشان می دهد که اصلاح ترکیبی با استفاده از بیتوسل و نانوسیلیکا به طور مؤثر مقاومت شکست و دوام مخلوط های آسفالتی را تحت شرایط دمای پایین و نرخ های بارگذاری مختلف بهبود می بخشد.

### یافته های کلیدی

-ریزساختار بلوری و الیافی بیتوسل یک شبکه تقویت کننده داخلی درون قیر ایجاد می کند که انسجام ساختاری را افزایش داده و شروع و گسترش ترک را محدود می سازد.

مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR) و پراش پرتو ایکس (XRD) می‌تواند درک جامع‌تری از سازوکارهای اندرکنش میان اصلاح‌کننده‌ها و قیر، و نیز تأثیر آن‌ها بر مورفولوژی داخلی و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی مخلوط‌ها فراهم سازد.

عملکرد شیارشدگی و ویژگی‌های پیرشدگی در طول زمان معطوف شود. همچنین، استفاده از روش‌های پیشرفته ریزساختاری و شیمیایی مانند میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)، طیف‌سنجی

## ۶-مراجع

- Al-Mansob, A., Karim, M.R., Jaya, R.P., 2014. Fracture energy and crack propagation in sulfur-extended asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Engineering* 15(6), 592–601.
- Benham, P.P., Crawford, R.J., Armstrong, C.G., (1987). *Mechanics of Engineering Materials*. John Wiley & Sons, Chichester.
- Bahia, H.U., Zhai, H., Lee, D.Y., (2005). Evaluation of liquid anti-stripping additives in hot mix asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering* 17(2), 190–196.
- Bahmani, A., Aliha, M.R.M., Berto, F., 2017. Fracture toughness of a polycrystalline graphite under combined tensile-tear deformation. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 90, 53–64.
- Chailleux, E., Vanel, A., Gauthier, G., (2006). Determination of low temperature bitumen cracking properties. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Asphalt Pavements (ICAP)*, Tokyo, Japan, 897–906.
- Chong, K.P., Kuruppu, M.D., (1984). New specimen for fracture toughness determination of rock and other materials. *International Journal of Fracture* 26, 59–62.
- Edwards, M.A., Arambula, E.H., 2006. Compact tension testing of asphalt binders at low temperature. In: *Proceedings of the 85th Annual Meeting of the Transportation Research Board (TRB)*, Washington, DC, Paper 06-2292, 22–26.
- Hainin, M.R., Mohamed, A.M.O., Matori, N.F., (2016). Shear-dominated fracture response of sulfur-modified asphalt mixtures. *Materials and Design* 95, 168–176.
- Al Suhaibani, S., Al Mudaiheem, M., (2014). Moisture susceptibility of asphalt mixtures containing anti-stripping additives and polymer modifiers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(4), 1–8.
- Aliha, M.R., (2012). Crack growth behavior in asphalt under combined tensile–shear loading at low temperatures. *Technical Report, Ministry of Roads and Transportation*, Tehran, Iran.
- Aliha, M.R.M., Bahmani, A., Akhondi, S., (2015). Determination of mode III fracture toughness using a new designed test configuration. *Materials and Design* 86, 863–871.
- Anderson, D.A., Marasteanu, M.O., (2001). Low temperature thermal cracking of asphalt binders ranked by strength and fracture properties. *Transportation Research Record* 1766, 1–6.
- Ayatollahi, M.R., Aliha, M.M., Karim, M.R., (2013). Mixed-mode fracture behavior of sulfur-modified asphalt concrete using SCB specimen. *Engineering Fracture Mechanics* 102, 36–48.
- Abdulshafi, A.A., Majidzadeh, K., (1985). J-integral and cyclic plasticity approach to fatigue and fracture of asphalt mixtures. *Transportation Research Record* 1034, 112–123.
- Aliha, M.R.M., Bahmani, A., Akhondi, S., (2015). Numerical analysis of a new mixed-mode I/III fracture test specimen. *Engineering Fracture Mechanics* 134, 95–110.
- Aliha, M.R.M., Bahmani, A., Akhondi, S., (2016). Novel test specimen for mixed-mode I+III fracture toughness of hot-mix asphalt. *International Journal of Solids and Structures* 90, 167–177.

- SCB configuration. *Construction and Building Materials* 286, 122978.
- Lim, I.L., Johnston, I.W., Choi, S.K., Boland, J.N., (1994). Fracture testing of rocks with semicircular bend specimen. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 31(3), 185–197.
- Ling, M., Chen, Y., Luo, X., (2019). Enhanced model for thermally induced transverse cracking of asphalt pavements. *Construction and Building Materials* 206, 130–139.
- Ling, M., Luo, X., Chen, Y., Hu, S., Lytton, R.L., (2019). A calibrated mechanics-based model for top-down cracking of asphalt pavements. *Construction and Building Materials* 208, 102–112.
- Little, D.N., Button, J.W., White, R.M., (1987). Investigation of Asphalt Additives. Texas Transportation Institute, *Texas A&M University*, College Station, Texas.
- Ghajar, R., (2009). Mechanics of Fracture and Fatigue. Lecture Notes, Khajeh Nasir University of Technology, Tehran, Iran.
- Maji, K., 1976. Application of Fracture Mechanics for Improved Design of Bituminous Concrete. *Federal Highway Administration Report FHWA-RD-76-91*, Washington, DC.
- Molenaar, J.M.M., Liu, X., Molenaar, A.A.A., (2003). Resistance to crack growth and fracture of asphalt mixture. In: *Proceedings of the 6th RILEM International Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials (PTEBM'03)*, Zurich, Switzerland, 159–168.
- Olard, F., Di Benedetto, H., (2004). Fracture toughness and fracture energy of bituminous binders at low temperatures. In: *Cracking and Failure of Bituminous Materials (RILEM Proceedings PRO 41)*. *RILEM Publications*, 99–106.
- Shah, S.P., (1990). Determination of fracture parameters of plain concrete using three-point bend test. *Materials and Structures* 23, 457–460.
- Wang, H., Behnia, B., Buttlar, W.G., Reis, H., (2020). Two-dimensional micromechanical viscoelastic models for block cracking in
- Hills, J., O'Brien, D., (1966). Fracture of bitumens and asphalt mixes by temperature-induced stresses. *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists* 35, 292–309.
- Hiltunen, D.R., Roque, R., (1994). Mechanics-based prediction model for thermal cracking of asphaltic concrete pavements. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* 63, 655–688.
- Hossain, M.R., Islam, M.R., Karim, M.R., (2013). Effect of liquid anti-stripping additives on hot mix asphalt properties. *Construction and Building Materials* 47, 1005–1010.
- Huang, Y., Zhang, H., (2024). Thermal cracking behavior and fracture energy evaluation of asphalt mixtures with various binder systems. *Construction and Building Materials* 430, 136992.
- Im, S., Ban, H., Kim, Y.R., (2014). Mode-I and mode-II fracture properties of fine aggregate matrix using semicircular specimen geometry. *Construction and Building Materials* 52, 413–421.
- Karim, M.R., Mohamed, A.M.O., Hainin, M.A., (2011). Effect of sulfur modifier on fracture resistance of asphalt concrete. *Construction and Building Materials* 25(8), 1516–1523.
- Kim, H., Buttlar, W.G., (2009). Discrete fracture modeling of asphalt concrete. *International Journal of Solids and Structures* 46(13), 2593–2604.
- Lee, N.K., Morrison, G.R., Kennepohl, G.J., (1995). Low temperature fracture of polyethylene-modified asphalt binders and asphalt concrete mixes. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* 64, 534–574.
- Li, X.-J., Marasteanu, M., 2010. Using semicircular bending test to evaluate low-temperature fracture resistance of asphalt concrete. *Experimental Mechanics* 50(7), 867–876.
- Li, Z., Kim, Y.R., Underwood, B.S., (2021). Fracture characteristics of asphalt mixtures under mixed-mode loading using an improved

- Zhang, J., Huang, Y., (2015). Warm-mix asphalt with anti-stripping agents: Influence on mixture performance. *Materials and Design* 85, 102–109.
- Zhou, F., Luo, X., Hu, S., (2023). Mixed-mode fracture performance of asphalt mixtures evaluated using semi-circular bend tests. *Materials and Design* 225, 111593.
- Zhou, F., Luo, X., Scarpas, A., (2021). Review of fracture testing methods for asphalt mixtures at low temperatures. *Construction and Building Materials* 296, 123742.
- Ziari, H., Moniri, M., (2016). Combined effect of fibers and anti-stripping additives on asphalt mixture performance. *Road Materials and Pavement Design* 17(3), 448–462.
- asphalt pavements. *Construction and Building Materials* 243, 118233.
- Wagoner, M.P., Buttlar, W.G., Paulino, G.H., Blankenship, P., (2005). Investigation of fracture resistance of hot-mix asphalt using disk-shaped compact tension test. *Transportation Research Record* 1929, 183–192.
- Wang, Y., Zhou, F., Luo, X., Scarpas, A., (2017). Fracture characterization of asphalt mixtures at low temperature using disk-shaped compact tension test. *Construction and Building Materials* 157, 1032–1042.
- Xu, S., Wang, Y., (2021). Mixed mode I/II fracture behavior of asphalt mixtures using the semi circular bend (SCB) test. *Engineering Fracture Mechanics* 247, 107634.

# Synergistic Analysis of the Effects of Bitucell and Nanosilica on the Low-Temperature Fracture Behavior of Asphalt Mixtures Based on the ENDB Test

*Mahmoud Reza Keymanesh, Civil Engineering Faculty, Payame Noor University, Tehran, Iran.*

*Mohsen Sadeqian, Ph.D. Student, Civil Engineering Faculty, Payame Noor University, Tehran, Iran.*

**E-mail: mrkeymanesh@pnu.ac.ir**

Received: February 2026- Accepted: May 2026

## ABSTRACT

Low-temperature cracking is one of the most critical pavement distresses affecting the durability of asphalt mixtures in cold regions. In this study, the individual and synergistic effects of Bitucell (as a sulfur-based additive) and nanosilica on the fracture resistance of asphalt mixtures were evaluated using the Edge Notched Disc Bend (ENDB) test under Mode I, Mode II, and Mode III loading conditions. Four types of mixtures, including the control mixture, Bitucell-modified mixture, nanosilica-modified mixture, and the Bitucell–nanosilica composite mixture, were tested at temperatures of  $-5$ ,  $-10$ , and  $-15^{\circ}\text{C}$  and loading rates of 0.5, 1, and 5 mm/min. In total, 324 ENDB specimens were prepared and tested in triplicate. The results showed that the composite mixture exhibited the highest fracture resistance compared with mixtures containing each additive individually. Specifically, its stress intensity factors increased in all Modes I, II, and III relative to both the control mixture and the mixtures modified with a single additive. The minimum increase was observed in the shear mode, whereas the maximum improvement was obtained under the tearing mode. A decrease in temperature and an increase in loading rate led to a reduction in the fracture toughness  $(K_{IC})$  values; however, the composite mixture showed the lowest sensitivity to these conditions. Overall, the findings confirm that the simultaneous use of Bitucell and nanosilica can effectively enhance the low-temperature fracture resistance and reduce the brittleness of asphalt mixtures.

**Keywords:** NDB, Bitucell, Nanosilica, Stress Intensity Factor, Fracture Toughness