



Research Article

Mode I Fracture Toughness (K_{Ic}) Investigation Under Low-Temperature Conditions for Asphaltic Mixtures Containing Different Percentages of Steel Slag Filler

Mohammad Reza Malek ^a, Shahin Shabani ^b, Mahmoud Reza Keymanesh ^{c*}

^a PhD Student in Road and Transportation, Department of Civil Engineering, Payame Noor University, North Tehran Branch, I. R. Iran.

^b Associate Professor in Road and Transportation, Department of Civil Engineering, Payame Noor University, North Tehran Branch, I. R. Iran.

^c Professor in Road and Transportation, Department of Civil Engineering, Payame Noor University, North Tehran Branch, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-10-06

Revised: 2024-11-09

Accepted: 2024-11-26

Keywords:

Asphalt concrete mixtures;
Steel slag filler;
Low-temperature fracture;
Pure mode-I;
SCB sample;
Experimental and numerical study.

ABSTRACT

Mode I or tensile type crack growth is one of the main failure modes in roads and the surface of overlays especially for cold regions. Fracture toughness (K_{Ic}) is a suitable index for ranking and investigating the performance of the asphalt materials against low-temperature mode I cracking. This index is often determined experimentally by means of valid and reliable experimental and laboratory methods. In this regard, the Semi-Circular-Bend (SCB) sample is among the most common specimens and techniques for determining mode I fracture toughness of asphalt concrete materials. Hence, in the current research, the SCB shape samples made of hot mix asphalt (HMA) material containing 3% and 5% steel slag powder as filler is tested at two low-temperatures of -12°C and -24°C . Results showed that mode I fracture toughness value for the tested HMA mixtures can increase up to 45% compared to the control mixture (i.e. the mixture without slag filler). Also, decreasing the test temperature can increase significantly the fracture toughness value because of increasing the stiffness of binder material. The fracture load in the tested SCB samples was increased by increasing the sample thickness, but the K_{Ic} value was nearly independent from the thickness of the SCB discs.

* Corresponding author

E-mail address: cv.amir1995@gmail.com

How to cite this article: Malek, M. R., shabani, S., & Keymanesh, M. R. (2024). Fracture resistance of asphalt concrete mixtures under pure tensile mode loading in different environmental and geometric conditions with different percentages of filler. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 10(3), 23-36.

<https://doi.org/10.22075/jtie.2024.35546.1694>

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



مقاله پژوهشی

بررسی چقرمگی شکست مود کشش خالص (K_{Ic}) دمای کم مخلوط‌های بتن آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف فیلر سرباره کوره آهن

محمدرضا ملک^۱، شاهین شعبانی^۲، محمود رضا کی‌منش^{۳*}

^۱ دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور تهران شمال، ایران.

^۲ دانشیار، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور تهران شمال، ایران.

^۳ استاد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور تهران شمال، ایران.

چکیده

به طور کلی، رشد ترک و شکست ناشی از شرایط مود I بارگذاری در سطح راه‌ها از عوامل اصلی خرابی روسازی‌های آسفالتی، خصوصاً در فصول سرد سال، می‌باشد. چقرمگی شکست (K_{Ic}) شاخص مناسبی برای بررسی و پیش‌بینی رفتار و مقاومت ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی در شرایط دمای کم می‌باشد که معمولاً از طریق آزمایش مناسب شکست برای مخلوط‌های آسفالتی به‌دست می‌آید. قطعه نیمه‌دیسک با ترک لبه‌ای و تحت بار خمشی سه‌نقطه‌ای (قطعه SCB) یکی از قطعات متداول برای انجام آزمایش چقرمگی شکست در مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد. در این تحقیق، از این قطعه و روش برای محاسبه K_{Ic} مخلوط آسفالتی گرم حاوی مقادیر مختلف (۳ و ۵ درصد) پودر سرباره آهن به عنوان فیلر استفاده شده است. تست‌های شکست در دو دمای ۱۲- و ۲۴- درجه سلسیوس و با نرخ بارگذاری ثابت انجام گردید. نتایج تست‌ها نشان داد که با افزایش درصد فیلر، مقدار چقرمگی شکست مود کششی (I) تا حدود ۴۵ درصد نسبت به نمونه شاهد (مخلوط بدون فیلر سرباره آهن) افزایش می‌یابد. همچنین، با کاهش دما، مقدار K_{Ic} افزایش قابل ملاحظه‌ای را نشان داد که بیانگر بهبود مقاومت در برابر شکست مخلوط آسفالتی به‌واسطه افزایش سفتی قیر می‌باشد. هر چند که بار و نیروی شکست در نمونه‌های SCB با افزایش ضخامت قطعه افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد اما نهایتاً با افزایش ضخامت نمونه SCB تغییر چندانی در مقدار چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی تست شده مشاهده نگردید.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۱۵

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۱۹

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۰۶

واژگان کلیدی:

مخلوط‌های بتن آسفالتی،

فیلر سرباره آهن،

مقاومت شکست دمای کم،

مود I خالص،

نمونه‌های SCB،

تحلیل عددی و آزمایشگاهی.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: cv.amir1995@gmail.com

استناد به این مقاله: ملک، محمدرضا، شعبانی، شاهین & کی‌منش، محمدرضا. (۱۴۰۳). بررسی چقرمگی شکست مود کشش خالص (K_{Ic}) دمای

پایین مخلوط‌های بتن آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف فیلر سرباره کوره آهن. مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، ۳۶-۲۳، (۳)۱۰.

<https://doi.org/10.22075/jtie.2024.35546.1694>

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

۱. مقدمه

به طور کلی، ایجاد ترک در روسازی‌ها به دلیل ضعف روسازی در برابر عوامل ایجاد کننده تنش‌های برشی و کششی در روسازی و یا همچنین به دلیل عوامل جوی (محیطی) می‌باشد. یکی از علت‌های ایجاد ترک در روسازی‌ها و روکش‌های آسفالتی ناشی از افت مقاومت و نیز افزایش تنش‌های وارده نسبت به مقاومت نهایی آسفالت می‌باشد. به طور خلاصه، پارامترهایی نظیر تغییرات دمای رویه آسفالتی، مقدار بار ترافیکی، نوع، طول و جهت قرارگیری ترک‌ها در روی سطح لایه آسفالتی، فاصله و محل عبور وسایل نقلیه نسبت به ترک‌ها، جنس لایه رویه آسفالتی و لایه زیراساس، و رطوبت موجود در خاک بستر از عوامل مؤثر بر شکست آسفالت ترک‌دار تحت بار کششی خالص می‌باشند. بنابراین، لازم است که میزان مقاومت در برابر رشد ترک و یا چقرمگی شکست مود کششی خالص (مود I) در مخلوط‌های آسفالتی از طریق قطعات و روش‌های مناسب آزمایشگاهی تعیین گردد. مکانیک شکست الاستیک خطی، شروع رشد ترک تحت شرایط بارگذاری مونوتونیک (یکنواخت) یا شبه‌استاتیک توسط مقدار ضریب شدت تنش بحرانی (K_{IC}) مشخص می‌شود. منصوریان و همکاران (۲۰۱۹) مقاله‌ای تحت عنوان ارزیابی چقرمگی شکست آسفالت نیمه‌گرم حاوی الیاف طبیعی و مصنوعی در دماهای کم ارائه کردند. آنها در سه دمای صفر، ۱۰- و ۲۰- درجه سلسیوس، چقرمگی شکست را با استفاده از قطعه نیمه-دیسک ترک‌دار و تحت بار خمش سه نقطه‌ای (قطعه SCB) که یکی از متداول‌ترین و ساده‌ترین قطعات و روش‌های انجام تست شکست مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد، محاسبه کردند. نتایج آزمایش‌ها و تحلیل‌های انجام شده آنها نشان می‌دهد که چقرمگی شکست مخلوط آسفالت نیمه‌گرم حاوی الیاف طبیعی و مصنوعی نسبت به مخلوط بدون الیاف در مود کشش خالص افزایش می‌یابد. همچنین، در تمام دماهای آزمایش، به ازای درصد مساوی الیاف، تأثیر الیاف مصنوعی روی بهبود چقرمگی شکست آسفالت نیمه‌گرم بیشتر از الیاف طبیعی است. حسینی و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی رفتار شکست مود I نمونه‌های آسفالت حاوی درصد‌های مختلف فیلرها و

افزودنی‌های کربن سیاه و هیدروکربن پرداخته و مشاهده نمودند که با افزایش درصد این افزودنی‌ها مقدار انرژی شکست و چقرمگی شکست افزایش می‌یابد. آنها همچنین اثر سیکل‌های ذوب و یخبندان را بر رفتار این مخلوط‌های آسفالتی مورد تحلیل قرار داده و دریافتند که با افزایش تعداد سیکل ذوب و یخ، مقاومت در برابر رشد ترک کششی مخلوط‌های تست شده کاهش قابل توجهی می‌یابد. با استفاده از نمونه SCB، بهبهانی و همکاران (۲۰۱۳) و علیها و همکاران (۲۰۱۵) نیز به محاسبه مقدار چقرمگی شکست مود I (K_{IC}) چند نمونه مخلوط آسفالت حاوی افزودنی‌های مختلف نظیر CR (پودر لاستیک)، SBS (سasuویت)، ANTI (عامل ضد عریان-شدگی) و PPA (پلی‌فسفریک اسید) در دمای کم پرداختند و به این نتیجه رسیدند که تمامی این افزودنی‌ها قادر به بهبود رفتار شکست و ترک‌خوردگی آسفالت در دمای کم نسبت به نمونه شاهد بوده و بهترین عملکرد مربوط به مخلوط حاوی پودر لاستیک می‌باشد. شهابخش و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از قطعه SCB به بررسی رفتار شکست در مود I و مود ترکیبی I/II مخلوط آسفالتی گرم حاوی نانوسیلیکا پرداختند و نتیجه گرفتند که افزودن ۱/۲ درصد نانوسیلیکا باعث تقویت و بهبود عملکرد دمای کم مخلوط آسفالت، علی‌الخصوص در حالت مود کششی (مود I) بارگذاری می‌گردد. شاکر و همکاران (۲۰۲۳) نیز با استفاده از قطعات دیسک‌شکل با ترک لبه‌ای و تحت بار خمش سه نقطه‌ای (که به قطعه ENDB شناخته می‌شود) به ارزیابی مقاومت ترک-خوردگی آسفالت‌های حاوی سرباره آهن در شرایط دمایی زیر صفر پرداختند و با استفاده از روش پاسخ سطح به تحلیل نتایج آزمایش‌ها در مودهای مختلف بارگذاری (از جمله مود I خالص) پرداختند و به درصد بهینه‌ای از افزودنی (فیلر) برای تقویت رفتار شکست مخلوط آسفالتی دست یافتند. یالچین و همکاران (۲۰۲۴) نیز با اضافه کردن درصد‌های مختلف SBS (استایرن-

استفاده از فیلر سرباره کوره آهن به عنوان یکی از مواد ضایعاتی در طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی می‌تواند یک گزینه مناسب برای کاهش ضایعات و اثرات زیست‌محیطی زباله‌های صنعتی باشد. با وجود این، اثر سرباره پودر شده سنگ آهن به عنوان ماده فیلر و افزودنی مخلوط‌های آسفالتی کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. لذا، در این تحقیق، به بررسی اثر افزودنی سرباره آهن در رفتار شکست مود I مخلوط‌های آسفالتی در دمای کم پرداخته می‌شود. بدین منظور ابتدا روش آزمایشگاهی و قطعه تست چقرمگی شکست معرفی شده و پارامترهای شکست آن (نظیر ضریب شدت تنش و ضریب هندسی) با استفاده از تحلیل‌های المان محدود محاسبه و تعیین می‌گردد. در ادامه، به معرفی مواد و مصالح و طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی پرداخته می‌شود. در انتها، با انجام تست شکست روی این مخلوط‌ها در شرایط دمایی و هندسی مختلف به بررسی اثر این پارامترها بر رفتار شکست و مقاومت ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره کوره آهن پرداخته می‌شود.

۲. معرفی قطعه آزمایشی شکست مود I و تحلیل المان محدود آن

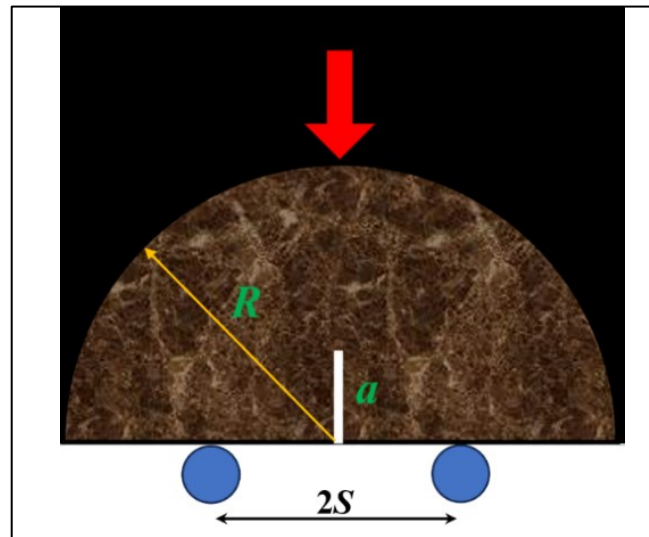
در تحقیق حاضر، از قطعه SCB که یک نمونه نیم دایره-ای با یک ترک در لبه و تحت بارگذاری خمش سه‌نقطه-ای است، جهت مطالعات آزمایشگاهی مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده است. مهم‌ترین دلیل استفاده از این نمونه را می‌توان سادگی هندسی، سهولت در ساخت و ایجاد ترک، و امکان شبیه‌سازی مود اول بارگذاری (مود کشش خالص)، امکان ساخت نمونه با استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی همچون متراکم کننده چرخش ژیراتوری^۱ و امکان ساخت قطعه با نمونه‌برداری میدانی از طریق مغزه‌گیری نام برد. همچنین، قطعات SCB به

بوتادین- استایرن) در محدوده ۲ تا ۴ درصد به عنوان یکی از متداول‌ترین افزودنی‌های قیر به بررسی شکست مود I با استفاده از نمونه ترک‌دار SCB پرداختند. فخری و متعهد (۲۰۲۱) با استفاده از قطعه SCB به بررسی شرایط شکست و مقاومت ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم حاوی درصد‌های مختلف آسفالت بازیافتی (RAP) و نانورس پرداخته و نتیجه گرفتند که این مخلوط، مقاومت شکست مناسب‌تر و بالاتری نسبت به مخلوط شاهد و بدون افزودنی دارد. در تحقیقی مشابه، برادران و همکاران (۲۰۲۴) از قطعه SCB برای ارزیابی مقاومت شکست مود-I مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی RAP و افزودنی PET سنتز شده دوست‌دار محیط‌زیست (بطری‌های پت بازیافتی) در ساختار قیر استفاده نمودند. شهریاری و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از چند نمونه آزمایشگاهی، از جمله نمونه SCB، شکست مود I در مخلوط‌های آسفالت، با افزودنی LDPE (پلی‌اتیلن با چگالی کم)، را در دماها و نرخ‌های بارگذاری مختلف مورد بررسی قرار دادند. حقیقت‌پور و علیها (۲۰۲۲ a, b) و (۲۰۲۳) رفتار شکست دمای کم و دمای میانی مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصد‌های متفاوتی از آسفالت بازیافتی (RAP) را مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار دادند. بر اساس نتایج فنی-اقتصادی به‌دست آمده، افزودن تا ۵۰ درصد RAP به طرح اختلاط آسفالت گرم دارای توجیه است. در بسیاری از مقالات، سایر محققین (مانند قرقی و همکاران، ۲۰۲۳) نیز تأثیر افزودن انواع مختلفی از افزودنی‌ها و طرح‌های اختلاط بر رفتار رشد ترک و مقاومت شکست آسفالت را مورد بررسی قرار داده‌اند. مرور منابع فوق نشان می‌دهد که نوع افزودنی به قیر و یا مخلوط آسفالتی تأثیر متفاوت و ویژه‌ای بر رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی در دماها و شرایط مختلف بارگذاری و محیطی دارد.

^۱ - Gyrotory Compactor Machine (GCM)

است. بر همین اساس، در تحقیق حاضر نیز قطعه SCB به عنوان گزینه مناسب جهت انجام آزمایش‌های شکست در مخلوط‌های آسفالتی انتخاب شده است. در شکل ۱، طرح‌واره نمونه SCB نمایش داده شده است.

سبب این که بارگذاری آن به صورت بار خمشی سه- نقطه‌ای انجام می‌گردد، قطعه مناسب‌تری برای انجام آزمایش شکست در مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد و بنا به همین دلایل استفاده از این قطعه در مطالعات تجربی شکست مخلوط‌های آسفالتی گسترش روز افزونی یافته



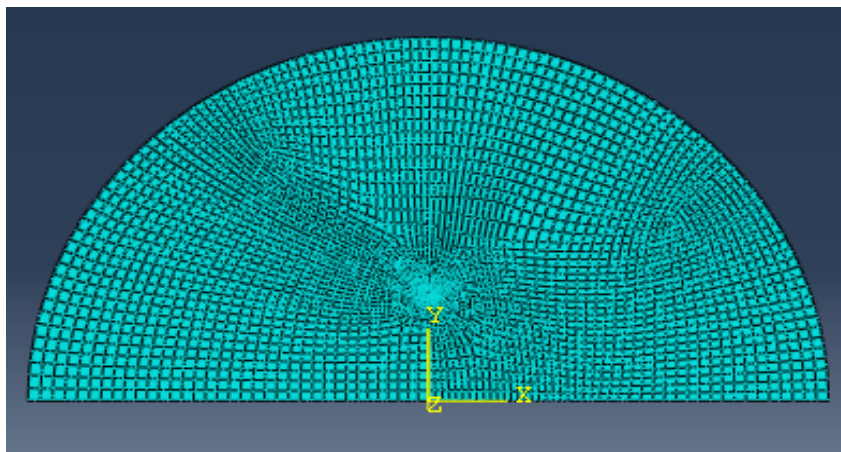
شکل ۱. هندسه قطعه SCB در بارگذاری مود I

دوبعدی استفاده شده است. در این مدل، شعاع نیم‌دیسک ۷۵ میلی‌متر، طول ترک ۲۲/۵ میلی‌متر، ضخامت قطعه ۳۵ میلی‌متر و فاصله تکیه‌گاه‌های پایین از یکدیگر $2S = 37.5$ میلی‌متر در نظر گرفته شد. همچنین، به منظور در نظر گرفتن تکنیکی تنش در اطراف نوک ترک، از المان‌های سینگولار (تکین) استفاده می‌شود. با تخصیص مقادیر $E = 2760 \text{ MPa}$ (مدول الاستیسیته) و $\nu = 0.35$ (ضریب پواسون) برای مدل‌سازی خواص مکانیکی ماده آسفالتی از تحلیل الاستیک خطی (انتگرال جی) برای تعیین ضریب شدت تنش استفاده شده است. در تحلیل مدل المان محدود ایجاد شده، بار مرجع و دلخواهی ($F = 1 \text{ N}$) به صورت عمودی و فشاری به گره بالایی قطعه اعمال شده و با بهره‌گیری از رابطه (۱) و مقدار ضریب شدت تنش حاصل از نرم‌افزار، مقدار ضریب شکل برای این شرایط بارگذاری استخراج و محاسبه گردید.

این قطعه، یک نیم‌دیسک دایره‌ای با شعاع R و ضخامت B است و یک ترک عمودی با عمق a در راستای شعاع دیسک در آن ایجاد می‌شود. ضریب شدت تنش این قطعه در مود کششی شکست (K_I) با رابطه زیر محاسبه و تعیین می‌گردد:

$$K_I = \frac{F}{2RB} \times Y_I \times \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

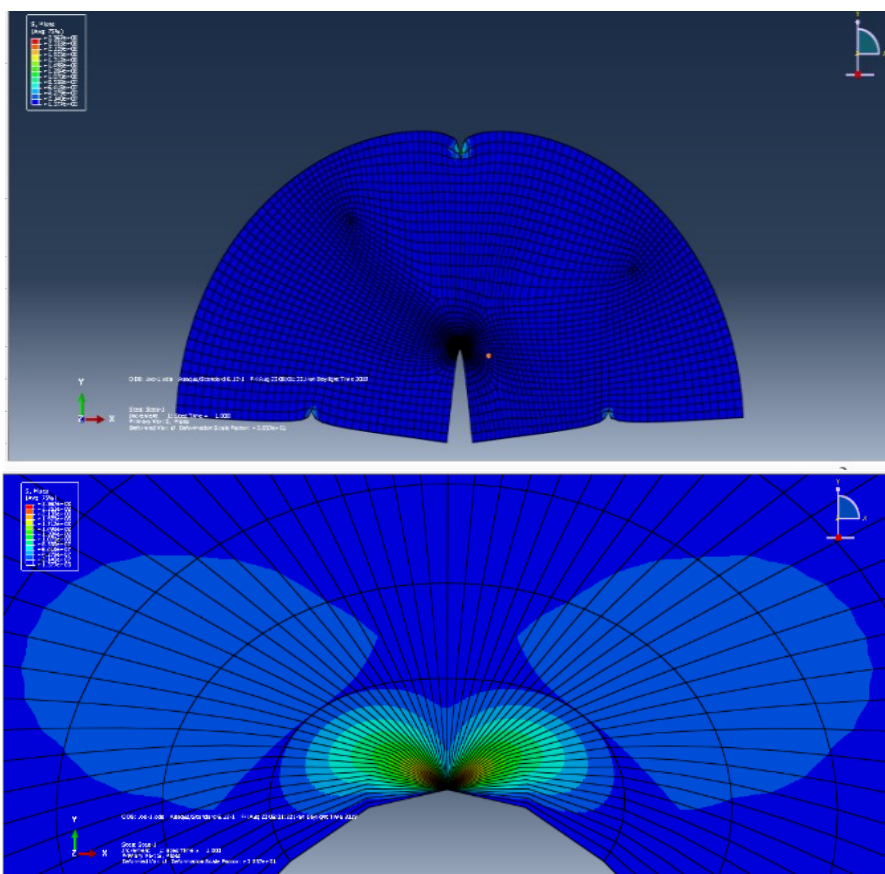
که در آن، Y_I ضریب هندسی یا ضریب شکل قطعه SCB در حالت بارگذاری مود I خالص می‌باشد. این ضریب تابع هندسه و بارگذاری نمونه SCB بوده و بر حسب پارامترهای بدون بعد a/R ، S/R تعیین می‌گردد (آیت-اللهی و علیها، ۲۰۰۷؛ لیم و همکاران، ۱۹۹۳). با توجه به عدم وجود حل تحلیلی برای محاسبه Y_I در قطعه SCB معمولاً از روش حل عددی (تحلیل المان محدود) بدین منظور استفاده می‌شود. شکل ۲، مدل المان محدود قطعه SCB تولید شده در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس را نشان می‌دهد که در ساخت آن از حدود ۱۳۰۰۰ المان



شکل ۲. مدل المان محدود قطعه تولید شده در نرم افزار آباکوس

بارگذاری مود I (خمش خالص با تکیه گاه های متقارن)
در شکل ۳ قابل مشاهده است.

نمونه ای از مدل تغییر شکل یافته قطعه SCB و تغییر
شکل نوک ترک و کانتور تنش اطراف ترک پس از اعمال

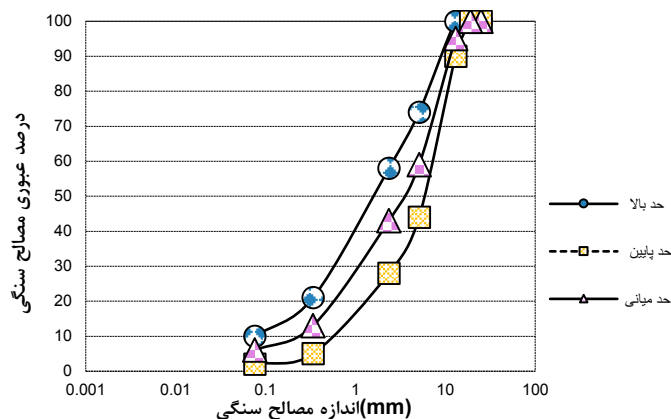


شکل ۳. نمونه ای از مدل تغییر شکل یافته و کانتور تنش اطراف نوک ترک پس از اعمال بار خمشی به قطعه SCB

۳. مواد و مصالح مخلوط آسفالتی

۳-۱. مصالح سنگی و دانه‌بندی آنها

به منظور دانه‌بندی مصالح سنگی جهت ساخت نمونه‌های آسفالتی از حد وسط دانه‌بندی‌های پیوسته شماره ۴ آیین‌نامه راه‌های آسفالتی (نشریه ۲۳۴) مورد استفاده در لایه رویه (توپکا) در ساخت نمونه‌های آسفالتی استفاده شده است. مصالح سنگی به کار رفته در این



شکل ۴. دانه‌بندی مورد استفاده در تحقیق حاضر

به کار بردن مقدار بیش از حد پرکننده‌ها باعث پرشدن کامل فضای خالی بین مصالح شده و این سبب می‌شود که قیر کافی در مخلوط وارد نشده و آسفالت حاصل مقاومت و دوام لازم را نداشته باشد. فیلر، مدول سفتی قیر خالص را افزایش می‌دهد و تغییرات این مدول که بر حسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بیان می‌شود، با نوع و جنس فیلر، نرمی و دانه‌بندی آن بستگی دارد. در انجام این تحقیق از درصد‌های متفاوت فیلر سرباره آهن (ذوب آهن اصفهان) که به صورت پودر درآمده (شکل ۵) استفاده می‌شود.

۳-۲. پرکننده (فیلر)

فیلرها بیشتر به منظور پُر کردن فضای خالی بین دانه‌های مصالح سنگی و بهبود بخشیدن به دانه‌بندی مصالح، پایدار کردن آسفالت حاصل و افزایش چسبندگی بین مصالح به کار می‌روند. از جمله مواد پرکننده، می‌توان گرد سنگ سیمان، خاکستر ذغال سنگ، نرمه ذغال سنگ مرغوب، گوگرد و آهک را نام برد. علاوه بر پر کردن فضای خالی مصالح، مواد مذکور هر یک بسته به ویژگی‌های خود، تأثیرات متفاوتی بر مخلوط خواهند داشت. عمل مخلوط کردن پرکننده‌ها با مصالح باید با درصد صحیح و به‌طور یکنواخت انجام گیرد تا آسفالت حاصل یکنواخت شود.



شکل ۵. فیلر (پودر سرباره آهن) مورد استفاده در تحقیق حاضر

به‌دست آمده از آزمایش‌های روی مصالح سنگی نشان داده شده است.

۳-۴. آزمایش‌های قیر (۶۰-۷۰)

قیر مورد استفاد برای ساخت نمونه‌های آسفالت گرم، قیر با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ می‌باشد که در بسیاری از پروژه‌های اجرای روسازی راه‌ها و جاده‌های کشور ایران به‌کار برده می‌شود. به منظور مشخص کردن خصوصیات قیر مورد استفاده در این تحقیق آزمایش‌های مربوطه انجام پذیرفت. بر این اساس، تعیین وزن مخصوص در دمای ۲۵ °C مطابق با استاندارد ASTM D70 انجام پذیرفت. میزان درجه اشتعال مطابق با استاندارد ASTM D92 و میزان درجه نفوذ در ۲۵ °C مطابق با استاندارد ASTM D5 تعیین شد. آزمایش‌های انگمی و نقطه نرمی مطابق با استانداردهای ASTM D113 و ASTM D36 انجام پذیرفت. آزمایش‌های ویسکوزیته در دماهای ۱۲۰، ۱۳۵ و ۱۶۰ درجه مطابق با استاندارد ASTM D2170 صورت گرفت. نتایج آزمایش‌های انجام شده روی قیر مورد استفاده در جدول ۲ نشان داده شده است.

۳-۳. آزمایش‌های انجام شده روی مصالح سنگی

به منظور بررسی مشخصات مصالح مورد استفاده برای ساخت نمونه‌ها در این تحقیق، آزمایش‌های مختلفی روی سنگدانه‌های استفاده شده انجام پذیرفت. بر این اساس، آزمایش سایش لُس‌آنجلس، بر اساس استاندارد ASTM C131 انجام گرفت. همچنین، برای تعیین مقدار جذب آب سنگدانه‌ها، آزمایش‌های جذب آب برای بخش درشت‌دانه مطابق استاندارد ASTM C127 و برای جذب آب بخش ریزدانه مطابق استاندارد ASTM C128 انجام پذیرفت. درصد شکستگی در یک جهت و دو جهت مطابق با استاندارد ASTM D5821 انجام گرفت. آزمایش ارزش ماسه‌ای بر اساس استاندارد ASTM D2419 و آزمایش تعیین درصد تطویل و تورق مطابق با استاندارد ASTM D4791 انجام گرفت. همچنین، آزمایش تعیین درصد افت وزنی در برابر سولفات سدیم بر اساس استاندارد ASTM C88 تعیین شد. برای تعیین دانه‌بندی نمونه‌ها نیز آزمایش دانه‌بندی مطابق با استاندارد ASTM D422 انجام پذیرفت. در جدول ۱، مقادیر مجاز آیین‌نامه و همچنین نتایج

جدول ۱. مشخصات مصالح سنگی مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها

شرح آزمایش	حدود مجاز آیین‌نامه	مصالح سنگی
درصد سایش لُس‌آنجلس (%)	حداکثر ۲۵ درصد	۱۶
جذب آب درشت‌دانه (%)	حداکثر ۲/۵ درصد	۲/۳۷۸
جذب آب ریزدانه (%)	حداکثر ۲/۵ درصد	۲/۵۰
درصد شکستگی (یک وجه) (%)	۱۰۰ درصد	۹۸
درصد شکستگی (دو وجه) (%)	۱۰۰ درصد	۹۷
ارزش ماسه ای	حداقل ۵۰	۸۱
درصد افت وزنی در برابر سولفات سدیم	حداکثر ۸ درصد درشت‌دانه حداکثر ۱۲ درصد ریزدانه	درشت‌دانه ۰/۲۲ ریزدانه ۱/۱۲
درصد تطویل و تورق	حداکثر ۱۵ درصد	تطویل ۲۰ تورق ۲۶

جدول ۲. مشخصات قیر مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها

شرح آزمایش		واحد	نتایج	قیر (۶۰-۷۰)	
				حداقل	حداکثر
وزن مخصوص در ۲۵ °C		°C	۱/۰۲۸	-	-
درجه اشتعال (روپاز-کلیولند)		°C	۲۹۸	۲۳۲	-
درجه نفوذ در ۲۵ °C		°C	۶۲	۶۰	۷۰
انگمی (کشش قیر در ۲۵ °C)		Cm	بیش از ۱۰۰	۵۰	-
نقطه نرمی (ساچمه-حلقه)		°C	۴۸/۷	۴۹	۵۶
ویسکوزیته در ۱۲۰ درجه		mm ² /s	۸۳۲	-	-
ویسکوزیته در ۱۳۵ درجه		mm ² /s	۳۹۳	-	-
ویسکوزیته در ۱۶۰ درجه		mm ² /s	۱۵۶	-	-
حلالیت در تری کلرواتیلن		-	۹۹/۹	۹۹	-
لغاب نازک قیر(۱۶۳ °C- پنج ساعت)		°C	۰/۰۸	-	۰/۸
نشانه درجه نفوذ (PI)				- ۰/۶۴	

۴. ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

پس از تعیین قیر بهینه با استفاده از نمودارهای کلیدی مارشال و طرح اختلاط مربوط به مخلوط‌های آسفالتی مختلف، ساخت نمونه‌ها با درصد‌های مختلف فضای خالی با استفاده از دستگاه متراکم‌کننده چرخشی (ژیراتوری) صورت گرفت. بدین منظور، نمونه‌های استوانه‌ای آسفالتی به قطر ۱۵ سانتی‌متر و ارتفاع تقریبی ۱۲ الی ۱۳ سانتی‌متر با وزن تقریبی ۴۷۰۰ گرم ساخته شد. درصد فضای خالی آسفالت به عنوان یکی از پارامترهای تأثیرگذار در رشد ترک همواره مورد مطالعه محققین قرار داشته است. در این پژوهش نیز اثر تغییرات درصد فضای خالی بر مقاومت شکست مخلوط‌های بتن آسفالتی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور دو

محدوده فضای خالی مختلف ۳ و ۵ درصد با دقت مثبت و منفی ۰/۵ درصد استفاده شد. برای دستیابی به این مقادیر فضای خالی، از دستگاه متراکم‌کننده ژیراتوری با چگالی‌های مشخص و مختلف استفاده شد. نمونه‌های استوانه‌ای شکل تولید شده با تیغه برش دورانی دیسکی شکل به دیسک‌هایی با ضخامت ۳۵ و ۵۰ میلی‌متر برش داده شده و سپس هر دیسک مجدداً از وسط به دو نیم-دیسک تقسیم گردید تا نمونه‌های نیم دیسک SCB به-وجود آید. نهایتاً در وسط هر نمونه یک ترک عمودی به طول ۲۲/۵ میلی‌متر با برش‌کاری ایجاد گردید. در جدول ۳، پارامترهای متغیر هندسی و شرایط محیطی برای انجام آزمایش‌های چقرمگی شکست در تحقیق حاضر نمایش داده شده است.

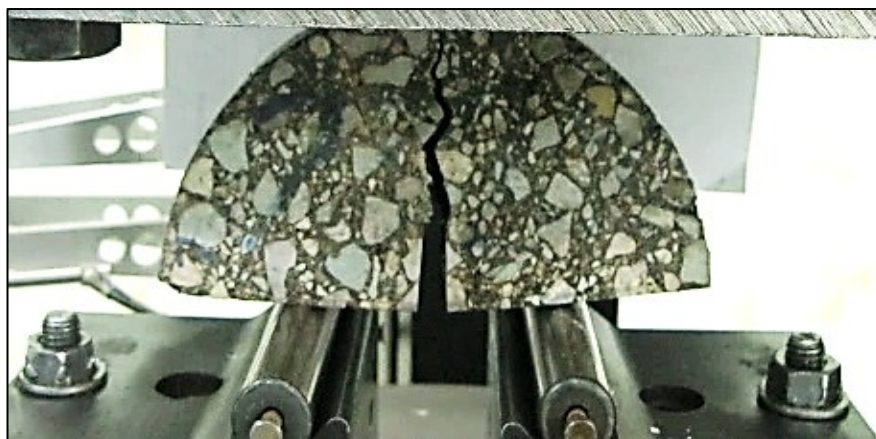
جدول ۳. پارامترهای متغیر در تحقیق حاضر برای انجام آزمایش شکست در مخلوط HMA

مود بارگذاری	I
دما	۱۲- و ۲۴- (°C)
فضای خالی	۳ و ۵ (%)
ضخامت قطعه SCB	۳۵ و ۵۰ (mm)
درصد فیبر (سرباره آهن)	صفر، ۳ و ۵ (%)

۵. آزمایش چقرمگی شکست

انجام آزمایش چقرمگی شکست روی نمونه‌های آسفالتی با استفاده از دستگاه Galdabini تحت بارگذاری یکنواخت با نرخ ثابت ۳ میلی‌متر بر دقیقه بارگذاری صورت پذیرفت. این دستگاه قابلیت ترسیم منحنی بار-جابجایی، اندازه‌گیری بار بحرانی شکست مخلوط‌های بتن آسفالتی مورد نیاز برای تعیین میزان چقرمگی شکست هر یک از مخلوط‌های بتن آسفالتی را دارا است. تحقیقات مختلف نشان داده که دمای آزمایش به عنوان یکی از مهمترین پارامترهای تأثیرگذار بر مقاومت شکست مخلوط‌های بتن آسفالتی است. علت این امر را می‌توان ناشی از وابستگی رفتار ویسکوالاستیک قیر به تغییرات دمایی دانست. در دماهای کم، رفتار قیر به سمت الاستیک میل می‌کند که این امر افزایش سختی آسفالت را به دنبال دارد. در مقابل، در دماهای زیادتر، مخلوط آسفالتی رفتاری ویسکوالاستیک دارد. قبل از شروع

آزمایش، هر یک از مخلوط‌های بتن آسفالتی مورد نظر به مدت ۸ ساعت در دو دمای ۱۲- و ۲۴- درجه سلسیوس قرار داده شدند تا تمام حجم نمونه از نظر دمایی شرایط یکسانی داشته باشد. پس از گذشت زمان لازم، نمونه‌ها به ترتیب از یخچال خارج شده و سریعاً در داخل دستگاه تست تنظیم شده و بارگذاری شدند. چون فاصله تکیه‌گاه‌ها و موقعیت فک بالایی دستگاه از قبل تنظیم می‌شد، فاصله زمانی خروج نمونه‌ها از فریزر و شروع بارگذاری آنها بسیار کوتاه بود، و تغییر دمای احتمالی آنها در طول آزمایش شکست ناچیز بوده است. برای بررسی و تحلیل نتایج، سه تکرار در مود بارگذاری انجام گرفته است. با توجه به مود بارگذاری (I) فواصل تکیه‌گاهی در شرایط مناسب مود تنظیم و نمونه در محل مورد نظر تحت بارگذاری قرار داده شد. شکل ۶، موقعیت تکیه‌گاه نسبت به ترک در مود بارگذاری I و نحوه قرارگیری نمونه روی فیکسچر را نشان می‌دهد.

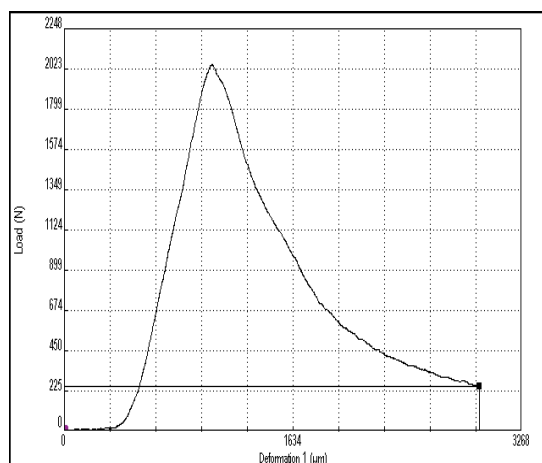


شکل ۶. انجام آزمایش شکست در بارگذاری مود I و رشد ترک در نمونه تا لحظه گسیخته شدن

در شکل ۷، منحنی نیرو-جابجایی برای یکی از قطعات SCB تست شده نمایش داده شده است. طبق این نمودار، با افزایش میزان جابجایی، نیروی مورد نیاز افزایش یافته

و پس از آن به سرعت کاهش می‌یابد. بار حد اکثر به عنوان بار بحرانی شکست جهت محاسبه چقرمگی شکست قرائت و یادداشت می‌شود.

بررسی چقرمگی شکست مود کشش خالص (K_{Ic}) دمای کم مخلوط‌های بتن آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف فیبر سرباره کوره آهن



شکل ۷. نمونه منحنی بار-جابجایی برای یکی از نمونه‌های تست شده

۶. نتایج و بحث

جدول ۴، چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی تحت مود بارگذاری کشش خالص را نشان می‌دهد.

جدول ۴. نتایج چقرمگی شکست (K_{Ic}) مخلوط‌های آسفالتی

ردیف	$x/y/z/f$	$K_{Ic} (ave)$ $MPa\sqrt{m}$
۱	۳/۳۵/-۱۲/۰	۰/۷۹۶
۲	۳/۳۵/-۲۴/۰	۰/۹۱۶
۳	۳/۳۵/-۱۲/۳	۰/۹۸۵
۴	۳/۳۵/-۲۴/۳	۱/۱۵۹
۵	۳/۳۵/-۱۲/۵	۱/۲۴۴
۶	۳/۳۵/-۲۴/۵	۱/۳۹۳
۷	۳/۵۰/-۱۲/۰	۰/۷۳۱
۸	۳/۵۰/-۲۴/۰	۰/۸۸۳
۹	۳/۵۰/-۱۲/۳	۰/۹۲۱
۱۰	۳/۵۰/-۲۴/۳	۱/۰۶۴
۱۱	۳/۵۰/-۱۲/۵	۱/۱۹۳
۱۲	۳/۵۰/-۲۴/۵	۱/۳۳۲
۱۳	۵/۳۵/-۱۲/۰	۰/۷۲۳
۱۴	۵/۳۵/-۲۴/۰	۰/۸۲۵
۱۵	۵/۳۵/-۱۲/۳	۰/۹۱۴
۱۶	۵/۳۵/-۲۴/۳	۰/۹۸۶
۱۷	۵/۳۵/-۱۲/۵	۱/۱۱۲
۱۸	۵/۳۵/-۲۴/۵	۱/۱۹۹
۱۹	۵/۵۰/-۱۲/۰	۰/۷۱۵
۲۰	۵/۵۰/-۲۴/۰	۰/۷۸۳
۲۱	۵/۵۰/-۱۲/۳	۰/۸۶۹
۲۲	۵/۵۰/-۲۴/۳	۰/۹۶۳
۲۳	۵/۵۰/-۱۲/۵	۱/۰۸۲
۲۴	۵/۵۰/-۲۴/۵	۱/۱۶۵

شکست در ضخامت‌های برش‌های بزرگتر افزایش یافته است.

جدول ۵، مقادیر Y_I را برای حالت‌های مختلف استفاده شده در این تحقیق بر اساس تحلیل المان محدود نمونه مورد آزمایش نشان می‌دهد. از آنجا که پارامتر Y_I به عنوان ضریب هندسه بی‌بعد است، بنابراین میزان چقرمگی شکست تحت ضخامت‌های برش مختلف در مود بارگذاری I از معادله زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$K_{Ic} = \frac{F_c}{2RB} \times 2.6 \times \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

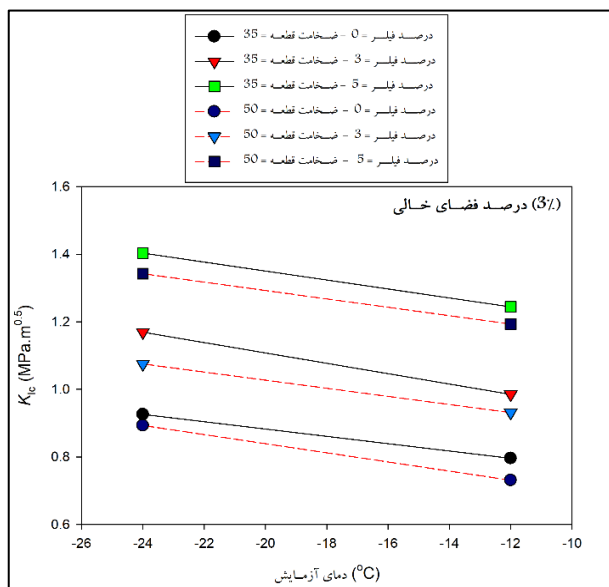
جدول ۵. مقادیر ضریب شکل هندسی در حالت مود I

B (mm)	a (mm)	R (mm)	a/R	S/R	Y_I
۳۵	۲۲/۵	۷۵	۰/۳	۰/۵	۲/۶
۵۰	۲۲/۵	۷۵	۰/۳	۰/۵	۲/۶

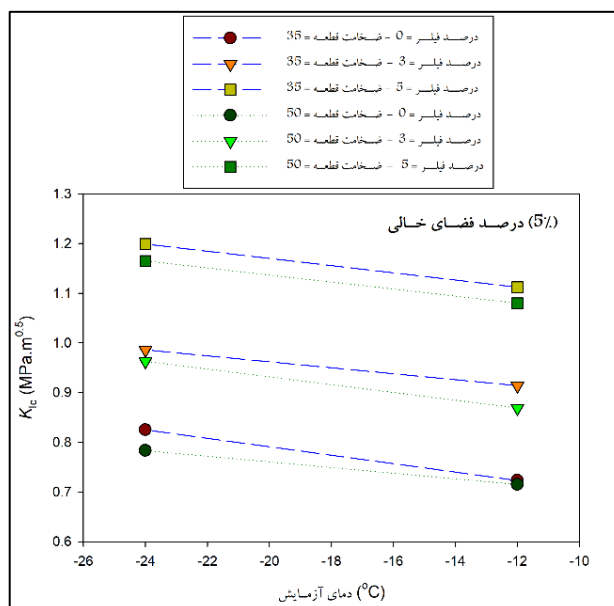
نمونه شاهد افزایش یافته است. در حالی که با کاهش دمای آزمایش از ۱۲- به ۲۴- درجه سلسیوس مقدار افزایش K_{Ic} تنها در حدود ۱۵ درصد است. همچنان که انتظار می‌رود، مقدار چقرمگی شکست با افزایش درصد فضای خالی کاهش می‌یابد که دلیل عمده آن وجود تعداد بیشتری حباب هوا به عنوان عامل تمرکز تنش در داخل ساختار مخلوط آسفالتی می‌باشد. چنین نتیجه‌ای در سایر مقالات و پژوهش‌ها نیز گزارش شده است. بر اساس داده‌های حاصل از آزمایش‌ها، ضخامت قطعه در مقدار چقرمگی شکست نمونه‌های تست شده در شرایط مختلف دمایی و درصد فیلر، تأثیر قابل توجهی ندارد و تنها در حدود ۴ درصد اختلاف در نتایج حاصله از دو ضخامت ۳۵ و ۵۰ میلی‌متری SCB مشاهده گردید. با توجه به تأثیر مثبت و قابل توجه فیلر سرباره کوره آهن در بهبود مقاومت ترک خوردگی مخلوط آسفالتی و با لحاظ کردن جنبه‌های زیست‌محیطی، استفاده از این فیلر در پروژه‌های اجرایی روسازی‌های آسفالتی توصیه می‌گردد.

در این جدول، نمونه‌ها با نمادهای $x/y/z/f$ نام-گذاری شدند که نماد x نشان‌دهنده درصد فضای خالی (۳٪ و ۵٪)، نماد y شامل ضخامت‌های برش نمونه‌ها (۳۵ و ۵۰ میلی‌متر)، نماد z دمای آزمایش (۱۲- و ۲۴- درجه سلسیوس و f درصد‌های مختلف فیلر (صفر، ۳٪ و ۵٪) را نشان می‌دهند. با توجه به بررسی نمودارهای متوسط نیرو در شکست مود I خالص در تمامی درصد‌های فضای خالی و دماهای مورد آزمایش، میزان نیروی

داده‌های حاصل از آزمایش‌های شکست برای شرایط مختلف در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. بر اساس این نتایج، شرایط محیطی و هندسی و میزان درصد فضای خالی و درصد مختلف فیلر تأثیر قابل توجهی بر میزان چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی دارد. با توجه به نوع مخلوط و شرایط محیطی و دمایی تست شده، مقدار K_{Ic} در محدوده ۰/۷ تا ۱/۴ MPa.m0.5 متغیر می‌باشد که در محدوده گزارش شده برای مخلوط‌های آسفالتی گرم توسط سایر محققین نیز می‌باشد. این نتایج می‌تواند دلیلی بر درستی و اعتبار فرایند طی شده در این تحقیق برای محاسبه چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی در دمای کم با استفاده از قطعه SCB باشد. به طور کلی، مقدار چقرمگی شکست یا مقاومت در برابر رشد ترک مخلوط‌های آسفالتی تست شده با افزایش درصد فیلر و نیز با کاهش دمای آزمایش افزایش می‌یابد. البته تأثیر افزایش درصد فیلر در افزایش چقرمگی شکست بسیار ملموس‌تر از نقش تغییر دما (کاهش دما) می‌باشد. به عنوان مثال، در نمونه‌های حاوی ۵٪ فیلر مقدار چقرمگی شکست تا حدود ۴۵ درصد نسبت به



شکل ۸. تغییرات چقرمگی شکست نمونه‌های آسفالتی با ۳٪ فضای خالی و درصد‌های مختلف فیلر و ضخامت دیسک



شکل ۹. تغییرات چقرمگی شکست نمونه‌های آسفالتی با ۵٪ فضای خالی و درصد‌های مختلف فیلر و ضخامت دیسک

۷. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، پارامترهای درصد فیلر و درصد فضای خالی به عنوان متغیر تعیین‌کننده مشخصات مخلوط آسفالتی و میزان ضخامت برش نمونه‌های آسفالتی، شرایط بارگذاری، و دما به عنوان متغیرهای تأثیرگذار در انجام آزمایش شکست مورد بررسی قرار گرفت. نمونه SCB به عنوان قطعه مناسب جهت انجام آزمایش‌های شکست تحت بارگذاری کشش خالص مورد استفاده قرار

گرفت. اهم نتایج حاصله به شرح زیر است:

با توجه به درصد فیلر، درصد فضای خالی و دمای آزمایش، مقدار چقرمگی شکست (K_{IC}) مخلوط‌های آسفالتی در محدوده $0.7 \text{ MPa}\sqrt{m}$ و $1.4 \text{ MPa}\sqrt{m}$ به‌دست آمد. چقرمگی شکست نمونه‌های آسفالتی با افزایش مقدار فیلر تا ۵ درصد، افزایش قابل ملاحظه‌ای به نسبت مخلوط آسفالتی شاهد (بدون فیلر) نشان داد.

به طور کلی، از تحلیل‌ها مشاهده شد که میزان چقرمگی شکست در مود I بارگذاری در نمونه‌های با مقدار فضای خالی ثابت با کاهش دما، به صورت افزایشی بوده است. در میان پارامترهای مورد بررسی، افزودنی فیلر (پودر سرباره آهن) بیشترین تأثیر و ضخامت قطعه SCB کمترین تأثیر در تغییر چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی نشان داد.

افزایش مقدار فضای خالی در نمونه‌ها می‌تواند باعث کاهش مقدار چقرمگی شکست در نمونه‌ها شود. به طور کلی، با کاهش میزان درصد فضای خالی، مقدار چقرمگی به میزان ۱/۱ برابر افزایش می‌یابد.

۸. مراجع

- Aliha, M. R. M., Behbahani, H., Fazaali, H. and Rezaifar, M. H. 2015. "Experimental study on model fracture toughness of different asphalt mixtures". *Sci. Iran.*, 22(1): 120-130.
- Ayatollahi, M. R. and Aliha, M. R. M. 2007. "Wide range data for crack tip parameters in two disc-type specimens under mixed mode loading". *Comput. Mater. Sci.*, 38(4): 660-670.
- Baradaran, S., Aliha, M. R. M., Maleki, A. and Underwood, B. S. 2024. "Fracture properties of asphalt mixtures containing high content of reclaimed asphalt pavement (RAP) and eco-friendly PET additive at low temperature". *Constr. Build. Mater.*, 449: 138426.
- Behbahani, H., Mohammad Aliha, M. R., Fazaali, H. and Aghajani, S. 2013. "Experimental fracture toughness study for some modified asphalt mixtures". *Adv. Mater. Res.*, 723: 337-344.
- Fakhri, M. and Mottahed, A. R. 2021. "Improving moisture and fracture resistance of warm mix asphalt containing RAP and nanoclay additive". *Constr. Build. Mater.*, 272: 121900.
- Ghoroghi, S. S., Haghighatpour, P. J., Aliha, M. R. M. and Berto, F. 2023. "Comparative cracking resistance-cost study for the hot mix asphalt (HMA) mixtures made of natural and recycled asphaltic materials". *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 46(11): 4199-4217.
- Haghighatpour, P. J. and Aliha, M. R. M. 2022a. "Effect of Marshal and gyratory compaction methods on cracking characteristics of hot mix asphalt concrete materials under all three basic modes of fracture". *Theor. Appl. Fract. Mech.*, 117: 103207.
- Haghighatpour, P. J. and Aliha, M. R. M. 2022b. "Assessment of freezing and thawing cycle (FTC) effects on mixed mode I/III fracture toughness and work of fracture of HMA asphalt mixtures". *Theor. Appl. Fract. Mech.*, 118: 103261.
- Haghighatpour, P. J. and Aliha, M. R. M. 2023. "The influence of recycled asphalt pavement materials on low and intermediate fracture behavior of asphalt concrete (AC) after exposing to different thawing and freezing periods". *Eng. Fract. Mech.*, 293: 109715.
- Hosseini, S. G., Kordani, A. A. and Zarei, M. 2023. "Effect of recycled additives on pure mode I fracture resistance and moisture susceptibility of hot mix asphalt (HMA): An experimental study using semicircular bending (SCB) and indirect tensile strength (ITS) tests". *Theor. Appl. Fract. Mech.*, 128: 104168.
- Lim, I. L., Johnston, I. W. and Choi, S. K. 1993. "Stress intensity factors for semi-circular specimens under three-point bending". *Eng. Fract. Mech.*, 44(3): 363-382.
- Mansourian, A., Razmi, A., Razavi, M. and Mohammad Aliha, M. R. 2019. "Evaluation of fracture toughness of warm-mix asphalt containing natural and synthesis fibers at low temperatures". *Sci. Iran.*, 35.2: 29-38. [In Persian]
- 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.
- Shahyari, N., Keymanesh, M. R. and Aliha, M. R. M. 2021. "Specimen type effect on measured low-temperature fracture toughness of asphalt concrete". *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 44(2): 551-567.
- Shaker, H., Ameri, M., Aliha, M. R. M. and Rooholamini, H. 2023. "Evaluating low-temperature fracture toughness of steel slag aggregate-included asphalt mixture using response surface method". *Constr. Build. Mater.*, 370: 130647.
- Yalcin, E., Yilmaz, M., Demir, F., Guzel, B., Ozdemir, A. M., Şengur, A. and Çambay, E. 2024. "Evaluation of asphalt anti-cracking performance of SBS polymer with SCB method and deep learning". *Heliyon*, 10(20): e39613