

بررسی آزمایشگاهی چقرمگی شکست بتن‌های آسفالتی تحت مودهای ترکیبی کششی-برشی

محمد رضا محمد علیها^{۱*} - محمد حسین رضایی فر^۲ - حسن فضائلی^۳

۱. استادیار-دانشگاه علم و صنعت ایران

۲. کارشناسی ارشد-دانشگاه علم و صنعت ایران

۳. دانشجوی دکترا-دانشگاه علم و صنعت ایران

mrm-aliha@iust.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۳/۱]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۲/۹/۹]

چکیده - یکی از مهم‌ترین خرابی‌های ایجاد شده برای جاده‌ها، پدیده ترک‌خوردگی رویه‌های آسفالتی در شرایط دمایی پایین است. تغییرات مشخصات بتن آسفالتی (مانند نوع قیر، جنس مصالح، نوع دانه‌بندی و درصد فضای خالی) تأثیر زیادی در رفتار ترک‌خوردگی آن‌ها دارد. از آنجا که اصلی‌ترین خرابی روکش‌های آسفالتی (ایجاد ترک‌های انعکاسی) تحت بارگذاری مود ترکیبی کششی-برشی ناشی از عبور وسائط نقلیه است، در این پژوهش به بررسی آزمایشگاهی تأثیر مشخصات بتن آسفالتی بر مقاومت ترک‌خوردگی (چقرمگی شکست) مود ترکیبی آن‌ها در شرایط دمایی پایین پرداخته می‌شود. بدین منظور، از آزمایش قطعه نیمه دیسک با ترک لبه ای (SCB) و تحت بارگذاری خمش سه نقطه‌ای استفاده شد. دو جنس مصالح سنگی، دو نوع دانه‌بندی و دو نوع قیر که معمولاً در روسازی راه‌های ایران استفاده می‌شود، در ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی به کار گرفته شد. از نمونه‌های استوانه‌ای به دست آمده از دستگاه تراکم ژیراتوری و تحت دوران‌های ۳۵، ۷۰ و ۹۰ دور چرخش، برای تهیه نمونه‌های SCB استفاده شد و برای در نظر گرفتن تأثیر فضای خالی از تلورانس $\pm 0.5\%$ برای بارگذاری با مود کششی غالب‌تر و $\pm 0.8\%$ برای بارگذاری با مود برشی غالب‌تر استفاده گردید. بررسی نمودار بار-جابجایی نمونه‌های آزمایش شده در دمای ۱۵- درجه سلسیوس، نمایانگر این مطلب بود که رفتار شکست آسفالت تحت این شرایط خطی است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که خصوصیات بتن آسفالتی تأثیر قابل توجهی بر مقدار چقرمگی شکست این بتن‌ها دارد اما با افزایش درجه مود برشی، تأثیر درصد فضای خالی و اندازه دانه‌ها در رفتار ترک خوردگی بتن آسفالتی کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی: بتن آسفالتی، چقرمگی شکست دمای پایین، نمونه خمشی نیم دایره‌ای (SCB)، مودهای ترکیبی کششی-برشی

۱. مقدمه

است. به طور کلی ترک‌ها در اجسام و قطعات، بسته به نوع بارگذاری به چندین صورت (مود) تغییر فرم می‌یابند. این مودها عبارتند از:

- مود I بارگذاری یا مود بازشونده: اگر قطعه ترک‌دار به گونه‌ای تحت بارگذاری قرار گیرد که سطوح ترک نسبت به هم فقط باز شوند قطعه تحت مود I بارگذاری است (شکل ۱).

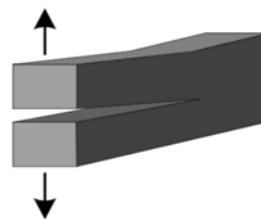
معمولاً ترک‌های مختلفی در رویه آسفالتی ایجاد می‌شود که از متداول‌ترین آن‌ها ترک‌های حرارتی، ترک‌های خستگی و ترک‌های انعکاسی است. پژوهش‌های انجام شده در مورد رویه‌های آسفالتی نشان می‌دهد که مکانیک شکست یک ابزار مناسب و توانا برای بررسی رفتار شکست بتن‌های آسفالتی و همچنین تحلیل شرایط شروع رشد ترک در آن‌ها

وقتی که میزان تنش‌های حرارتی از مقدار استحکام رویه‌های آسفالتی بیشتر می‌شود، در محل ترک‌های مویی موجود در رویه‌های آسفالتی، ترک‌هایی ایجاد می‌شود. این نوع ترک‌ها عموماً تحت مود I بارگذاری ایجاد می‌شود. با عبور چرخ از روی رویه ترک خورده (اعمال بارگذاری ترافیکی)، مود II ترک خوردگی نیز اتفاق می‌افتد [۲ و ۳]. در مورد رویه‌های کامپوزیت که رویه آسفالتی بر روی دال بتن سیمانی قرار می‌گیرد هنگامی که چرخ‌ها از محل درز دال بتن سیمانی عبور می‌کنند رویه‌های آسفالتی تحت ترکیب هم‌زمان مود I و مود II (مود ترکیبی) قرار می‌گیرد که در آن حتی مود برشی غالب نیز است [۴]. همچنین مهم‌ترین عامل ایجاد و گسترش ترک در روکش‌های آسفالتی، ترکیب تنش‌های کششی و برشی است [۵]. افزایش تنش‌های کششی و برشی در کف روکش که از مناطق بحرانی ترک خوردگی است، خطر ترک خوردگی روکش و انعکاس ترک‌های قدیمی را به بدنه آن افزایش می‌دهد [۶].

احتمال وقوع و گسترش ترک در دماهای پایین‌تر از صفر درجه سلسیوس به دلیل رفتار شکننده آسفالت افزایش می‌یابد. با توجه به رفتار الاستیک بتن‌های آسفالتی در دماهای پایین، استفاده از مبانی مکانیک شکست الاستیک خطی به منظور بررسی رفتار شکست مخلوط‌ها و بتن‌های آسفالتی روش مناسبی است. در این روش ضریب شدت تنش به عنوان پارامتر اساسی در تشریح رفتار شکست و معیار شروع و گسترش ترک در بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد. ارتباط بین ضریب شدت تنش و تنش‌های وارده به یک المان در نزدیکی نوک ترک، مطابق روابط ۱ تا ۳ است [۲ و ۴].

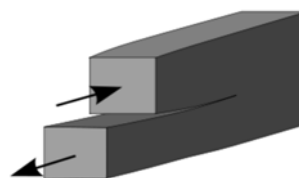
$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \right] + H.O.T \quad (1)$$

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



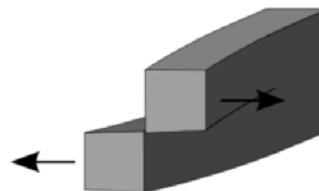
شکل ۱- مود I بارگذاری یا مود بازشونده

- مود II بارگذاری یا مود برشی: در مود II بارگذاری، لغزش وجوه ترک در راستای موازی با صفحه ترک و عمود بر جبهه ترک است (شکل ۲).



شکل ۲- مود II بارگذاری یا مود برشی

- مود III بارگذاری یا مود پارگی^۱: در مود III بارگذاری، لغزش وجوه ترک در راستای موازی با صفحه ترک و موازی با جبهه ترک است (شکل ۳).



شکل ۳- مود III بارگذاری یا مود پارگی

در مود II و مود III بارگذاری هیچ‌گونه بازشدگی دهانه ترک وجود ندارد. 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 [۱].

۱. Tearing Mode

را مورد بررسی قرار دادند [۹]. آن‌ها پژوهش خود را برای دو حالت مود کششی خالص و مود ترکیبی کششی-برشی انجام دادند. از آنجا که ترک‌خوردگی در دماهای پایین و زیر صفر در مناطق سردسیر بیشتر دیده می‌شود و از طرفی خواص استحکامی بتن آسفالتی به عنوان یک ماده کامپوزیت متأثر از خصوصیات مشخصه آسفالت مانند نوع دانه‌بندی، نوع قیر و اندازه سنگدانه‌ها است، در این پژوهش به بررسی تأثیر خصوصیات بتن‌های آسفالتی مختلف بر میزان مقاومت در برابر رشد ترک تحت مود ترکیبی I و II در دمای پایین پرداخته می‌شود و مقادیر چقرمگی شکست متناظر با هر حالت به طریق آزمایشگاهی محاسبه شده و تغییرات آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

انتخاب قطعه آزمایشگاهی مناسب برای انجام آزمایش‌های چقرمگی شکست

برای اینکه یک نمونه آزمایشگاهی بتواند روند ترک‌خوردگی بتن آسفالتی را به خوبی توصیف کند باید موارد زیر در مورد آن رعایت شده باشد [۱۰]:

۱- تحت مود بارگذاری مورد نظر قرار گرفته و توانایی ایجاد حالت‌های مختلف تنش متناسب با شرایط بارگذاری واقعی اعمالی به رویه را داشته باشد

۲- سادگی انجام آزمایش چقرمگی شکست (ساخت نمونه، در دسترس بودن دستگاه و فیکسچرهای مورد نیاز و غیره)

۳- راحتی مغزه‌گیری میدانی در صورت نیاز

از این‌رو به منظور بررسی رفتار شکست و گسترش ترک بتن آسفالتی گرم، روش‌ها و قطعات آزمایشگاهی متعددی به وسیله‌ی پژوهشگران مختلف پیشنهاد شده است که از جمله آن می‌توان به آزمایش تیر با ترک لبه‌ای و تحت بار خمشی سه و یا چهار نقطه‌ای (قطعه SENB^۵) [۴ و ۱۰]،

$$\sigma_{r\theta} = \frac{1}{2\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} [K_I \sin \theta + K_{II} (3 \cos \theta - 1)] + H.O.T \quad (۳)$$

که در آن r و θ مولفه‌های مختصات قطبی و $\sigma_{r\theta}$ و σ_{rr} ، $\sigma_{\theta\theta}$ مولفه‌های تنش در سیستم مختصات قطبی است. K_I و K_{II} ضرایب شدت تنش نوک ترک متناظر با مودهای I و II (کششی و برشی) 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 تکین بوده و بیانگر ضرایب شدت تنش مودهای I و II شکست است. سایر جملات این بسط سری (که در روابط فوق با H.O.T نشان داده شده است) غیر تکین بوده و در بسیاری از منابع مکانیک شکست معمولاً از اثر آن‌ها در نزدیکی نوک ترک چشم‌پوشی شده، و فرض می‌شود که ضرایب شدت تنش به تنهایی می‌توانند توصیف مناسبی از میدان تنش نوک ترک ارائه دهند. در آستانه شکست و رشد ترک، مقدار ضریب شدت تنش نوک ترک با ضریب شدت تنش بحرانی ماده (یا چقرمگی شکست که خاصیت ذاتی هر ماده ترک‌دار محسوب می‌شود) برابر می‌گیرد بنابراین می‌توان شرایط شکست هر نمونه ترک‌دار را با دانستن ضرایب شدت تنش و معیارهای تحلیلی موجود به خوبی تخمین زد. نوع بتن آسفالتی می‌تواند تأثیر زیادی بر عملکرد، استحکام و رفتار شکست و رشد ترک رویه آسفالتی داشته باشد. لی^۲ و همکارانش تأثیر خصوصیات بتن آسفالتی بر رفتار شکست را تحت شرایط مود کششی مورد مطالعه قرار دادند [۷]. آن‌ها همچنین تغییرات شرایط بارگذاری و دما را بر روند گسترش ترک در شرایط مود I بارگذاری بررسی کردند [۸]. آرتمندلی^۳ و خالد^۴ رفتار گسترش ترک برای دو بتن آسفالتی با دانه‌بندی پیوسته و استخوان‌بندی سنگدانه‌ای

2. -Li

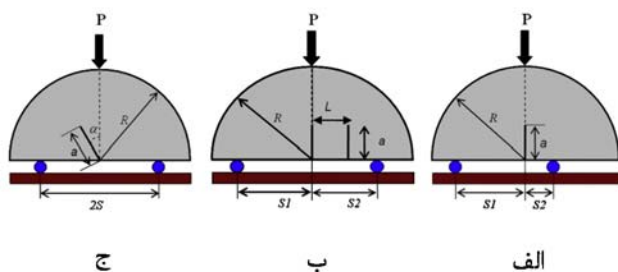
۳. Artamendi

۴. Khalid

۵. Single - Edge Notched Beam

مستطیل شکل با ترک لبه‌ای و تحت بار خمشی سه نقطه‌ای تنها قادر به ایجاد حالت‌های محدودی از بارگذاری مود ترکیبی بوده و خصوصا شرایط بارگذاری مود برشی خالص با این قطعه بوجود نمی‌آید. در نتیجه تعداد زیادی از پژوهشگران از قطعه SCB برای انجام آزمایش‌های چقرمگی شکست بتن آسفالتی تحت شرایط مختلف بارگذاری استفاده کرده‌اند [۷، ۸، ۹، ۱۳].

آیت‌اللهی و همکاران تعداد زیادی تحلیل المان محدود برای تعیین پارامترهای شکست نمونه SCB با ترک قائم و ترک زاویه‌دار انجام دادند [۱۴ و ۱۵]. آن‌ها تغییرات ضرایب شدت تنش مودهای I و II را در قطعه SCB برای طول ترک‌های مختلف، فواصل S1, S2 مختلف، زوایای مختلف α و نیز مقادیر متفاوت L بررسی کردند. اخیرا عامری و همکاران به منظور بررسی رفتار گسترش ترک در بتن آسفالتی، از قطعه SCB و با ترک‌های قائم استفاده کرده و برای ایجاد مودهای ترکیبی از جابه‌جایی تکیه‌گاه (شکل ۴-الف) و همچنین جابه‌جایی ترک قائم نسبت به مرکز نمونه (شکل ۴-ب) استفاده کردند [۱۳].



شکل ۴- حالت‌های مختلف ایجاد مود ترکیبی در نمونه SCB [۱۳]

در این مقاله از جابه‌جایی تکیه‌گاه (شکل ۴-الف) به منظور ایجاد مود ترکیبی در آزمایش‌های چقرمگی شکست بتن آسفالتی استفاده می‌شود.

برنامه آزمایشگاهی

در برنامه آزمایشگاهی این پژوهش، تأثیر جنس مصالح، نوع دانه‌بندی، نوع قیر و درصد فضای خالی بر چقرمگی

آزمایش نمونه نیم دایره خمشی (قطعه SCB^۶) [۷ و ۸]، آزمایش نمونه متراکم دیسک شکل کششی (قطعه DCT^۷) [۱۱] و همچنین آزمایش کشش غیر مستقیم (قطعه IDT^۸) [۱۲] اشاره کرد. به عنوان مثال، وگانر^۹ و همکاران از نمونه‌های SENB برای بررسی رفتار شکست آسفالت استفاده کردند [۱۰]. آن‌ها برای ایجاد مودهای ترکیبی کششی- برشی از جابه‌جایی ترک نسبت به محور مرکزی قطعه تیر مستطیل شکل برای یک نمونه آسفالت بهره گرفتند. از میان قطعات یاد شده، قطعه نیم دایره شکل تحت بار خمشی سه نقطه‌ای (SCB)، نمونه مناسب‌تری برای انجام آزمایش‌های چقرمگی شکست بتن آسفالتی است. چرا که این 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. قطعه SCB یک نیم‌دایره به شعاع R و ضخامت t است که در آن یک ترک لبه‌ای به طول a وجود داشته و با اعمال بار P به صورت خمشی سه نقطه‌ای تحت بار قرار می‌گیرد. علاوه بر سادگی هندسی قطعه و بارگذاری آن، این قطعه توانایی ایجاد حالت‌های مختلف مود ترکیبی کششی- برشی (مود I/II) را نیز دارد. مطابق آنچه در شکل ۴ نشان داده شده است، با تغییر فاصله تکیه‌گاه‌های پایینی قطعه نسبت به ترک لبه‌ای واقع در وسط قاعده قطعه (فواصل S2, S1 در شکل ۴-الف)، یا با تغییر محل ترک از وسط قطعه (تغییر L در شکل ۴-ب)، یا با تغییر زاویه ترک لبه‌ای نسبت به راستای قائم (تغییر زاویه α در شکل ۴-ج) می‌توان به حالت‌های مختلفی از کشش خالص (مود I خالص) تا برش خالص (مود II خالص) دست یافت. این در حالیست که برخی از قطعات آزمایشگاهی مانند قطعه تیر

۶. Semi Circular Bending
۷. Disk Compact Tension
۸. Indirect Tensile Strength
۹. Wogoner

جدول ۲- مقادیر قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی

نام مخلوط	درصد قیر بهینه
مخلوط مصالح سنگی سیلیسی، دانه‌بندی شماره ۴ و قیر ۶۰/۷۰	۵/۳٪
مخلوط مصالح سنگی آهکی دانه‌بندی شماره ۴ و قیر ۶۰/۷۰	۴/۸٪
مخلوط مصالح سنگی آهکی دانه‌بندی شماره ۴ و قیر ۸۵/۱۰۰	۴/۶٪
مخلوط مصالح سنگی آهکی دانه‌بندی شماره ۶ و قیر ۶۰/۷۰	۵/۷٪

برای تهیه نمونه‌های SCB، ابتدا نمونه‌های استوانه‌ای با وزن مصالح سنگی ۴۷۰۰ گرم تهیه شد (این مقدار مصالح سنگی بیشینه مقدار ممکن برای تراکم یکنواخت نمونه‌های آسفالتی با استفاده از تراکم ژیراتوری است). علت استفاده از این روش این است که در این روش امکان کنترل خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی از جمله درصد فضای خالی وجود دارد به گونه‌ای که نمونه‌هایی که با استفاده از این روش تهیه شده‌اند دارای خواص مکانیکی نسبتاً یکنواخت است [۱۷].

با توجه به اینکه یکی از اهداف این پژوهش بررسی تأثیر درصد فضای خالی بتن آسفالتی روی چقرمگی شکست می‌باشد، بتن‌های آسفالتی با تعداد دورهای ۹۰، ۷۰ و ۳۵ ضربه متراکم شدند. نمونه‌ها باید با فشار $600 \pm 18 \text{ kPa}$ متراکم شوند در غیر این صورت نمونه متراکم شده قابل استفاده برای آزمایش نیست. با توجه به وزن مصالح ریخته شده در داخل قالب ارتفاع نمونه در حدود $115 \pm 5 \text{ mm}$ و قطر نمونه ۱۵۰ میلی‌متر به دست آمد [۱۷]. شکل ۵ نمونه استوانه‌ای ساخته شده در دستگاه تراکم ژیراتوری را نشان می‌دهد.

شکست مود ترکیبی I و II و در دمای پایین مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور از مصالح سنگی سیلیسی و آهکی با بیشینه سایش لوسانجلس ۲۳٪ و ۱۳٪ استفاده شد. این مصالح به ترتیب از مناطق شهریار و معدن اسب چران دماوند تهیه شدند. همچنین به منظور بررسی تأثیر نوع دانه‌بندی از حد وسط دانه‌بندی شماره ۴ و ۶ آیین نامه روسازی راه‌های ایران - نشریه ۲۳۴ که مقادیر مانده بر روی الک‌های استاندارد مطابق جدول ۱ است، استفاده شد [۱۶]. همچنین به منظور بررسی نوع قیر از دو نوع قیر ۸۵/۱۰۰ و ۶۰/۷۰ تهیه شده از پالایشگاه تهران به ترتیب با درجه نفوذ ۹۰ و ۶۶ ساخت نمونه‌های آسفالتی استفاده شد.

جدول ۱- مقادیر مانده روی الک‌های استاندارد

الک‌های استاندارد	دانه‌بندی شماره ۴	دانه‌بندی شماره ۶
اینچ $\frac{1}{2}$	۵٪	۰٪
اینچ $\frac{3}{8}$	-	۰٪
شماره ۴	۳۶٪	۱۰٪
شماره ۸	۱۶٪	۷/۵٪
شماره ۱۶	-	۲۲/۵٪
شماره ۳۰	-	۱۵٪
شماره ۵۰	۳۰٪	۲۱/۵٪
شماره ۱۰۰	-	۱۲٪
شماره ۲۰۰	۷٪	۵/۵٪
فیلر	۶٪	۶٪

به منظور تعیین قیر بهینه از طرح اختلاط به روش مارشال استفاده شد که مقادیر آن مطابق جدول ۲ می‌باشد.

میلی متر برش داده شد. شکل ۶ چگونگی برش نمونه‌های استوانه‌ای را نشان می‌دهد. پس از تهیه نمونه‌های دیسک شکل، با نصف کردن آنها، نمونه‌های نیم دایره‌ای حاصل شده و سپس به منظور ترک‌دار کردن نمونه از یک تیغه برشی دورانی بسیار نازک به ضخامت ۰/۵ میلی متر در وسط لبه‌ی تخت نمونه استفاده شد.



شکل ۶- چگونگی برش نمونه استوانه‌ای آسفالتی با دیسک گردان

لازم به ذکر است که کلیه ترک‌های ایجاد شده در وسط نمونه دارای طول ۲۰ میلی متر بوده و همگی به لبه‌ی تخت قطعه عمود بودند. همان‌گونه که اشاره شد، در قطعه‌ی SCB، با جابه‌جایی تکیه‌گاه‌ها می‌توان به ترکیب‌های مختلفی از مود کششی و برشی دست یافت. حالت متقارن بارگذاری $S_1 = S_2$ متناظر با مود I خالص است. با ثابت نگه‌داشتن S_1 و حرکت تکیه‌گاه S_2 به سمت ترک (در شکل ۴-الف) مشارکت مود برشی (مود II) بارگذاری نیز در تغییر فرم ترک علاوه بر مود I، مشاهده می‌شود [۱۳] و [۱۵]. بنابراین در این پژوهش برای بررسی تأثیر هم‌زمان برش و کشش در رفتار شکست نمونه‌های آسفالتی، دو حالت مود ترکیبی I و II مورد آزمایش قرار گرفت: حالت (الف) مود ترکیبی I و II با اثر مود کششی بیشتر و حالت (ب) مود ترکیبی I و II با درجه مود برشی بیشتر. برای رسیدن به این دو حالت با توجه به تحلیل‌های المان محدود



شکل ۵- نمونه استوانه‌ای ساخته شده به روش ژیراتوری

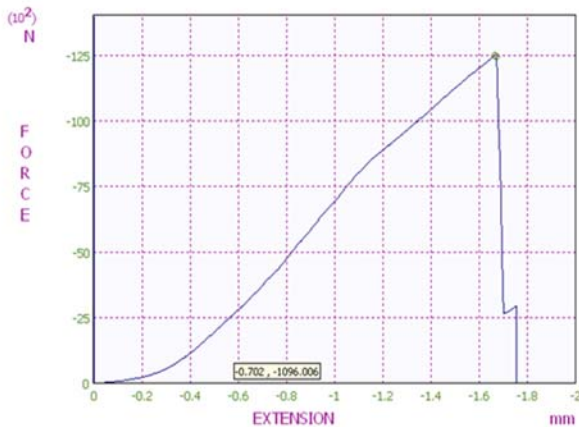
برای تعیین درصد فضای خالی لازم است که وزن مخصوص ماکزیمم مخلوط‌های آسفالتی بر طبق استاندارد AASHTO T-209 [۱۸] و همچنین وزن مخصوص حقیقی نمونه‌های آسفالتی متراکم شده بر طبق استاندارد AASHTO T-331 [۱۹] تعیین شود. با استفاده از رابطه زیر درصد فضای خالی (V_a) هر یک از نمونه‌های استوانه‌ای به دست می‌آید.

$$V_a = 100 \times \frac{(G_{mm} - G_{mb})}{G_{mm}} \quad (۴)$$

که در آن G_{mm} وزن مخصوص ماکزیمم بتن آسفالتی و G_{mb} وزن مخصوص حقیقی نمونه آسفالتی است. بدین ترتیب درصد فضای خالی در نمونه‌های تولید شده در محدوده ۴٪ و ۶٪ به دست آمد. برای ایجاد نمونه‌ها به شکل SCB لازم است که نمونه‌های استوانه‌ای به صورت دیسک برش داده شوند. برای برش نمونه‌های آسفالتی، دستگاه برش با دیسک گردان استفاده شد که به دلیل سطح هموار و حذف گرمای ایجاد شده به دلیل استفاده از آب در هنگام برش بسیار مناسب است. به منظور برش یکنواخت نمونه‌های استوانه‌ای از یک قید و بند مناسب استفاده شد. بدین ترتیب ۴۵ نمونه دیسک استوانه‌ای به قطر ۱۵۰ میلی متر و ضخامت ۳۰



شکل ۷- نمونه SCB ساخته شده از بتن آسفالتی تحت بارگذاری خمش سه نقطه‌ای.



شکل ۸- نمودار بار- جابه‌جایی برای یکی از قطعات SCB آزمایش شده در دمای 15°C

برای هر حالت مشخص بارگذاری ۳ قطعه‌ی SCB با موفقیت مورد آزمایش قرار گرفت تا بتوان میانگین مناسبی از میزان چقرمگی شکست آسفالت برای هر حالت بارگذاری به دست آورد. شکل ۷، یک نمونه بارگذاری خمش سه نقطه‌ای و تکیه‌گاه‌های مورد استفاده برای انجام این آزمایش را نشان می‌دهد. در طول آزمایش نتایج بار- جابه‌جایی مربوط به هر قطعه به وسیله‌ی رایانه دستگاه آزمایش ثبت شد. بررسی نمودار بار- جابه‌جایی بیانگر رفتار خطی بتن آسفالتی قبل از شکست است. شکل ۸، نمونه‌ای از منحنی‌های بار- جابه‌جایی به دست آمده را نشان می‌دهد.

نتایج و تحلیل آن‌ها

با توجه به خطی بودن رفتار نمونه‌ها با استفاده از بار بحرانی

انجام شده این قطعه به وسیله‌ی آیت‌اللهی و همکاران مقادیر S_2 و S_1 بدین صورت در نظر گرفته شد: برای حالت (الف) $S_1 = 22\text{mm}, S_2 = 50\text{mm}$ و برای حالت (ب): $S_1 = 15\text{mm}, S_2 = 50\text{mm}$ [۱۳ و ۱۵]. بدین ترتیب پارامتر مود ترکیبی M^e که نسبت مشارکت مود I و II را نشان می‌دهد و با رابطه ۵ تعریف می‌شود برای دو حالت (الف) و (ب) به ترتیب برابر $0/8$ و $0/38$ محاسبه می‌شود

$$M^e = \frac{2}{\pi} \text{tg}^{-1} \left(\frac{K_I}{K_{II}} \right) \quad (5)$$

در نتیجه برای انجام آزمایش‌ها، فاصله‌ی تکیه‌گاه‌های پایینی نگه‌دارنده قطعه آزمایش خمش سه نقطه‌ای (با توجه به شکل ۴ - الف) در مقادیر فوق تنظیم شده و با قرار دادن نمونه‌های SCB ساخته شده از بتن آسفالتی بر روی تکیه‌گاه، آزمایش شکست انجام شد؛ و همچنین با توجه به دمای در نظر گرفته شده برای آزمایش‌ها (15°C -)، قبل از انجام آزمایش، نمونه‌ها در داخل یخچال به مدت ۶ ساعت در دمای 15°C - نگه‌داری شد. آزمایش شکست با استفاده از دستگاه کشش ساخت شرکت ایرانی سنتام (مدل ۱۵۰

STM) با ظرفیت بارگذاری کششی - فشاری معادل ۵ kN انجام شد. این دستگاه قابلیت اعمال انواع بارگذاری‌های کششی، فشاری و خمشی و با نرخ‌های متفاوت را دارد. در این پژوهش نمونه‌های آسفالتی با نرخ ثابت $3 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ و به صورت فشاری مورد آزمایش قرار گرفتند. نرخ بارگذاری در نظر گرفته شده که نسبتاً سریع است، برای کم کردن آثار تغییر دمای نمونه در نظر گرفته شد. با توجه به نرخ بارگذاری سریع و کوتاه بودن زمان شروع آزمایش تا شکست نمونه در آزمایش‌های استاتیکی انجام شده (که کمتر از ۶۰ ثانیه است) و از طرفی زمان نسبتاً زیاد قرار گیری نمونه‌ها در داخل یخچال می‌توان انتظار داشت در حین انجام آزمایش افت دمایی ناچیزی در نمونه صورت گرفته، و رفتار الاستیک بتن آسفالتی حفظ شود. البته شایان ذکر است که هرگونه تاثیر احتمالی افت دمای نمونه‌ها برای تمامی آزمایش‌های این پژوهش یکسان است.

۴-۱- تأثیر درصد فضای خالی

شکل ۹ تأثیر درصد فضای خالی نمونه‌های آسفالتی ساخته شده از مصالح سیلیسی دانه بندی شماره ۵ و با قیر ۶۰/۷۰ را بر مقادیر چقرمگی شکست نشان می‌دهد. تقسیم‌بندی درصد فضای خالی در حالتی که درجه مود کششی بیشتر است (شکل ۹-الف) با درجه بندی $\pm 0.5\%$ انجام شد. همان گونه که در شکل (۹-الف) نشان داده شده است، با افزایش درصد فضای خالی ضریب شدت تنش بحرانی (چقرمگی شکست) کاهش می‌یابد. علت این امر را می‌توان در کاهش همگنی قیر و مصالح سنگی بیان کرد. همچنین جسم متراکم‌تر، تحت نیروی بیشتری دچار شکست می‌شود این امر با آنچه در پژوهش‌های گذشته نیز انجام شده مطابقت دارد [۷]. یکی دیگر از دلایل کاهش چقرمگی شکست امکان ایجاد تمرکز تنش به دلیل توزیع نامناسب فضای خالی در بتن آسفالتی با درصد فضای خالی بیشتر است [۲۰]. اما در شرایطی که مود برشی غالب باشد (شکل ۹-ب) اهمیت درصد فضای خالی نسبت به حالتی که مود کششی غالب است، کاهش یافته و تقسیم‌بندی درصد فضای خالی با تلورانس $\pm 0.8\%$ انجام گرفت.

در این حالت بارگذاری ($M^c = 0.38$) نیز مشاهده شد که با افزایش درصد فضای خالی از مقدار چقرمگی شکست کاسته می‌شود. مقدار چقرمگی شکست موثر مود ترکیبی K_{eff} نیز با افزایش درصد فضای خالی در هر دو حالت بارگذاری (مود کششی غالب و مود برشی غالب) کاهش می‌یابد. همچنین مقدار K_{eff} برای نمونه‌های آسفالتی آزمایش شده در شرایط مود برشی غالب، از مقدار چقرمگی شکست موثر مود ترکیبی نمونه‌های آزمایش شده در شرایط بارگذاری مود کششی غالب بیشتر است.

۴-۲- تأثیر اندازه دانه‌ها:

نتایج حاصل از آزمایش‌های چقرمگی شکست موده‌های ترکیبی با دانه‌بندی‌های شماره ۴ و ۶ در شکل (۱۰-الف) برای حالتی که مود کششی غالب است و در شکل (۱۰-ب)

شکست آن‌ها می‌توان، مقادیر چقرمگی شکست متناظر را با استفاده از قوانین مکانیک شکست الاستیک خطی به دست آورد. مقدار چقرمگی شکست در حالت‌های مود I و مود II بارگذاری برای قطعه SCB آزمایش شده از طریق روابط زیر به دست می‌آید [۱۵ و ۱۳].

$$K_I = \frac{Y_I}{\sqrt{\pi a}} \frac{P_{cr}}{2Rt} \quad (6)$$

$$K_{II} = \frac{Y_{II}}{\sqrt{\pi a}} \frac{P_{cr}}{2Rt} \quad (7)$$

همچنین چقرمگی شکست مؤثر (K_{eff}) که تأثیر هم‌زمان هر دو مود را نشان می‌دهد از رابطه (۸) محاسبه می‌شود:

$$K_{eff} = \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2} \quad (8)$$

که در این روابط R شعاع نمونه SCB که ۷۵ میلی‌متر است، ضخامت نمونه SCB که ۳۰ میلی‌متر است، P_{cr} بار بحرانی که از آزمایش تعیین می‌شود و a طول ترک است که برابر ۲۰ میلی‌متر است. همچنین Y_I و Y_{II} ضرایب شکل مود I و مود II می‌باشد، که از طریق مدلسازی قطعه SCB در نرم افزار ABAQUS به وسیله‌ی آیت‌الهی و همکاران محاسبه شده است [۱۳ و ۱۵]. مقادیر متناظر این ضرایب برای حالت‌های آزمایش شده در این پژوهش ($M^c = 0.8$, $M^c = 0.38$) در جدول ۳ ارائه شده است.

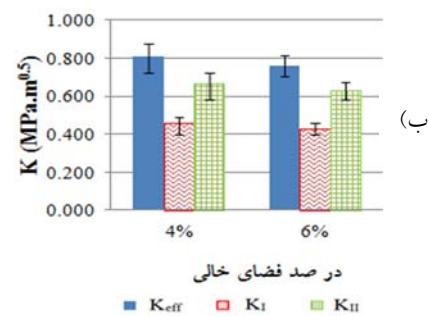
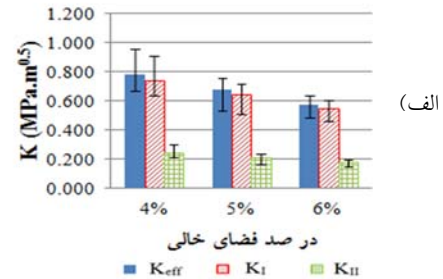
جدول ۳- مقادیر ضریب شکل استخراج شده از مرجع [۱۳] برای حالت‌های مود ترکیبی آزمایش شده در این پژوهش.

نوع بارگذاری	M^c	مقدار ضریب شکل برای حالت مود I (Y_I)	مقدار ضریب شکل برای حالت مود II (Y_{II})
مود ترکیبی (مود کششی غالب) (الف)	۰/۸	۱/۷۶۶	۰/۵۷۸
مود ترکیبی (مود برشی غالب) (ب)	۰/۳۸	۰/۸۰۲	۱/۱۷۹

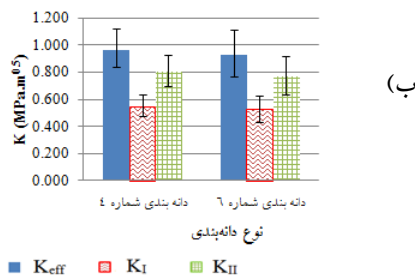
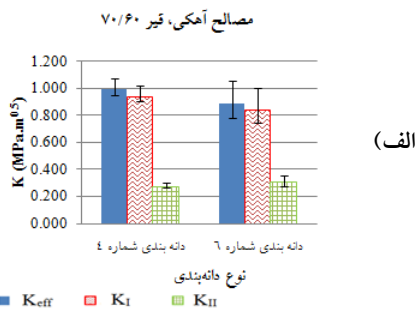
برای حالتی که مود برشی غالب است، ارائه شده است.

به طور کلی از این شکل مشاهده می‌شود که با کاهش ماکزیمم اندازه دانه‌بندی مخلوط، مقاومت در برابر رشد ترک کاهش پیدا می‌کند. این کاهش برای حالتی که مود کششی در آن غالب است، مشهودتر است. برخلاف تاثیر درصد فضای خالی بر مقدار چقرمگی شکست موثر K_{eff} مشاهده می‌شود که مقدار K_{eff} متناظر با هر دو نوع دانه بندی ۴ و ۶ در حالتی که مود برشی بارگذاری غالب است ($M^c = 0.38$)، بیشتر از حالتی است که در آن مود کششی بارگذاری غالب تر است ($M^c = 0.8$).

مصالح سیلیسی، دانه‌بندی ۴، قیر ۷۰/۶۰



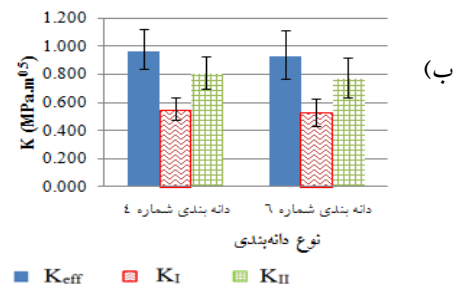
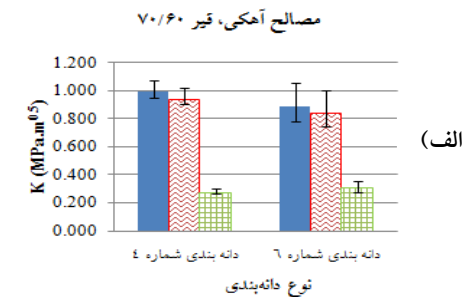
شکل ۹- تأثیر درصد فضای خالی بر مقدار چقرمگی شکست بتن آسفالتی آزمایش شده (الف) حالتیکه مود کششی غالب است و (ب) حالتی که مود برشی غالب است.



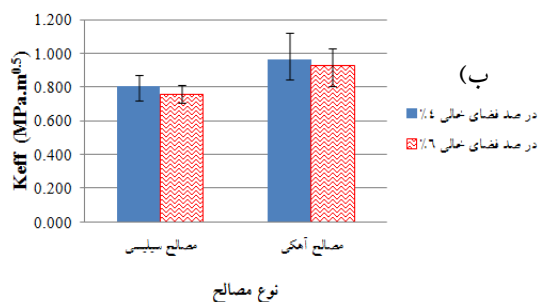
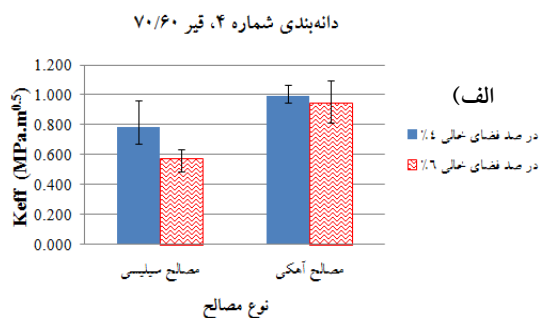
شکل ۱۰- تأثیر دانه‌بندی بر مقدار چقرمگی شکست بتن آسفالتی آزمایش شده (الف) حالتی که مود کششی غالب است و (ب) حالتی که مود برشی غالب است.

۳-۴- تأثیر نوع قیر

در شکل ۱۱ تأثیر نوع قیر مصرفی بر مقدار چقرمگی شکست بتن آسفالتی تهیه شده با مصالح آهکی و دانه‌بندی شماره ۴ با یکدیگر مقایسه شده است. از آنجا که بتن‌های آسفالتی با قیر نرم‌تر در مقابل ترک‌خوردگی انعطاف‌پذیری بیشتری دارند، عملکرد آن‌ها در موده‌های ترکیبی تا حدودی بهتر از قیر سخت‌تر است. به عبارت دیگر همان‌گونه که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، استفاده از قیر نرم‌تر



شکل ۱۰- تأثیر دانه‌بندی بر مقدار چقرمگی شکست بتن آسفالتی آزمایش شده (الف) حالتی که مود کششی غالب است و (ب) حالتی که مود برشی غالب است.



شکل ۱۲- تأثیر جنس مصالح بر مقدار چقرمگی شکست موثر بتن آسفالتی آزمایش شده (الف) حالتی که مود کششی غالب است و (ب) حالتی که مود برشی غالب است.

نتیجه گیری

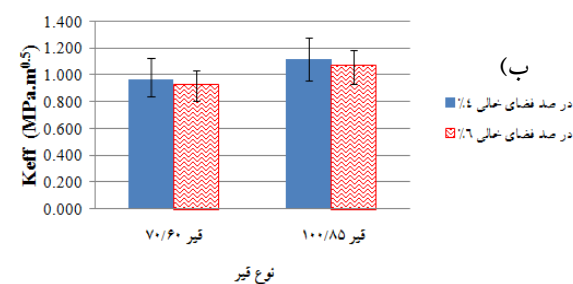
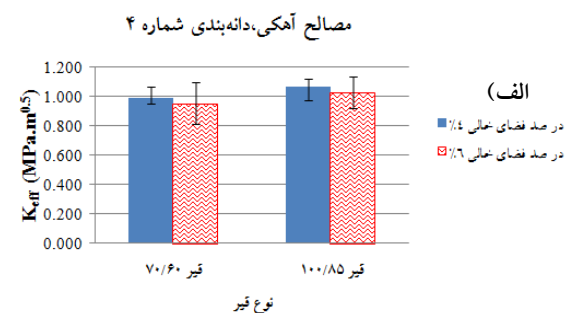
۱- چقرمگی شکست بتن آسفالتی با ترکیب‌های مختلفی از نظر نوع و اندازه دانه‌ها، نوع قیر و درصد فضای خالی متفاوت در دو حالت بارگذاری مود ترکیبی ($M^c = 0.38$) با استفاده از قطعات SCB در شرایط دمایی زیر صفر به طریق آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت و با استفاده از روابط مکانیک شکست الاستیک خطی مقادیر چقرمگی شکست بتنهای مختلف آسفالتی محاسبه شد.

۲- نتایج آزمایش‌ها بیانگر این مطلب بود که با افزایش درصد فضای خالی چقرمگی شکست کاهش می‌یابد که با افزایش درجه مود برشی از تأثیر درصد فضای خالی کاسته می‌شود.

۳- در حالت مود ترکیبی چقرمگی شکست بتن آسفالتی تهیه شده از قیر نرمتر بیشتر است.

۴- بتن‌های تهیه شده از مصالح سنگی سیلیسی به خاطر استحکام پایین‌تر این نوع مصالح به ویژه در کشش دارای مقاومت ترک خوردگی کمتری نسبت به بتن‌های تهیه شده

(۸۵/۱۰۰) باعث افزایش چقرمگی شکست بتن آسفالتی در هر دو حالت (مود برشی غالب و مود کششی غالب) می‌شود.



شکل ۱۱- تأثیر نوع قیر بر مقدار چقرمگی شکست موثر بتن آسفالتی آزمایش شده (الف) حالتی که مود کششی غالب است و (ب) حالتی که مود برشی غالب است.

۴-۴- تأثیر جنس مصالح

جنس مصالح (آهکی و سیلیسی) تأثیر قابل توجهی بر مقاومت ترک خوردگی بتن آسفالتی آزمایش شده در این پژوهش دارد. همان‌گونه که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، استفاده از مصالح آهکی به دلیل چسبندگی و اتصال مناسب‌تر با قیر و همچنین درصد شکستگی بالاتر که اتصال مناسب بین مصالح سنگی را میسر می‌سازد، باعث افزایش چقرمگی شکست آسفالت نسبت به بتن‌های آسفالتی ساخته شده با مصالح سنگی سیلیسی می‌شود. البته با افزایش درجه مود برشی از تأثیر جنس مصالح کاسته می‌شود که علت احتمالی این موضوع رفتار متفاوت مصالح سنگی تحت تأثیر برش و کشش است. در هر دو نوع مخلوط مسیر شکست آسفالت از محل سنگدانه‌ها، نیز مشاهده شد.

- Notched Beam Development of a Single-Edge Notched Beam," *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 33, no. 6, pp. 1-9, 2005
- [11] M. Wagoner, W. Buttlar, G. Paulino and P. Blankenship, "Investigation of the fracture resistance of hot-mix asphalt concrete using a disk-shaped compact tension test," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1929, no. 1, pp. 183-192, 2005
- [12] B. Sangpetngam, B. Birgisson and R. Roque, "Development of an efficient hot mix asphalt fracture mechanics-based crack growth simulator," in *Proc., 82nd Transportation Research Board Annual Meeting*, 2003.
- [13] M. Ameri, A. Mansourian, S. Pirmohammad, M.R.M. Aliha and M.R. Ayatollahi, "Mixed mode fracture resistance of asphalt concrete mixtures," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 93, pp. 153-167, 2012.
- [14] M.R. Ayatollahi and M.R.M. Aliha, "Wide range data for crack tip parameters in two disc-type specimens under mixed mode loading," *Computational materials science*, vol. 38, no. 4, pp. 660-670, 2007.
- [15] M.R. Ayatollahi, M.R.M. Aliha and H. Saghafi "An improved semi-circular bend specimen for investigating mixed mode brittle fracture" *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 78, no. 1, pp. 110-123, 2011.
- [۱۶] "آیین نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴)", دفتر امور فنی و تدوین معیارها سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور, ۱۳۸۱.
- [17] AASHTO T 312, "Standard method for preparing and determining the density of hot mix asphalt (HMA) specimens by means of the SHRP Gyrotory Compactor", FHWA Multi Regional Asphalt Training and Certification Group, 1999.
- [18] AASHTO T-209, "Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures", *Ensaio Rice*.
- [19] AASHTO T 331, "Bulk specific gravity and density of compacted asphalt mixtures using automatic vacuum sealing method"
- [20] J. Harvey and B.-W. Tsai, "Effects of asphalt content and air void content on mix fatigue and stiffness," *Journal of Transportation Research and Recourse*, vol. 1543, no. 1, pp. 38-45, 1996.
- از مصالح سنگی آهکی است.
- ۵- با افزایش بیشترین اندازه دانه‌ها، چقرمگی شکست افزایش پیدا می‌کند اما با افزایش درجه مود برشی از مقدار آن کاسته می‌شود.
- ۶- مراجع:**
- [1] T. Anderson, *Fracture mechanics: fundamentals and applications*, CRC, 2005.
- [2] M. Ameri, A. Mansourian, M. Heidary Khavas, M.R.M. Aliha and M.R. Ayatollahi, "Cracked asphalt pavement under traffic loading – A 3D finite element analysis," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 78, no. 8, pp. 1817-1826, 2011.
- [3] M. Fakhri, M. Fakhri and P.T. Kheiry, "Modeling of top-down cracking (TDC) propagation in asphalt concrete pavements using fracture mechanics theory," *Adv Test Charact Bituminous Material*, pp. 681-692, 2009.
- [4] A. Braham, W. Buttlar and F. Ni, "Laboratory Mixed-Mode Cracking of Asphalt Concrete Using the Single-Edge Notch Beam," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 11, no. 4, pp. 947-968, 2010.
- [۵] ف. مقدس‌نژاد، "کاربرد ژئوستنتیکها در روکشهای آسفالتی جهت کنترل ترکهای انعکاسی"، وزارت راه و ترابری، پژوهشکده حمل و نقل، ۱۳۸۶.
- [6] R. L. Lytton, "Use of Geotextile for Reinforcement and Strain Relief in Asphalt Concrete," *Geotextile and Geomembrane*, vol. 8, pp. 217-237, 1989.
- [7] X. Li and M. Marasteanu, "Using Semi Circular Bending Test to Evaluate Low Temperature Fracture Resistance for Asphalt Concrete," *Experimental mechanics*, vol. 50, no. 7, pp. 867-876, 2010.
- [8] X. Li, M. O. Marasteanu, A. Kvasnak, J. Bausano, R. C. Williams and B. Worel, "Factors study in low-temperature fracture resistance of asphalt concrete," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 22, no. 2, pp. 145-152, 2010.
- [9] I. Artamendi and H. A. Khalid, "A comparison between beam and semi-circular bending fracture tests for asphalt," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 7, pp. 163-180, 2006
- [10] M. P. Wagoner, W. G. Buttlar and G. H. Paulino, "Development of a Single-Edge

