

تأثیر الیاف کربن بر مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از اصول مکانیک شکست الاستیک خطی

بابک گلچین*، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
روح‌اله صفایی، دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر

Email: b-golchin@iau-ahar.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۰۶ - پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۰۲

چکیده

برای بررسی رفتار مخلوط‌های آسفالتی در دماهای کم، روش‌های مختلفی وجود دارد. یکی از این روش‌ها، استفاده از اصول مکانیک شکست الاستیک خطی است. در این پژوهش، با استفاده از اصول مکانیک شکست الاستیک خطی به بررسی اثر مودهای مختلف بارگذاری و دما بر مقاومت شکست مخلوط آسفالت گرم حاوی الیاف کربن در دماهای زیر صفر درجه پرداخته شده است. از نمونه نیم‌دایره‌ای با ترک لبه‌ای، تحت بارگذاری خمشی سه نقطه‌ای برای ایجاد مودهای مختلف بارگذاری شامل مود خالص I (کشش خالص)، مود خالص II (برش خالص) و مود ترکیبی I/II (کشش-برش) در آزمایش مقاومت شکست استفاده شده است. ضرایب شدت تنش بحرانی با استفاده از بار بحرانی به دست آمده از آزمایش شکست، محاسبه و ضرایب شکل از تجزیه و تحلیل المان محدود تعیین شد. نتایج نشان می‌دهد که مخلوط آسفالت گرم حاوی الیاف کربن در دماهای کم از مقاومت شکست قابل ملاحظه‌ای نسبت به مخلوط آسفالتی بدون الیاف در تمام مودهای بارگذاری برخوردار است. همچنین، در مود کشش خالص ۳۰ الی ۴۳ درصد، در مود ترکیبی ($M^e=0.5$)، ۱۳/۲ تا ۴۱ درصد، در مود ترکیبی ($M^e=0.2$)، ۱۰/۵ تا ۴۰ درصد و در مود برش خالص ۲ الی ۱۲/۵ درصد بهبود در مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی مشاهده گردید.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالت گرم، مقاومت شکست، الیاف کربن

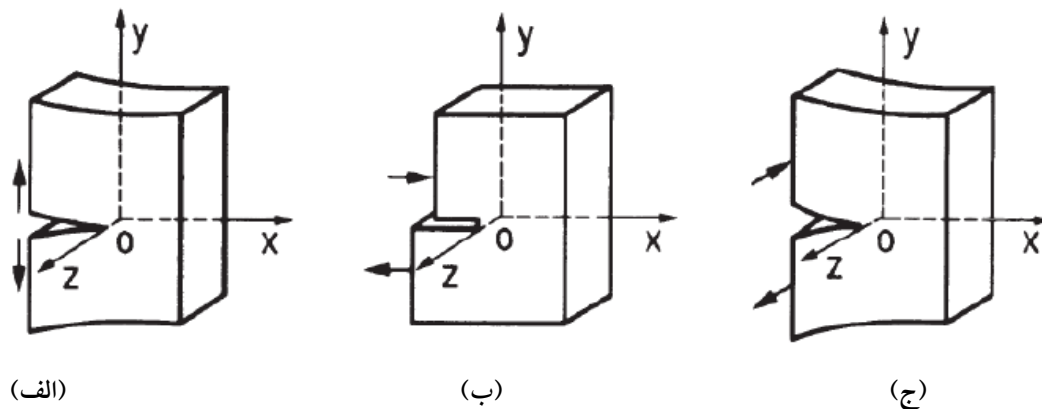
۱. مقدمه

روسازی‌های آسفالتی آسیب دیده متحمل می‌شوند. بررسی فرایند آغاز و گسترش ترک در روسازی نشان می‌دهد که ترک‌ها عمدتاً با شکل‌گیری میکروتُرک‌ها در محدوده مورد نظر شروع و تحت اثر تنش‌های کششی، برشی و یا ترکیبی از این دو، گسترش و ماکروتُرک‌ها را

ترک خوردگی روسازی همواره به عنوان یکی از مهمترین مودهای خرابی روسازی‌های آسفالتی، بخصوص در مناطق سردسیر، مطرح بوده است. به طوری که ادارات راه این مناطق، سالانه هزینه گزافی را جهت تعمیر و بازسازی

هم فقط باز شوند)، ب) مود II بارگذاری یا مود برشی (لغزش وجوه ترک در راستای موازی با صفحه ترک و عمود بر جبهه ترک است) و ج) مود III بارگذاری یا مود پارگی (لغزش وجوه ترک در راستای موازی با صفحه ترک و موازی با جبهه ترک است) بروز می‌کنند (شکل ۱) (اندرسون، ۲۰۰۵).

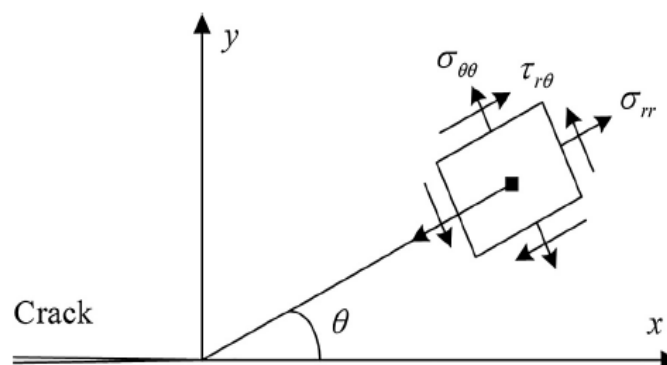
شکل می‌دهد. با توجه به رفتار الاستیک مخلوط‌های آسفالتی در دماهای کم، استفاده از مبانی مکانیک شکست به منظور بررسی رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی روش مناسبی است (عامری و همکاران، ۲۰۱۱). به طور کلی در اجسام، بسته به نوع بارگذاری به صورت: الف) مود I بارگذاری یا مود کششی (جسم ترک‌دار به گونه‌ای تحت بارگذاری قرار می‌گیرد که سطوح ترک نسبت به



شکل ۱. مودهای ترک خوردگی در قطعه ترک‌دار: الف) مود باز شونده (I، ب) مود برش (II و ج) مود پارگی (III)

شکست و معیار شروع و گسترش ترک در مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. ارتباط بین ضریب شدت تنش و تنش‌های وارده به یک المان در نزدیکی نوک ترک، مطابق شکل ۲ و در روابط (۱) تا (۳) نشان داده شده است (ویلیمز، ۱۹۵۷).

اگر بارگذاری به صورت ترکیبی از هر کدام از این مودها باشد حالت بارگذاری مود ترکیبی به وجود می‌آید. به عنوان مثال، در مود ترکیبی I و II بارگذاری، وجوه ترک نسبت به هم می‌لغزند و همزمان دهانه ترک باز نیز می‌شود (اندرسون، ۲۰۰۵). در مکانیک شکست، ضریب شدت تنش به عنوان پارامتر اساسی در تشریح رفتار



شکل ۲. تنش‌های الاستیک در اطراف نوک ترک

$$\sigma_{rr} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left[\frac{5}{4} \cos \frac{\theta}{2} - \frac{1}{4} \cos \frac{3\theta}{2} \right] + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \left[-\frac{5}{4} \sin \frac{\theta}{2} + \frac{3}{4} \sin \frac{3\theta}{2} \right] + H.O.T \quad (1)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left[\frac{3}{4} \cos \frac{\theta}{2} + \frac{1}{4} \cos \frac{3\theta}{2} \right] - \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \left[\frac{3}{4} \sin \frac{\theta}{2} + \frac{3}{4} \sin \frac{3\theta}{2} \right] + H.O.T \quad (2)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left[\frac{1}{4} \sin \frac{\theta}{2} + \frac{1}{4} \sin \frac{3\theta}{2} \right] + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \left[\frac{1}{4} \cos \frac{\theta}{2} + \frac{3}{4} \cos \frac{3\theta}{2} \right] + H.O.T \quad (3)$$

برشی پیچیده در سطح تماس بین چرخ و جاده است مهم تلقی می‌شود. اما بر اساس یافته‌های لیتون (۱۹۸۹)، غالب گسیختگی و توسعه ترک به لایه‌های فوقانی ناشی از مود I و یا مود بازشوندگی است. آیت‌اللهی و پیر محمد (۲۰۱۳) در تحقیقی، به بررسی رفتار شکست مخلوط آسفالتی تحت اثر تغییرات دما و در شرایط مودهای بارگذاری خالص کشش و برش پرداخته‌اند. در این تحقیق، از نمونه ترک‌دار با مقطع نیم‌دایره‌ای خمشی با بارگذاری سه‌نقطه‌ای استفاده شد. به منظور ایجاد شرایط مود برش خالص به‌طور همزمان از جابجایی تکیه‌گاه و ترک استفاده گردید. در تحقیق آنها، ضریب شدت تنش مخلوط آسفالتی تا حد قابل توجهی تابعی از دما بود. به‌طوری که با کاهش دما، میزان ضریب شدت تنش تا حد مشخصی افزایش و سپس کاهش می‌یابد. در تحقیقی دیگر، پیر محمد و آیت‌اللهی (۲۰۱۵) به بررسی انواع مختلف قیر، دانه‌بندی و فضای خالی با استفاده از آزمایش نمونه ترک‌دار با مقطع نیم‌دایره‌ای خمشی در مودهای خالص I و II و ترکیبی در دمای منفی ۱۰ درجه سلسیوس پرداخته‌اند. نتایج آنها بیانگر این است که قیر نرم‌تر دارای مقاومت شکست بیشتری نسبت به سایر قیرها، دانه‌بندی درشت‌تر مقاومت شکست بیشتر و دانه بندی ریزتر مقاومت کمتر، بخصوص در مود برش، از خود نشان داد. همچنین، افزایش فضای خالی سبب کاهش مقاومت شکست بتن آسفالتی گردید. فضائی و همکاران (۲۰۱۶)، در تحقیقی به بررسی عملکرد آسفالت نیمه‌گرم حاوی الیاف فورتا در دماهای کم پرداخته‌اند. در این تحقیق، برای بررسی رفتار مخلوط‌های آسفالتی نیمه-گرم ترک خورده از اصول مکانیک شکست الاستیک

که Γ و θ مؤلفه‌های مختصات قطبی، $\tau_{r\theta}$ ، σ_{rr} ، $\sigma_{\theta\theta}$ مؤلفه‌های تنش در سیستم مختصات قطبی و K_I و K_{II} ضرایب شدت تنش نوک ترک متناظر با مودهای کشش و برش است. در واقع، بر اساس روابط فوق، تنش‌های الاستیک اطراف نوک ترک از یک بسط سری بی‌نهایت جمله به دست می‌آید که در آن جمله اول به صورت تکیه بوده و بیانگر ضرایب شدت تنش مودهای I و II شکست است (در این پژوهش، از قسمت H.O.T چشم-پوشی شده است). بنابراین، می‌توان شرایط شکست هر نمونه ترک‌دار را با دانستن ضرایب شدت تنش و معیارهای تحلیلی موجود به خوبی تخمین زد.

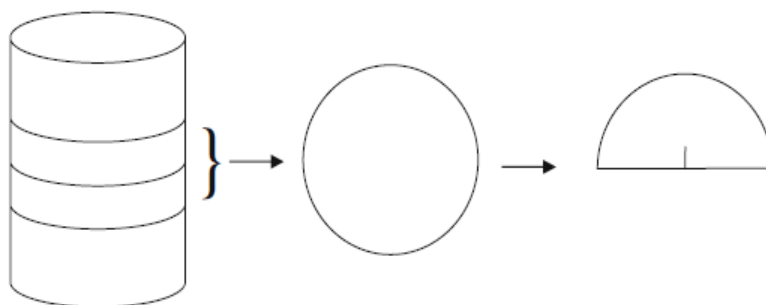
در بررسی ترک خوردگی در دمای کم می‌توان با استناد به رفتار الاستیک مخلوط آسفالتی، معادلات و روابط مربوط به حالت خطی را به‌کار بست. بدین ترتیب، ضریب شدت تنش می‌تواند به عنوان یک پارامتر اساسی در این رابطه مورد استفاده قرار گیرد. در پژوهشی، عامری و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از روش المان محدود و آنالیز سه‌بعدی یک ترک عرضی از بالا به پایین، در شرایط الاستیک خطی، تأثیرپذیری ترک از هر یک از مودهای سه‌گانه را تحت ترافیک عبوری نشان دادند. بر این اساس، مود قالب در رشد ترک می‌تواند تابعی از وزن وسیله نقلیه و موقعیت قرارگیری آن نسبت به ترک باشد. در تحقیقی دیگر، عامری و همکاران (۲۰۱۲) نشان دادند که گسترش ترک ناشی از مود برشی به محل قرارگیری چرخ اتومبیل نسبت به ترک بستگی دارد. دو بوند (۱۹۹۹) نشان داد که قرارگیری چرخ دقیقاً در نزدیک ترک در رشد ترک مؤثر است. برای ترک‌های سطحی، ترک خوردگی مود II که منجر به توزیع تنش

ویژگی‌های مورد نظر در داخل ماده‌ای دیگر است که فاقد آن ویژگی‌ها هستند. یکی از روش‌های مسلح‌سازی، استفاده از الیاف در داخل بتن آسفالتی است که به دو صورت توزیع تصادفی در آن و یا استفاده از مواد الیافی جهت‌دار مانند خانواده ژئوستنتیک‌ها انجام می‌شود. ابطیحی و همکاران (۲۰۱۰) مرور جامعی بر نتایج مطالعات انجام گرفته روی بتن آسفالتی مسلح شده با الیاف انجام داده‌اند. سرفاس و سامانوس (۱۹۹۶) نتیجه‌گیری کردند که افزودن الیاف نایلون باعث افزایش و بهبود خصوصیات مثل مقاومت به ترک خوردگی، پیرشدگی و آسیب رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی می‌شود. لی و همکاران (۲۰۰۵) نتیجه‌گیری کردند که افزودن الیاف نایلون به بتن آسفالتی می‌تواند مقاومت به ترک خوردگی را از طریق افزایش انرژی شکست و طاقت افزایش دهد. جهرمی و خدایی (۲۰۰۸) خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی حاوی الیاف کربن را با استفاده از آزمایش‌های کشش غیرمستقیم استاتیک و دینامیک، خزش و استقامت مارشال ارزیابی کردند. نتیجه‌گیری آنها این بود که الیاف کربن باعث کاهش روانی و افزایش فضای خالی مخلوط شده، و مقاومت به تغییرشکل، استقامت مارشال و عمر خستگی را افزایش می‌دهند. از این رو، در این تحقیق، به بررسی اثر مودهای کشش، برش خالص، ترکیب مودها و دما بر مقاومت شکست مخلوط آسفالت گرم حاوی الیاف کربن (۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ درصد وزنی مخلوط آسفالت گرم) در دماهای زیر صفر درجه پرداخته شده است. تعداد زیادی از نمونه‌های خمشی ترک‌دار نیم‌دایره‌ای ساخته شده با آسفالت گرم (حاوی الیاف و بدون الیاف) مورد آزمایش شکست در دماهای کم انجام گرفته است. ضریب شدت تنش I_K و II_K از آنالیز محدود و ضریب شدت تنش بحرانی III_K و III_K با استفاده از بار بحرانی به دست آمده از آزمایش شکست محاسبه می‌شود.

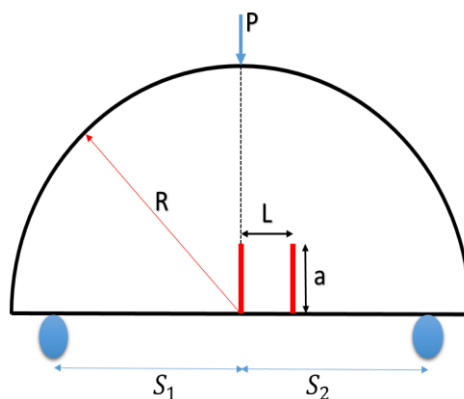
خطی استفاده شده است. همچنین، برای بررسی مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی فقط کشش خالص (مود I) بررسی شده است. نتایج آنها بیانگر اینست که یکی از بهترین روش‌ها برای بررسی مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی ترک‌دار در مناطق سردسیر انجام آزمایش شکست است. همچنین، مخلوط‌های آسفالتی حاوی الیاف فورتا در برابر رشد ترک مقاومت بیشتری نسبت به مخلوط‌های بدون الیاف داشتند. در تحقیقی توسط رزمی و میرسیار (۲۰۱۸) به بررسی تأثیر خرده لاستیک بر مقاومت شکست آسفالت نیمه‌گرم در دماهای کم با استفاده از اصول مکانیک شکست الاستیک خطی پرداخته شده است. در این تحقیق، برای ایجاد مودهای بارگذاری از نمونه‌های نیم‌دایره‌ای ترک‌دار استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که مقاومت شکست آسفالت نیمه‌گرم حاوی ۲۰٪ خرده لاستیک بیشتر از مقاومت شکست آسفالت نیمه‌گرم بدون این افزودنی است. همچنین، مود ترکیبی I/II نسبت به مودهای I و II در مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم تعیین کننده است. در تحقیقی دیگر، فخری و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی تأثیر نرخ بارگذاری بر مقاومت شکست آسفالت گرم در دماهای متوسط و کم در مودهای مختلف بارگذاری پرداخته‌اند. در تحقیق صورت گرفته برای ایجاد مودهای مختلف بارگذاری از نمونه‌های نیم‌دایره‌ای ترک‌دار استفاده کرده‌اند. نتایج آنها حاکی از اینست که انرژی شکست مخلوط‌های آسفالتی گرم تأثیرپذیر از نرخ بارگذاری در دماهای کم و متوسط هستند. همچنین، نتایج نشان داد که نمونه‌های نیم‌دایره‌ای ترک‌دار نمونه‌های بسیار مناسبی برای تولید انواع مودهای بارگذاری شکست هستند. یکی از روش‌های بهبود عملکرد بتن آسفالتی، مسلح کردن آنها با استفاده از انواع مختلف مواد است که در چند دهه اخیر توسط محققین و مهندسين به کار گرفته شده است. مسلح سازی شامل قرار دادن موادی خاص با

نمونه را می‌توان به راحتی با استفاده از دستگاه تراکم ژیراتوری و با مغزه‌گیری از سطح جاده فراهم کرد. همچنین، ایجاد ترک لبه‌ای در این قطعه و بارگذاری آن نیز به آسانی انجام می‌شود. علاوه بر سادگی هندسه قطعه و بارگذاری آن، این قطعه توانایی ایجاد حالت‌های مود ترکیبی کشش-برشی (مود II/I) را نیز دارد (عامری و همکاران، ۲۰۱۲b).

برای ایجاد نمونه‌های خمش نیم‌دایره‌ای، با استفاده از دستگاه ژیراتوری متراکم می‌شوند و سپس با برش نمونه‌های استوانه‌ای مطابق شکل ۳، نمونه ترک‌دار با مقطع نیم‌دایره‌ای خمشی (قطعه SCB) تهیه خواهد شد. مطابق آنچه در شکل ۴ نشان داده شده است، با تغییر فاصله تکیه‌گاه‌های پایینی نسبت به ترک لبه‌ای واقع در وسط قاعده (فواصل S_1 و S_2)، یا تغییر محل ترک از وسط قطعه (تغییر L) می‌توان به حالت‌های مختلفی از کشش خالص تا برش خالص دست یافت.



شکل ۳. نمایی از نحوه برش نمونه‌های ترک‌دار با مقطع نیم‌دایره‌ای خمشی



شکل ۴. نمونه انتخاب شده برای آزمایش مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی

۲. انتخاب قطعه آزمایشگاهی مناسب برای انجام آزمایش‌های مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی

به منظور بررسی رفتار شکست و گسترش ترک مخلوط آسفالتی، روش‌ها و قطعات آزمایشگاهی متعددی به وسیله‌ی پژوهشگران مختلف پیشنهاد شده است که از آن جمله می‌توان به آزمایش تیر با ترک لبه‌ای و تحت بار خمش سه یا چهار نقطه‌ای (BNES) (براهام و همکاران، ۲۰۱۰)، آزمایش نمونه خمش نیم‌دایره (قطعه SCB) (لی و همکاران، ۲۰۱۰a)، آزمایش نمونه متراکم دیسک شکل کششی (قطعه TCD) (لی و همکاران، ۲۰۱۰) و همچنین آزمایش کشش غیرمستقیم (قطعه TDI) (لی و همکاران، ۲۰۱۰b) اشاره کرد.

از میان قطعات یاد شده، قطعه نیم‌دایره شکل تحت بار خمش نیم‌دایره (SCB) نمونه مناسب‌تری برای انجام آزمایش‌های مقاومت شکست آسفالت است. چرا که این

در حالت‌های مختلف بارگذاری مود ترکیبی، پارامتر M^e به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود (آیت‌اللهی و علیها، ۲۰۰۷):

$$M^e = \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{K_I}{K_{II}} \right) \quad (4)$$

برای اینکه بتوان نتایج حاصل از یک مدل‌سازی را در موارد مشابهی از هندسه و بارگذاری استفاده کرد، باید آنها را به طریقی بی‌بعد نمود که مستقل از هندسه و بارگذاری باشند. برای بی‌بعد کردن نتایج به دست آمده برای قطعه نیم‌دایره‌ای تحت بارگذاری خمشی می‌توان از فرمول‌های زیر استفاده کرد:

ضرایب شکل با استفاده از روابط (۵) و (۶) قابل محاسبه است (آیت‌اللهی و علیها، ۲۰۰۷):

$$Y_I = \frac{K_I}{\sqrt{\pi a}} \frac{2Rt}{P} \quad (5)$$

$$Y_{II} = \frac{K_{II}}{\sqrt{\pi a}} \frac{2Rt}{P} \quad (6)$$

البته قابل ذکر است که مقادیر منفی در ضریب شدت تنش مود II در جدول ۱، به مفهوم اینست که بر خلاف مود I که علامت منفی نشانگر بسته شدن ترک است، در مود II علامت منفی تأثیر مثبت در بازشدگی ترک دارد.

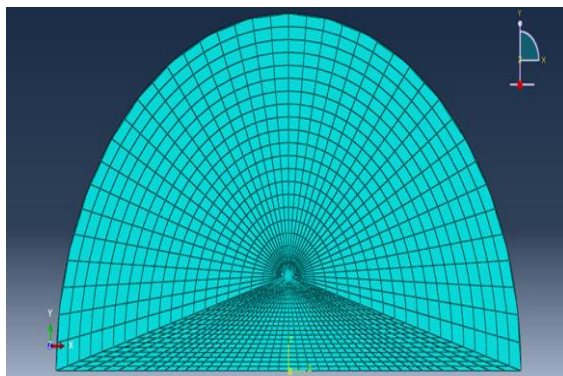
جدول ۱. نتایج تحلیل عددی برای ایجاد انواع مودهای بارگذاری با استفاده از نمونه خمشی نیم‌دایره‌ای (پیرمحمد و آیت‌اللهی، ۲۰۱۵).

مود بارگذاری	M^e	S_1, S_2, L (mm)	K_I ($MPa\sqrt{m}$)	K_{II} ($MPa\sqrt{m}$)	Y_I	Y_{II}
مود I	۱	۰ و (۵۰،۵۰)	۰/۱۹۵	۰	۳/۷۳۴	۰
مود ترکیبی I/II	۰/۵	۵ و (۵۰،۲۰)	۰/۰۶۲۲	- ۰/۰۵۹۰	۱/۱۹۱	۱/۱۳۰
مود ترکیبی I/II	۰/۲	۱۱ و (۵۰،۲۰)	۰/۰۳۰۴	۰/۰۹۴۲	۰/۵۸۲	۱/۸۰۴
مود II	۰	۱۶ و (۵۰،۲۰)	۰	- ۰/۱۲۰	۰	۲/۲۹۸

۳. تحلیل المان محدود برای تعیین ضرایب

شکل نمونه‌ها

از نمونه SCB شکل ۳ برای مدل‌سازی نمونه در نرم‌افزار آباکوس استفاده می‌شود. برای مدل‌سازی در نرم‌افزار a طول ترک، R شعاع نمونه، t ضخامت نمونه و p بار متمرکز به صورت استاتیک بر قطعه از بالا وارد می‌شود، به ترتیب برابر ۲۰ میلی‌متر، ۷۵ میلی‌متر، ۳۲ میلی‌متر و ۱۰۰۰ نیوتن در نظر گرفته شده است. S_1 ، S_2 و L به ترتیب فاصله تکیه‌گاه‌ها از مرکز نیم‌دایره و فاصله ترک از مرکز نیم‌دایره است که مقادیر مناسب آنها برای ایجاد مود خالص I، مود خالص II و مود ترکیبی II/I با استفاده از نرم‌افزار آباکوس به دست آمده است. برای المان‌بندی کل مدل نیز حدود ۲۸۰۰ المان مستطیلی ۸ گرهی استفاده شده است که این المان‌ها در نوک ترک به صورت سینگولار هستند. در نهایت، پس از پایان تحلیل‌های عددی در نرم‌افزار آباکوس، مقادیر ضرایب شدت تنش جدول ۱ محاسبه و استخراج گردیده است (پیرمحمد و آیت‌اللهی، ۲۰۱۵). همچنین، نمونه‌ای از مش‌بندی کل مدل در مود خالص I در شکل ۵ آورده شده است. به منظور تعیین نسبت مشارکت هر یک از مودهای I و II



شکل ۵. نمونه‌ای از مش‌بندی مدل در مود خالص I

مشخصات مربوط به قیر استفاده شده در ساخت نمونه‌های آسفالتی گرم در جدول ۲ درج شده است.

جدول ۲. مشخصات فیزیکی قیر مورد استفاده در ساخت مخلوط‌های آسفالتی گرم

شرح آزمایش	واحد	استاندارد	۷۰- ۶۰
چگالی	$\frac{gr}{cm^3}$	ASTM D70	۱/۰۳
درجه اشتعال	$^{\circ}C$	ASTM D92	۳۰۸
درجه نفوذ	$^{\circ}C$	ASTM D5	۶۲
انگمی	Cm	ASTM D113	بیش از ۱۰۰
نقطه نرمی	$^{\circ}C$	ASTM D36	۴۹
ویسکوزیته در ۱۲۰ درجه	$\frac{mm^2}{S}$	ASTM D2170	۸۱۰
ویسکوزیته در ۱۳۵ درجه	$\frac{mm^2}{S}$	ASTM D2170	۴۲۰
نشانه درجه نفوذ (PI)	-	-	۱/۱۲ -

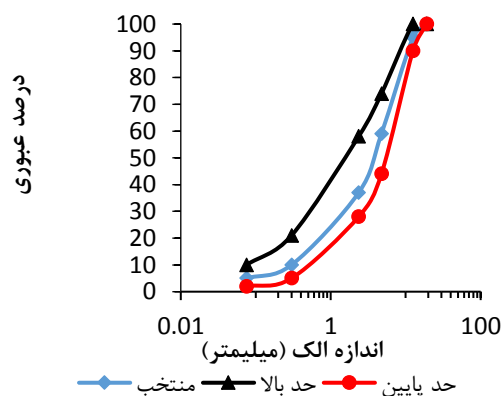
۴-۳. الیاف کربن

الیاف کربن یکی از پُرکاربردترین الیاف در صنعت است و در تولید انواع کامپوزیت‌ها استفاده می‌شود. این الیاف ضریب الاستیک نسبتاً بالایی در مقایسه با الیاف شیشه و

۴. مصالح و تهیه مخلوط آسفالت گرم

۴-۱. مصالح سنگی

در این پژوهش، از مصالح سنگی کوهی تهیه شده از معدن شن و ماسه اسب چران واقع در شرق تهران با درصد بالای سیلیس استفاده شد. دانه‌بندی مصالح سنگی در شکل ۶ نشان داده شده است. دانه‌بندی مورد استفاده در این تحقیق مطابق دانه‌بندی شماره ۴ از جدول (۹-۱) آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه شماره ۲۳۴) می‌باشد.



شکل ۶. دانه‌بندی مصالح سنگی برای ساخت مخلوط آسفالت گرم

۴-۲. قیر

در این پژوهش، برای ساخت نمونه‌های آسفالت گرم، از قیر خالص ۶۰-۷۰ پالایشگاه تهران استفاده گردید.

نظامی گردیده است. در این تحقیق، الیاف کربن به طول ۲۰ میلی‌متر به روش اختلاط خشک و به میزان ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ درصد (نسبت به وزن مخلوط آسفالتی گرم) به مصالح سنگی اضافه شده است. مشخصات و شکل الیاف کربن در جدول ۳ و شکل ۷ ارائه شده است.

کولار دارد. ضریب انبساط گرمایی این نوع الیاف‌ها در دماهای متفاوت کم می‌باشد که این مسئله باعث پایداری اندازه الیاف‌های کربن در دماهای مختلف می‌گردد. از خصوصیات الیاف کربن می‌توان به مقاومت کششی زیاد، وزن کم و انبساط حرارتی کم اشاره کرد که باعث استفاده از آن در کارهای فضایی، مهندسی عمران و کاربردهای

جدول ۳. مشخصات افزودنی الیاف کربن

نوع الیاف	طول (میلی‌متر)	مقاومت کششی (MPa)	نقطه ذوب (°C)	وزن مخصوص (g/cm ³)	مدول الاستیک (MPa)	جذب آب (%)
کربن	۲۰	۶۰۰	۲۳۰	۰/۹۱	۳۵۰۰	۰/۰-۰/۱/۰۲



شکل ۷. الیاف کربن به کار رفته در این تحقیق

نمونه‌های شاهد، قیر ۷۰-۶۰ به مخلوط مصالح سنگی اضافه شد. بر اساس ملاحظات مندرج در طرح اختلاط به روش سوپریو در سطح ۱، میزان قیر بهینه نمونه‌های شاهد ۴/۸ درصد به دست آمد. برای ساخت نمونه‌های آسفالت گرم حاوی الیاف، ابتدا هر یک از الیاف کربن با مقادیر ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ درصد وزنی مخلوط آسفالتی به مصالح سنگی افزوده شد و سپس قیر ۷۰-۶۰ که قبلاً آماده شده بود به مخلوط مصالح سنگی و الیاف اضافه گردید. ارتفاع نمونه‌های آسفالت گرم بسته به انرژی تراکم به کار گرفته شده (تعداد چرخش)، حدود ۱۶ تا

۵. ساخت نمونه‌های آسفالتی گرم و نمونه‌های

نیم‌دایره‌ای

برای تعیین در صد قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی شاهد (بدون الیاف) از روش طرح اختلاط سوپریو سطح ۱ استفاده شد. برای این منظور، در آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک وزارت راه و شهرسازی، نمونه‌های شاهد با در صد های قیر ۴، ۴/۵، ۵، ۵/۵، ۶ و ۶/۵ با استفاده از تراکم ژیراتوری تهیه شدند. در ادامه، برای تهیه

ایجاد ترک روی قطعات نیم‌دایره‌ای با استفاده از تیغه با ضخامت کم، برش‌هایی به طول ۲۰ میلی‌متر روی هر نمونه نیم‌دایره‌ای ایجاد گردید. شکل ۸ مراحل ۸ مرحله‌ای از آماده‌سازی نمونه‌های نیم‌دایره‌ای آسفالت گرم حاوی الیاف کربن را نشان می‌دهد.

۱۷ سانتی‌متر به دست آمد. برای تهیه نمونه‌های نیم‌دایره‌ای، ابتدا با برش هر نمونه ساخته شده با دستگاه ژیراتوری، چهار نمونه دیسک شکل با ضخامت حدود ۳ سانتی‌متر به دست آمد. سپس، با برش هر نمونه دیسکی شکل، دو نمونه نیم‌دایره حاصل شد. به منظور



شکل ۸. مراحل آماده‌سازی نمونه‌های نیم‌دایره‌ای

مورد تأیید محققان در این زمینه است (مولنار و مولنار، ۲۰۰۰؛ عامری و همکاران، ۲۰۱۱؛ عامری و همکاران، ۲۰۱۲؛ پیرمحمد و آیت‌اللهی، ۲۰۱۵؛ فخری و همکاران، ۲۰۱۸). قبل از شروع آزمایش، هر یک از مخلوط‌های آسفالتی مورد نظر به مدت ۱۲ ساعت در دماهای صفر، ۱۰- و ۲۰- درجه سلسیوس قرار داده شدند تا تمام جسم نمونه‌ها از نظر دمایی شرایط یکسانی داشته باشند. پس از گذشت زمان لازم، نمونه‌ها به ترتیب از فریزر خارج شده و سریعاً در داخل دستگاه تست فشار تنظیم شده و بارگذاری قرار داده شدند. با توجه به اینکه فاصله تکیه‌گاه‌ها و موقعت فک بالایی دستگاه از قبل تنظیم می‌شد، فاصله زمانی خروج نمونه‌ها از فریزر و شروع

۶. آزمایش تعیین مقاومت شکست نمونه‌های آسفالتی گرم

انجام آزمایش شکست با استفاده از دستگاه یونیورسال با ظرفیت ۱۵ کیلونیوتن و تحت بارگذاری استاتیک با نرخ ثابت بارگذاری ۳ میلی‌متر در دقیقه صورت پذیرفت. این دستگاه قابلیت ترسیم منحنی بار-جابجایی، اندازه‌گیری بار بحرانی شکست مخلوط‌های آسفالتی و در نتیجه تعیین میزان مقاومت شکست هر یک از مخلوط‌های آسفالتی را داراست. همچنین، اعتبار و استاندارد بودن این آزمایش با توجه به تحقیقات صورت گرفته در این زمینه

شکل ۹. نمونه‌ی نیم‌دایره‌ای آسفالت گرم تحت مود بارگذاری

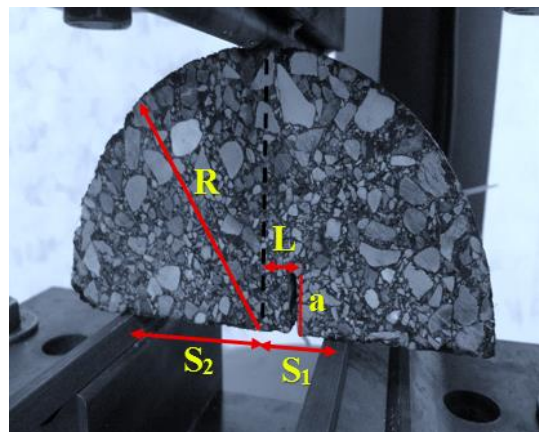
پس از تعیین میزان بار بحرانی شکست، مقادیر ضریب شدت تنش بحرانی (چقرمگی شکست) در هر یک از مودهای بارگذاری I و II از روابط (۷) و (۸) محاسبه شد (آیت الهی و علیها، ۲۰۰۷):

$$K_{Icf} = \frac{P_{cr}}{2Rt} \sqrt{\pi a} Y_I \quad (۷)$$

$$K_{IIcf} = \frac{P_{cr}}{2Rt} \sqrt{\pi a} Y_{II} \quad (۸)$$

که در روابط بالا، R شعاع نمونه‌ها (۷۵ میلی‌متر)، a طول ترک (۲۰ میلی‌متر) و t ضخامت نمونه‌ها (۳۲ میلی‌متر) است. P_{cr} بار بحرانی شکست بوده و مقادیر به‌دست آمده از آزمایش برای بار بحرانی شکست نمونه‌های آسفالتی (حاوی الیاف و بدون الیاف) در تمام مودهای بارگذاری در جدول ۴ نشان داده شده است. مقادیر متناظر Y_{II} و Y_I برای نمونه‌های تست شده نیز در جدول ۱ آمده است. بنابراین، با داشتن اطلاعات مذکور می‌توان مقادیر K_{Ic} و K_{IIc} را محاسبه کرد.

بارگذاری آنها بسیار کوتاه بود. از طرفی، چون نرخ ثابت بارگذاری سریع و ۳ میلی‌متر در دقیقه است، بنابراین تغییر دمای احتمالی آنها در طول آزمایش شکست ناچیز بود. لازم به ذکر است که از هر نوع ترکیب مخلوط آسفالتی برای هر مود بارگذاری سه نمونه یکسان به منظور کاهش میزان خطای آزمایش تحت آزمایش شکست قرار داده شد. شکل ۹ تصویری از چگونگی قرارگیری نمونه نیم‌دایره‌ای ترک خورده در دستگاه نشان داده شده است.



جدول ۴. مقادیر بار بحرانی به‌دست آمده از آزمایشگاه در مودهای مختلف بارگذاری

نوع نمونه	میانگین بار بحرانی (N) (0 °C)	میانگین بار بحرانی (N) (-10 °C)	میانگین بار بحرانی (N) (-20 °C)
نتایج بار شکست نمونه‌ها در مود I خالص ($M^e=1.0$)			
شاهد	۴/۰۱	۴/۳۶	۵/۲۲
الیاف کربن ۰/۳ درصد	۵/۲۳	۵/۹۷	۶/۹۴
الیاف کربن ۰/۵ درصد	۵/۳۹	۶/۱۹	۷/۱۵
الیاف کربن ۰/۷ درصد	۵/۴۷	۶/۲۹	۷/۲۳
نتایج بار شکست نمونه‌ها در مود ترکیبی ($M^e=0.5$)			
شاهد	۶/۷۴	۷/۴۳	۸/۵۲
الیاف کربن ۰/۳ درصد	۷/۲۳	۸/۳۷	۹/۵۸
الیاف کربن ۰/۵ درصد	۷/۹۲	۹/۰۶	۱۰/۶۹
الیاف کربن ۰/۷ درصد	۸/۳۰	۹/۳۶	۱۱/۰۳
نتایج بار شکست نمونه‌ها در مود ترکیبی ($M^e=0.2$)			

۸/۲۳	۷/۳۶	۶/۶۶	شاهد
۹/۰۲	۷/۴۱	۷/۰۶	الیاف کربن ۰/۳ درصد
۹/۶۹	۸/۳۶	۷/۸۹	الیاف کربن ۰/۵ درصد
۱۰/۱۱	۸/۹۶	۸/۵۲	الیاف کربن ۰/۷ درصد
نتایج بار شکست نمونه‌ها در مود II خالص ($M^e=0$)			
۱۲/۱۳	۱۰/۱۹	۹/۰۲	شاهد
۱۲/۲۳	۱۰/۳۹	۹/۱۹	الیاف کربن ۰/۳ درصد
۱۲/۵۹	۱۰/۷۸	۹/۳۱	الیاف کربن ۰/۵ درصد
۱۲/۸۹	۱۱/۲۴	۹/۶۳	الیاف کربن ۰/۷ درصد

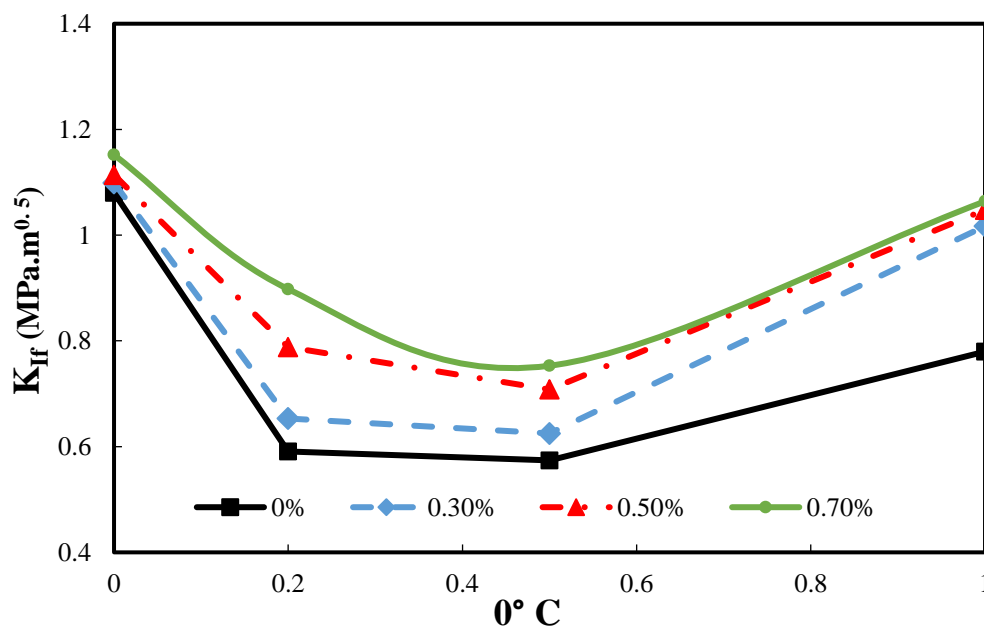
مختلف زیر صفر درجه افزایش می‌یابد. همچنین، با اضافه شدن برش، به‌ویژه در $M^e=0.5$ (سهم کشش و برش برابر) مقاومت شکست مخلوط آسفالتی (حاوی الیاف و بدون الیاف کربنی) به کمترین مقدار خود نسبت به سایر مودهای بارگذاری می‌رسد. نتیجه‌ی مهمی که می‌توان از این مطلب گرفت این است که مود بحرانی برای شروع ترک در روسازی آسفالتی، مود ترکیبی $M^e=0.5$ (سهم کشش و برش برابر) است. همچنین، نکته قابل توجه در شکل‌های ۱۰ الی ۱۲ این است که مقاومت شکست مود برش خالص بیشتر از مود کشش خالص است.

۷. نتایج و بحث

۷-۱. تحلیل مودهای مختلف بارگذاری بر مقاومت

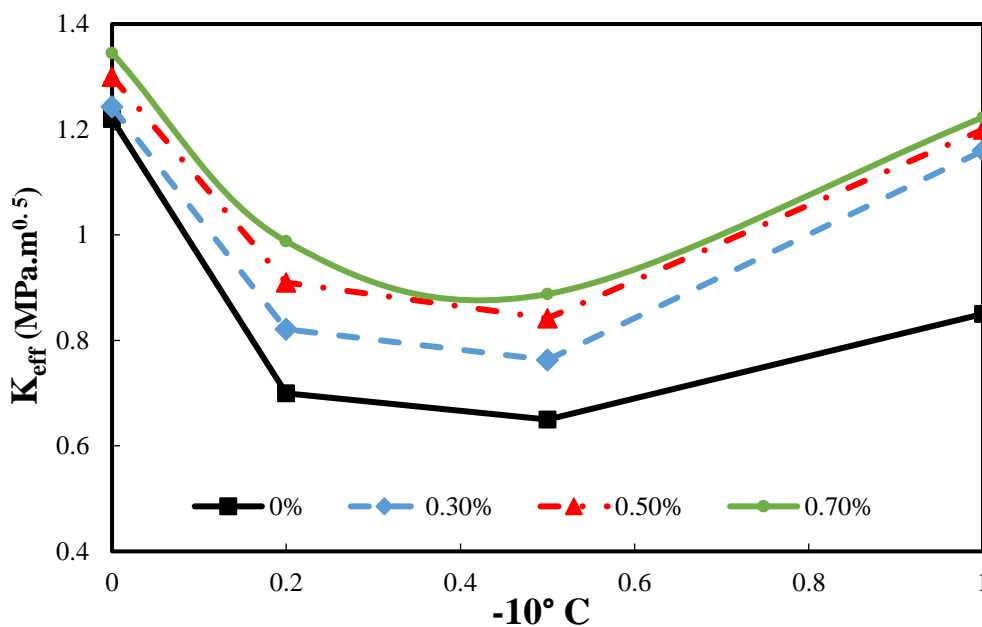
شکست مخلوط‌های آسفالتی

نمودارهای تأثیر مودهای مختلف بارگذاری بر مقاومت شکست آسفالت گرم با افزودنی الیاف کربن در دماهای مختلف در شکل‌های ۱۰ الی ۱۲ نشان داده شده است. همانطوری که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، با انتقال از مود کشش خالص به برش خالص، مقاومت شکست مخلوط آسفالتی حاوی الیاف و بدون الیاف در دماهای

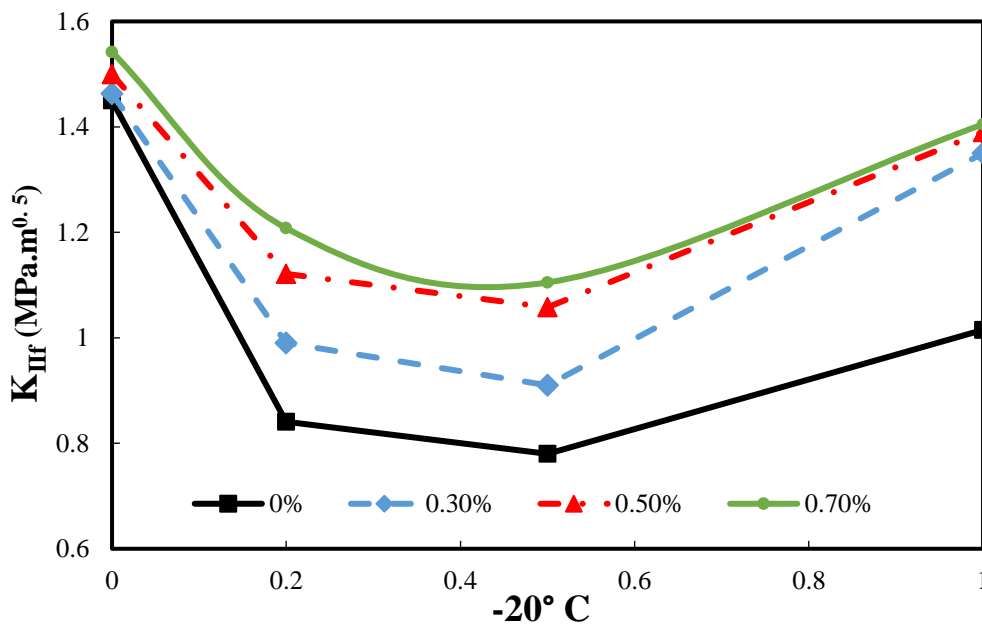


شکل ۱۰. تأثیر مودهای مختلف بارگذاری بر مقاومت شکست آسفالت گرم بدون الیاف و حاوی الیاف کربنی در دمای 0°C

تأثیر الیاف کربن بر مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از اصول مکانیک شکست الاستیک خطی



شکل ۱۱. تأثیر موده‌های مختلف بارگذاری بر مقاومت شکست آسفالت گرم بدون الیاف و حاوی الیاف کربنی در دمای -10°C



شکل ۱۲. تأثیر موده‌های مختلف بارگذاری بر مقاومت شکست آسفالت گرم بدون الیاف و حاوی الیاف کربنی در دمای -20°C

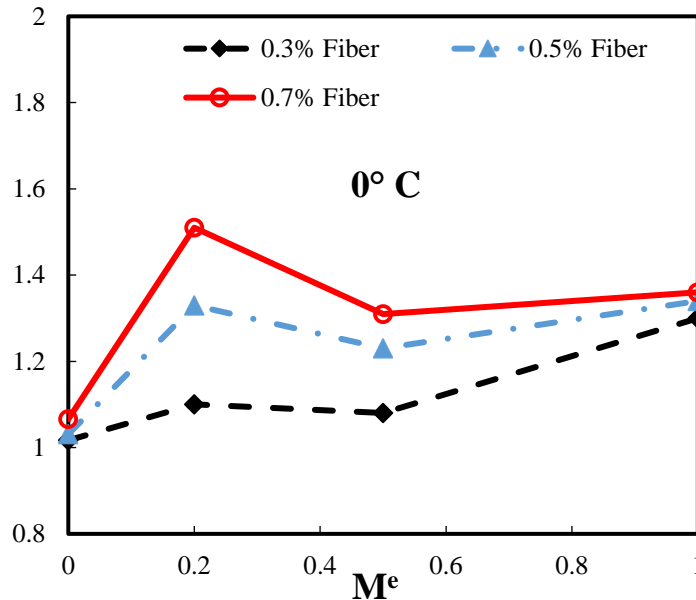
کربن به بدون الیاف در دماهای کم نشان داده شده است. با توجه به شکل‌ها دیده می‌شود که نسبت مقاومت شکست آسفالتی حاوی الیاف کربن به بدون الیاف همیشه بزرگتر از ۱ است که نشان دهنده این است که مقاومت شکست آسفالت گرم حاوی الیاف کربن در برابر شروع رشد ترک در روسازی‌های آسفالتی مقاومت به مراتب

۷-۲. تأثیر الیاف کربن بر مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی

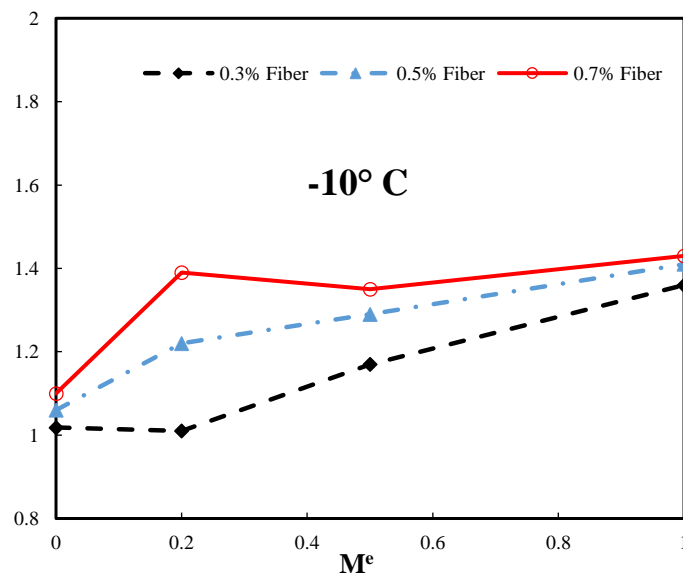
تأثیر الیاف کربن بر مخلوط‌های آسفالتی در دماهای کم در شکل‌های ۱۳ الی ۱۵ نشان داده شده است. در این شکل‌ها، نسبت مقاومت شکست آسفالتی حاوی الیاف

مشاهده می‌گردد. همچنین، بیشترین تأثیر الیاف در بهبود مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی در کشش خالص و کمترین در برش خالص ایجاد شده است. بیشترین تأثیر نسبت الیاف کربن مربوط به مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۰/۷ درصد الیاف کربنی است.

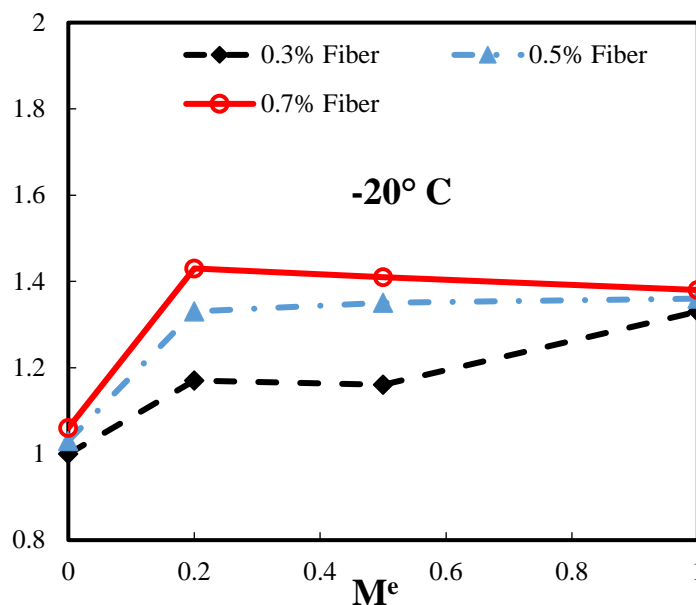
بیشتری از مخلوط‌های بدون الیاف دارد. با توجه به شکل‌های ۱۳ الی ۱۵، در مود کشش خالص ($M^e=1$) تقریباً ۳۰ الی ۴۳ درصد، در مود ترکیبی ($M^e=0.5$)، ۱۳/۲ تا ۴۱ درصد، در مود ترکیبی ($M^e=0.2$)، ۱۰/۵ تا ۴۰ درصد و در مود برش خالص ($M^e=0$)، ۲ الی ۱۲/۵ درصد بهبود در مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی



شکل ۱۳. تأثیر نسبت مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی حاوی الیاف کربن به بدون الیاف در دمای ۰ °C



شکل ۱۴. تأثیر نسبت مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی حاوی الیاف کربن به بدون الیاف در دمای -10 °C



شکل ۱۵. تأثیر نسبت مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی حاوی الیاف کربن به بدون الیاف در دمای -20°C

مقاومت قیر و چسبندگی بین مصالح سنگی و قیر افزایش پیدا کرده که منجر به افزایش مقاومت شکست آسفالت گرم در مودهای خالص کشش، برش و مود ترکیبی شده است.

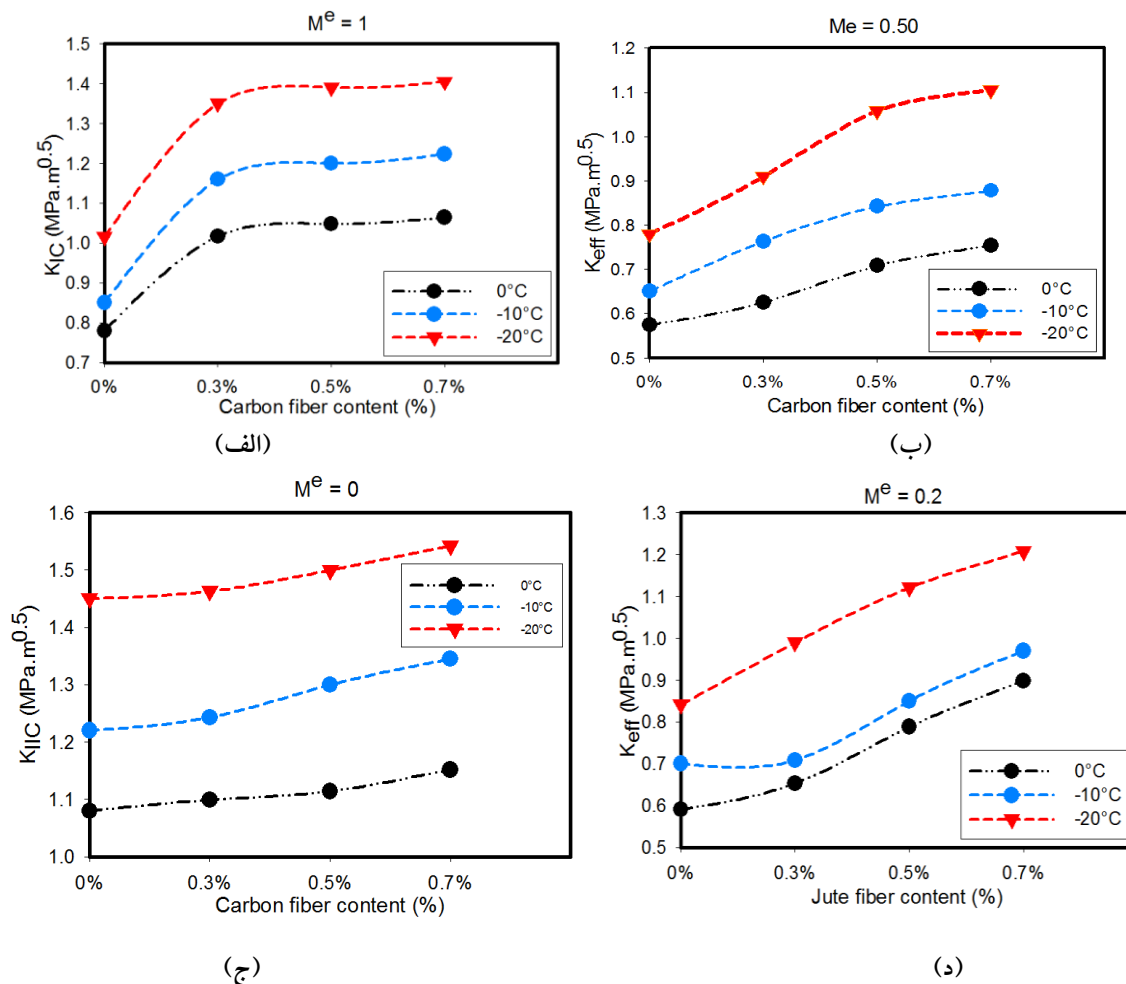
۸. نتیجه‌گیری

در این پژوهش مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی گرم شامل افزودنی الیاف کربن در سه درصد مختلف در دماهای کم در مودهای مختلف بارگذاری مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، نمونه‌ها به شکل نیم‌دایره‌ای ترک دار ساخته شدند و تحت دو مود ترکیبی کشش - برش و مود کشش خالص و مود برش خالص بارگذاری شدند. نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها به قرار زیر است:

- در مناطق سردسیر، برای بررسی چگونگی توزیع و شروع رشد ترک در مخلوط‌های آسفالتی، استفاده از اصول مکانیک شکست الاستیک خطی روش کاربردی و قابل اتکایی است.

۳-۷. تحلیل اثر دماهای مختلف بر مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی

نمودارهای مقاومت شکست آسفالت گرم با افزودنی الیاف کربن در دماهای مختلف در شکل ۱۶ (الف، ب، ج و د) نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۶ دیده می‌شود، در آسفالت گرم حاوی الیاف و بدون الیاف، با کاهش دما، ضریب شدت تنش بحرانی در مودهای کشش و برش و مود ترکیبی (کشش- برشی) افزایش می‌یابد. این رفتار مخلوط آسفالتی در برابر دما را می‌توان به تغییر در ساختار خرابی آسفالت و اجزای آن شامل مصالح سنگی، قیر و ارتباط قیر و مصالح سنگی نسبت داد. خرابی مصالح سنگی تحت تأثیر دما نیست. در حالی که قیر و ارتباط قیر و مصالح سنگی به میزان قابل توجهی تحت تأثیر دما هستند. با کاهش دما، مقدار قیر موجود در مخلوط آسفالتی منقبض و منجر به افزایش ویسکوزیته شده، و در نتیجه مقاومت قیر افزایش می‌یابد. با توجه به مطالب گفته شده، می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش دما،



شکل ۱۶. تأثیر کاهش دما بر مقاومت شکست مخلوط آسفالت گرم حاوی الیاف در درصدهای مختلف الیاف کربن در موده‌های مختلف بارگذاری

- مقاومت شکست (ضریب شدت تنش بحرانی) مخلوط آسفالتی گرم (حاوی الیاف کربنی و بدون الیاف) در مود برش خالص بیشتر از مد کشش خالص است.

- نسبت مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی حاوی الیاف کربن به نمونه‌های شاهد (بدون الیاف) برابر ۱-می‌باشد و نشان‌دهنده‌ی این است که مخلوط آسفالتی گرم حاوی الیاف کربنی مقاومت بیشتری در برابر رشد ترک نسبت به آسفالت گرم شاهد دارد.

- با کاهش دما، مقاومت شکست (ضریب شدت تنش بحرانی) نمونه‌های آسفالت گرم حاوی الیاف کربن افزایش می‌یابد.

- نمونه‌های نیم‌دایره‌ای ترک دار، نمونه‌های مناسبی برای مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس و به‌دست آوردن بار شکست نمونه‌ها در آزمایش شکست هستند.

- با انتقال موده‌های بارگذاری از مود کشش خالص به برش خالص، مقاومت شکست آسفالت گرم (حاوی الیاف کربنی و بدون الیاف) افزایش می‌یابد.

- دما و موده‌های بارگذاری اثر قابل توجهی در مقاومت شکست گرم (حاوی الیاف کربنی و بدون الیاف) دارند.

- حداقل مقاومت شکست مخلوط آسفالتی گرم (حاوی الیاف کربنی و بدون الیاف) در مود بارگذاری $M^e=0.5$ رخ می‌دهد. در واقع، مود بحرانی برای شروع ترک در روسازی آسفالتی مود $M^e=0.5$ (کشش - برش) است.

۹. مراجع

- Ayatollahi, M. R. and Pirmohammad, S. 2013. "Temperature effects on brittle fracture in cracked asphalt concretes". *Struct Eng Mech.*, 45, 19-32.
- Abtahi, S. M., Sheikhzadeh, M. and Hejazi, S. M. 2010. "Fiber-reinforced asphalt-concrete- A review". *Constr. Build. Mater.*, 24: 871-877.
- Ameri, M., Mansourian, A., Heidary Khavas, M., Aliha, M. R. M. and Ayatollahi, M. R. 2011. "Cracked asphalt pavement under traffic loading- A 3D finite element analysis". *Eng. Fract. Mech.*, 78: 1817-1826.
- Ameri, M., Mansourian, A., Pirmohammad, S., Aliha, M. R. M. and Ayatollahi, M. R. 2012. "Mixed mode fracture resistance of asphalt concrete mixtures". *Eng. Fract. Mech.*, 93: 153-167.
- Anderson, T. 2005. "Fracture mechanics: Fundamentals and applications". CRC Press.
- 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: 660-670.
- Braham, A., Buttlar, W. and Ni, F. 2010. "Laboratory mixed-mode cracking of asphalt concrete using the single-edge notch beam". *Road Mater. Pavement Design*, 11: 947-968.
- De Bondt, A. H. 1999. "Anti-reflective cracking design of (reinforced) asphaltic overlays". PhD Dissertation, Delft University of Technology.
- Fazaeli, H., Samin, Y., Pirnoun, A. and Dabiri, A. S. 2016. "Laboratory and field evaluation of the warm fiber reinforced high performance asphalt mixtures (case study Karaj- Chaloos Road)". *Constr. Build. Mater.*, 122: 273-283.
- Fakhri, M., Haghghat Kharrazi, E., Aliha, M. R. M. and Berto, F. 2018. "The effect of loading rate on fracture energy of asphalt mixture at intermediate temperatures and under different loading modes". *Frattura ed Integrità Strutturale*, 43: 113-132.
- Jahromi, S. and Khodaii, A. 2008. "Carbon fiber reinforced asphalt concrete". *Arab. J. Sci. Eng.*, 33: 355-364.
- Lee, S. J., Rust, J. P., Hamouda, H., Kim, Y. R. and Borden, R. H. 2005. "Fatigue cracking resistance of fiber-reinforced asphalt concrete". *Text. Res.*, 2: 123-128.
- Li, X. J. and Marasteanu, M. O. 2010. "Using semi circular bending test to evaluate low temperature fracture resistance for asphalt concrete". *Exp. Mech.*, 50: 867-876.
- Li, X., Marasteanu, M. O., Kvasnak, A., Bausano, J., Williams, R. C. and Worel, B. 2010. "Factors study in low-temperature fracture resistance of asphalt concrete". *J. Mater. Civ. Eng.*, 22(2): 145-152.
- Lytton, R. L. 1989. "Use of geotextile for reinforcement and strain relief in asphalt concrete". *Geotext. Geomembranes*, 8: 217-237.
- Molenaar, J. M. M. and Molenaar, A. A. A. 2000. "Fracture toughness of asphalt in the semi-circular bend test". *Eurasphalt and Eurobitume Congress, Barcelona, Spain*, pp. 509-518.
- Pirmohammad, S. and Ayatollahi, M. R. 2015. "Asphalt concrete resistance against fracture at low temperatures under different modes of loading". *Cold Reg Sci Technol.*, 110: 149-159.
- Razmi, A. and Mirsayar, M. M. 2018. "Fracture resistance of asphalt concrete modified with crumb rubber at low temperatures". *Int. J. Pavement Res. Tech.*, 11: 265-273.
- Serfass, J. P. and Samanos, J. 1996. "Fiber modified asphalt concrete characteristics, applications and behavior". *Assoc. Asphalt Paving Technol.*, 65: 193-230.
- Williams, M. L. 1956. "On the stress distribution at the base of a stationary crack". *J. Appl. Mech.*, 24: 109-114.