

# ارزیابی چقرمگی شکست آسفالت نیمه گرم حاوی الیاف طبیعی و مصنوعی در دماهای پایین

Original Article

احمد منصوریان\* (استادیار)

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، بخش قیر و آسفالت

علی رزمی (کارشناس ارشد)

محمود رضوی (کارشناس ارشد)

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهر

محمد رضا محمد علیها (دانشیار)

دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران

چقرمگی شکست، خاصیتی از ماده‌ی دارای ترک است که مقاومت آن را در برابر رشد ترک نشان می‌دهد. معمولاً هر چه میزان پارامتر چقرمگی شکست بیشتر باشد، آن ماده بهتر می‌تواند در برابر رشد ترک و بارهای وارده مقاومت کند. در نوشتار حاضر، به منظور ارزیابی چقرمگی شکست آسفالت نیمه گرم حاوی الیاف مصنوعی (با پایه‌ی پلی اولفین و آرامید) و طبیعی (از نوع جوت)، نمونه‌هایی به صورت نیم دیسک و حاوی درصد‌های مختلف از هر یک از الیاف گفته شده (۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ درصد وزنی مخلوط آسفالت نیمه گرم) تهیه شد. در ادامه، برای تعیین موقعیت نسبی ترک در نمونه‌ها به منظور ایجاد شرایط بارگذاری در هر یک از مودهای بارگذاری و همچنین محاسبه‌ی ضرایب شکل نمونه‌های دارای ترک، تحلیل به روش المان محدود انجام شد. سپس با ایجاد ترک در نمونه‌های نیم دیسک و بارگذاری آن‌ها در سه دمای ۰، ۱۰- و ۲۰- درجه‌ی سانتی‌گراد، چقرمگی شکست در هر یک از مودهای بارگذاری محاسبه شد. بررسی نتایج آزمایش‌ها و تحلیل‌های انجام شده نشان می‌دهد که چقرمگی شکست مخلوط آسفالت نیمه گرم حاوی الیاف طبیعی و مصنوعی نسبت به مخلوط بدون الیاف در مود کشش خالص و مود ترکیبی (برش و کشش برابر) افزایش می‌یابد، ولی روند مذکور با بیشتر شدن سهم برش به ویژه در الیاف طبیعی مشاهده نمی‌شود. همچنین در تمام مودهای بارگذاری و در تمام دماهای آزمایش، به ازاء درصد مساوی الیاف، تأثیر الیاف مصنوعی در بهبود چقرمگی شکست آسفالت نیمه گرم بیشتر از الیاف طبیعی است.

واژگان کلیدی: آسفالت نیمه گرم، چقرمگی شکست، دمای پایین، الیاف طبیعی، الیاف مصنوعی.

a.mansourian@bhrc.ac.ir  
m.razmi@iau-ahar.ac.ir  
a\_razavi@ia u-ahar.ac.ir  
mrm.aliha@iust.ac.ir

## ۱. مقدمه

اختلاط، ویسکوزیته‌ی قیر پایین آورده می‌شود؛ در نتیجه، امکان تولید مخلوط‌های آسفالتی در درجه حرارت‌های پایین‌تر فراهم می‌شود. به طور کلی آسفالت نیمه گرم مجموعه‌ی فناوری است که با استفاده از آن، درجه حرارت تولید و پخش مخلوط آسفالتی حدود ۲۵ تا ۵۵ درجه سانتی‌گراد نسبت به تهیه‌ی آسفالت گرم (HMA)<sup>۱</sup> کاهش می‌یابد.<sup>[۱]</sup> با توجه به ویژگی مذکور، یکی از کاربردهای بالقوه‌ی آسفالت گرم، استفاده از آن در مناطق سردسیر است. از طرفی، یکی از نگرانی‌هایی که در خصوص مخلوط‌های آسفالتی در مناطق سردسیر وجود دارد، احتمال وقوع و گسترش ترک در دماهای پایین به دلیل رفتار شکننده‌ی آسفالت است. بررسی‌ها نشان می‌دهند

کمیته‌سازی انرژی مورد نیاز برای تولید آسفالت و به تبع آن پایین آوردن آلاینده‌های متصاعد شده در زمان تولید و پخش آن، همواره یکی از مسائل پیش روی دست‌اندرکاران بخش اجرایی و پژوهشگران در حوزه‌ی راهسازی بوده است. یکی از ابداعات مهم در زمینه‌ی مذکور، تکنولوژی آسفالت نیمه گرم (WMA)<sup>۱</sup> است. در تکنولوژی‌های مربوط به تهیه‌ی مخلوط‌های آسفالت نیمه گرم با استفاده از افزودنی و یا بهبود فرایند

\* نویسنده مسئول

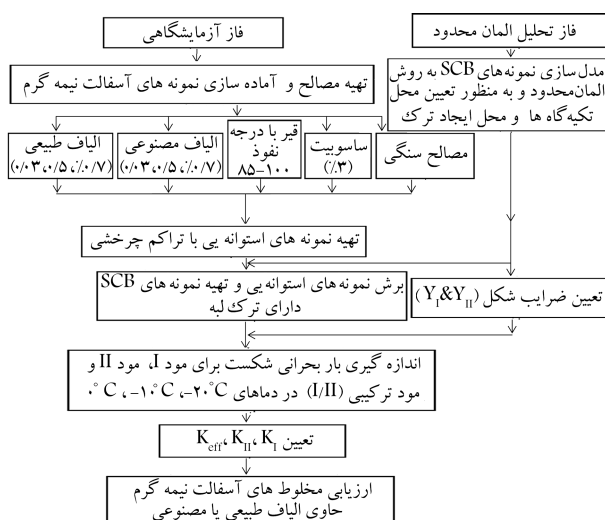
تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۱۲/۲۶، اصلاحیه ۱۳۹۶/۵/۷، پذیرش ۱۳۹۶/۵/۳۰

DOI:10.24200/J30.2018.2139.2107

## Archive of SID

نیمه گرم شوند، در حالی که مواد ارگانیک و کف سازها اثر کاهنده در انرژی شکست مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم دارند. همچنین در پژوهشی در سال ۲۰۱۶، [۱۲] با تهیه نمونه‌های آسفالت گرم حاوی ساسویت و الیاف پلیمری فورتا و سپس انجام آزمایش چقرمگی شکست در مود I روی نمونه‌های SCB اظهار شد که الیاف مورد استفاده منجر به بهبود مقاومت مخلوط‌های آسفالت گرم می‌شود. در فرایند توسعه‌ی متدولوژی جدید برای ارزیابی خصوصیات شکست آسفالت نیمه گرم نیز با استفاده از آزمایش روکش<sup>۹</sup> (۲۰۱۵)، [۱۳] نتیجه‌گیری شد که استفاده از اوترم منجر به بهبود اندکی در مقاومت مخلوط آسفالت نیمه گرم در برابر وقوع ترک می‌شود، در حالی که تکنولوژی کف قیر می‌تواند این مقاومت را به نحو قابل ملاحظه‌ی بهبود بخشد. در پژوهش همچنین دیگری (۲۰۱۶)، [۱۴] با انجام آزمایش شکست در مود I روی نمونه‌های SCB آسفالت نیمه گرم حاوی افزودنی‌های شیمیایی با پایه زیستی<sup>۱۰</sup> نتیجه‌گیری شد که نوع افزودنی، عاملی مهم در میزان چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم است. همچنین در پژوهش دیگری (۲۰۱۷)، [۱۵] نیز به منظور بررسی تأثیر افزودنی‌های شیمیایی با پایه زیستی در تراکم و عملکرد آسفالت نیمه گرم، از آزمایش نمونه متراکم دیسکی شکل تحت بارکشی<sup>۱۱</sup> استفاده و انرژی شکست مخلوط‌های آسفالتی اندازه‌گیری شد و نتایج به دست آمده نشان داد که استفاده از مواد افزودنی با پایه زیستی، اثر معنی‌دار (مثبت یا منفی) در عملکرد آسفالت نیمه گرم در دمای پایین ندارد.

بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که در خصوص ارزیابی عملکرد آزمایشگاهی مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم به خصوص آسفالت نیمه گرم حاوی الیاف طبیعی یا مصنوعی در دماهای پایین و همچنین در مدهای بارگذاری متنوع (کشش خالص، برش خالص و حالت ترکیبی برش - کشش) مطالعات زیادی انجام نشده است؛ بنابراین هدف اصلی از انجام پژوهش حاضر، تعیین چقرمگی شکست آسفالت نیمه گرم حاوی الیاف طبیعی یا مصنوعی در دماهای پایین قرار داده شد. برای این منظور نمونه‌های آسفالت نیمه گرم به شکل SCB که حاوی درصد‌های مختلف الیاف طبیعی یا مصنوعی بودند، ساخته شدند و پس از ایجاد شرایط بارگذاری برای حالت‌های کشش خالص، برش خالص یا حالت ترکیبی (کشش - برش)، بار بحرانی شکست آن‌ها در سه دمای ۰، ۱۰- و ۲۰- درجه‌ی سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد و در ادامه، چقرمگی شکست متناظر، محاسبه و ارزیابی شد. شکل ۱، فرایند انجام پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.



شکل ۱. فرایند انجام پژوهش.

با توجه به رفتار نسبتاً کشسان آسفالت در دماهای پایین، استفاده از روش مکانیک شکست کشسان خطی به منظور بررسی رفتار مخلوط‌های آسفالتی در دماهای پایین می‌تواند روشی مناسب باشد. [۵-۲]

به طور کلی ترک در اجسام، بسته به نوع بارگذاری به صورت:

الف) مود I بارگذاری یا مود بازشونده/کششی (جسم ترک دار به گونه‌ی تحت بارگذاری قرار می‌گیرد که سطوح ترک نسبت به هم فقط باز شوند)؛

ب) مود II بارگذاری یا مود برشی (لغزش وجوه ترک در راستای موازی با صفحه‌ی ترک و عمود بر جبهه‌ی ترک است)؛

ج) مود III بارگذاری یا مود پارگی (لغزش وجوه ترک در راستای موازی با صفحه‌ی ترک و موازی با جبهه‌ی ترک است) بروز می‌کنند. [۵]

در مکانیک شکست، ضریب شدت تنش به عنوان پارامتر اساسی در تشریح رفتار شکست و معیار شروع و گسترش ترک در مخلوط آسفالتی استفاده می‌شود و از رابطه‌ی ۱ به دست می‌آید. [۶]

$$K_i = Y_i \sigma \sqrt{\pi a} \quad i = I, II, III \quad (1)$$

که در آن،  $K_i$  ضریب شدت تنش در هر یک از مدهای I، II یا III (برحسب  $MPa\sqrt{m}$ )،  $\sigma$  تنش اعمال شده روی نمونه مورد نظر (برحسب مگاپاسکال)،  $Y_i$  ضریب هندسی (بی بعد) و  $a$  طول ترک برای ترک‌های لبه‌ی یا نصف طول ترک برای ترک‌های داخلی (برحسب متر) است. ضریب شدت تنش به ازاء تنش‌ی که منجر به شکست نمونه شود، ضریب شکست بحرانی یا اصطلاحاً چقرمگی شکست<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. با توجه به اینکه چقرمگی شکست یک خاصیت وابسته به جنس ماده است، بنابراین در یک مخلوط آسفالتی، هر چه مقدار آن بیشتر باشد، قابلیت آن در برابر رشد ترک افزایش می‌یابد و بهتر می‌تواند در برابر بارهای وارده مقاومت کند. [۷]

## ۲. مطالعات پیشین در ارتباط با خصوصیات شکست چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالت نیمه گرم

پژوهشگران (۲۰۱۱)، [۸] با استفاده از آزمایش خمش سه نقطه‌ی متقارن، چقرمگی شکست تیرچه‌های آسفالتی گرم و نیمه گرم (حاوی اوترم<sup>۲</sup> یا واکس پارافینی جامد<sup>۵</sup>) با مقطع مستطیل شکل و ترک لبه‌ی را در دمای ۲۰- درجه‌ی سانتی‌گراد به دست آوردند و نتایج پژوهش نشان داد با وجود آنکه دمای اختلاط آسفالت نیمه گرم ۳۰ تا ۴۰ درجه‌ی سانتی‌گراد کمتر از مخلوط آسفالت گرم است، ولی مقدار چقرمگی شکست در مود I (مود کششی) مخلوط آسفالت نیمه گرم در دمای ۲۰- درجه مشابه یا بهتر از مخلوط آسفالت گرم است. این در حالی است که در آزمایش دیگری (۲۰۱۳)، [۹] روی نمونه‌ی به شکل نیم‌دیسک با ترک لبه تحت خمش سه نقطه‌ی (SCB) در دمای ۱۰- درجه‌ی سانتی‌گراد نتیجه‌گیری شد که چقرمگی شکست در مود I مخلوط آسفالت گرم بیشتر از مورد مشابه برای آسفالت نیمه گرم (حاوی ساسویت یا توفالت<sup>۷</sup>) است. همچنین در تحقیق دیگری، [۱۰] اندازه‌گیری چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالت نیمه گرم حاوی انواع افزودنی‌های SBS، ماده‌ی ضد عریان‌شدگی، ساسویت و خرده‌لاستیک در دمای ۱۵- درجه‌ی سانتی‌گراد نتیجه‌گیری شد که بیشترین افزایش مقدار چقرمگی شکست در مود I مربوط به افزودنی‌های خرده‌لاستیک و ساسویت است. در پژوهش دیگری (۲۰۱۱)، [۱۱] پس از ساخت نمونه‌های دیسکی شکل از آسفالت نیمه گرم حاوی ساسویت، اوترم و ادورا<sup>۸</sup> اظهار داشتند که مواد افزودنی شیمیایی می‌تواند باعث بهبود انرژی شکست آسفالت

جدول ۱. نتایج تحلیل عددی برای ایجاد انواع مودهای مختلف بارگذاری با استفاده از نمونه‌ی خمشی نیم‌دیسک.

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

به دست آمده برای قطعه‌ی نیم‌دیسک تحت بارگذاری خمشی می‌توان از روابط ۳ و ۴ استفاده کرد: [۱۷]

$$Y_I = \frac{K_I}{\sqrt{\pi a}} \frac{2Rt}{P} \quad (3)$$

$$Y_{II} = \frac{K_{II}}{\sqrt{\pi a}} \frac{2Rt}{P} \quad (4)$$

که در آن‌ها،  $R$  شعاع نمونه (میلی‌متر)،  $t$  ضخامت نمونه (میلی‌متر)،  $P$  مقدار بار متمرکز استاتیکی (نیوتن)،  $a$  طول ترک (متر)،  $K_I$  و  $K_{II}$  به ترتیب ضرایب شدت تنش (بر حسب  $(MPa\sqrt{m})$ ) به ترتیب در مودهای I، II،  $Y_I$  و  $Y_{II}$  نیز به ترتیب ضرایب شکل نمونه‌ها (بی‌بعد) در هر یک از مودهای I و II هستند. با توجه به تحلیل‌های انجام شده در پژوهش حاضر در محیط نرم‌افزار آباکوس، مقادیر به دست آمده برای ضرایب شکل، در جدول ۱ ارائه شده است.

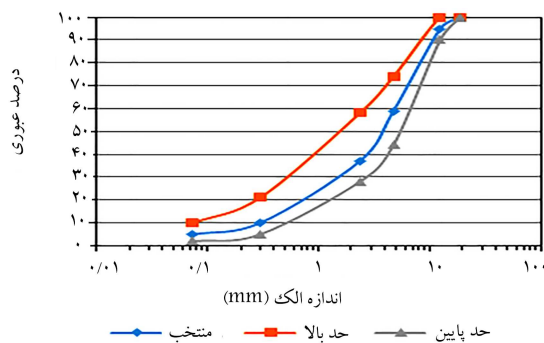
### ۴. مصالح و تهیه‌ی مخلوط آسفالت نیمه‌گرم

#### ۴.۱. مصالح سنگی

در پژوهش حاضر، به منظور ساخت مخلوط آسفالت نیمه‌گرم از مصالح سنگی کوهی واقع در شرق تهران استفاده شده است. خصوصیات مصالح سنگی در جدول ۲ و دانه‌بندی مصالح سنگی در شکل ۳ ارائه شده است. دانه‌بندی مورد استفاده در پژوهش حاضر مطابق دانه‌بندی شماره ۴ از جدول (۹-۱) آیین‌نامه‌ی روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه‌ی شماره ۲۳۴ سازمان برنامه و بودجه کشور) است.

#### ۴.۲. قیر

در پژوهش حاضر، برای ساخت نمونه‌های آسفالت نیمه‌گرم از قیر خالص ۱۰۰-۸۵ پالایشگاه تهران، استفاده شد. مشخصات مربوط به قیر استفاده شده در ساخت نمونه‌های آسفالتی نیمه‌گرم در جدول ۳ ارائه شده است.



شکل ۳. دانه‌بندی مصالح سنگی برای ساخت مخلوط آسفالت نیمه‌گرم.

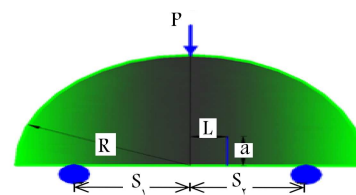
### ۳. تحلیل المان محدود برای تعیین ضرایب شکل نمونه‌ها

با توجه به رفتار کشسان مخلوط آسفالت گرم در دماهای پایین، در پژوهش حاضر فرض شد که آسفالت نیمه‌گرم نیز در دماهای ۰، ۱۰- و ۲۰- درجه‌ی سانتی‌گراد دارای رفتار کشسان و ضریب پواسون آن برابر ۰,۳۵ باشد. شکل نمونه‌های مورد ارزیابی در تحلیل به روش المان محدود نیز به صورت SCB در نظر گرفته شد. از جمله دلایل انتخاب ساختار نمونه به صورت SCB عبارت بودند از: سهولت تهیه‌ی نمونه‌ی مذکور با استفاده از دستگاه تراکم چرخشی<sup>۱۲</sup> سهولت ایجاد ترک لبه‌ی در این نوع قطعه، بارگذاری راحت آن، قابلیت ایجاد حالت‌های مختلف مودهای خالص کششی و برشی، و حالت ترکیبی کششی - برشی. مطابق آنچه در شکل ۲ مشاهده می‌شود، با تغییر فاصله‌ی تکیه‌گاه‌های پایینی نسبت به ترک لبه‌ی واقع در وسط قاعده (فاصله‌های  $S_1$  و  $S_2$ )، یا تغییر محل ترک از وسط قطعه (تغییر  $L$ ) می‌توان به حالت‌های مختلفی از کشش خالص تا برش خالص دست یافت.

در شکل ۲،  $a$  طول ترک،  $R$  شعاع نمونه،  $t$  ضخامت نمونه و  $P$  بار متمرکز استاتیکی است. مقادیر هر یک از پارامترهای گفته شده برای مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس به ترتیب برابر ۲۰ میلی‌متر، ۷۵ میلی‌متر، ۳۲ میلی‌متر و ۱۰۰۰ نیوتن در نظر گرفته شد. با استفاده از نرم‌افزار آباکوس مقادیر  $S_1$ ،  $S_2$ ،  $L$  و برای ایجاد مود I، مود II و مود ترکیبی I/II به دست آمد. برای المان‌بندی کل مدل از المان مستطیلی ۸ گره‌ی استفاده شد. این المان‌ها در نوک ترک به صورت سینگولار بودند. در نهایت، پس از انجام تحلیل‌های عددی در نرم‌افزار آباکوس، مقادیر ضرایب شدت تنش با استفاده از روش  $J$  - انتگرال محاسبه و استخراج شد (جدول ۱). به منظور تعیین نسبت مشارکت هر یک از مودهای I و II در حالت‌های مختلف بارگذاری مود ترکیبی پارامتر  $M^e$  به صورت رابطه‌ی ۲ تعریف می‌شود: [۱۶]

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

که در آن،  $K_I$  و  $K_{II}$  ضرایب شدت تنش (بر حسب  $(MPa\sqrt{m})$ ) به ترتیب در مودهای I و II هستند. برای حالت مود I، مقدار  $M^e$  برابر ۱ و برای حالت مود II مقدار این پارامتر برابر صفر خواهد بود. برای اینکه بتوان نتایج حاصل از یک مدل‌سازی را در موارد مشابهی از هندسی و بارگذاری استفاده کرد، باید آن‌ها را به طریقی بی‌بعد کرد که مستقل از هندسه و بارگذاری باشند. برای بی‌بعد کردن نتایج



شکل ۲. ساختار کلی نمونه‌ی مورد بررسی در تحلیل به روش المان محدود.

جدول ۲. مشخصات مصالح سنگی مورد استفاده در ساخت نمونه‌های آسفالت نیمه گرم.

مشخصه	استاندارد	مقدار	حد آیین نامه (نشریه ۲۳۴)
وزن مخصوص	ASTMC-۱۲۷	۲٫۴۱	-
درصد سایش لوس آنجلس درشت دانه	AASHTO T-۹۶	۲۳	بیشینه ۲۵
درصد جذب آب ریزدانه	AASHTO T-۸۴	۱	بیشینه ۲٫۸
درصد جذب آب درشت دانه	AASHTO T-۸۵	۱٫۵	بیشینه ۲٫۸
درصد شکستگی (یک جهت)	ASTM D۵۸۲۱	۹۸	کمینه ۹۵
درصد شکستگی (دو جهت)	ASTM D۵۸۲۱	۹۰	کمینه ۹۰

جدول ۳. مشخصات فیزیکی قیر مورد استفاده در ساخت مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم.

مشخصه	واحد	استاندارد	مقدار	حد آیین نامه (نشریه ۲۳۴)
چگالی	گرم بر سانتی متر مکعب	ASTM D۷۰	۱٫۰۱	-
درجه‌ی اشتعال	درجه‌ی سانتی گراد	ASTM D۹۲	۲۹۴	کمینه ۲۳۲
درجه‌ی نفوذ	دهم میلی متر	ASTM D۵	۹۴	۸۵-۱۰۰
انگمی	سانتی متر	ASTM D۱۱۳	> ۱۰۰	کمینه ۱۰۰
نقطه‌ی نرمی	درجه‌ی سانتی گراد	ASTM D۳۶	۴۲	بیشینه ۵۲
ویسکوزیته در ۱۲۰ درجه	سانتی استوکس	ASTM D۲۱۷۰	۵۱۲	-
ویسکوزیته در ۱۳۵ درجه	سانتی استوکس	ASTM D۲۱۷۰	۲۲۱	-
ویسکوزیته در ۱۵۰ درجه	سانتی استوکس	ASTM D۲۱۷۰	۱۲۰	-
نشانه‌ی درجه‌ی نفوذ	-	-	-۱٫۹۸	-

جدول ۴. مشخصات ساسوبیت.

مشخصه	واحد	استاندارد	نتیجه
شکل ظاهری	-	-	پریل (دانه‌بی)
رنگ	-	-	سفید
چگالی	کیلوگرم بر متر مکعب	-	تقریباً ۶۰۰
بیشترین دمایی که ساسوبیت حالت جامد دارد*	درجه‌ی سانتی گراد	ASTM D۹۳۸	۱۰۵
نفوذ در ۲۵ درجه سانتی گراد	دهم میلی متر	ASTM D۱۳۲۱	< ۱
نفوذ در ۶۵ درجه سانتی گراد	دهم میلی متر	ASTM D۱۳۲۱	< ۶

\* Congealing point

### ۳.۴. ساسوبیت

واکس فیشر تراپس (ساسوبیت) یک واکس هیدروکربن آلیفاتیک ترکیبی و از مشتقات ذغال سنگ است که به عنوان پرکاربردترین افزودنی در تولید آسفالت‌های نیمه گرم محسوب می‌شود. با توجه به نقطه‌ی ذوب پایین آن (حدود ۱۰۰ درجه‌ی سانتی گراد) به راحتی در قیر حل می‌شود و ترکیبی پایدار را با قیر تشکیل می‌دهد. پس از تراکم مخلوط آسفالتی و با سرد شدن آن، ساختاری کریستالی در قیر تشکیل می‌دهد.<sup>[۱۹][۱۸]</sup> جدول ۴، مشخصات ساسوبیت استفاده شده در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه مقدار ساسوبیتی که به قیر مخلوط آسفالت نیمه گرم اضافه می‌شود، معمولاً بین ۰٫۸ تا ۴ درصد وزن قیر پایه است و از طرفی، فراوانی استفاده از درصد‌های نزدیک به حد بالا بیشتر است،<sup>[۱۹]</sup> در پژوهش حاضر از ساسوبیت به صورت گلوله‌بی شکل و به اندازه‌ی ۳٪ وزنی قیر استفاده

شد. برای این منظور ساسوبیت در دمای ۱۳۰ درجه‌ی سانتی گراد با قیر پایه در یک مخلوط کن با تعداد دوران ۳۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه مخلوط شد.

### ۴.۴. الیاف طبیعی (جوت)

جوت، چتایی یا کنف هندی، نوعی الیاف طبیعی است که از لیگنین<sup>۱۳</sup> (۱۴-۱۲ درصد)، بنتوزان<sup>۱۴</sup> (۱۶-۱۴ درصد)، سلولز (۶۴-۵۰ درصد) و دیگر مواد مانند رطوبت، پروتئین و چربی تشکیل شده است.<sup>[۲۰]</sup> در پژوهش حاضر، الیاف طبیعی جوت به طول ۲۰ میلی متر به روش اختلاط خشک و با درصد‌های ۰٫۳، ۰٫۵ و ۰٫۷ (نسبت به وزن مخلوط آسفالتی نیمه گرم) به مصالح سنگی اضافه شد. مشخصات الیاف طبیعی جوت در جدول ۵ ارائه شده است.



الف) نمایی از مصالح سنگی و الیاف طبیعی و ب) اختلاط برای تهیه ی آسفالت نیمه گرم؛ مصنوعی مورد استفاده برای ساخت نمونه ها؛



ت) نمونه های آستوانه یی به ضخامت حدود ۳ cm



پ) تهیه ی نمونه های آستوانه یی شکل به قطر ۱۵ cm به روش تراکم چرخشی؛



ج) تهیه ی نمونه های نیم دیسک با برش نمونه های دیسکی شکل.



ث) تهیه ی نمونه های دیسکی شکل؛

شکل ۴. مراحل آماده سازی نمونه های نیم دیسک.

ایجاد ترک روی قطعات نیم دیسک با استفاده از تیغه با ضخامت کم، برش هایی به طول ۲۰ میلی متر روی هر نمونه ی نیم دیسک ایجاد شد. شکل ۴، مراحل ای از آماده سازی نمونه های نیم دیسک آسفالت نیمه گرم حاوی الیاف طبیعی و مصنوعی را نشان می دهد.

## ۵. آزمایش تعیین چقرمگی شکست نمونه های آسفالت

### نیمه گرم

برای انجام آزمایش چقرمگی شکست نمونه های آسفالت نیمه گرم از دستگاه یونیورسال GALDABINI مدل QUASAR۶۰۰ با ظرفیت ۱۵ کیلو نیوتن و تحت بارگذاری استاتیک با نرخ ثابت بارگذاری ۳ میلی متر در دقیقه استفاده شد. در دستگاه مذکور، قابلیت ترسیم منحنی بار - جابه جایی و اندازه گیری بار بحرانی شکست نمونه های نیم دیسک فراهم شده است. قبل از شروع آزمایش، هر یک از نمونه های تهیه شده، به مدت حدود ۱۲ ساعت در دماهای ۵، ۱۰- و ۲۰- درجه ی سانتی گراد قرار داده شدند تا تمام جسم نمونه ها از نظر دمایی شرایط یکسانی داشته باشند. ذکر این نکته لازم است که آزمایش تعیین بار بحرانی شکست در هر یک از دماهای مذکور در یک روز مجزا صورت پذیرفت. پس از گذشت زمان ذکر شده، نمونه ها به ترتیب از فریزر خارج و سریعاً در داخل

جدول ۵. مشخصات الیاف طبیعی (جوت).

نوع الیاف	مقاومت کششی (MPa)	مدول یانگ (GPa)	چگالی (Kg/M <sup>3</sup> )	مقدار جذب آب (%)
طبیعی	۲۰۰-۴۵۰	۲۰-۵۵	۱۳۰۰-۱۵۰۰	۱۲

جدول ۶. مشخصات الیاف مصنوعی.

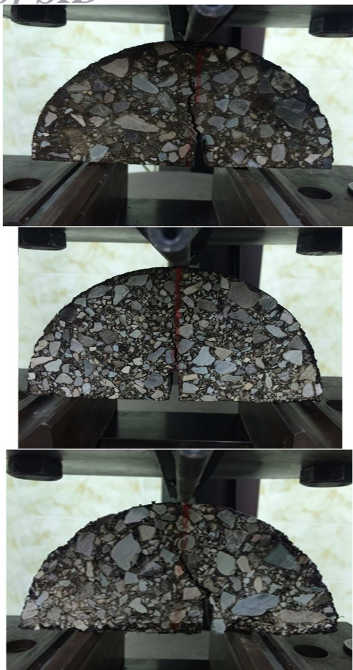
مشخصات	جزء	
	پلی اولفین	آرامید
وزن مخصص	۰/۹۱	۱/۴۴
مقاومت کششی MPa	۴۹۰	۲۸۰۰
طول mm	۱۹	۱۹
رنگ	سیاه	زرد
نقطه ذوب C°	۱۰۰	۴۲۷

## ۵.۴. الیاف مصنوعی با پایه ی پلی اولفین و آرامید (فورتا)

الیاف مصنوعی مورد استفاده در پژوهش حاضر از دو جزء اساسی پلی اولفین و آرامید تشکیل شده است. پلی اولفین موجود در الیاف به عنوان یک اصلاح کننده ی قیر عمل می کند و الیاف آرامید نیز به علت مقاومت کششی زیاد به عنوان مسلح کننده ی مخلوط آسفالتی وارد عمل می شود.<sup>[۱۲]</sup> مشخصات الیاف مصنوعی مورد استفاده در پژوهش حاضر در جدول ۶ ارائه شده است. برای ساخت نمونه های آسفالت نیمه گرم در پژوهش حاضر، الیاف مصنوعی با مقادیر ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ درصد (نسبت به وزن مخلوط آسفالت نیمه گرم) به مصالح سنگی اضافه شد.

## ۶.۴. ساخت نمونه های آسفالتی نیمه گرم و نمونه های نیم دیسک

برای تعیین درصد قیر بهینه ی مخلوط های آسفالتی شاهد (بدون الیاف) از روش طرح اختلاط سوپرپیو سطح ۱ استفاده شد.<sup>[۲۱]</sup> برای این منظور در آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک وزارت راه و شهرسازی، نمونه های شاهد با درصد قیرهای ۴، ۵، ۵/۵، ۶ و ۶/۵ و با استفاده از تراکم چرخشی تهیه شدند. برای ساخت نمونه های آسفالت نیمه گرم، ابتدا ساسوئیت به میزان ۳٪ وزنی قیر، به قیر پایه (۱۰۰-۸۵) در دمای ۱۳۰ درجه ی سانتی گراد اضافه شد و عملیات اختلاط قیر پایه و ساسوئیت به مدت ۱۰ دقیقه در یک مخلوط کن با سرعت ۳۰۰ دور در دقیقه انجام گرفت. در ادامه، برای تهیه ی نمونه های شاهد، قیر حاوی ساسوئیت به مخلوط مصالح سنگی اضافه شد. براساس ملاحظات مندرج در طرح اختلاط به روش سوپرپیو در سطح ۱، درصد قیر بهینه ی نمونه های شاهد برابر ۵/۶٪ به دست آمد. برای ساخت نمونه های آسفالت نیمه گرم حاوی الیاف، ابتدا هر یک از انواع الیاف طبیعی و مصنوعی با مقادیر ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ درصد وزنی مخلوط آسفالتی به مصالح سنگی و سپس قیر حاوی ساسوئیت که قبلاً آماده شده بود، به مخلوط مصالح سنگی و الیاف افزوده شد. ارتفاع نمونه های آسفالت نیمه گرم بسته به انرژی تراکم به کار گرفته شده (تعداد چرخش)، حدود ۱۶ تا ۱۷ سانتی متر به دست آمد. برای تهیه ی نمونه های نیم دیسک، ابتدا با برش هر نمونه ی ساخته شده با دستگاه چرخشی، ۴ نمونه ی دیسک شکل با ضخامت حدود ۳ سانتی متر به دست آمد؛ سپس با برش هر نمونه ی دیسکی شکل، دو نمونه ی نیم دیسک حاصل شد. با توجه به اینکه قسمت های فوقانی و تحتانی هر نمونه حاصل از تراکم چرخشی با انرژی تراکم بیشتری مواجه هستند، برای یکنواختی در نتایج از برش های قسمت های میانی نمونه های آستوانه یی استفاده شد. به منظور



شکل ۶. نمونه‌های نیم‌دیسک آسفالت نیمه‌گرم تحت مدهای مختلف بارگذاری.



شکل ۵. نمایی از چگونگی قرارگیری نمونه‌ی نیم‌دیسک با ترک در دستگاه یونیورسال.

دستگاه تنظیم و بارگذاری شدند. با توجه به اینکه فاصله‌ی تکیه‌گاه‌ها و موقعیت فک بالایی دستگاه از قبل تنظیم می‌شد؛ بنابراین، فاصله‌ی زمانی خروج نمونه‌ها از فریزر و شروع بارگذاری آن‌ها بسیار کوتاه بود و تغییر احتمالی دمای آن‌ها در طول آزمایش شکست ناچیز در نظر گرفته شد. به منظور کاهش میران خطای آزمایش تعیین بار بحرانی شکست، برای هر نوع ترکیب مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم و برای هر مود بارگذاری، سه نمونه‌ی یکسان آزمایش شدند. بسته به مود بارگذاری موردنظر (خالص یا ترکیبی)، فواصل تکیه‌گاهی با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته در بند ۳، تنظیم و نمونه در محل موردنظر تحت بارگذاری قرار داده شد. شکل ۵، نمایی از آزمایش تعیین بار بحرانی شکست نمونه‌ی نیم‌دیسک ترک خورده را نشان می‌دهد. شکل ۶، نیز تصویر تعدادی از نمونه‌های نیم‌دیسک آسفالت نیمه‌گرم تحت مدهای مختلف بارگذاری را نشان می‌دهد. آزمایش‌های مربوط به تعیین بار بحرانی شکست در آزمایشگاه خستگی و شکست دانشگاه علم و صنعت ایران انجام شد.

پس از تعیین میزان بار بحرانی شکست، مقادیر ضریب شدت تنش بحرانی (چقرمگی شکست) در هر یک از مدهای بارگذاری  $I$  و  $II$ ، از روابط ۵ (الف و ب) محاسبه شدند.

$$K_{If} = \frac{P_{cr}}{\sqrt{Rt}} \sqrt{\pi a} Y_I \quad (الف ۵)$$

$$K_{IIIf} = \frac{P_{cr}}{\sqrt{Rt}} \sqrt{\pi a} Y_{II} \quad (ب ۵)$$

که در آن،  $K_{If}$  و  $K_{IIIf}$  مقادیر ضریب شدت تنش بحرانی به ترتیب در هر یک از مدهای بارگذاری  $I$  و  $II$  (بر حسب  $MPa\sqrt{m}$ )، شعاع نمونه‌های نیم‌دیسک (۷۵ میلی‌متر)، طول ترک ( $a$  متر)، ضخامت نمونه‌های نیم‌دیسک (۳۲ میلی‌متر)،  $P_{cr}$  بار بحرانی شکست (حاصل از نتایج آزمایش شکست بر حسب نیوتن) و  $Y_I$  و  $Y_{II}$  ضرایب شکل نمونه‌ها هستند که براساس تحلیل‌های انجام شده در بند ۱ از جدول ۱ تعیین می‌شود. برای تعیین چقرمگی شکست معادل، در حالتی که نمونه‌ها تحت بارگذاری ترکیبی کششی - برشی قرار داشته‌اند، از رابطه‌ی ۶ استفاده شد:

$$K_{eff} = \sqrt{K_{If}^2 + K_{IIIf}^2} \quad (۶)$$

که در آن،  $K_{eff}$  ضریب شدت تنش مؤثر (بر حسب  $MPa\sqrt{m}$ ) است.

## ۶. نتایج و بحث

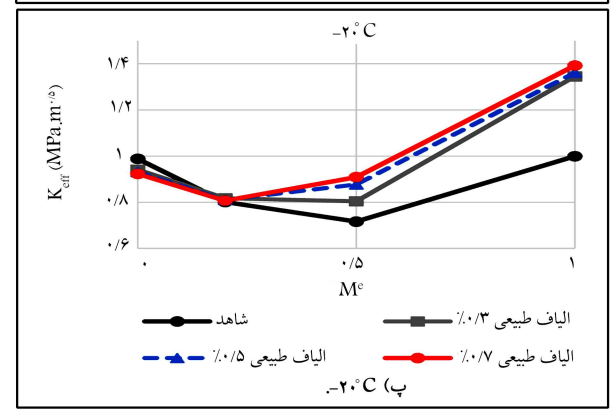
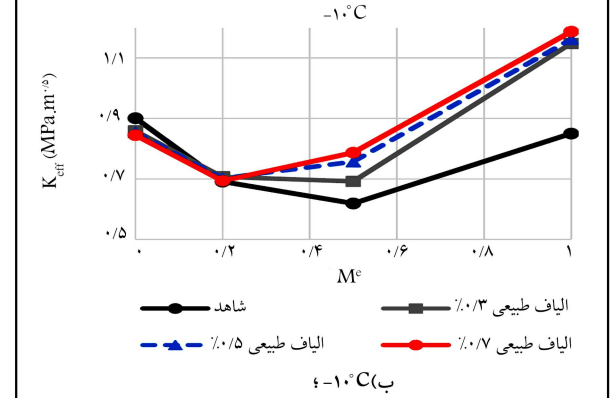
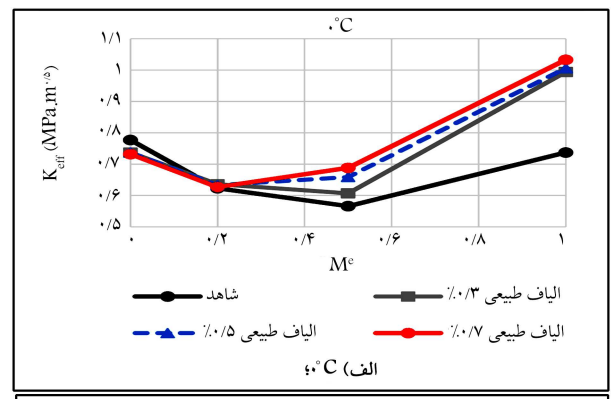
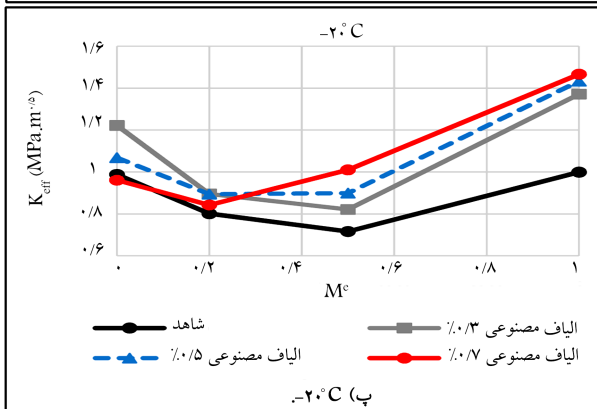
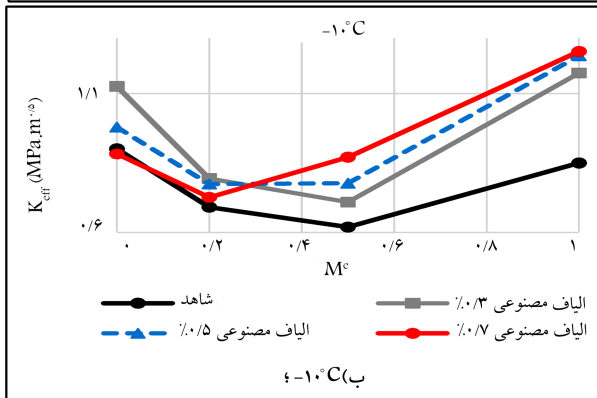
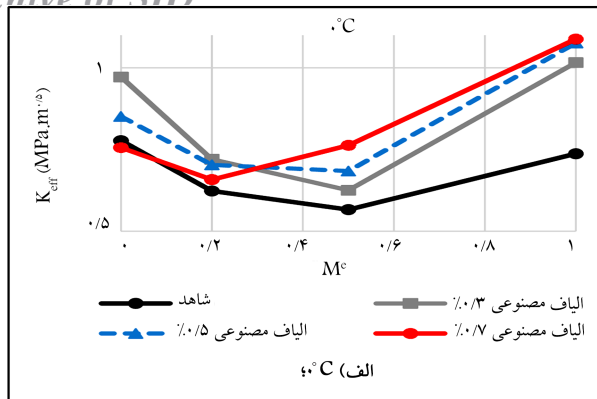
### ۶.۱. تأثیر کلی الیاف در ضریب شدت تنش آسفالت نیمه‌گرم

شکل‌های ۷ و ۸، به ترتیب تأثیر الیاف طبیعی و مصنوعی را در ضریب شدت تنش در هر یک از دماهای مورد بررسی در پژوهش حاضر نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودارهای مذکور مشاهده می‌شود، با افزایش سهم کشش (افزایش پارامتر  $M^e$ )، ضریب شدت تنش مؤثر ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد، به طوری که در تمام نمونه‌های آسفالتی نیمه‌گرم حاوی الیاف طبیعی یا مصنوعی بیشترین افزایش ضریب شدت تنش مؤثر ابتدا برای مود  $I$  ( $M^e = ۱$ ) و سپس برای مود ترکیبی با سهم برابر کشش و برش ( $M^e = ۰.۵$ ) مشاهده می‌شود. افزایش ۳۵ تا ۴۸ درصدی ضریب شدت تنش در مود کشش خالص نشان می‌دهد که الیاف مورد استفاده منجر به بهبود مقاومت کششی نمونه‌های آسفالت نیمه‌گرم نسبت به نمونه‌های شاهد شده است. درخصوص علت این امر می‌توان گفت الیاف مورد استفاده که چسبندگی مناسبی با قیر دارند، با تسلیح آسفالت نیمه‌گرم و ایجاد پیوستگی (پل‌شدگی) بین دو وجه ترک در برابر بازشدگی بیشتر ترک مقاومت کرده‌اند.

نتایج پژوهشی در سال ۲۰۱۰، [۱۲] نیز بیانگر بهبود رفتار مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و آرامید در برابر رشد ترک در مود خالص کشش است. همچنین برخی پژوهشگران، [۱۲] نیز که رفتار مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم حاوی الیاف مصنوعی فورتا را در مود  $I$  شکست بررسی کرده‌اند، به این نتیجه رسیدند که این الیاف سبب بهبود مقاومت شکست نمونه‌ها در مود  $I$  می‌شود.

از طرفی همان‌طور که در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود، در مود برش خالص و مود بارگذاری با سهم بیشتر برش ( $M^e = ۰.۲$ )، افزودن الیاف منجر به اثر منفی یا بهبود ناچیز چقرمگی شکست (ضریب شدت تنش مؤثر) مخلوط آسفالت نیمه‌گرم شده است. به عبارت دیگر، الیاف موجود در مخلوط آسفالت نیمه‌گرم اثر منفی یا بهبود کمی در مقاومت لغزشی سنگ‌دانه‌ها داشته‌اند. در توجیه پدیده‌ی





شکل ۸. تأثیر درصد الیاف مصنوعی در چقرمگی شکست مخلوط آسفالت نیمه گرم در مودهای مختلف بارگذاری در دما.

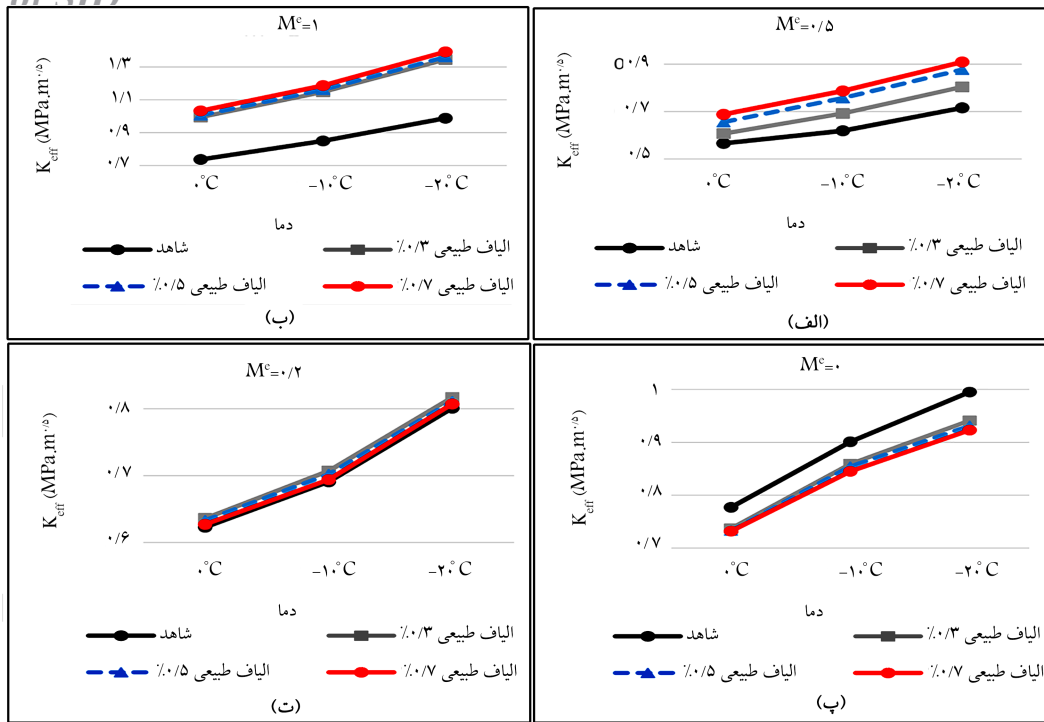
شکل ۷. تأثیر درصد الیاف طبیعی در چقرمگی شکست مخلوط آسفالت نیمه گرم در مودهای مختلف بارگذاری در دما.

می‌دهند. مطابق شکل‌های مذکور، در تمام نمونه‌ها با کاهش دما، مقدار چقرمگی شکست (ضریب شدت تنش بحرانی) افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، در مود I با کاهش دما از ۰ به ۱۰- درجه سانتی‌گراد، از ۱۰- به ۲۰- درجه سانتی‌گراد افزایش در مقدار چقرمگی شکست نمونه‌های آسفالت نیمه‌گرم مشاهده می‌شود. علت بروز پدیده‌ی ذکر شده را این طور می‌توان توضیح داد که با کاهش دما، کُندروانی قیر افزایش می‌یابد؛ بنابراین بار بیشتری برای ایجاد شکست در قیر باید اعمال شود. با توجه به اینکه ضریب شدت تنش بحرانی، نسبت مستقیم با مقدار بار شکست دارد، در نتیجه با کاهش دما، چقرمگی شکست افزایش خواهد یافت. البته این نکته را نیز باید در نظر داشت که کاهش زیاد دما می‌تواند به بروز ترک‌های ریز در مخلوط آسفالتی و در نتیجه کاهش مقاومت آن منجر شود. براساس شکل‌های مذکور، بهبود

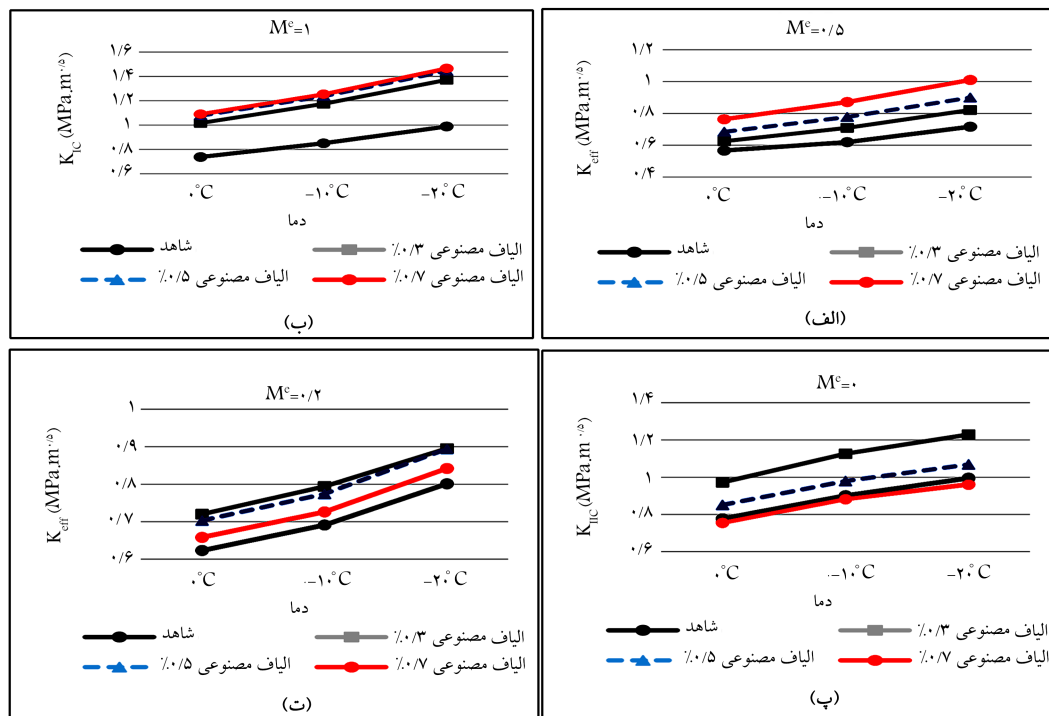
مذکور می‌توان اظهار داشت که الیاف استفاده شده در مخلوط آسفالت نیمه‌گرم، مقداری هر چند اندک از قیر موجود در مخلوط آسفالتی را به خود جذب می‌کنند؛ بنابراین مقدار قیری که در مخلوط آسفالتی استفاده می‌شود، باید مقداری بیشتر در نظر گرفته شود (دست‌کم به اندازه‌ی میزان جذب شده توسط الیاف)؛ تا به این ترتیب پیوستگی و چسبندگی بین مصالح، به خصوص مصالحی که در ناحیه‌ی برش قرار گرفته‌اند، تضعیف نشود.

## ۲.۶. تأثیر کاهش دما در ضریب شدت تنش آسفالت نیمه‌گرم حاوی الیاف طبیعی یا مصنوعی

شکل‌های ۹ و ۱۰، تغییرات چقرمگی شکست نمونه‌های آسفالت نیمه‌گرم حاوی درصد‌های مختلف الیاف طبیعی یا مصنوعی را در هر یک از مودهای بارگذاری نشان



شکل ۹. تأثیر کاهش دما در چقرمگی شکست مخلوط آسفالت نیمه گرم حاوی درصد‌های مختلف الیاف طبیعی در مودهای مختلف بارگذاری.

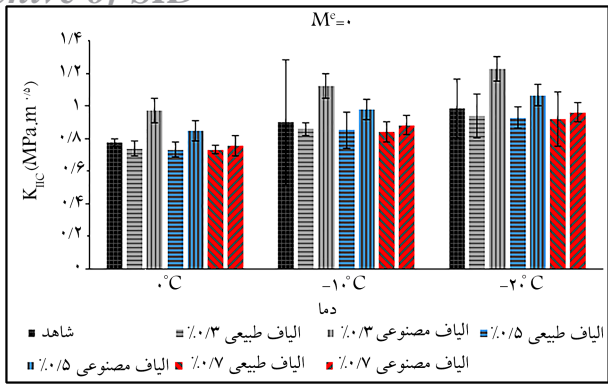


شکل ۱۰. تأثیر کاهش دما در چقرمگی شکست مخلوط آسفالت نیمه گرم حاوی درصد‌های مختلف الیاف مصنوعی در مودهای مختلف بارگذاری.

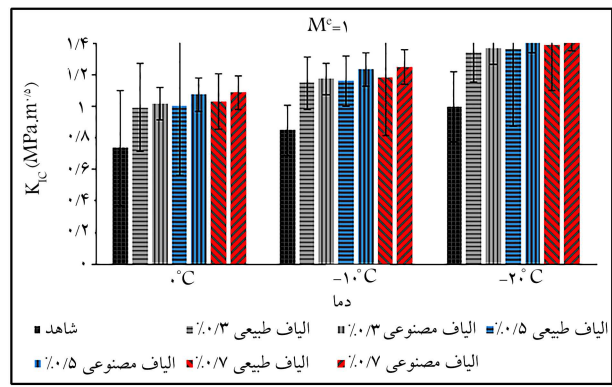
حاوی ۰/۳٪ الیاف ندارد؛ بنابراین می‌توان گفت درصد بهینه الیاف در مخلوط‌های آسفالت نیمه گرم مورد مطالعه حدود ۰/۳٪ است. مطالعاتی در سال ۱۴۰۱، ۲۰۱۴ [۱۴] نیز که در آن چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالت نیمه گرم حاوی افزودنی‌های شیمیایی در مود I بررسی شده است، نشان می‌دهد که کاهش دما منجر به افزایش چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم می‌شود.

چقرمگی شکست نمونه‌های آسفالت نیمه گرم حاوی الیاف طبیعی یا مصنوعی در مود کشش خالص و مود ترکیبی با سهم بیشتر کشش مشاهده می‌شود؛ در حالی که الیاف مورد استفاده، اثر منفی در چقرمگی شکست نمونه‌های آسفالت نیمه گرم در مود برش خالص داشته است. با توجه به اینکه چقرمگی شکست نمونه‌های حاوی ۰/۵ یا ۰/۷ درصد الیاف تفاوت چندانی با چقرمگی شکست نمونه‌های





شکل ۱۴. مقایسه‌ی تأثیر الیاف طبیعی و مصنوعی بر چقرمگی شکست مخلوط آسفالت نیمه‌گرم در مود برش خالص.



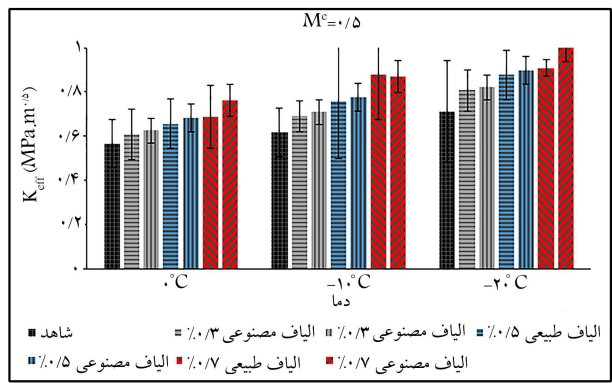
شکل ۱۱. مقایسه‌ی تأثیر الیاف طبیعی و مصنوعی بر چقرمگی شکست مخلوط آسفالت نیمه‌گرم در مود کشش خالص.

تقریباً ۲ تا ۶ درصد در مود برش خالص ۳ تا ۳۰ درصد بهبود مشاهده می‌شود. از جمله دلایل این امر را می‌توان در مقاومت کششی بیشتر الیاف آرامید موجود در الیاف مصنوعی نسبت به الیاف طبیعی برشمرد. از طرفی به علت آنکه نقطه‌ی ذوب پلی اولفین موجود در الیاف مصنوعی کمتر از درجه‌ی اختلاف قیر و مصالح سنگی است، بنابراین این جزء از الیاف مصنوعی می‌تواند به عنوان یک اصلاح‌کننده‌ی قیر و در نتیجه در جهت بهبود مقاومت آسفالت نیمه‌گرم عمل کند.

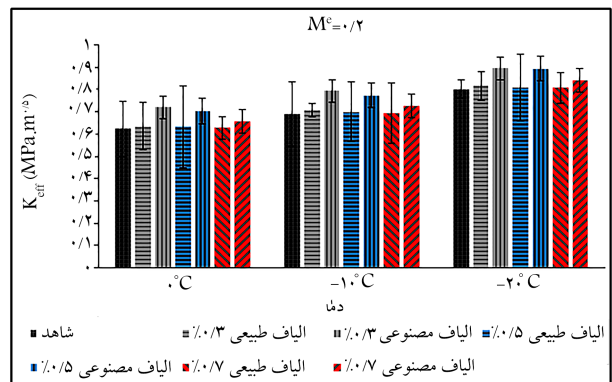
## ۷. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، به منظور ارزیابی چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم حاوی الیاف طبیعی و مصنوعی در سه درصد مختلف و در دماهای ۰، -۱۰ و -۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، ابتدا نمونه‌های آسفالت نیمه‌گرم به روش تراکم چرخشی متراکم شدند، سپس با برش آن‌ها، نمونه‌های نیم‌دیسک ترک‌دار تهیه شد. براساس اندازه‌گیری نیروی شکست بحرانی و در ادامه، محاسبه‌ی ضریب شدت تنش بحرانی (چقرمگی شکست) مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم و تحلیل‌های صورت گرفته، موارد زیر را می‌توان به عنوان نتیجه‌گیری پژوهش حاضر برشمرد:

- در نمونه‌های آسفالتی نیمه‌گرم حاوی الیاف طبیعی یا مصنوعی، بیشترین افزایش ضریب شدت تنش مؤثر ابتدا برای مود  $I (M^e = 1)$  و سپس برای مود ترکیبی با سهم برابر کشش و برش ( $M^e = 0.5$ ) اتفاق می‌افتد. افزایش ۳۵ تا ۴۸ درصدی ضریب شدت تنش در مود کشش خالص نشان می‌دهد الیاف مورد استفاده منجر به بهبود مقاومت کششی نمونه‌های آسفالت نیمه‌گرم نسبت به نمونه‌های شاهد شده‌اند.
- با کاهش دما، چقرمگی شکست (ضریب شدت تنش بحرانی) نمونه‌های آسفالت نیمه‌گرم حاوی الیاف طبیعی یا مصنوعی افزایش می‌یابد. در این ارتباط، بهبود چقرمگی شکست نمونه‌های آسفالت نیمه‌گرم حاوی الیاف طبیعی یا مصنوعی در مود کشش خالص و مود ترکیبی با سهم بیشتر کشش مشاهده می‌شود. مقدار این افزایش در دو حالت مذکور، به ترتیب برابر ۱۵ تا ۳۴ درصد و ۹ تا ۳۲ درصد است.
- در تمام موده‌های بارگذاری و در تمام دماهای آزمایش، به ازای درصد مساوی از الیاف، تأثیر الیاف مصنوعی در بهبود چقرمگی شکست آسفالت نیمه‌گرم بیشتر از الیاف طبیعی است. این بهبود با افزایش سهم رفتار برش، بیشتر نمایانگر می‌شود؛ به طوری که در مود کشش خالص تقریباً ۲ تا ۶ درصد و در مود برش خالص ۳ تا ۳۰ درصد بهبود مشاهده می‌شود.



شکل ۱۲. مقایسه‌ی تأثیر الیاف طبیعی و مصنوعی بر چقرمگی شکست مخلوط آسفالت نیمه‌گرم در مود ترکیبی با سهم مساوی کشش و برش.



شکل ۱۳. مقایسه‌ی تأثیر الیاف طبیعی و مصنوعی بر چقرمگی شکست مخلوط آسفالت نیمه‌گرم در مود ترکیبی با سهم بیشتر برش.

## ۳.۶. اثر نوع الیاف در چقرمگی شکست آسفالت نیمه‌گرم

شکل‌های ۱۱ الی ۱۴، تأثیر الیاف طبیعی و مصنوعی بر ضریب شدت تنش بحرانی (چقرمگی شکست) نمونه‌های آسفالت نیمه‌گرم را به‌طور مقایسه‌ی نشان می‌دهند. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، در تمام موده‌های بارگذاری و در تمام دماهای آزمایش، به ازاء درصد مساوی از الیاف، تأثیر الیاف مصنوعی در بهبود چقرمگی شکست آسفالت نیمه‌گرم بیشتر از الیاف طبیعی بوده است. این بهبود با افزایش سهم رفتار برش، بیشتر نمایان می‌شود؛ به طوری که در مود کشش خالص،

1. warm-mix asphalt
2. hot-mix asphalt
3. fracture toughness
4. Evotherm
5. solid-form paraffin wax
6. semi-circular bend
7. Rheofalt
8. Advera
9. overlay test
10. bio-based/chemical additives
11. disk compact tension (DCT)
12. Gyrotory compactor
13. Lignin
14. Pentosan

### (References) منابع

1. Angelo, J.D., Harm, E., Bartoszek, J. and et al., "Warm mix asphalt: European practice", Federal Highway Administration Reports FHWA-PL-08-007 (2008).
2. Novak, M., Birgisson, B. and Roque, R. "Near-surface stress states in flexible pavements using measured radial tire contact stresses and ADINA", *Comput. Struct.*, **81**(8-11), pp. 859-870 (2003).
3. Braham, A., Buttlar, W. and Ni, F. "Laboratory mixed-mode cracking of asphalt concrete using the single-edge notch beam", *Road Mater. Pav. Des.*, **11**(4), pp. 947-968 (2010).
4. Li, X. and Marasteanu, M. "The fracture process zone in asphalt mixture at low temperature", *Eng. Fract. Mech.*, **77**(7), pp. 1175-1190 (2010).
5. Ameri, M., Mansourian, A., Heidary Khavas, M. and et al. "Cracked asphalt pavement under traffic loading - a 3D finite element analysis", *Eng. Fract. Mech.*, **78**(8), pp. 1817-1826 (2011).
6. Anderson, T.L. "Fracture mechanics: Fundamentals and applications", CRC Press (2005).
7. Ayatollahi, M.R. "Crack propagation in asphalt concrete under mixed mode I/II loading (in low temperature)", Transportation institute, Tehran (2012).
8. Yoo M.Y., Jeong S.H., Park J.Y. and et al. "Low-temperature fracture characteristics of selected warm-mix asphalt concretes", *Transp. Res. Rec.*, **2208**(1), pp. 40-47 (2011).
9. Ziari, H., Behbahani, H., Izadi, A. and et al. "Long term performance of warm mix asphalt versus hot mix asphalt", *J. Cent. South. Univ.*, **20**(1), pp. 256-266 (2013).
10. Behbahani, H., Aliha, M.R.M., Fazaeli, H. and et al. "Experimental fracture toughness study for some modified asphalt mixtures", *Adv. Mater. Res.*, **723**, pp. 337-344 (2013).
11. Hill, B., Behnia, B., Hakimzadeh, S. and et al. "Evaluation of low-temperature cracking performance of warm mix asphalt mixtures", *J. Trans. Res. Rec.*, **2294**(1), pp. 81-88 (2012).
12. Fazaeli, H., Samin, Y., Pirnoun, A. and et al. "Laboratory and field evaluation of the warm fiber reinforced high performance asphalt mixtures (case study Karaj-Chaloos Road)", *Constr. and Build. Mater.*, **122**, pp. 273-283 (2016).
13. Gu, F., Zhang, Y., Luo, X. and et al. "Improved methodology to evaluate fracture properties of warm-mix asphalt using overlay test", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **2506**(2506), pp. 8-18 (2015).
14. Podolsky, J.H., Buss, A., Williams, R.C. and et al. "Comparative performance of bio-derived/chemical additives in warm mix asphalt at low temperature", *Mater. and Struct.*, **49**(1), pp. 563-575 (2016).
15. Podolsky, J.H., Buss, A., Williams, R.C. and et al. "Effect of bio-derived/chemical additives on warm mix asphalt compaction and mix performance at low temperature", *Cold Regions Science and Technology*, **136**, pp. 52-61 (2017).
16. Smith, D.J., Ayatollahi, M.R. and Pavier, M.G. "The role of T-stress in brittle fracture for linear elastic materials under mixed mode loading", *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, **24**(2), pp. 137-150 (2001).
17. Ayatollahi, M.R. and Aliha, M.R.M. "Wide range data for crack tip parameters in two disc-type specimens under mixed mode loading", *Comput. Mater. Sci.*, **38**(4), pp. 660-670 (2007).
18. Fazaeli, H., Behbahani, H., Amini, A.A. and et al. "High and low temperature properties of FT paraffin modified bitumen", *Adv. Mater. Sci. Eng.*, **2012**, 7 p. (2012).
19. Hurley, G. and Prowell, B. "Evaluation of Sasobit for use in warm mix asphalt", National Center for Asphalt Technology, Report 05-06, Auburn, Alabama (2005).
20. Khan, M.A., Shehrzade, S., Sarwar, M. and et al. "Effect of pretreatment with UV radiation on physical and mechanical properties of photocured Jute yarn with 1,6-hexanediol diacrylate (HDDA)", *J. Polym. and the Environ.*, **9**(3), pp. 115-124 (2002).
21. Asphalt Institute (AI), "Superpave mix design, superpave series No. 2 (SP-2), 3ed. edition, (2001).
22. Kaloush, K.E., Biligiri, K.P., Zeiada, W.A. and et al. "Evaluation of fiber-reinforced asphalt mixtures using advanced material characterization tests", *Journal of Testing and Evaluation*, **38**(4), pp. 400-411 (2010).