

**M. R. Keymanesh \***

Assistant Professor, Faculty of  
Engineering, Payame Noor  
University, North Tehran,  
Tehran, Iran.

**e-mail:**

mrkeymanesh@pnu.ac.ir

**M. Mohammad Karimi**

Assistant Professor,  
Department of Civil and  
Environmental Engineering,  
Tarbiat Modares University,  
Tehran, Iran.

**e-mail:**

mohammad.karimi@modares.ac.ir

**A. Taghinezhad Omran**

Faculty of Engineering,  
Payame Noor University,  
North Tehran, Tehran, Iran.

**e-mail:**

aliomran@student.pnu.ac.ir

**Evaluation of the Effect of Aging on the Long-Term Performance of WMA Containing High Percentage of RAP Based on the Results of SCB Test at Intermediate Temperature**

*With regards to the increase in stiffness for the asphalt mixture containing RAP, the improvement of rutting is predictable, but with increasing aging level and increasing stiffness in mixtures containing high percentages of RAP, problems such as cracking at low and intermediate temperatures is formed in the long-term. In this study, the long-term fracture performance of WMA mixtures containing high percentage of RAP at 25<sup>o</sup>c was evaluated using a SCB test. To conduct the research, different amounts of RAP (0, 50, 75, and 100%), a rejuvenator, Zycotherm as WMA additive and 85/100 asphalt binder were used. To apply different levels of aging, the samples were kept in the oven for 3, 5, 7 and 9 days at 85<sup>o</sup> C. The results showed that with increasing the amount of RAP and the aging level of the samples, the  $P_{cr}$  and the  $K_{IC}$  increased, but the  $U$  decreased. Also, in order to compare the long-term performance of asphalt mixtures containing different percentages of RAP, the area under the  $J_c$  - aging is determined and it was concluded that in the long-term, samples without RAP show 8, 34, and 52% more resistance to cracks than samples containing 50, 75, and 100% RAP.*

Keywords: WMA, RAP, Failure, Aging, SCB test.

---

\* Corresponding author

Received 02 November 2021, Revised 19 December 2021, Accepted 22 December 2021.

DOI: 10.22091/cer.2021.7526.1320

## ارزیابی تأثیر پیرشدگی بر عملکرد بلندمدت مخلوط‌های آسفالت گرم حاوی مقادیر زیاد تراشه آسفالت بر پایه نتایج آزمایش خمشی نیم‌دایره‌ای (SCB) در دمای میانی

با توجه به افزایش سختی آسفالت برای مخلوط حاوی تراشه آسفالت (RAP)، بهبود خرابی شیارشدگی، قابل پیش‌بینی است، اما با افزایش سطح پیرشدگی و افزایش سختی در مخلوط‌های حاوی درصد‌های بالای تراشه آسفالت، مشکلاتی نظیر ترک‌خوردگی در دمای پایین و دمای میانی (کاهش مقاومت در برابر ترک‌خوردگی) در بلندمدت شکل می‌گیرد. در این پژوهش، تأثیر پیرشدگی بر عملکرد شکست مخلوط‌های آسفالتی گرم (WMA) حاوی درصد بالای تراشه آسفالت در بلندمدت در دمای میانی (۲۵°C)، با استفاده از آزمایش خمشی نیم‌دایره‌ای، مورد ارزیابی قرار گرفت. برای انجام تحقیق از مقادیر مختلفی از تراشه آسفالت (صفر، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد)، روغن گیاهی به عنوان عامل جوانساز، زایکوترم به عنوان افزودنی مخلوط آسفالتی گرم و قیر ۸۵/۱۰۰ به عنوان قیر جدید استفاده شد. برای اعمال سطوح مختلف پیرشدگی، نمونه‌ها مطابق با مطالعات پیشین به مدت ۳، ۵، ۷ و ۹ روز و در دمای ۸۵°C در گرماخانه نگهداری شدند. نتایج نشان داد با افزایش مقدار تراشه آسفالتی و افزایش سطح پیرشدگی نمونه‌ها، حداکثر نیروی لازم برای شکست و ضریب بحرانی شدت تنش  $K_{IC}$ ، افزایش ولی انرژی کرنشی U کاهش یافت. همچنین، به منظور مقایسه عملکرد بلندمدت مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف تراشه آسفالت، سطح زیر منحنی انرژی کرنشی رها سازی شده (J<sub>r</sub>) - پیرشدگی، تعیین و نتیجه گرفته شد که نمونه‌های بدون تراشه آسفالت ۸، ۳۴ و ۵۲ درصد مقاومت بیشتری در برابر ترک‌خوردگی نسبت به نمونه‌های حاوی ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد تراشه آسفالت از خود نشان می‌دهند.

**واژگان کلیدی:** آسفالت گرم، تراشه آسفالت، شکست، پیرشدگی، آزمایش خمشی نیم‌دایره‌ای.

محمودرضا کی‌منش\*

استادیار، گروه عمران، دانشگاه  
پیام نور تهران - شمال.  
پست الکترونیک:  
mrkeymanesh@pnu.ac.ir

محمد محمدکریمی

استادیار، دانشکده مهندسی  
عمران و محیط زیست، دانشگاه  
تربیت مدرس.  
پست الکترونیک:  
mohammad.karimi@modares.ac.ir

علی تقی نژاد عمران

دانشکده مهندسی عمران،  
دانشگاه پیام نور تهران - شمال.  
پست الکترونیک:  
aliomran@student.pnu.ac.ir

### ۱- مقدمه

همچون مصرف سوخت فسیلی و انتشار مواد آلاینده بیشتر در مخلوط‌های آسفالتی داغ و نیز افزایش قیمت سوخت در جهان، باعث شده است استفاده از آسفالت گرم در صنعت روسازی با استقبال زیادی روبه‌رو شود. فناوری استفاده از آسفالت گرم در صنعت روسازی از اواخر دهه ۱۹۹۰ توسعه یافت [۱].

امروزه افزایش قیمت مصالح و انرژی منجر به استفاده از تراشه آسفالت (RAP<sup>۱</sup>) به عنوان جایگزینی

مخلوط‌های آسفالتی را می‌توان از نظر دمای اختلاط و مصرف انرژی به چهار دسته کلی آسفالت سرد، آسفالت نیمه‌گرم، آسفالت گرم و آسفالت داغ تقسیم‌بندی نمود. نگرانی‌های موجود در ارتباط با عوامل زیست‌محیطی

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۱۱، بازنگری: ۱۴۰۰/۰۹/۲۸، پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۰۱  
(DOI): 10.22091/cer.2021.7526.1320 شناسه دیجیتال

<sup>۱</sup>- Reclaimed Asphalt Pavement

مقادیر زیاد تراشه آسفالت بر پایه نتایج آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای (SCB<sup>۳</sup>) در دمای میانی بررسی شد. محققان روش‌های مختلفی (گرمایش طولانی، اکسیداسیون، استفاده از مادون قرمز/UV) برای بررسی پیرشدگی<sup>۴</sup> بلندمدت روسازی استفاده کردند [۴]. پیرشدگی در گرمخانه روی نمونه‌های متراکم شده یکی از روش‌های پیرشدگی مخلوط آسفالتی در بلندمدت است. در این تحقیق، مشابه تحقیقات گذشته در این خصوص نمونه‌های SCB به مدت ۳، ۵، ۷ و ۹ روز در دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد به منظور شبیه‌سازی پیرشدگی مخلوط آسفالتی در ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سال از عمر روسازی، در گرمخانه نگهداری شدند [۵، ۶ و ۷].

## ۲- پیشینه تحقیق

پژوهشگران، روش‌های مختلفی برای تولید مخلوط آسفالتی گرم پیشنهاد نموده‌اند که می‌توان آنها را در سه دسته کلی مخلوط تولید شده به روش کف قیر، مخلوط تولید شده با افزودنی‌های آلی و مخلوط تولید شده با استفاده از افزودنی‌های شیمیایی تقسیم‌بندی نمود [۸]. تحقیقات مختلفی در خصوص استفاده از افزودنی شیمیایی زایکوترم که عملکردی با خاصیت ضدعریان‌شدگی در روسازی آسفالت گرم ایجاد می‌کنند، انجام شده است. در این تحقیقات از درصد‌های مختلف زایکوترم بین ۰/۱ الی ۰/۲ درصد وزنی قیر استفاده شده است [۹ و ۱۰].

امروزه علیرغم آگاهی از پتانسیل بالقوه استفاده از تراشه آسفالت در روسازی، ارزیابی عملکرد بلندمدت روسازی‌های آسفالتی حاوی تراشه آسفالت نیازمند بررسی بیشتر است. به نظر می‌رسد وجود قیر پیرشده در تراشه آسفالت دلیل اصلی استفاده کمتر از این مصالح برای ساخت روسازی‌های جدید است. پیرشدگی یک فرآیند

برای مصالح سنگی و قیر جدید در تهیه مخلوط‌های آسفالتی شده است. مطالعات پیشین نشان داد که استفاده از درصد‌های پایین (کمتر از ۱۵ درصد) تراشه آسفالت، تأثیر قابل‌توجهی در مخلوط آسفالتی ایجاد نمی‌کند؛ بنابراین، درصد‌های بالاتر (بالاتر از ۳۰ درصد) مورد بررسی پژوهشگران قرار گرفته است. اگرچه استفاده گسترده از تراشه آسفالت در تولید مخلوط‌های آسفالتی، مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی فراوانی در پی دارد، اما مهم‌ترین مانع در استفاده از مخلوط‌های آسفالتی با درصد بالای تراشه آسفالت، سفتی بیش از حد این نوع مخلوط‌ها است که کارایی آن را به شدت کاهش می‌دهد. پیری قیر موجود در تراشه آسفالت باعث سخت‌تر و شکننده‌تر شدن مخلوط و در نتیجه سبب کاهش مقاومت در برابر ترک‌خوردگی می‌شود. بدین منظور، جوانساز<sup>۲</sup> به‌عنوان اصلاح‌کننده، مورد استفاده قرار می‌گیرد. تأثیر استفاده از جوانساز بر روی خواص مکانیکی و عملکرد مخلوط‌های آسفالتی و قیرها توسط پژوهشگران زیادی مورد بحث و بررسی قرار گرفته و نتایج حاکی از تأثیر قابل‌توجه آنها در مخلوط‌های آسفالتی حاوی تراشه آسفالت دارد [۲ و ۳].

امروزه جنبه‌های مختلفی از مخلوط آسفالتی گرم حاوی تراشه آسفالتی نظیر عمر خستگی، مقاومت در برابر شیارشدگی و نحوه گسترش ترک در دماهای مختلف، مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به استفاده از تراشه آسفالتی و خصوصیات قیر موجود در آنها، همچنان زوایای پنهانی در مورد تأثیر به‌کارگیری و اثرات آنها بر عملکرد فنی مخلوط آسفالتی گرم حاوی تراشه آسفالت وجود دارد، که این موضوع پژوهشگران را بر آن داشته است تا از روش‌های مختلف ارزیابی، برای بررسی مکانیزم تأثیرگذاری تراشه آسفالت بر عملکرد مخلوط آسفالتی گرم استفاده نمایند. در این تحقیق با توجه به مطالب ذکر شده در خصوص مشخصات آسفالت گرم و تراشه آسفالت، ارزیابی عملکرد بلندمدت مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی

<sup>۳</sup>- Semi- Circular Bend

<sup>۴</sup>- Aging

<sup>۲</sup>- Rejuvenator

برگشت‌ناپذیر است که باعث کاهش دوام روسازی و سرانجام افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری و در نهایت موجب اضمحلال روسازی می‌شود [۱۱ و ۱۲]. با استفاده از جوانسازهایی همچون روغن موتور ضایعاتی، روغن گیاهی، روغن‌های پخت‌وپز و غیره به‌عنوان اصلاح‌کننده‌های مخلوط‌های آسفالتی، می‌توان مشخصات فیزیکی و شیمیایی قیر پیرشده در روسازی را بهبود بخشید. در سال ۲۰۱۶ در پژوهشی با استفاده از پلیمر لاتکس و دو نوع جوانساز مختلف، عملکرد مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۵۰ درصد تراشه آسفالت مورد بررسی قرار گرفت؛ نتایج این تحقیق حاکی از بهبود رفتار مخلوط‌های بازیافتی در برابر خستگی و شکست بود [۱۳]. بررسی اثر پیرشدگی قیر و مخلوط آسفالتی بر دوام و عملکرد بلندمدت روسازی در طول عمر بهره‌برداری از آن ضروری است [۱۴]. مطالعات بسیاری نشان داده است که پیرشدگی بلندمدت می‌تواند به شرایط آب‌وهوایی، روش پیرشدگی در آزمایشگاه و دمای پیرشدگی در آزمایشگاه یا نوع قیر و ضخامت روسازی وابسته باشد [۶ و ۱۵].

برای ارزیابی مکانیزم رشد ترک و شکست مخلوط‌های آسفالتی در آزمایشگاه، از آزمایش‌های مختلفی همچون آزمایش کشش غیرمستقیم، آزمایش تیر خمشی، آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای و آزمایش کشش فشرده دیسکی استفاده می‌شود. از میان آزمایش‌های اشاره شده، آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای به علت سادگی ساخت نمونه و سهولت انجام آزمایش، یکی از آزمایش‌های شناخته شده در بحث ارزیابی مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی است [۱۶ و ۱۷]. در سال‌های اخیر پژوهش‌های مختلفی در خصوص رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی تراشه آسفالت با استفاده از آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای در دمای میانی ( $25^{\circ}\text{C}$ ) انجام شده است؛ به عنوان مثال، سونگ<sup>۵</sup> و همکاران در

تحقیقی با عنوان ارزیابی مقاومت در برابر ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی مصالح تراشه آسفالت با استفاده از آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای، دریافتند که استفاده از تراشه آسفالت مقاومت کششی مخلوط آسفالتی را افزایش می‌دهد ولی باعث کاهش پایداری و مقاومت در برابر ترک‌خوردگی می‌شود [۱۸]. سینک<sup>۶</sup> و همکاران، عملکرد مخلوط‌های آسفالتی حاوی تراشه آسفالت و افزودنی شیمیایی را با استفاده از آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای و محاسبه انرژی کرنشی رهاسازی شده ( $J_C^V$ ) در دمای میانی مورد مطالعه قرار دادند. مطابق نتایج آنها، افزایش درصد تراشه آسفالت باعث سفتی بیشتر مخلوط آسفالتی و بهبود مقاومت شکست مخلوط‌ها شد و اضافه کردن افزودنی شیمیایی، مقاومت در برابر شکست را کاهش داده و تأثیر منفی بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها داشته است [۱۹]. در برخی از تحقیقات دیگر نظیر تحقیق سینک و همکاران، به بررسی و مقایسه مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی داغ و گرم حاوی درصدهای بالای تراشه آسفالت (صفر، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد) با استفاده از آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای در دمای میانی پرداخته شد. نتایج مطالعات آنها نشان داد انرژی کرنشی<sup>۸</sup> ( $U$ ) و انرژی کرنشی رهاسازی شده ( $J_C$ ) در مخلوط‌های آسفالتی داغ و گرم با افزایش تراشه آسفالت، افزایش یافته است که نشان از بهبود مقاومت شکست می‌باشد؛ همچنین مخلوط‌های آسفالتی داغ حاوی تراشه آسفالتی دارای مقاومت شکست بالاتری نسبت به مخلوط‌های آسفالت گرم حاوی تراشه آسفالتی می‌باشند [۲۰]. در تحقیقی دیگر به ارزیابی تأثیر استفاده از جوانساز در مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی ۲۵ و ۵۰ درصد تراشه آسفالت در دمای  $25^{\circ}\text{C}$  و  $-15^{\circ}\text{C}$  با استفاده از آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای در مود بارگذاری I پرداخته شده است.

<sup>6</sup>- Singh

<sup>7</sup>- Strain Energy Release

<sup>8</sup>- Strain Energy

<sup>5</sup>- Song

مصالح سنگی آهکی و فیلر (پودر سنگ آهک)، یک نوع قیر جدید (قیر ۸۵/۱۰۰)، یک نوع افزودنی آسفالت گرم (زایکوترم)، یک نوع جوانساز (روغن گیاهی کلزا) و از مقادیر مختلف تراشه آسفالتی (صفر، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰) استفاده شده است.

### ۳-۱- تعیین مقدار و نوع قیر موجود در تراشه‌های آسفالت

از آزمایش سانترفیوژ برای جداسازی سنگدانه‌ها از قیر و تعیین درصد قیر مصالح تراشه آسفالت، استفاده شد که پس از انجام آزمایش درصد قیر موجود در تراشه آسفالتی، ۵/۰۲ درصد به دست آمد؛ همچنین برای به دست آوردن قیر خالص تراشه‌های آسفالت، آزمایش تقطیر طبق دستورالعمل ASTM-D1856، انجام و مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده است [۲۲].

### ۳-۲- مصالح سنگی

مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق شامل مصالح سنگی خام و مصالح سنگی بازیافتی می‌باشد. مصالح سنگی خام مورد استفاده برای ساخت نمونه‌های آسفالتی در این تحقیق، آهکی و از نوع سنگ شکسته کوهی است. برای ساخت نمونه‌های مخلوط آسفالتی از دانه‌بندی پیوسته و با حداکثر اندازه اسمی سنگدانه ۱۹ میلی‌متر استفاده شده است؛ با توجه به اینکه هدف اصلی این تحقیق تأثیر درصد‌های مختلف تراشه‌های آسفالتی بر روی عملکرد بلندمدت مخلوط‌های آسفالتی گرم است؛ بنابراین، دانه‌بندی تراشه‌های آسفالت (پس از جداسازی و انجام آزمایش دانه‌بندی، مشخص گردید در محدوده مجاز آیین‌نامه است) به عنوان دانه‌بندی هدف انتخاب تا نمونه‌های آسفالتی در درصد‌های مختلف تراشه آسفالت (صفر، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد) دارای دانه‌بندی یکسانی باشند. دانه‌بندی مورد استفاده در این تحقیق مطابق با مشخصات دانه‌بندی تیپ ۴ براساس آیین‌نامه روسازی راه‌های ایران (استاندارد ASTM D3515-01) انتخاب

در دو دمای پایین و میانی، با افزایش سفتی مخلوط‌های آسفالتی (افزودن تراشه آسفالت) شکنندگی مخلوط بیشتر شد و در نتیجه مقاومت در برابر ترک‌خوردگی کاهش یافته ولی با استفاده از جوانساز، مقاومت در برابر ترک‌خوردگی بهبود یافت [۳]. در تحقیق دیگر توسط یوسفی و همکاران، چقرمگی شکست سه نوع مخلوط آسفالتی (مخلوط آسفالتی‌داغ، مخلوط آسفالتی گرم و مخلوط آسفالتی گرم حاوی ۲۵ درصد تراشه آسفالت) در دمای ۲۵°C و ۱۵°C- با استفاده از آزمایش خمش نیم‌دایره و در سه مود بارگذاری (I، II و ترکیب آنها) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج تحقیق آنها نشان داد مخلوط‌های آسفالت گرم و آسفالت گرم حاوی تراشه آسفالت دارای انرژی شکست و چقرمگی شکست بالاتری (در هر دو دما و هر سه مود بارگذاری) نسبت به مخلوط‌های آسفالتی داغ هستند [۲۱].

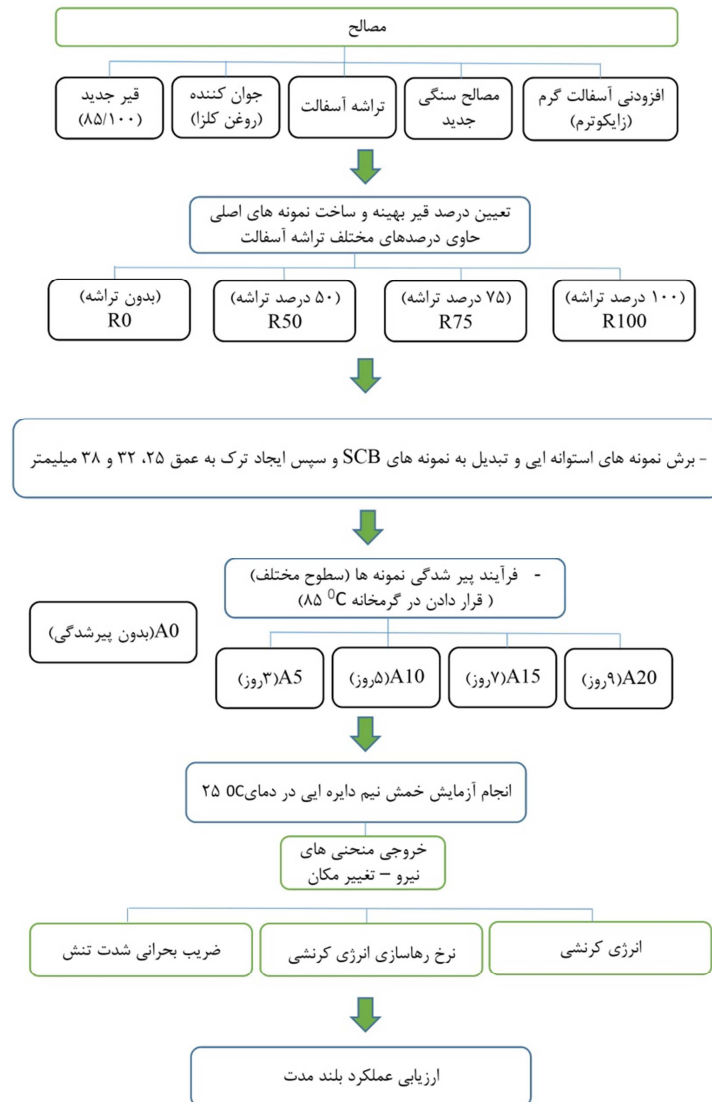
با توجه به اینکه تاکنون تحقیقی در خصوص عملکرد بلندمدت مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی درصد بالای تراشه آسفالتی صورت نگرفته است، در این پژوهش مقاومت در برابر شکست و ترک‌خوردگی این مخلوط‌های آسفالتی در سطوح مختلف پیرشدگی در دمای میانی مورد ارزیابی قرار گرفته است تا به شناخت عملکرد بلندمدت این مخلوط‌های آسفالتی کمک کرده و موجب درک صحیحی از مکانیزم خرابی‌ها ایجاد شده در طول عمر بهره‌برداری (زمان مناسب برای انجام تعمیر و نگهداری) این نوع مخلوط‌های آسفالتی گردد. در این راستا تأثیر درصد‌های بالای تراشه آسفالت (۵۰، ۷۵ و ۱۰۰) بر رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی گرم در دوره‌های مختلف عمر روسازی (پیرشدگی بلندمدت شامل ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سال) در دمای ۲۵°C براساس نتایج آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۳- مصالح مصرفی و طرح اختلاط

برای ساخت مخلوط‌های آسفالتی و انجام آزمایش که مراحل آن در شکل ۱ ارائه شده است، از یک نوع

شده است [۲۳]. نتایج آزمایش دانه‌بندی و مشخصات مصالح سنگی در شکل ۲ و جدول ۲ نشان داده شده است. مشخصات قیر مورد استفاده در این تحقیق که از پالایشگاهی در تهران تهیه شده، از نوع ۸۵/۱۰۰ است. مشخصات قیر مورد نظر در جدول ۳ آورده شده است.

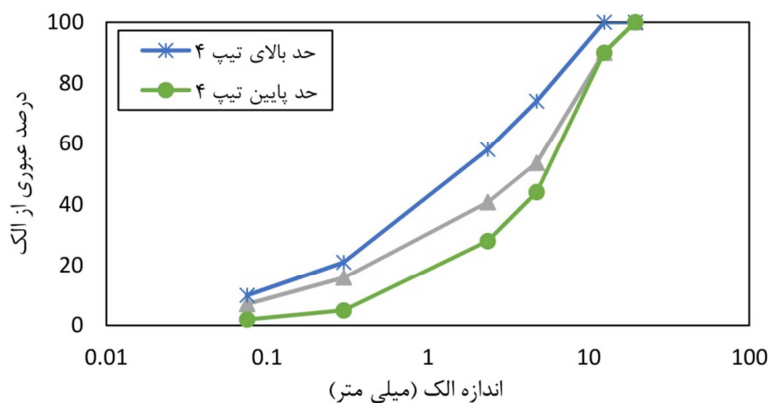
### ۳-۳- قیر مورد استفاده در این تحقیق



شکل ۱- مراحل انجام آزمایش

جدول ۱- مشخصات قیر موجود در تراشه آسفالت

استاندارد آزمایش	نتایج آزمایش	آزمایش انجام شده
ASTM D5	۲۵	درجه نفوذ (mm / ۰)
ASTM D2398	۶۰	نقطه نرمی (°C)
ASTM D113	۴۵	خاصیت انگمی (cm)
ASTM D-88	۲/۷۲۵	ویسکوزیته در ۱۳۵ °C (Pa.s)



شکل ۲- نمودار دانه‌بندی مورد استفاده در ساخت مخلوط‌های آسفالتی حاوی تراشه آسفالت (RAP)

جدول ۲- مشخصات مصالح سنگی

استاندارد آزمایش	نتایج آزمایش		آزمایش انجام شده
	RAP	مصالح سنگی خام	
ASTM C131 (2020)	۲۵	۲۲	حداکثر سایش به روش لوس آنجلس (درصد)
BS812	۱۲	۹	حداکثر ضریب تورق (درصد)
D5821 (2017)	یک جهت ۹۶	یک جهت ۹۹	حداقل درصد شکستگی در دو وجه روی الک
C127 (2015)	-	۱	حداکثر درصد جذب آب (مصالح درشت دانه)
C128 (2015)	-	۱/۲	حداکثر درصد جذب آب (مصالح ریزدانه)

جدول ۳- مشخصات قیر ۸۵/۱۰۰

استاندارد آزمایش	نتایج آزمایش	آزمایش انجام شده
ASTM D-70 (2021)	۱/۰۳	وزن مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )
ASTM D-5 (2013)	۹۱	درجه نفوذ (۰/۱mm)
ASTM D-36 (2020)	۴۸	نقطه نرمی (°C)
ASTM D-113 (2017)	>۱۰۰	خاصیت انگمی (cm)
ASTM D-92 (2012)	۲۴۸	نقطه اشتعال (°C)
ASTM D-88 (2019)	۰/۲۵	ویسکوزیته در ۱۳۵ (°C) (Pa.s)

### ۳-۴- ماده افزودنی برای مخلوط آسفالتی گرم



شکل ۳- ماده افزودنی آسفالت گرم (زایکوترم)

زایکوترم، که تصویر آن در شکل ۳ مشخص است، یک ماده افزودنی است که به قیر اضافه می‌شود. افزودن زایکوترم سبب بهبود خواص قیر و در نتیجه مخلوط‌های آسفالتی می‌گردد. برخی از مزایای استفاده از زایکوترم عبارتند از ضد عریان‌شدگی، کند نمودن روند پیرشدگی، مقاومت در برابر خستگی و صرفه‌جویی سوخت و حفظ محیط‌زیست.

به نحوی تنظیم گردید که در قیر با دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس، گردابی به عمق ۲ الی ۳ سانتیمتر ایجاد شود. سپس، زایکوترم با یک سرنگ انسولین به آرامی با نرخ ۱۰ قطره در دقیقه به قیر اضافه شد تا مخلوط همگنی به دست آید. مشخصات کلی زایکوترم که برای ساخت مخلوط‌های آسفالتی گرم استفاده شده است در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴- مشخصات ماده افزودنی زایکوترم

مشخصات زایکوترم	نوع مشخصات
مایع	حالت فیزیکی
زرد کم‌رنگ	رنگ
بی بو	بو
۹۷۰ کیلوگرم بر متر	چگالی حجمی
۸۰ درجه سانتی‌گراد	نقطه اشتعال
غیرقابل حل	حلالیت در آب
۰/۱ درصد	دوز (نسبت به قیر)

با توجه به مطالعات پیشین و شرایط ساخت نمونه‌ها، به میزان ۷ درصد قیر موجود در تراشه آسفالتی انتخاب گردید که مشخصات آن در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵- مشخصات جوانساز (روغن گیاهی کلزا)

مشخصات روغن	نوع مشخصات
مایع	حالت فیزیکی
زرد	رنگ
قابل تشخیص	بو
۰/۷٪	دوز (نسبت به قیر تراشه آسفالتی)

### ۳-۶- تعیین درصد قیر بهینه

قبل از ساخت نمونه‌های اصلی و انجام آزمایش‌های مربوط به شکست، درصد قیر بهینه هر اختلاط (براساس فضای خالی ۴ درصد) تعیین گردید. با توجه به اینکه مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف تراشه‌های آسفالتی هستند از روابط طرح اختلاط انستیتو آسفالت جهت تعیین درصد قیر بهینه استفاده گردید [۲۴]. درصد قیر بهینه برای مخلوط‌های حاوی صفر، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد تراشه آسفالت به ترتیب ۴/۷، ۵/۱، ۵/۳۵ و ۵/۶ درصد به دست آمد. درصد قیر بهینه مطابق روابط ارائه

در این پژوهش از زایکوترم در قیر به عنوان افزودنی آسفالت گرم استفاده شده است و براساس مطالعات پیشین و پیشنهاد شرکت سازنده، مقدار ۰/۱ درصد وزنی قیر انتخاب گردید. زایکوترم به قیر، قبل از اختلاط با مصالح سنگی افزوده می‌شود. ابتدا قیر، گرم شده تا به حالت مذاب تبدیل گردد و سپس جهت اختلاط زایکوترم با قیر خالص، از یک همزن برقی استفاده شد و سرعت آن

### ۳-۵- ماده جوانساز

تحقیقات نشان داد که ضایعات روغن آشپزی نیز می‌تواند به عنوان یک آنتی‌اکسیدان و عامل جوان‌کننده برای قیرهای پیرشده به کار گرفته شود. در این تحقیق، از روغن کلزا، که تصویر آن در شکل ۴ نشان داده شده است، به عنوان جوانساز تراشه‌های آسفالتی استفاده شده است.



شکل ۴- ماده جوانساز (روغن کلزا)

برای ساخت مخلوط آسفالتی، ابتدا جوانساز مورد استفاده به طور مستقیم به تراشه‌های آسفالتی افزوده شد. میزان مصرف جوانساز در تهیه مخلوط‌های آسفالتی گرم



(روغن کلزا) با درصد فضای خالی ۴ درصد و دمای  $25^{\circ}\text{C}$  به چهار بخش قابل تقسیم می‌باشد؛ بخش اول مربوط به ساخت نمونه‌های استوانه‌ای ژیراتوری، بخش دوم شامل برش نمونه‌های استوانه به نیم‌دایره‌ای خمشی و ایجاد ترک در نمونه‌ها، بخش سوم شامل فرآیند پیر نمودن نمونه‌ها و بخش چهارم شامل انجام آزمایش مقاومت شکست بر روی نمونه‌های نیم‌دایره خمشی ترک خورده پیرشده و پیرنشده در دمای  $25^{\circ}\text{C}$  می‌باشد. دمای اختلاط و تراکم انواع مخلوط‌های آسفالتی ساخته‌شده در این تحقیق به ترتیب برابر  $135^{\circ}\text{C}$  و  $110^{\circ}\text{C}$  بوده است. خلاصه‌ای از ترکیب و تعداد نمونه‌های مورد آزمایش در جدول ۶ ارائه شده است.

شده براساس طرح اختلاط انستیتو آسفالت مربوط به برآورد کل قیر مخلوط (قیر جدید و قیر موجود در تراشه آسفالت) است بنابراین مقدار قیر جدید مورد نیاز با توجه به مقدار تراشه آسفالت و مقدار قیر موجود در آن، براساس روابط طرح اختلاط انستیتو آسفالت محاسبه و به مخلوط‌ها اضافه گردید.

#### ۴- ساخت نمونه‌های اصلی و انجام آزمایش شکست

برنامه آزمایشگاهی برای ساخت و آزمایش نمونه‌های اصلی، شامل صفر، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد تراشه آسفالت، عمر پیرشدگی صفر، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سال، یک نوع افزودنی آسفالت گرم (زایکوترم) و یک نوع جوانساز

جدول ۶- ترکیب و تعداد نمونه‌های انجام آزمایش

تعداد نمونه‌های SCB	تعداد تکرار آزمایش	مدت زمان قرارگیری در گرمخانه (روز)	عمق ترک (میلیمتر)	نوع قیر جدید	ماده جوانساز	ماده افزودنی آسفالت گرم	مقدار تراشه آسفالت (درصد)	نوع مخلوط
۴۵	سه تکرار برای هر حالت	صفر، ۳، ۵، ۷ و ۹	سه ترک به عمق ۲۵، ۳۱/۸ و ۳۸	۸۵/۱۰۰	-	زایکوترم	بدون تراشه آسفالت	آسفالت گرم
۱۳۵	سه تکرار برای هر حالت	صفر، ۳، ۵، ۷ و ۹	سه ترک به عمق ۲۵، ۳۱/۸ و ۳۸	۸۵/۱۰۰	روغن کلزا	زایکوترم	۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد	آسفالت گرم حاوی تراشه آسفالت

پیرشدگی مخلوط آسفالتی در ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سال از عمر روسازی، در گرمخانه نگهداری شدند [۵-۷]. در جدول ۷ علامت اختصاری نمونه‌ها نشان داده شده است.

#### ۴-۲- آزمایش شکست

آزمایش خمش نیم‌دایره روی نمونه‌های مخلوط آسفالتی در دمای  $25^{\circ}\text{C}$  مطابق با استاندارد ASTM D8044-16 انجام شد [۲۵].

مطابق با این استاندارد، همانطور که در شکل ۵ به‌طور شماتیک نشان داده شده است، نمونه‌های آسفالتی

#### ۴-۱- فرآیند پیرشدگی مورد استفاده در این تحقیق

هدف از این پژوهش، اعمال پیرشدگی روی نمونه‌های متراکم شده به منظور تخمین پیرشدگی روسازی در طول ۲۰ سال عمر روسازی است؛ بنابراین تأثیر سطوح مختلف پیرشدگی مخلوط‌های آسفالتی روی عملکرد بلندمدت روسازی مورد بررسی قرار گرفت. به همین منظور، مطابق با روش پیرشدگی امانی و همکاران، نمونه‌های نیم‌دایره پس از ایجاد ترک در آنها به مدت ۳، ۵، ۷ و ۹ روز در دمای  $85^{\circ}\text{C}$  به منظور شبیه‌سازی

ضریب بحرانی شدت تنش<sup>۹</sup> یکی از پارامترهای مهم در تحلیل رفتار شکست مواد بوده که تابع تنش وارده به نمونه و مشخصات هندسی آن است.

ضریب بحرانی شدت تنش در واقع نشان‌دهنده مقاومت مواد در برابر ترک‌خوردگی و شکست است. در این تحقیق، مقادیر مربوط به ضریب هندسی مطابق با تحقیق پیشین استفاده شده است [۲۶]. مقادیر آن در جدول ۸ مشاهده می‌گردد. بنابراین مقدار ضریب بحرانی شدت تنش از رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$K_{IC} = \frac{P_{cr}}{2rt} Y_I \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

که در آن ضریب بحرانی شدت تنش ( $K_{IC}$ ) در مد ۱ ( $P_{cr}$ ،  $(Pa \cdot m^{0.5})$  حداکثر بار  $r$ ، شعاع نمونه  $t$ ، ضخامت نمونه  $a$ ، عمق ترک  $m$ ) و  $Y_I$  ضریب هندسی است.

جدول ۸- مقادیر مربوط به ضریب هندسی در آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای در دمای میانی [۲۶]

عمق ترک (میلی‌متر)	۲۵	۳۲	۳۸
ضریب هندسی ترک در مد ۱	۰/۵۴۴	۰/۶۱۱	۰/۷۰۶

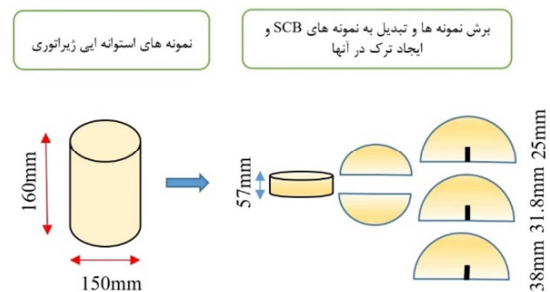
۴-۲-۲- انرژی کرنشی رهاسازی شده ( $J$  - انتگرال ( $J_C$ ))

این پارامتر، انرژی ذخیره شده در نمونه را برای انتشار ترک توصیف می‌کند، به طوری که  $J_C$  بالاتر، میزان مقاومت در برابر شکست مطلوب‌تری را ارائه می‌دهد. برای این منظور، مقدار انرژی کرنشی رهاسازی شده در لحظه شکست ( $U$ )، با استفاده از منحنی نیرو-جابجایی تعیین شد. در آزمایش SCB، سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی برابر با انرژی کرنشی رهاسازی شده در لحظه شکست است. سپس رگرسیون خطی ناشی از کار شکست به ازای هر عمق ترک به دست آمد ( $dU/da$ )؛ شیب خط رگرسیونی (به عنوان مثال، شکل ۷ منحنی رگرسیونی حاصل از آزمایش SCB در دمای میانی را نشان می‌دهد) تقسیم بر

دارای ضخامت ۵۷ و سه عمق ترک ۲۵، ۳۱/۸ و ۳۸ میلی‌متر هستند.

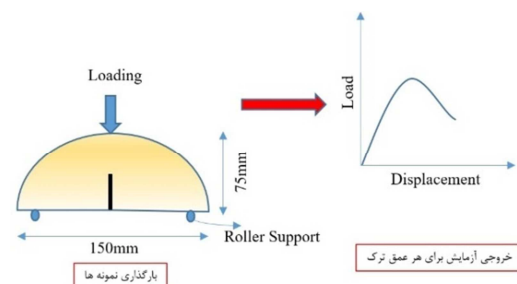
جدول ۷- علامت اختصاری نمونه‌ها

R0	مخلوط بدون تراشه آسفالتی
R50	مخلوط حاوی ۵۰ درصد تراشه آسفالتی
R75	مخلوط حاوی ۷۵ درصد تراشه آسفالتی
R100	مخلوط حاوی ۱۰۰ درصد تراشه آسفالتی
A0	مخلوط بدون پیرشدگی
A5	مخلوط معادل ۵ سال پیرشدگی (۳ روز)
A10	مخلوط معادل ۱۰ سال پیرشدگی (۵ روز)
A15	مخلوط معادل ۱۵ سال پیرشدگی (۷ روز)
A20	مخلوط معادل ۲۰ سال پیرشدگی (۹ روز)



شکل ۵- مراحل تهیه نمونه‌های SCB

در بارگذاری مورد استفاده در این تحقیق (بارگذاری مود اول یا مود بازشدگی که در آن بارگذاری وارد بر جسم بر صفحه حاوی ترک عمود است) موقعیت ترک اولیه دقیقاً در وسط لبه صاف نمونه SCB قرار دارد، به طوری که فاصله آن از دو تکیه‌گاه بارگذاری به یک اندازه است. نحوه بارگذاری مطابق شکل ۶، به صورت یکنواخت (مونوتونیک) و با سرعت ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه اعمال شده است.



شکل ۶- نحوه بارگذاری نمونه‌های SCB

۴-۲-۱- ضریب بحرانی شدت تنش  $K_{IC}$

<sup>۹</sup>- Critical Stress Intensity Factor

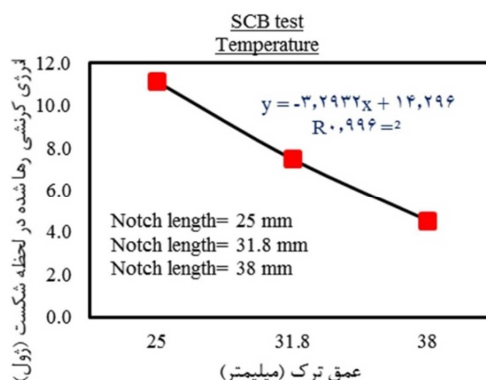
است؛ بنابراین می‌توان دریافت که تأثیر توأم پیرشدگی و افزودن تراشه آسفالت به طور قابل توجهی روی میزان مقاومت نمونه‌ها در برابر شکست تأثیر می‌گذارد. به عنوان مثال، با مقایسه نمونه‌های مخلوط آسفالتی دارای طول ترک ۲۵ میلی‌متر و با سطح پیرشدگی معادل ۱۵ سال (A15)، می‌توان ملاحظه کرد که با افزودن ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد تراشه آسفالت، نیروی شکست نمونه‌های به ترتیب ۷۱، ۷۳ و ۹۲ درصد افزایش یافته است. به عبارت دیگر، می‌توان ادعان کرد که میزان تردشدگی نمونه‌ها به ترتیب ۷۱، ۷۳ و ۹۲ درصد نسبت به نمونه‌های بدون تراشه آسفالت (A15- 0% RAP) افزایش یافته است. براساس جدول ۷،  $R_i$  مخفف مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف تراشه آسفالت و  $A_i$  مخفف سطوح مختلف پیرشدگی (عمر روسازی براساس سال)، می‌باشد.

#### ۵-۲- تأثیر درصد‌های مختلف تراشه آسفالت بر حداکثر نیروی شکست ( $P_{cr}$ ) نمونه‌ها در سطوح مختلف پیرشدگی

براساس نتایج حاصله که در شکل ۹ نشان داده شده است، به‌طور کلی می‌توان ادعان کرد که در تمامی طول ترک‌ها (۲۵، ۳۲ و ۳۸ میلی‌متر) با افزایش سطح پیرشدگی، حداکثر نیروی قابل تحمل در نمونه‌ها افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، حداکثر نیرو ( $P_c$ ) در نمونه‌های مخلوط آسفالتی حاوی ۵۰ درصد تراشه آسفالت، با افزایش سطح پیرشدگی از A0 به A5، A10، A15 و A20 به ترتیب ۱۵، ۲۸، ۳۵ و ۴۲ درصد افزایش پیدا می‌کند. همین روند در تمامی درصد‌های مختلف تراشه آسفالت نیز مشاهده می‌گردد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزایش سطح پیرشدگی مخلوط‌های آسفالتی (که موجب سفتی مخلوط‌های آسفالتی می‌گردد) موجب افزایش حداکثر نیروی لازم برای شکست می‌گردد.

علاوه بر این، مشاهده می‌گردد که وجود تراشه آسفالت در مخلوط آسفالتی گرم به علت داشتن قیرهای پیرشده، حداکثر نیروی لازم برای شکست مخلوط‌های

ضخامت نمونه (b) برابر با مقدار بحرانی نرخ رهاسازی انرژی کرنشی تعریف می‌شود که در رابطه (۲) نشان داده شده است:



شکل ۷- انرژی کرنشی رها شده در برابر عمق ترک

$$J_c = -\frac{1}{b} \left( \frac{dU}{da} \right) \quad (2)$$

#### ۵- تحلیل نتایج

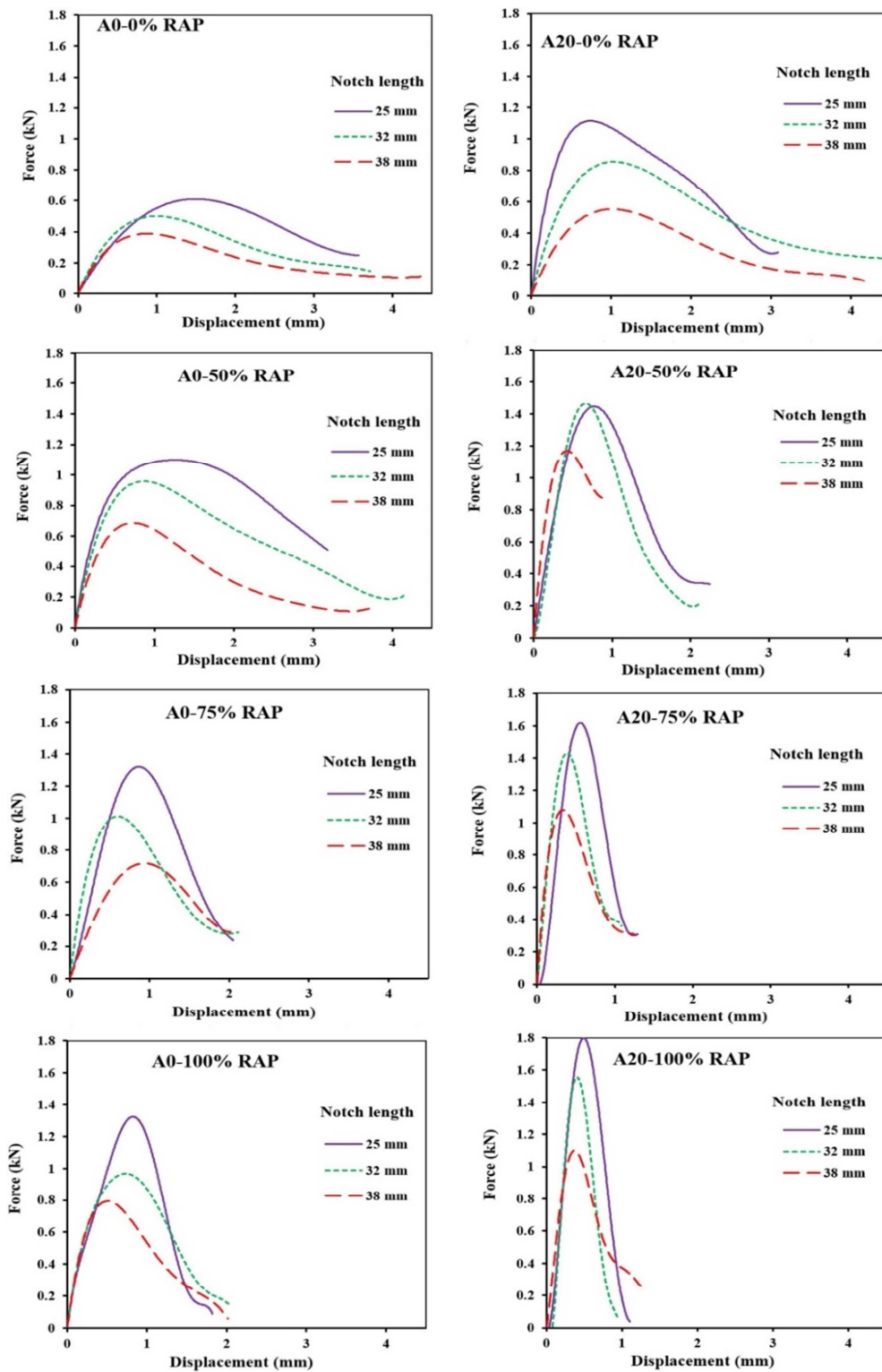
در این پژوهش، هدف بررسی رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی درصد‌های بالای تراشه آسفالت در بلندمدت با استفاده از نتایج آزمایش خمش نیم دایره در دمای  $25^\circ\text{C}$  بوده است، بنابراین با انجام آزمایش شکست بر روی نمونه‌ها، منحنی‌های نیرو-جابجایی به‌دست آمده‌اند، سپس با استفاده از این منحنی‌ها، سایر پارامترها نظیر  $U$ ،  $P_{cr}$  و  $K_{IC}$  و  $J_c$  محاسبه شدند.

#### ۵-۱- منحنی نیرو- تغییرمکان

منحنی نیرو- تغییرمکان برخی از نمونه‌ها (با توجه به زیاد بودن تعداد کل آنها) در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است، با افزایش میزان تراشه آسفالت در مخلوط‌های آسفالتی، حداکثر نیروی لازم برای شکست افزایش، اما در مقابل تغییرمکان کاهش یافته است؛ همچنین در مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالت با افزایش سطح پیرشدگی، حداکثر نیروی لازم برای شکست افزایش و تغییرمکان کاهش یافت که هر دو مورد فوق نشان از سفت شدن مخلوط‌ها

نسبت کمتری افزایش می‌یابد.

آسفالتی را در دمای میانی افزایش داده و همواره با افزودن بیشتر مقدار تراشه آسفالت این مقدار نیرو به

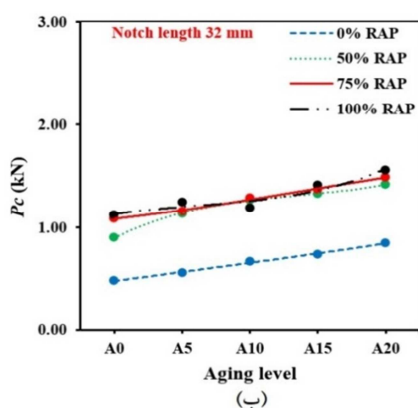


شکل ۸- منحنی نیرو- تغییر مکان برخی نمونه‌ها برای درصدهای مختلف تراشه آسفالتی و پیرشدگی

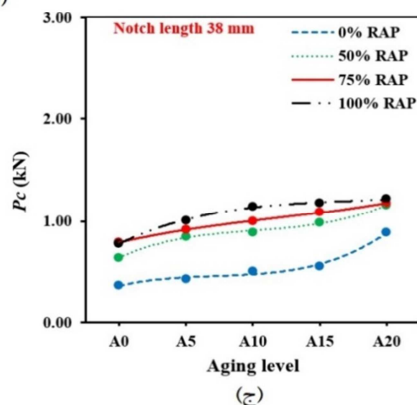
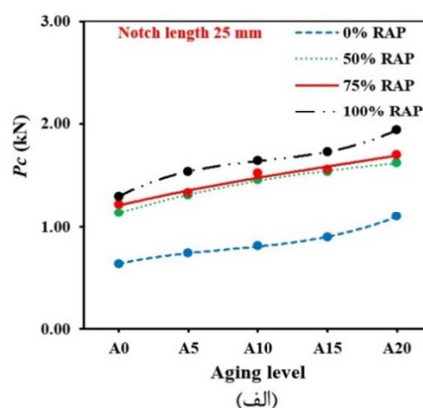
مخلوط‌های آسفالتی ۴۳ درصد افزایش می‌یابد (مقایسه حداکثر نیروی نمونه‌های بدون تراشه آسفالت و حاوی ۵۰

به عنوان مثال، در نمونه‌های شاهد (A0) با افزودن ۵۰ درصد تراشه آسفالت حداکثر نیروی لازم برای شکست

بنابراین میزان افزایش حداکثر نیروی لازم برای شکست با افزایش تراشه آسفالت شیب ملایم‌تری پیدا نموده است. همچنین با افزایش عمق ترک، مقدار حداکثر نیروی لازم برای شکست مخلوط‌های آسفالتی گرم کاهش می‌یابد. این موضوع در تمامی عمق‌های ترک و در تمامی سطوح مختلف پیرشدگی مشاهده گردید. به عنوان مثال در نمونه‌های A0 حاوی ۵۰ درصد تراشه آسفالت حداکثر نیروی لازم برای شکست نمونه‌ها با عمق ترک ۲۵، ۳۲ و ۳۸ میلیمتر به ترتیب برابر با ۱/۱۴، ۰/۹۰ و ۰/۶۴ کیلونیوتن است.



درصد تراشه آسفالت؛ این در حالی است که در نمونه‌های شاهد (A0) با افزودن ۷۵ درصد تراشه آسفالت حداکثر نیروی لازم برای شکست مخلوط‌های آسفالتی ۵۰ درصد افزایش می‌یابد (مقایسه حداکثر نیروی نمونه‌های حاوی ۵۰ و ۷۵ درصد تراشه آسفالت و اختلاف ۷ درصد بین آنها)؛ از دلایل این امر، استفاده از جوانساز و استفاده از تکنولوژی آسفالت گرم است، جوانساز با بازیابی خواص قیرهای پیر شده باعث نرمی مخلوط‌های آسفالتی گردیده و استفاده از تکنولوژی آسفالت گرم (دمای کمتر مورد نیاز برای اختلاط و تراکم) سبب کندی روند پیرشدگی شده،



شکل ۹- حداکثر نیروی لازم برای شکست ( $P_{cr}$ ) در عمق ترک (الف) ۲۵ میلیمتر، (ب) ۳۲ میلیمتر و (ج) ۳۸ میلیمتر

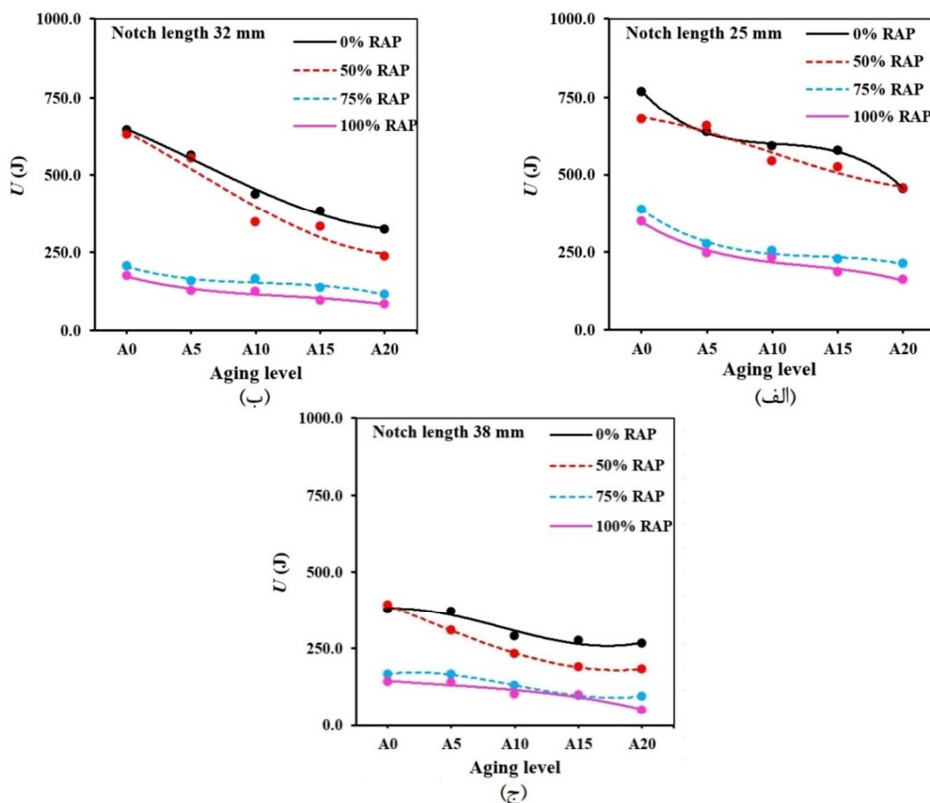
به دست می‌آید. همانطور که ملاحظه می‌شود، با افزایش سطح پیرشدگی مخلوط آسفالتی، انرژی کرنشی نمونه‌ها کاهش می‌یابد؛ دلیل این امر آن است که هرچند حداکثر نیروی لازم برای شکست نمونه‌ها با افزایش سطح پیرشدگی افزایش یافت ولی جابه‌جایی نظیر آن در لحظه شکست کاهش می‌یابد (به دلیل سفت‌تر شدن)، در نتیجه با در نظر گرفتن تأثیر توأم این دو پارامتر در محاسبه انرژی کرنشی، می‌توان نتیجه گرفت که انرژی کرنشی

### ۵-۳- تأثیر درصدهای مختلف تراشه آسفالت بر انرژی کرنشی (U) نمونه‌ها در سطوح مختلف پیرشدگی

نتایج مربوط به انرژی کرنشی مخلوط‌های آسفالتی مورد مطالعه در این تحقیق در دمای میانی در شکل ۱۰ آورده شده است. انرژی کرنشی مخلوط‌های آسفالتی تابع ظرفیت باربری و مقدار جابه‌جایی بوده و با محاسبه سطح زیر منحنی نمودارهای بار- تغییرمکان تا حداکثر بار وارده،

مقدار جابه‌جایی در لحظه شکست به دلیل سفتی مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالتی کاهش یافت. بنابراین در مجموع، انرژی کرنشی با افزایش تراشه آسفالتی روند کاهشی داشته است. البته این روند کاهشی برای نمونه‌های حاوی ۵۰ درصد تراشه آسفالت نسبت به نمونه‌های بدون تراشه آسفالت در مقایسه با نمونه‌های حاوی ۷۵ و ۱۰۰ درصد تراشه آسفالت نسبت به نمونه‌های بدون تراشه آسفالت، کمتر است، دلیل این امر را می‌توان هم نقش مؤثر جوانساز در بهبود پیرشدگی قیر دانست. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از جوانساز روغن کلزا موجب بهبود قیر پیرشده و بازیابی آن و رسیدن به شرایطی مشابه قیر تازه برای مخلوط‌های حاوی ۵۰ درصد تراشه آسفالت نسبت به درصد‌های بالاتر ایجاد نمود.

نمونه‌ها در لحظه شکست کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، همانطور که در شکل ۱۰- ب مشاهده می‌گردد، انرژی کرنشی نمونه‌های شاهد (RAP ٪۰) در سطوح مختلف پیرشدگی A0، A5، A10، A15 و A20 به ترتیب برابر با ۷۶۸/۹، ۶۳۸، ۵۹۲/۷، ۵۷۸ و ۴۵۵/۵ ژول بر مترمربع است. این در حالی است که انرژی کرنشی نمونه‌های حاوی ۱۰۰٪ RAP در سطوح مختلف پیرشدگی A0، A5، A10، A15 و A20 به ترتیب برابر با ۳۴۸/۳، ۲۴۶/۳، ۲۳۲، ۱۸۶/۶ و ۱۶۱/۴ ژول بر مترمربع است. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که افزودن تراشه آسفالت در سطوح مختلف پیرشدگی موجب کاهش مقدار انرژی کرنشی نمونه‌های آسفالتی گرم می‌شود، برای این حالت نیز حداکثر نیروی لازم برای شکست با توجه به وجود تراشه آسفالت، افزایش را نشان داد ولی در مقابل،



شکل ۱۰- انرژی کرنشی (U) در عمق ترک (الف) ۲۵ میلیمتر، (ب) ۳۲ میلیمتر و (ج) ۳۸ میلیمتر

با این تحقیق، همانطور که در ابتدای این پاراگراف نیز بیان گردید، نشان‌دهنده این موضوع است که استفاده از درصد بالای تراشه آسفالت هرچند نیروی لازم برای

در پژوهش‌های پیشین انجام شده، افزایش تراشه آسفالت (حداکثر تا ۵۰ درصد، تراشه آسفالت استفاده شده بود)، باعث افزایش انرژی کرنشی شد که در مقایسه

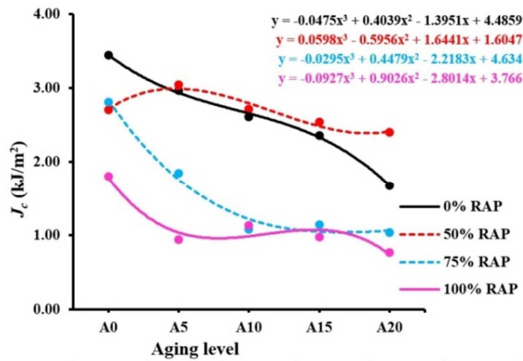
آسفالت، جوانساز و عمق ترک هریک به نحوی روی انرژی کرنشی مخلوط آسفالتی تأثیرگذار هستند و باید در ارزیابی عملکرد بلندمدت مخلوط آسفالتی مورد توجه قرار گیرند؛ البته نتایج این بخش نشان داد رفتار مقاومت در برابر شکست مخلوط‌های حاوی ۵۰ درصد تراشه آسفالت تا حدود مشابه رفتار مخلوط‌های بدون تراشه آسفالت است و افزایش بیشتر تراشه آسفالتی موجب سخت و تردتر شدن مخلوط‌های آسفالتی گرم شده است.

#### ۴-۵- تأثیر درصد‌های مختلف تراشه آسفالت بر انرژی کرنشی رها سازی شده (J<sub>c</sub>) در سطوح مختلف پیرشدگی

انرژی کرنشی رهاسازی شده (J<sub>c</sub>) نمونه‌های مخلوط آسفالتی گرم در سطوح مختلف پیرشدگی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، برای تمامی نمونه‌های آسفالتی با درصد مختلف تراشه آسفالت (صفر، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد)، هرچه سطح پیرشدگی مخلوط آسفالتی افزایش می‌یابد، انرژی کرنشی رهاسازی شده (J<sub>c</sub>) نمونه‌ها کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه J<sub>c</sub> بالاتر نشان‌دهنده مقاومت بالای نمونه در برابر ترک‌های خستگی (منظور ترک‌های دمایی میانی) است، می‌توان نتیجه گرفت که نمونه‌های پیرنشده با درصد‌های مختلف تراشه آسفالت مقاومت بیشتری در برابر ترک‌های خستگی از خود نشان می‌دهند. به عنوان مثال، ملاحظه می‌گردد که مقدار J<sub>c</sub> نمونه‌های آسفالتی فاقد تراشه‌های آسفالتی (0% RAP) در سطوح مختلف پیرشدگی A5، A10، A15 و A20 به ترتیب ۱۴، ۲۴، ۳۱ و ۵۲ درصد کمتر از نمونه‌های پیرنشده (A0) است. این در حالی است که مقدار J<sub>c</sub> نمونه‌های آسفالتی حاوی ۱۰۰ درصد تراشه‌های آسفالتی (100% RAP) در سطوح مختلف پیرشدگی A5، A10، A15 و A20 به ترتیب ۴۸، ۳۷، ۴۶ و ۵۸ درصد کمتر از نمونه‌های پیرنشده (A0) است. سطوح مختلف پیرشدگی موجب کاهش در مقدار J<sub>c</sub> نمونه‌های آسفالتی گرم می‌شود. همچنین می‌توان گفت که تأثیر توام پیرشدگی و افزودن تراشه آسفالت موجب سفت شدن

شکست را افزایش می‌دهد اما در مقابل باعث کاهش محسوس جابه‌جایی در لحظه شکست می‌شود که در مجموع موجب کاهش انرژی کرنشی شده است [۲۰ و ۲۷].

با مقایسه شکل‌های ۱۰ الف و پ می‌توان دریافت که با افزایش عمق ترک مقدار انرژی کرنشی نمونه‌ها به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد (در تحقیقات گذشته نیز این یافته مشاهده شده است [۲۰ و ۲۷]). بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که عمق ترک تأثیر قابل توجهی روی مقاومت نمونه در برابر ترک خوردگی دارد. به عنوان مثال، در نمونه‌های A0 میزان انرژی کرنشی نمونه‌ها با افزایش عمق ترک از ۲۵ به ۳۲ و ۳۸ میلی‌متر به ترتیب ۱۶ و ۵۱ درصد کاهش می‌یابد. علاوه بر این، می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر توام پیرشدگی و افزایش عمق ترک به طور قابل توجهی روی انرژی کرنشی نمونه‌ها تأثیر می‌گذارد. به عنوان مثال، با افزایش عمق ترک از ۲۵ به ۳۲ میلی‌متر، انرژی کرنشی نمونه‌های A0 به میزان ۱۶ درصد کاهش می‌یابد، این در حالی است که در نمونه‌های A20 به میزان ۲۸ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش سطح پیرشدگی تأثیر منفی روی انرژی کرنشی نمونه‌های مخلوط آسفالتی گرم دارد. همین نتیجه برای نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف تراشه آسفالت نیز تکرار گردید. به عنوان مثال، در نمونه‌های A0 حاوی ۵۰ درصد تراشه آسفالت با افزایش عمق ترک از ۲۵ به ۳۲ میلی‌متر، انرژی کرنشی نمونه‌ها به میزان ۷ درصد کاهش می‌یابد، این در حالی است که در نمونه‌های A20 به میزان ۴۸ درصد کاهش می‌یابد. نکته قابل توجهی دیگری که از این نتایج می‌توان استنباط کرد این است که این میزان کاهش برای نمونه‌های حاوی تراشه آسفالت بیش از نمونه‌های فاقد تراشه آسفالت است. یکی از دلایل این امر را می‌توان به وجود قیر پیرشده در تراشه آسفالت و کاهش چسبندگی میان قیر و مصالح سنگی دانست. بنابراین، می‌توان به طور کلی نتیجه گرفت که سطح پیرشدگی مخلوط آسفالتی، میزان تراشه



شکل ۱۱- نرخ رهاسازی انرژی کرنشی ( $J_c$ ) نمونه‌ها

#### ۵-۵- تأثیر درصد‌های مختلف تراشه آسفالت بر ضریب بحرانی شدت تنش ( $K_{IC}$ ) در سطوح مختلف پیرشدگی

مقادیر مربوط به  $K_{IC}$  مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی درصد‌های مختلف تراشه آسفالت (صفر، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد) در سطوح مختلف پیرشدگی (A0، A5، A10، A15 و A20) با استفاده از روابط ارائه شده در بند ۴-۲ به دست آمده و نتایج آن در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، به طور کلی با افزایش سطح پیرشدگی، میزان  $K_{IC}$  نمونه‌ها افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، همانطور که در شکل ۱۲-الف ملاحظه می‌گردد، در نمونه‌های فاقد تراشه آسفالت با افزایش سطح پیرشدگی از A0 به A20،  $K_{IC}$  به میزان ۷۲ درصد افزایش می‌یابد. این نتیجه در تمامی مخلوط‌های آسفالتی با طول شیارهای مختلف مشاهده گردید. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که مخلوط‌های آسفالتی پیرشده دارای خاصیت ترد و شکننده بوده و بنابراین سفتی بیشتری دارند که منجر به افزایش  $K_{IC}$  آنها می‌شود. در پژوهش‌های انجام شده توسط محققان دیگر نیز در دمای میانی با افزایش تراشه آسفالت،  $K_{IC}$  افزایش یافته است [۲۱، ۳۱ و ۳۲].

براساس نتایج ارائه شده در شکل ۱۲ (به ویژه شکل الف و ب)، شیب تغییر  $K_{IC}$  نسبت به سطوح مختلف پیرشدگی برای همه مخلوط‌ها تا حدود زیادی مشابه هم است، به عبارتی پس از ایجاد تغییر در  $K_{IC}$  مخلوط‌های آسفالتی در ابتدا با افزایش تراشه آسفالت، نرخ تغییر  $K_{IC}$

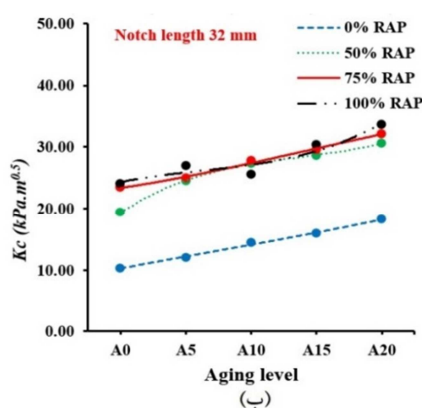
قیر موجود در نمونه‌های آسفالتی شده، در نتیجه موجب کاهش چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی شده، در نهایت منجر به کاهش مقاومت نمونه‌های مخلوط‌های آسفالتی در برابر ترک‌های خستگی می‌شود.  $J_c$  به دست آمده در این تحقیق برای مخلوط‌ها در عمر پیرشدگی مختلف، در بازه ۰/۷۴ الی ۳/۴۴ کیلوژول بر مترمربع، قرار داشتند، که در مقایسه با حداقل‌های ذکر شده در تحقیقات قبلی (۰/۵ الی ۰/۶۵ کیلوژول بر مترمربع)، قابل قبول هستند [۲۸ و ۲۹]. در برخی از تحقیقات گذشته مقدار  $J_c$  با افزایش RAP، افزایش و در برخی دیگر کاهش یافته است [۱۹ و ۳۰].

علاوه بر این، همانطور که در شکل ۱۱ ملاحظه می‌گردد در بعضی نقاط، نمودارهای مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی درصد‌های مختلف تراشه آسفالت در سطوح مختلف پیرشدگی با یکدیگر تلاقی کردند. به عنوان مثال، نمونه‌های حاوی ۵۰ درصد تراشه آسفالت در سطوح مختلف پیرشدگی A5، A10، A15 و A20 مقدار  $J_c$  بیشتری در مقایسه با نمونه‌های فاقد تراشه آسفالت از خود نشان می‌دهند. در این قسمت نیز نقش مؤثر روغن کلزا به عنوان جوانساز همانند توضیحات ارائه شده در بخش انرژی کرنشی مشهود است. براساس نتایج حاصل از این تحقیق، پارامتر  $J_c$  که محاسبات آن بر پایه نرخ تغییرات سطح زیر منحنی بار-جابجایی در لحظه شکست نسبت به طول ترک‌های مختلف است، شاخص مناسب‌تری برای ارزیابی مقاومت ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد. زیرا همانطور که مشاهده گردید دو عامل اصلی پیرشدگی و افزایش تراشه آسفالت موجب سفتی مخلوط‌های آسفالتی و در نتیجه موجب افزایش نیروی لازم برای شکست گردیدند، بنابراین نیرو به تنهایی نمی‌تواند ملاک ارزیابی برای مقاومت در برابر ترک‌خوردگی باشد.



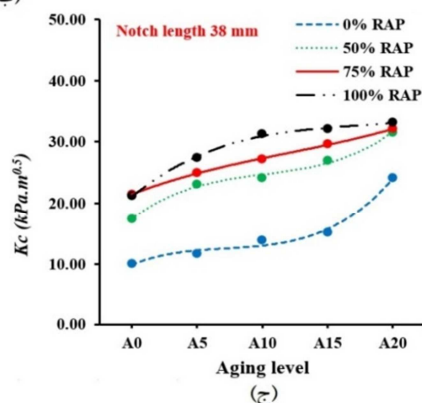
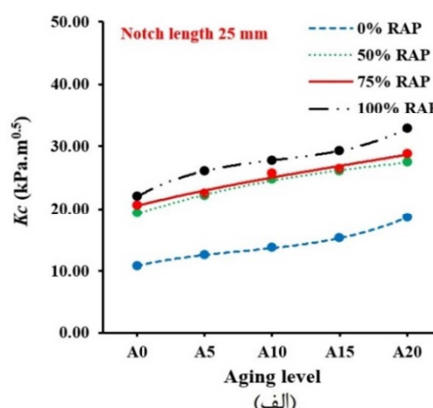
به ۳۲ میلیمتر مقدار ضریب شدت تنش، ۱۳ درصد افزایش یافته، این در حالی است که با افزایش طول شیار از ۲۵ میلیمتر به ۳۸ میلیمتر مقدار ضریب شدت تنش به میزان ۴ درصد افزایش می‌یابد.

بنابراین، می‌توان به طور کلی نتیجه گرفت که سطح پیرشدگی مخلوط آسفالتی، میزان تراشه آسفالت، جوانساز و طول شیار هریک به نحوی روی ضریب شدت تنش مخلوط آسفالتی تأثیرگذار هستند و باید در ارزیابی عملکرد بلندمدت مخلوط آسفالتی مورد توجه قرار گیرند.



در طول زمان برای همه مخلوط‌ها تا حدودی یکسان می‌باشد؛ بنابراین استفاده همزمان از جوانساز و تکنولوژی آسفالت گرم می‌تواند تأثیر مثبت در عدم تغییر غیرمعمول  $K_{IC}$  در طول زمان برای مخلوط‌های آسفالتی حاوی تراشه آسفالت، داشته باشد.

علاوه بر این، افزایش عمق ترک در نمونه‌ها، موجب افزایش  $K_{IC}$  می‌گردد ( $K_{IC}$  براساس معادله ارائه شده، دارای رابطه مستقیم با عمق ترک و حداکثر بار است). به عنوان مثال، در نمونه‌های پیرنشده (A0) حاوی ۷۵ درصد تراشه آسفالت با افزایش طول شیار از ۲۵ میلیمتر



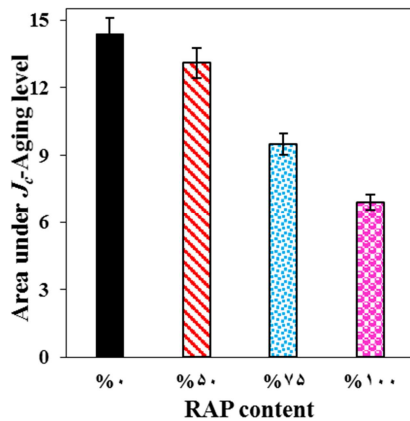
شکل ۱۲- ضریب بحرانی شدت تنش ( $K_{IC}$ ) در عمق ترک، (الف) ۲۵ میلیمتر، (ب) ۳۲ میلیمتر و (ج) ۳۸ میلیمتر

است اما در بررسی  $U$  و  $J_C$  مشاهده گردید که افزایش پیرشدگی مخلوط آسفالتی و افزودن تراشه آسفالت، موجب تغییر در رفتار مخلوط‌های آسفالتی شده و منحنی‌ها در برخی نقاط به یکدیگر نزدیک و یا با یکدیگر برخورد می‌کنند. در این تحقیق، به منظور مقایسه مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف تراشه آسفالت، سطح زیر منحنی انرژی کرنشی رهاسازی شده ( $J_C$ ) - پیرشدگی تعیین شد. با توجه به اینکه نمونه‌های

#### ۵-۶- مقایسه عملکرد بلند مدت مخلوط‌های آسفالتی گرم در برابر ترک خوردگی

در بندهای قبل به بررسی  $P_{cr}$ ،  $K_{IC}$ ،  $U$  و  $J_C$  پرداخته شد، با توجه به ماهیت تراشه آسفالت (دارای قیر پیرشده) و پیرشدگی مجدد نمونه‌ها که باعث سفتی مخلوط‌های آسفالتی می‌گردند افزایش  $P_{cr}$  و  $K_{IC}$  (با توجه به ارتباط مستقیم با حداکثر نیرو) قابل پیش‌بینی بوده

ولی استفاده از جوانساز و تکنولوژی آسفالت گرم موجب بهبود خواص قیر و کندی روند پیرشدگی گشته و مانع از افت بسیار زیاد مقاومت در برابر ترک‌خوردگی در دمای میانی شدند.



شکل ۱۳- مساحت زیر منحنی نمودار Jc-Aging level

#### ۶- هزینه تولید (مقایسه اقتصادی)

هزینه آسفالت در پروژه‌های راهسازی بخش زیادی از هزینه کل را شامل می‌شود، در نتیجه تولید آسفالت با مشخصات جدید که دارای کیفیت مشابه و بهتر از آسفالت داغ متداول بوده و هزینه تولید آن نیز قابل رقابت با آن باشد، بسیار در پیشرفت زیر ساخت کشور (با بودجه مشخص، سطح بیشتری تحت پوشش قرار می‌گیرد) مؤثر می‌باشد. به منظور مقایسه هزینه اجرای روسازی آسفالتی، هزینه یک تن آسفالت مورد بررسی قرار گرفته است که با توجه به مشخص بودن طول، عرض و ضخامت لایه آسفالت مورد استفاده (به همراه وزن مخصوص آسفالت) در هر پروژه راهسازی، این هزینه قابل تعمیم و مقایسه می‌باشد. در جدول ۹ هزینه تولید مخلوط‌های آسفالتی جهت مقایسه ارائه شده است.

براساس نتایج این تحقیق، درصد قیر بهینه برای مخلوط‌های حاوی صفر، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد تراشه آسفالت به ترتیب ۴/۷، ۵/۱، ۵/۳۵ و ۵/۶ درصد است که با توجه به وجود تراشه آسفالت مقدار قیر (جدید و روغن) مورد نیاز به ترتیب ۴/۷، ۲/۵۹، ۱/۵۸ و ۰/۵۸ درصد است. مقدار زایکوترم ۰/۱ درصد وزن کل قیر و مقدار روغن کلزا

مخلوط آسفالتی مختلف در ابتدا ممکن است عملکرد یکسانی از یکدیگر در برابر ترک‌های خستگی (منظور از ترک‌های خستگی، ترک‌های دمای میانی  $25^{\circ}\text{C}$  است) نشان دهند، اما در طول بهره‌برداری در اثر عواملی همچون پیرشدگی ممکن است رفتار مخلوط‌های آسفالتی به کلی دچار تغییر شود؛ بنابراین، ارزیابی عملکرد بلندمدت مخلوط‌های آسفالتی در طول عمر روسازی امری ضروری است. شکل ۱۳ مساحت زیر منحنی Jc-پیرشدگی مخلوط‌های آسفالتی گرم که از شکل ۹ به دست آمده را جهت مقایسه عملکرد بلندمدت مخلوط‌های آسفالتی گرم در برابر ترک در دمای میانی نشان می‌دهد؛ همانطور که ملاحظه می‌شود، نمونه‌های بدون تراشه‌های آسفالت (0% RAP) بیشترین سطح زیر منحنی را ارائه می‌دهد. مطابق با این شکل مشاهده می‌شود که سطح زیر منحنی Jc-پیرشدگی نمونه‌های بدون تراشه آسفالت (0% RAP) به ترتیب ۸، ۳۴ و ۵۲ درصد بیشتر از نمونه‌های حاوی ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد تراشه آسفالتی است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که نمونه‌های بدون تراشه آسفالت ۸، ۳۴ و ۵۲ درصد مقاومت بیشتری در برابر ترک‌های خستگی نسبت به نمونه‌های حاوی ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد تراشه آسفالت از خود نشان می‌دهند. اما همین نتیجه نشان از اختلاف کم بین R0 و R50 دارد که نشان‌دهنده امکان استفاده از تراشه آسفالت بیشتر در مخلوط آسفالت گرم در بلندمدت است؛ همچنین مقایسه بین R0 با R75 و R100 نشان می‌دهد که این مخلوط‌ها نیز در بلندمدت دارای اختلاف زیاد نمی‌باشند و می‌بایست سایر پارامترها و مقایسه اقتصادی جهت تصمیم‌گیری نهایی توسط پیمانکاران جهت استفاده از مقدار زیاد تراشه آسفالت در مخلوط‌های آسفالت گرم انجام شود. بنابراین نتایج این تحقیق نشان داد که تأثیر توام پیرشدگی و افزودن مقادیر بالای تراشه آسفالت بر اتصال (چسبندگی) بین قیر و سنگدانه‌ها مؤثر بوده و در کل، باعث کاهش مقاومت در برابر ترک‌خوردگی در دمای میانی در بلندمدت گردیدند،

آسفالت، هزینه تراش آسفالت با این فرض که در هر صورت می‌بایست تراشه آسفالت برداشت شود (به دلیل خرابی روسازی یا افزایش ارتفاع خط پروژه و غیره)، لحاظ نشده است. با توجه به دمای پایین برای تولید آسفالت گرم، هزینه صرفه‌جویی در سوخت مصرفی در تولید و همچنین هزینه صرفه‌جویی ناشی از کاهش آلاینده، به عنوان جنبه مثبت برای آسفالت گرم است. هزینه صرفه‌جویی در عدم دپوی تراشه آسفالت (هزینه حمل به دپو و تخریب محیط زیست)، به عنوان جنبه مثبت برای آسفالت گرم حاوی تراشه آسفالت است.

۷ درصد وزن قیر تراشه آسفالت مصرفی است. برای آسفالت داغ، مقدار قیر بهینه ۵/۰ درصد فرض شده است. قیمت هر کیلو روغن کلزا ۸۰۰ هزار ریال، قیمت هر کیلو زایکوترم ۱۵ میلیون ریال، قیمت هر تن مصالح سنگی جدید ۵ میلیون ریال، قیمت هر کیلو قیر ۱۰۰ هزار ریال لحاظ شده است. در هزینه مصالح سنگی جدید و قیر جدید (حجم بالای مورد نیاز در یک پروژه راهسازی) علاوه بر قیمت محصول، هزینه حمل با توجه به موقعیت پروژه، تأثیرگذار است. با توجه به وارداتی بودن زایکوترم، قیمت دلار تأثیرگذار است. در هزینه تراشه

جدول ۹- هزینه تولید یک تن آسفالت و مقایسه هزینه‌ها

نوع مخلوط	مقدار مصالح سنگی جدید (کیلوگرم)	مقدار مصالح سنگی جدید (میلیون ریال)	هزینه مصالح سنگی جدید (کیلوگرم)	مقدار تراشه آسفالت (کیلوگرم)	مقدار تراشه آسفالت (میلیون ریال)	هزینه تراشه آسفالت (کیلوگرم)	مقدار قیر جدید (کیلوگرم)	هزینه قیر جدید (میلیون ریال)	مقدار زایکوترم (کیلوگرم)	مقدار زایکوترم (میلیون ریال)	هزینه زایکوترم (کیلوگرم)	مقدار روغن کلزا (کیلوگرم)	مقدار روغن کلزا (میلیون ریال)	هزینه روغن کلزا (میلیون ریال)	جمع کل هزینه (میلیون ریال)
آسفالت گرم	R0	۱۰۰۰	۵	صفر	صفر	صفر	۴۹/۳۰	۴/۹۳	۰/۰۵	۰/۷۵	صفر	صفر	صفر	۱۰/۶۸	
	R50	۵۰۰	۲/۵	۵۰۰	صفر	صفر	۲۴/۸۳	۲/۴۸	۰/۰۵۴	۰/۸۱	صفر	۱/۷۸	۱/۴۲	۷/۲۱	
	R75	۲۵۰	۱/۲۵	۷۵۰	صفر	صفر	۱۳/۴۲	۱/۳۴	۰/۰۵۷	۰/۸۶	صفر	۲/۶۳	۲/۱۰	۵/۵۵	
	R100	صفر	صفر	۱۰۰۰	صفر	صفر	۲/۳۱	۰/۲۳	۰/۰۵۹	۰/۸۹	صفر	۳/۵۱	۲/۸۰	۴/۱۹	
آسفالت داغ	۱۰۰۰	۵	صفر	صفر	صفر	۵۲/۶۳	۵/۲۶	صفر	صفر	صفر	صفر	صفر	۱۰/۲۶		

اقتصادی جهت استفاده از این دو تکنولوژی انجام شود، تا بتوان بیشتر از آنها در صنعت راهسازی استفاده نمود.

## ۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، عملکرد بلندمدت (۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سال) مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی درصد‌های بالای تراشه آسفالتی در دمای میانی (۲۵ درجه سانتی‌گراد) در مقایسه با نمونه‌های بدون پیرشدگی بررسی شده است. مخلوط‌های آسفالتی بررسی شده، شامل یک نوع افزودنی آسفالت گرم (زایکوترم)، یک نوع ماده جوانساز (روغن گیاهی کلزا) و شامل صفر، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد تراشه آسفالتی بودند. آزمایش خمش نیم دایره‌ای (SCB) انجام

مطابق جدول ۹ و براساس فرضیات لحاظ شده، هزینه تولید آسفالت داغ متداول نسبت به آسفالت گرم کمتر است ولی با افزایش مقدار تراشه آسفالت به آسفالت گرم، هزینه‌ها نسبت به آسفالت داغ متداول کاهش می‌یابد. براساس نتایج این تحقیق هرچند در بلندمدت مقاومت در برابر ترک‌خوردگی در دمای میانی با افزایش تراشه آسفالت کاهش می‌یابد اما پارامترهایی نظیر  $C_{t,0}$  در بلندمدت، از حداقل‌های ذکر شده در تحقیقات دیگر بیشتر است، بنابراین با توجه به سایر مزایای ذکر شده در خصوص استفاده آسفالت گرم و تراشه آسفالت، پیشنهاد می‌گردد در پروژه‌های راهسازی خصوصاً در پروژه‌هایی که دسترسی به مصالح مناسب دشوار است، مقایسه قنی و

طول بهره‌برداری در اثر عواملی همچون پیرشدگی ممکن است رفتار مخلوط‌های آسفالتی به کلی دچار تغییر شود. بنابراین، ارزیابی عملکرد درازمدت مخلوط‌های آسفالتی در طول عمر روسازی امری ضروری است. در این تحقیق، به منظور مقایسه مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف تراشه آسفالت در سطوح مختلف پیرشدگی، سطح زیر منحنی  $J_C$ -پیرشدگی برای مخلوط‌های مختلف به عنوان پارامتری مناسب جهت ارزیابی عملکرد درازمدت مخلوط‌های آسفالتی معرفی گردید.

۶- نتایج ارزیابی بلندمدت و بررسی نتایج  $J_C$  و  $U$  در این تحقیق نشان داد که عملکرد شکست مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی تراشه آسفالت افت قابل توجهی نداشته‌اند و عملکرد شکست بلندمدت، مانع استفاده از درصد‌های بالاتر تراشه آسفالت در مخلوط‌های آسفالتی گرم نیست، اما می‌بایست سایر پارامترها نیز ارزیابی گردد.

و رفتار شکست براساس پارامترهایی از جمله  $U$ ،  $K_{IC}$ ،  $P_{cr}$  و  $J_C$  در مد ۱ مورد بررسی و محاسبه قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان دادند:

۱- با افزایش مقدار تراشه آسفالتی در مخلوط‌های آسفالتی و با پیرشدن نمونه‌ها،  $P_{cr}$  و  $K_{IC}$  نمونه‌ها، افزایش یافت.

۲- با افزایش مقدار تراشه آسفالتی در مخلوط‌های آسفالتی و با پیرشدن نمونه‌ها،  $U$ ، کاهش یافت.

۳- با پیرشدن نمونه‌ها، به طور کلی  $J_C$  نمونه‌ها، روند کاهشی داشته است؛ ولی افزایش تراشه آسفالت در نمونه‌های پیر شده، روند ثابت افزایش یا کاهشی برای  $J_C$  نداشته است.

۴-  $J_C$  نمونه‌های پیر شده حاوی تراشه آسفالت، با افزایش مقدار تراشه آسفالت ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت.

۵- با توجه به اینکه نمونه‌های مخلوط آسفالتی مختلف در ابتدای بهره‌برداری، ممکن است عملکرد یکسانی از یکدیگر در برابر ترک‌های خستگی و حرارتی از خود نشان دهند، اما در

## مراجع

- [1] Yang, S., Lee, J., Hwang, S., Kwon, S., & Baek, C. (2012). "Development of warm-mix asphalt additive and evaluation of performance", *Transportation research record*, 2294(1), 89-97.
- [2] Guo, M., Liu, H., Jiao, Y., Mo, L., Tan, Y., Wang, D., & Liang, M. (2020). "Effect of WMA-RAP technology on pavement performance of asphalt mixture: A state-of-the-art review", *Journal of Cleaner Production*, 266, 121704.
- [3] Pirmohammad, S., Sobhi, S., & yusefi, A. (2021). "Study on the effect of reclaimed asphalt pavement and rejuvenator on fracture behavior of WMA", *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(10), 18-18.
- [4] Sirin, O., Paul, D. K., & Kassem, E. (2018). "State of the art study on aging of asphalt mixtures and use of antioxidant additives", *Advances in Civil Engineering*, 2018.
- [5] Amani, S., Kavussi, A., & Karimi, M. M. (2020). "Effects of aging level on induced heating-healing properties of asphalt mixes", *Construction and Building Materials*, 263, 120105.
- [6] Amani, S., Kavussi, A., & M.karimi, M. (2020). "Evaluation the effects of activated carbon on induced healing of laboratory aged mixes under microwave radiation", *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, 11(3), 773-792.
- [7] Amani, S., Kavussi, A., & Karimi, M. M. (2020). "Application of Activated Carbon on Induced Heating-Healing Characteristics of Aged Mixes", In *RILEM International Symposium on Bituminous Materials*, 271-278.
- [8] Kavussi, A., & Motevalizadeh, S. (2019). "Determination of Fracture Properties of Warm Mix Asphalt at Low Temperatures Based on SCB Results", *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 5(2), 1-16.
- [9] Ameri, M., Amiri Hormozaki, M., Vamegh, M., & Khabiri, M. (2019). "Effect of Organic and Chemical warm additive on WMA performance", *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, 10(4), 987-1002.

- [10] Fakhri, M., Shahebrahimi, E., & Khodadadi, M. (2020). "Evaluation of the Effect of Zycotherm on Moisture Susceptibility of Warm Mix Asphalt Containing Crumb Rubber", *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(3), 641-654.
- [11] Bell, C. A., Wieder, A. J., & Fellin, M. J. (1994). *Laboratory aging of asphalt-aggregate mixtures: Field validation* (No. SHRP-A-390).
- [12] Saleh, N. F., Keshavarzi, B., Rad, F. Y., Mocelin, D., Elwardany, M., Castorena, C., ... & Kim, Y. R. (2020). "Effects of aging on asphalt mixture and pavement performance", *Construction and Building Materials*, 258, 120309.
- [13] Haghshenas, H., Nabizadeh, H., Kim, Y. R., & Santosh, K. (2016). "Research on high-RAP asphalt mixtures with rejuvenators and WMA additives", *Nebraska Department of Transportation*, Research Report. No. SPRP1 (15), M016.
- [14] Amani, S., Kavussi, A., & Karimi, M. (2020). "Evaluation of Induced Healing of Laboratory Aged Mixes Based on Semi-Circular Bending Test Results", *Modares Civil Engineering*, 20(3), 129-145.
- [15] Wu, S., Zhao, Z., Xiao, Y., Yi, M., Chen, Z., & Li, M. (2017). "Evaluation of mechanical properties and aging index of 10-year field aged asphalt materials", *Construction and Building Materials*, 155, 1158-1167.
- [16] Pirmohammad, S., Majd Shokorlou, Y., & Amani, B. (2020). "Laboratory investigations on fracture toughness of asphalt concretes reinforced with carbon and kenaf fibers", *Engineering Fracture Mechanics*, 226(2020), 106875.
- [17] Aliha, M. R. M., Razmi, A., & Mansourian, A. (2017). "The influence of natural and synthetic fibers on low temperature mixed mode I + II fracture behavior of warm mix asphalt (WMA) materials", *Engineering Fracture Mechanics*, 182(2017), 322-336.
- [18] Song, W., Huang, B., & Shu, X. (2018). "Influence of warm-mix asphalt technology and rejuvenator on performance of asphalt mixtures containing 50% reclaimed asphalt pavement", *Journal of Cleaner Production*, 192(2018), 191-198.
- [19] Singh, D., Ashish, P. K., & Hitragar, S. F. (2018). "Laboratory performance of recycled asphalt mixes containing wax and chemical based warm mix additives using semi circular bending and tensile strength ratio tests", *Construction and Building Materials*, 158, 1003-1014.
- [20] Singh, D., Chitragar, S. F., & Ashish, P. K. (2017). "Comparison of moisture and fracture damage resistance of hot and warm asphalt mixes containing reclaimed pavement materials", *Construction and Building Materials*, 157(2017), 1145-1153.
- [21] Yousefi, A., Pirmohammad, S., & Sobhi, S. (2020). "Fracture toughness of warm mix asphalt containing reclaimed asphalt pavement", *Journal of Stress Analysis Bu-Ali Sina University*, 65(1), 85-98.
- [22] ASTM. American society for testing and materials. (2003). *Road and Paving Material*, vol 04.03.
- [23] The Ministry of Roads and Urban Development. (2011). *Iran Highway Asphalt Paving Code* No. 234, 1st Edition, Office of Deputy for Strategic Supervision, Bureau of Technical Execution System, Tehran, Iran.
- [24] Asphalt Institute. (1986). *Asphalt hot-mix recycling*, The asphalt institute manual, Series No. 20 (MS-20), 2nd ed., College Park, Maryland, p. 46.
- [25] ASTM. American society for testing and materials. (2016). *Standard test method for evaluation of asphalt mixture cracking resistance using the semi-circular bend test (SCB) at intermediate temperatures*, Des D8044 – 16 2016:1-7.
- [26] Karimi, M. M., Dehaghi, E. A., & Behnood, A. (2020). "A Fracture-Based Approach to Characterize Long-Term Performance of Asphalt Mixes under Moisture and Freeze-Thaw Conditions", *Engineering Fracture Mechanics*, 241, 107418.
- [27] Yousefi, A., Behnood, A., Nowruzi, A., & Haghshenas, H. (2021). "Performance evaluation of asphalt mixtures containing warm mix asphalt (WMA) additives and reclaimed asphalt pavement (RAP)", *Construction and Building Materials*, (268), 121200.
- [28] Mogawer, W., Austerman, A., Mohammad, L., & Kutay, M. E. (2013). "Evaluation of high RAP-WMA asphalt rubber mixtures", *Road Materials and Pavement Design*, 14(sup2), 129-147.
- [29] Mohammad, L. N., Elseifi, M. A., Cooper III, S. B., Challa, H., & Naidoo, P. (2013). "Laboratory evaluation of asphalt mixtures that contain biobinder technologies", *Transportation research record*, 2371(1), 58-65.
- [30] Cao, W., Barghabany, P., Mohammad, L., Cooper III, S. B., & Balamurugan, S. (2019). "Chemical and rheological evaluation of asphalts incorporating RAP/RAS binders and warm-mix technologies in relation to crack resistance", *Construction and Building Materials*, 198, 256-268.
- [31] Yousefi, A., Sobhi, S., Aliha, M. R. M., Pirmohammad, S., & Haghshenas, H. (2021). "Cracking Properties of Warm Mix Asphalts Containing Reclaimed Asphalt Pavement and Recycling Agents under Different Loading Modes", *Construction and Building Materials*, 300, 12430.
- [32] LU, D. X., Saleh, M., & Nguyen, N. H. T. (2020). "Evaluation of Fracture and Fatigue Cracking Characterization Ability of Nonstandardized Semicircular-Bending Test for Asphalt Concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(8), 3292.