Semnan University

Journal of Transportation Infrastructure Engineering

Journal homepage: https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en

ISSN: 2821-0549

Research Article

Fracture Behavior of Asphalt Mixture Containing High Content of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Under Various Loading Condition at Low-Temperature

Seyed Miad Salehi [a], Mohammad Reza Mohammad Aliha [b]*

[a]Assistant Professor, School of Management, Economics and Progress Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Narmak, Tehran, I. R. Iran.
[*b]Associate Professor, School of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Narmak, Tehran, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2026-04-21

Revised: 2026-09-03

Accepted: 2026-09-03

Keywords:

Hot mix asphalt, Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), Low temperature fracture toughness, Fracture energy.

ABSTRACT

Several waste and recycled materials are commonly incorporated into the mix design of asphalt concrete to produce more environmentally friendly construction materials. Among these, Recycled Asphalt Pavement (RAP) is one of the most widely used options, often employed as a partial substitute for natural stone aggregates. However, the inclusion of such recycled materials can adversely affect the mechanical properties, strength, and overall performance of asphalt pavements. In particular, the resistance of asphalt overlays containing high content of RAP against cracking and crack growth tends to decrease. Therefore, it is essential to evaluate the potential effects of RAP incorporation on the cracking resistance of asphalt mixtures. Traffic loading on cracked asphalt pavements and overlays can induce two fundamental crack deformation modes, namely pure mode I (tensile opening) and pure mode II (in-plane shear). Furthermore, owing to the visco-elastic behavior of bitumen in asphalt mixtures, the risk of crack propagation and brittle failure is significantly higher at low temperatures compared to intermediate and high temperatures. In this study, the effect of adding RAP on the fracture toughness of asphalt mixtures in two basic fracture modes (K_{Ic} and K_{IIc}) was investigated using Edge-Notched Disc Bend (ENDB) specimens. Fracture toughness tests were performed on Hot Mix Asphalt (HMA) mixtures containing 0%, 25%, and 50% RAP (as replacement of natural aggregates) at three low temperatures: 0 °C, -12 °C, and -24 °C. Based on the results, by increasing the RAP content in asphalt mixtures up to 25%, fracture toughness and fracture energy increased and by adding more RAP up to 50% (high content RAP) fracture toughness and fracture energy decreased compared to the mixtures containing 25% RAP while, fracture toughness and fracture energy increased compared to the control mixture. Depending on the test temperature and mixture type (HMA with or without RAP content) the K_{Ic} and K_{IIc} values were varied from 0.58 to 1.05 MPa.m$^{0.5}$.

*** Corresponding author.**

E-mail address: mrm_aliha@iust.ac.ir

How to cite this article: Salehi, S. M. & Mohammad Aliha, M, R. (2026). Fracture behavior of asphalt mixture containing high content of reclaimed asphalt pavement (rap) under various loading condition at low-temperature. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering, 12(2), pp.1-23.*

DOI: https://doi.org/10.22075/jtie.2026.40956.1759

© 2026 The Author(s). Journal of Transportation Infrastructure Engineering published by Semnan University Press.
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

مجله زیرساخت های حمل و نقل

وبسایت نشریه : https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en

شاپا: 2821-0549

دانشگاه سمنان

مقاله پژوهشی

رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصد زیاد تراشه آسفالت بازیافتی تحت شرایط بارگذاری مختلف در دمای پایین

سید میعاد صالحی[۱] ، محمدرضا محمدعلیها[۲]*

[۱] استادیار، دانشکده مدیریت، اقتصاد و مهندسی پیشرفت، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

[۲]دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۵/۰۲/۰۱

بازنگری مقاله: ۱۴۰۵/۰۶/۱۲

پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۶/۱۲

واژه‌های کلیدی:

مخلوط‌آسفالتی داغ،

تراشه آسفالت بازیافتی،

چقرمگی شکست دمای پایین،

انرژی شکست.

چکیده

معمولاً چندین ماده زائد و بازیافتی در طرح اختلاط بتن آسفالتی گنجانده می‌شوند تا مصالح روسازی سازگارتر با محیط‌زیست تولید شوند. در میان این مواد، آسفالت بازیافتی (RAP) یکی از پرکاربردترین گزینه‌ها است که اغلب به عنوان جایگزین جزئی برای سنگدانه‌های طبیعی استفاده می‌شود. با این حال، گنجاندن چنین مواد بازیافتی می‌تواند بر خواص مکانیکی، مقاومت و عملکرد کلی مخلوط آسفالتی تأثیر منفی بگذارد. به طور خاص، مقاومت روکش‌های آسفالتی حاوی میزان بالای RAP در برابر ترک-خوردگی و رشد ترک کاهش می‌یابد. بنابراین، ارزیابی اثرات بالقوه افزودن RAP بر مقاومت ترک-خوردگی مخلوط‌های آسفالتی ضروری است. بارگذاری ترافیکی روی آسفالت‌های ترک‌خورده و روکش‌ها می‌تواند دو حالت اساسی تغییر شکل ترک، یعنی حالت خالص I (بازشدگی کششی) و حالت خالص II (برش درون صفحه‌ای) را ایجاد کند. علاوه بر این، به دلیل رفتار ویسکوالاستیک قیر در مخلوط‌های آسفالتی، خطر انتشار ترک و شکست ترد در دماهای پایین در مقایسه با دماهای متوسط و بالا به طور قابل توجهی بیشتر است. در این مطالعه، تأثیر افزودن RAP بر چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی در دو حالت شکست اساسی (K_{Ic} و K_{IIc}) با استفاده از نمونه‌های خمش دیسکی با ترک لبه (ENDB)بررسی شد. آزمایش‌های چقرمگی شکست روی مخلوط‌های آسفالت داغ (HMA) حاوی ۰٪، ۲۵٪ و ۵۰٪ RAP (به عنوان جایگزین سنگدانه‌های طبیعی) در سه دمای پایین: صفر درجه سلسیوس، ۱۲- درجه سلسیوس و ۲۴- درجه سلسیوس انجام شد. بر اساس نتایج، با افزایش مقدار RAP در مخلوط‌های آسفالتی تا ۲۵٪، چقرمگی شکست و انرژی شکست افزایش یافت و با افزودن RAP بیشتر تا ۵۰٪ (RAP با درصد بالا)، چقرمگی شکست و انرژی شکست در مقایسه با مخلوط‌های حاوی ۲۵٪ RAP کاهش یافت. در حالی که چقرمگی شکست و انرژی شکست در مقایسه با مخلوط شاهد افزایش یافت. بسته به دمای آزمایش و نوع مخلوط (HMA با یا بدون RAP)، مقادیر K_{Ic} و K_{IIc} از ۰/۵۸ تا ۱/۰۵ مگاپاسکال بر متر مربع متغیر بود. برخی از شاخص‌های شکست مانند نسبت‌های چقرمگی شکست (K_{IIc}/K_{Ic}) برای مخلوط‌های HMA مورد بررسی در دماهای مختلف تعیین و مورد بحث قرار گرفتند.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mrm_aliha@iust.ac.ir

استناد به این مقاله: صالحی، سید میعاد و محمدعلیها، محمدرضا. (۱۴۰۵). رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصد زیاد تراشه آسفالت بازیافتی تحت شرایط بارگذاری مختلف در دمای پایین. *مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل*،۱۲(۲)، ۱-۲۳.

DOI: https://doi.org/10.22075/jtie.2026.40956.1759

۱. مقدمه

لایه رویی جاده‌ها و بزرگراه‌ها عمدتاً از مخلوط‌های آسفالتی ساخته می‌شود. هر سال میلیون‌ها تن مخلوط آسفالتی، متشکل از سنگدانه‌های معدنی مخلوط با قیر و مقداری پرکننده (فیلر) یا افزودنی‌های تقویت‌کننده، برای احداث و روکش‌سازی سطوح جاده‌ها مصرف می‌گردد. با وجود مزایای فنی و اقتصادی این ماده، چالش‌های متعددی از جمله مصرف بالای مواد خام در تولید آسفالت، محدودیت منابع طبیعی، هزینه بالای قیر، مصرف انرژی قابل توجه برای گرم‌کردن و اختلاط مخلوط آسفالتی، و مسائل زیست‌محیطی جدی نظیر آلودگی هوا، ردپای کربن، انتشار گازهای گلخانه‌ای و سایر آلاینده‌ها، طراحان، مدیران نگهداری و مجریان پروژه‌های روسازی را به سمت استفاده از مخلوط‌های بهینه با عمر مفید طولانی و دوام بالا سوق داده است. یکی از راه‌حل‌های مؤثر و پایدار برای کاهش بخشی از این مشکلات، جایگزینی جزئی یا کامل سنگدانه‌های طبیعی مورد استفاده در مخلوط بتن آسفالتی با مواد دیگر است. استفاده از پسماندهای صنعتی یا محصولات جانبی صنایع سنگین به‌عنوان جایگزین جزئی سنگدانه‌ها، راه‌حلی مناسب برای تولید روکش‌های آسفالتی کم‌هزینه‌تر، پاک‌تر و سبزتر به شمار می‌رود (رحمان و همکاران، ۲۰۲۰؛ یاسانتی و همکاران، ۲۰۱٦؛ تونکان و همکاران، ۲۰۰۳؛ طغرلی و همکاران، ۲۰۱۸ ؛ برادران و عامری، ۲۰۲۳؛ برادران و همکاران، ۲۰۲۳؛ ایار و همکاران، ۲۰۲۲؛ برادران و ضیایی، ۲۰۲۵).

این رویکرد نه تنها حجم آلودگی زیست‌محیطی را کاهش می‌دهد، بلکه مصرف انرژی مورد نیاز برای تولید محصولات آسفالتی را نیز به طور قابل توجهی پایین می‌آورد. از این‌رو، انواع گوناگونی از مواد زائد طبیعی و صنعتی شامل الیاف زائد (ابطحی و همکاران، ۲۰۱۰؛ شیونگ و همکاران، ۲۰۱۵؛ کیم و همکاران، ۲۰۱۸)، الیاف طبیعی و مصنوعی (پیرمحمد و منغرپی، ۲۰۱۰؛ پیرمحمد و همکاران، ۲۰۲۰؛ علیها و همکاران، ۲۰۱۷؛ دانشفر و همکاران، ۲۰۲۲؛ ۲۰۲۳؛ نارواله و ویساپور، ۲۰۲۲؛ روح‌الامینی و همکاران، ۲۰۱۸؛ موسی و همکاران، ۲۰۱۹)، ضایعات پلاستیک و لاستیک (حسنی و همکاران، ۲۰۰۵؛ احمدی نیا و همکاران، ۲۰۱۲؛ علیها، ۲۰۱۹؛ کریمی و همکاران، ۲۰۲۳ الف، ب)، سیم فولادی (گارسیا و همکاران، ۲۰۱۳؛ حسینی و همکاران، ۲۰۲۲)، ذرات و الیاف شیشه و چوب (برادران و ضیایی، ۲۰۲٦؛ علیها و همکاران، ۲۰۲۲؛ کرم‌زاده و همکاران، ۲۰۲۲)، پرکننده‌ها (داس و سینگ، ۲۰۱۷) و سرباره‌ها (فالکتتو و همکاران، ۲۰۱۷ الف، ب؛ روح‌الامینی و همکاران، ۲۰۱۹؛ ژائو و همکاران، ۲۰۲۲؛ عربانی و آذرگوش، ۲۰۱۲؛ فخری و احمدی، ۲۰۱۷) در گذشته در طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. به‌طور خاص، تراشه آسفالت بازیافتی (رپ) به دلیل سازگاری بالای خود با اجزای اصلی مخلوط‌های آسفالت داغ (HMA) و آسفالت گرم (WMA)، یکی از بهترین گزینه‌ها برای جایگزینی سنگدانه‌های جدید و خام محسوب می‌شود. رپ خود حاوی سنگدانه و قیر است و بنابراین می‌تواند به راحتی با مصالح تازه اختلاط یابد. از این‌رو، تحقیقات گسترده‌ای روی امکان‌سنجی و قابلیت اطمینان استفاده از رپ در درصدهای وزنی یا حجمی مختلف (از مقادیر کم تا درصدهای بالا) در مخلوط آسفالتی یا بتنی انجام شده است (برادران و عامری، ۲۰۲۵؛ برادران و همکاران، ۲۰۲٤ ب؛ حقیقت‌پور و علیها، ۲۰۲۲ الف، ۲۰۲٤؛ ساعد و همکاران، ۲۰۲۲؛ بازوبندی و همکاران، ۲۰۲۳).

یکی از مهم‌ترین معیارهای عملکردی در روسازی‌های آسفالتی، بررسی تأثیر افزودن مواد زائد یا افزودنی‌ها مانند رپ بر خواص مکانیکی و شاخص‌های مقاومتی مخلوط نهایی است. در شرایط دمای پایین، مخلوط‌های آسفالتی حاوی قیر ویسکوالاستیک رفتار شکننده‌تری از خود نشان می‌دهند. در چنین شرایطی، قیر

خاصیت الاستیک خود را از دست داده و بیشتر مانند یک ماده ترد عمل می‌کند. این مسئله باعث می‌شود ترک‌خوردگی ناگهانی و فاجعه‌آمیز روسازی‌ها به یکی از شایع‌ترین مکانیسم‌های شکست در مناطق سرد تبدیل شود (ماراستانو و همکاران، ۲۰۰۲؛ یوسفی و همکاران، ۲۰۲۱؛ زارعی و همکاران، ۲۰۲۲ الف، ب، ج؛ دیو و همکاران، ۲۰۱۱؛ شهریاری و همکاران، ۲۰۲۱؛ حقیقت‌پور و علیها، ۲۰۲۲ الف؛ هی و همکاران، ۲۰۲۲ الف؛ فخری و همکاران، ۲۰۲۰).

پدیده ترک‌خوردگی در سطح جاده‌ها با عبور وسایل نقلیه از روی روکش‌های آسفالتی تسریع می‌شود. بر اساس مطالعات پیشین، هر عبور یک وسیله نقلیه از یک ترک از بالا به پایین[1] که در سطح روکش یا لبه جاده‌ها آغاز شده است، می‌تواند همزمان سه مکانیسم اساسی شکست را فعال نماید: ۱) مود کششی (تغییر شکل باز شدن ترک)، ۲) مود برشی درون صفحه‌ای (تغییر شکل لغزش ترک) و ۳) مود برشی خارج از صفحه‌ای (تغییر شکل پارگی سطوح ترک) (علیها و همکاران، ۲۰۲۱؛ زیاری و همکاران، ۲۰۲۲؛ عامری و همکاران، ۲۰۱۱). این مکانیسم‌ها به‌ترتیب در اصطلاح مکانیک شکست به‌عنوان مود خالص I، مود خالص II و مود خالص III شناخته می‌شوند. برای ارزیابی دقیق عملکرد روکش‌های آسفالتی در برابر شکست ناشی از ترک‌خوردگی، تخمین عمر چرخه خدمت و تعیین زمان مناسب بهسازی و نگهداری جاده‌ها، تعیین پارامتر چقرمگی شکست مخلوط آسفالت ضروری است. چقرمگی شکست، مقاومت ماده ترک‌دار را در برابر شروع و گسترش ترک نشان می‌دهد و به‌عنوان یک ویژگی مکانیکی ذاتی ماده در نظر گرفته می‌شود. این پارامتر با نمادهای K_{Ic}، K_{IIc} و K_{IIIc} به‌ترتیب برای مودهای I، II و III بیان می‌گردد و تحت تأثیر عواملی مانند طرح اختلاط، نوع و درصد اجزا، شرایط دمایی و مود بارگذاری قرار دارد.

تا کنون تحقیقات تجربی متعددی برای تعیین چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی با طرح‌های اختلاط مختلف، در محدوده دمایی گوناگون، تحت مودهای بارگذاری متفاوت و شرایط محیطی متنوع انجام شده است (علیها و همکاران، ۲۰۱۵؛ بهبهانی و همکاران، ۲۰۱۳؛ اقبالی و همکاران، ۲۰۱۹؛ ملایم و همکاران، ۲۰۲۱؛ فخری و همکاران، ۲۰۱۸؛ علیها و همکاران، ۲۰۱۸؛ حامدی و همکاران، ۲۰۲۰؛ هی و همکاران، ۲۰۲۱، ۲۰۲۲ الف؛ کریمی و همکاران، ۲۰۲۱؛ بادلی و همکاران، ۲۰۱۸؛ حقیقت‌پور و علیها، ۲۰۲۲ ب؛ نجار و همکاران، ۲۰۱۹؛ شیونگژو و همکاران، ۲۰۲۱؛ امیردهی و همکاران، ۲۰۱۹؛ یانگ و همکاران، ۲۰۲۱؛ ون و همکاران، ۲۰۲۲؛ ساعد و همکاران، ۲۰۲۲؛ هی و همکاران، ۲۰۲۲ ب). برای انجام این آزمایش‌ها، نمونه‌های آزمایشی متنوعی با پیکربندی‌های دیسکی یا تیرمانند پیشنهاد و مورد استفاده قرار گرفته‌اند؛ از جمله: نمونه DCT[2] (ماندال و همکاران، ۲۰۱۹؛ استوارت و همکاران، ۲۰۱۸؛ اشانی و همکاران، ۲۰۲۲؛ دیو و همکاران، ۲۰۱۱؛ گو و همکاران، ۲۰۲۳)، نمونه ENDB[3] (فوان و همکاران، ۲۰۲۱؛ حقیقت‌پور و همکاران، ۲۰۱۸؛ متوسطی و همکاران، ۲۰۲۰؛ حسینی و همکاران، ۲۰۲۵؛ رئیسی و همکاران، ۲۰۲٤؛ آئلینه‌جادیان و همکاران، ۲۰۲۳؛ افشار و همکاران، ۲۰۲۵؛ بیدادی و همکاران، ۲۰۲۰؛ بهمنی و همکاران، ۲۰۲٦)، نمونه ENDC[4] (موسوی و همکاران، ۲۰۲۵ الف، ب؛ محمدعلیها و همکاران، ۲۰۲۱؛ بهمنی و نعمتی، ۲۰۲۱)، آزمایش فشاری قطری غیرمستقیم (فالکتتو و همکاران، ۲۰۱۷، ۲۰۱۸)، نمونه مرکز ترک‌دار دیسک برزیلی (هی و همکاران، ۲۰۲۲ ب؛ مبارکی و همکاران، ۲۰۱۳) و به‌ویژه

1- Top-down
2- Disc compact tension
3- Edge notched disc bend
4- Edge notched diametral compression disc

نمونه نیم‌دایره‌ای خمشی[1] (SCB) (مبارکی و سلام، ۲۰۲۰؛ فالکتتو و همکاران، ۲۰۱۸؛ هی و همکاران، ۲۰۲۱، ۲۰۲۲ ب؛ القدسی و همکاران، ۲۰۲۰؛ علیها و همکاران، ۲۰۲۰؛ برادران و همکاران، ۲۰۲٤؛ بیلیگیری و همکاران، ۲۰۱۲؛ بویی و صالح، ۲۰۲۱؛ عامری و همکاران، ۲۰۱٦؛ فتاحی امیردهی و همکاران، ۲۰۲٤؛ علیها، ۲۰۱۹؛ شیونگژو و همکاران، ۲۰۲۱؛ محمد و همکاران، ۲۰۱۲؛ ارسلان و علیها، ۲۰۲۵؛ علیها و همکاران، ۲۰۲۵؛ ساعی‌ساعی و همکاران، ۲۰۲٤).

در میان نمونه‌های ذکرشده، نمونه SCB ساده‌ترین و رایج‌ترین نمونه است که توسط استانداردهای AASHTO و ASTM برای تعیین چقرمگی شکست مواد بتن آسفالتی پیشنهاد و توصیه شده است. علاوه بر این، پیکربندی‌های تیر کوتاه و بلند با ترک لبه‌ای تحت بارگذاری خمشی سه‌نقطه‌ای نیز توسط برخی پژوهشگران مورد استفاده قرار گرفته است (یانگ و همکاران، ۲۰۲۱؛ ساعد و همکاران، ۲۰۲۲؛ علیها و همکاران، ۲۰۲٤، ۲۰۲٦؛ ریس و همکاران، ۲۰۰۳، ۲۰۰٤، ۲۰۱۱ الف، ب). نمونه ENDB نیز در سال‌های اخیر توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده است. این توجه عمدتاً به دلیل قابلیت این نمونه در ایجاد هر سه مود اساسی شکست (I، II و III) و همچنین سهولت ساخت و فرآیند آزمایش برای مواد آسفالتی و بتنی است (لیو و ما، ۲۰۲٤؛ کائو و همکاران، ۲۰۲٤؛ گان و همکاران، ۲۰۲٤؛ علیها و همکاران، ۲۰۲۳ ب؛ ژائو و همکاران، ۲۰۲٤؛ ژنگ و همکاران، ۲۰۲۳، ۲۰۲٤؛ موسوی و همکاران، ۲۰۲٤؛ طبسی و همکاران، ۲۰۲۳؛ بخش‌زاده و همکاران، ۲۰۲٤؛ نجار و همکاران، ۲۰۲۳؛ حسینی و همکاران، ۲۰۲۳؛ زارعی و همکاران، ۲۰۲۲ الف). با وجود تحقیقات گسترده پیشین، هنوز خلأ دانشی قابل توجهی در زمینه عملکرد مقاومت در برابر ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی HMA حاوی درصدهای مختلف ماده بازیافتی RAP، به‌ویژه تحت مودهای بارگذاری مختلف و شرایط دمای پایین وجود دارد. هدف اصلی این پژوهش، بررسی دقیق تأثیر افزودن ماده آسفالت بازیافتی (RAP) به مخلوط آسفالتی (HMA) بر مقادیر چقرمگی شکست و مقاومت در برابر ترک‌خوردگی است. برای دستیابی به این هدف، با استفاده از چندین نمونه ENDB ساخته‌شده از مخلوط‌های HMA حاوی درصدهای متفاوت RAP، مقادیر چقرمگی شکست تحت مودهای خالص I و II به‌ترتیب K_{Ic} و K_{IIc} در شرایط دمای پایین تعیین شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. مصالح و مواد خام

جهت تولید نمونه‌های آسفالت داغ (HMA) این پژوهش، از مصالح سنگی آهکی با دانه‌بندی شماره ٤ (مطابق استاندارد راه و ترابری جمهوری اسلامی ایران، نشریه ۲۳٤) استفاده گردید. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مصالح سنگی مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است. حداکثر اندازه اسمی مصالح در این دانه‌بندی ۱۲/۵ میلی‌متر می‌باشد. دانه‌بندی استفاده شده در این پژوهش در شکل ۱ ارائه شده است. پیش از استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی (RAP) در طرح اختلاط، کلوخه‌ها و ذرات به‌هم‌چسبیده RAP به‌صورت ملایم خرد و از یکدیگر جدا شدند و سپس مصالح حاصل مورد الک‌کردن قرار گرفتند. به‌منظور کنترل حداکثر اندازه ذرات و انطباق مصالح RAP با دانه‌بندی مورد استفاده در این پژوهش، ذرات باقی‌مانده روی الک ۱۹ میلی‌متر حذف شدند و بخش عبوری از این الک پس از همگن‌سازی برای تهیه مخلوط‌های آسفالتی حاوی RAP مورد استفاده قرار گرفت.

1- Semi-Circular Bend

همچنین پس از استخراج قیر موجود در تراشه آسفالتی بازیافتی مطابق با استاندارد ASTM D 2172 مصالح سنگی باقی مانده مطابق با شکل ۱ دانه‌بندی شد.

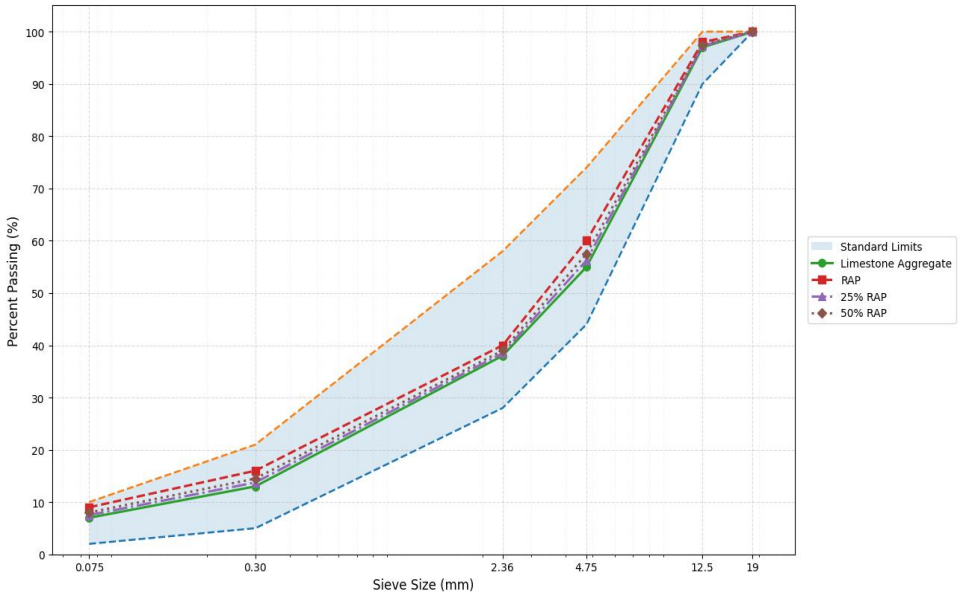
قیر مورد استفاده آسفالت داغ، قیر معمولی با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ و درجه عملکردی ۲۲-۶۴ می‌باشد. این نوع قیر معمولاً در ساخت جاده‌ها در بسیاری از کشورها با دامنه دمایی و شرایط محیطی مختلف و عمدتاً با آب و هوای سرد و معتدل استفاده می‌شود. برخی از خواص اصلی این نوع ماده قیری در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مصالح سنگی آهکی مورد استفاده در طراحی مخلوط آسفالتی این پژوهش.

مصالح سنگی	حدود مجاز آیین‌نامه	شرح آزمایش
۱۵	حداکثر ۲۵ درصد	درصد سایش لس آنجلس
۲/۳۶۵	حداکثر ۲/۵ درصد	جذب آب درشت‌دانه (٪)
۲/۴۰	حداکثر ۲/۵ درصد	جذب آب ریزدانه (٪)
۹۸	۱۰۰ درصد	درصد شکستگی (یک وجهه)
۹۷	۱۰۰ درصد	درصد شکستگی (دو وجهه)
۸۱	حداقل ۵۰	ارزش ماسه‌ای
درشت‌دانه ۰/۳۲، ریزدانه ۱/۱۵	حداکثر ۸ درصد درشت‌دانه، حداکثر ۱۲ درصد ریزدانه	درصد افت وزنی در برابر سولفات سدیم

جدول ۲. خصوصیات رئولوژیکی قیر ۷۰/۶۰ (معادل PG64-22) مورد استفاده در این پژوهش

ENDB	استاندارد	خواص
ENDB	ASTM D2170	ویسکوزیته کینماتیکی در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس
۴۱۹ mm^2/s	ASTM D2170	ویسکوزیته کینماتیکی در دمای ۱۳۵ درجه سلسیوس
۲۳۱ mm^2/s	ASTM D2170	ویسکوزیته کینماتیکی در دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس
۱/۰۵ gr/cm^3	ASTM D70	وزن مخصوص در دمای ۲۵ درجه سلسیوس
۱۰۰ cm	ASTM D113	شکل‌پذیری در دمای ۲۵ درجه سلسیوس
۳۱۵ °C	ASTM D92	نقطه اشتعال
۶۲ (0.1 mm)	ASTM D5	درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه سلسیوس



شکل ۱. دانه‌بندی سنگدانه‌های آهکی و تراشه آسفالت بازیافتی استفاده شده در این پژوهش

۲-۲. طرح اختلاط و ساخت نمونه‌های ژیراتوری

در این پژوهش، به‌منظور ارزیابی تأثیر تراشه آسفالت بازیافتی (RAP) بر رفتار شکست مخلوط آسفالتی، دو سطح ۲۵ و ۵۰ درصد RAP ، علاوه بر مخلوط شاهد فاقد RAP ، در نظر گرفته شد. انتخاب این مقادیر با توجه به مطالعات پیشین در زمینه رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر کم تا زیاد RAP صورت گرفت. در مطالعات قبلی، درصدهای مختلف RAP در محدوده مقادیر کم تا زیاد برای بررسی مقاومت ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند و به‌طور مشخص، استفاده از مقادیر ۲۵ و ۵۰ درصد RAP نیز در ارزیابی رفتار شکست دمای پایین مخلوط‌های آسفالتی گزارش شده است (بازوبندی و همکاران، ۲۰۲۳؛ برادران و همکاران، ۲۰۲٤ب). بر این اساس، در پژوهش حاضر، مقدار ۲۵ درصد به‌عنوان یک سطح میانی از کاربرد RAP و مقدار ۵۰ درصد به‌عنوان سطح بالای RAP انتخاب شد تا امکان مقایسه رفتار شکست مخلوط شاهد با مخلوط‌های دارای مقادیر متوسط و زیاد RAP فراهم گردد. این انتخاب همچنین امکان بررسی تغییرات رفتار شکست با افزایش قابل‌توجه مقدار RAP از ۲۵ به ۵۰ درصد را فراهم می‌کند.

پس از تعیین طرح اختلاط، قیر و مصالح سنگی در دمای اختلاط ترکیب شده و نمونه‌ها با استفاده از دستگاه ژیراتوری متراکم شدند. به‌منظور ایجاد شرایط تراکم یکسان برای تمامی طرح‌های اختلاط، شامل مخلوط شاهد، مخلوط حاوی ۲۵ درصدRAP و مخلوط حاوی ۵۰ درصد RAP ، فرآیند تراکم به‌گونه‌ای کنترل شد که فضای خالی هوا در تمامی نمونه‌ها در محدوده ۷±۰/۵ درصد قرار گیرد. در نهایت، نمونه‌های استوانه‌ای آسفالتی به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱٤۰ میلی‌متر تهیه شدند.

۲-۳. نمونه شکست برای مطالعه رفتار ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی داغ (HMA)

نمونه‌های استوانه‌ای تهیه‌شده با دستگاه ژیراتوری سپس به‌صورت عمود بر محور استوانه و نیز در راستای محور آن برش داده شدند تا نمونه‌های دیسکی (ENDB) با ضخامت ۳۰ میلی‌متر ایجاد شوند. در مرکز هر نمونه، یک ترک لبه‌ای به طول ۱۲ میلی‌متر با استفاده از تیغه اره

الماسی دورانی ایجاد گردید. بنابراین، نسبت طول ترک به ارتفاع نمونه (a/H) در تمامی نمونه‌های ENDB این پژوهش مقدار ثابتی برابر با ۰/٤ در نظر گرفته شد. به‌منظور بررسی مقاومت در برابر ترک‌خوردگی در دماهای پایین برای مخلوط آسفالتی داغ (HMA) شاهد و نمونه‌های اصلاح‌شده با RAP، آزمون‌های ENDB در سه دمای پایین شامل صفر، ۱۲- و ۲٤- درجه سلسیوس انجام شد. بر همین اساس، پیش از انجام آزمون، نمونه‌های ساخته‌شده به مدت ۱۲ ساعت در دماهای مذکور نگهداری شدند. نمونه‌های ENDB (با شعاع ۵۰ میلی‌متر، ضخامت ۳۰ میلی‌متر و طول ترک ۱۲ میلی‌متر) از مخلوط HMA با درصدهای مختلف RAP برای انجام آزمون‌های چقرمگی شکست در مودهای I و II تهیه گردید. شرایط بارگذاری و طول دهانه‌ها برای مودهای مختلف در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین مقادیر متناظر ضرایب هندسی (YI و YII) نیز در این جدول آورده شده‌اند که از مطالعات پیشین استخراج شده‌اند (علیها و همکاران، ۲۰۱۵؛ بهمنی و همکاران، ۲۰۲۰).

۲-٤. آزمایش‌های چقرمگی شکست مود I و مود II

آرایش آزمایشگاهی برای انجام آزمون‌های شکست مود I و مود II روی نمونه ENDB در شکل ۲ نشان داده شده است. تمامی نمونه‌های آسفالتی ساخته‌شده (اعم از نمونه‌های شاهد و حاوی RAP) تحت بارگذاری یکنواخت با نرخ بارگذاری ۳ میلی‌متر بر دقیقه قرار گرفتند. منحنی‌های شکست تمامی نمونه‌های مورد آزمایش در دماهای بررسی‌شده، تا لحظه شروع شکست و رسیدن به بار بیشینه، رفتار غالباً خطی از خود نشان دادند. این رفتار بیانگر آن است که چارچوب مکانیک شکست الاستیک خطی (LEFM) با دقت مناسبی برای مخلوط‌های آسفالتی مورد مطالعه در شرایط دمای پایین قابل کاربرد است. بر این اساس، مقادیر چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی آزمون‌شده با استفاده از نمونه ENDB، از طریق جایگذاری بار شکست (Fcr) هر نمونه در روابط (۱) تا (۳) و با به‌کارگیری ضرایب هندسی متناظر ارائه‌شده در جدول ۳ برای شرایط آزمایش این پژوهش، محاسبه گردید. همچنین لازم به ذکر است که برای هر حالت بارگذاری و دمای آزمایش برای تمام مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی در این پژوهش سه تکرار آزمایش انجام شد.

$$K_{Ic}(MPa.m^{0.5}) = \sigma_{cr}\sqrt{\pi a}\, Y_I \qquad (۱)$$

$$K_{IIc}(MPa.m^{0.5}) = \sigma_{cr}\sqrt{\pi a}\, Y_{II} \qquad (۲)$$

$$\sigma_{cr}\left(\frac{N}{mm^2}\right) = \frac{3F_{cr}\, S1S2}{RH^2(S1+S2)} \qquad (۳)$$

Fcr= بار پیک (نیوتن)

R= شعاع نمونه ENDB (میلی‌متر)

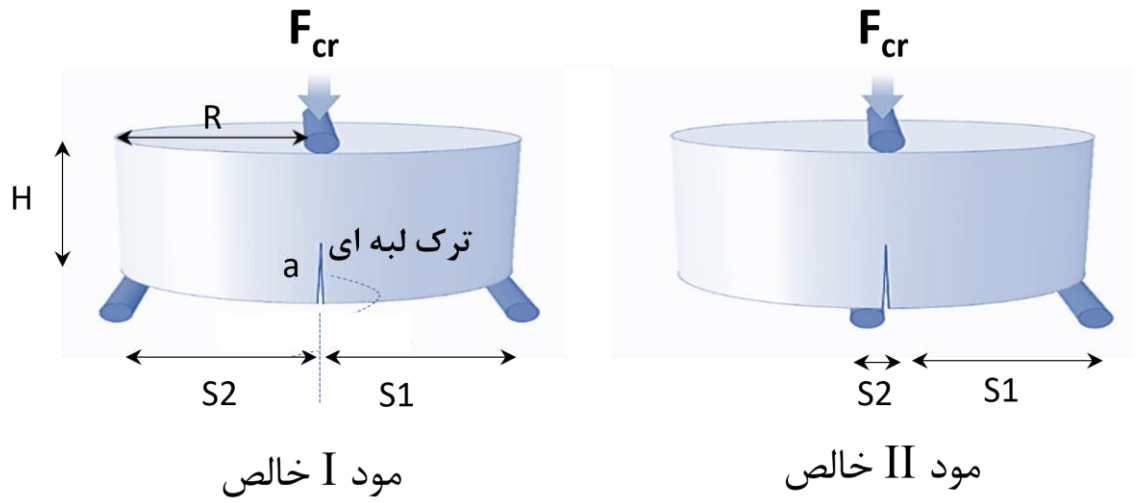
H= ضخامت نمونه ENDB (میلی‌متر)

S_1&S_2=

فاصله تا تکیه‌گاه‌ها (مطابق شکل ۱) (میلی متر)

جدول ۳. شرایط بارگذاری و ضرایب هندسی برای حالت‌های شکست مود اول خالص و مود دوم خالص با استفاده از آزمایش ENDB.

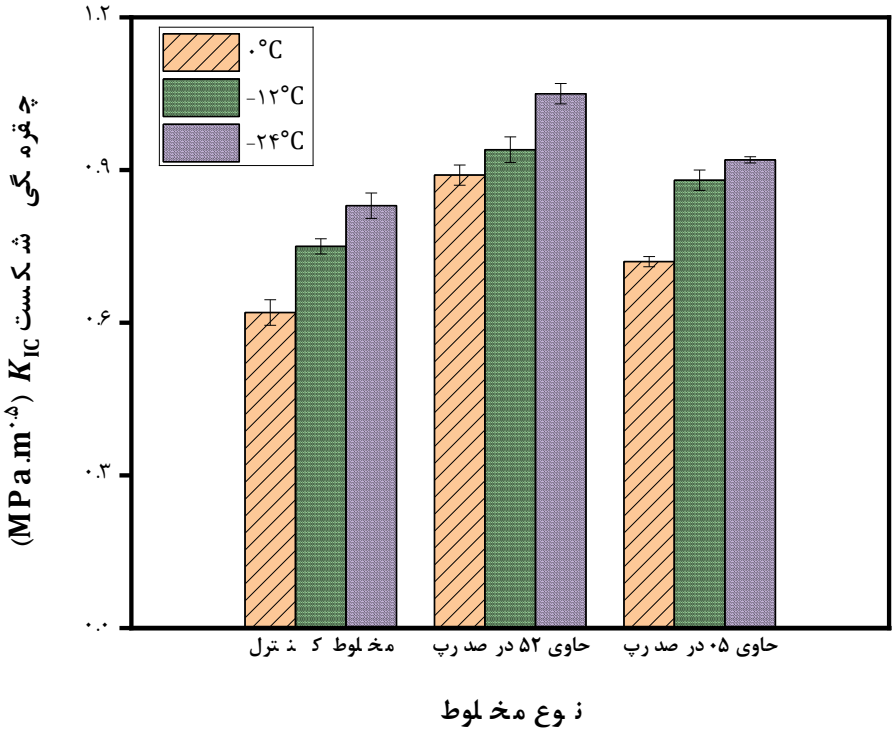
مود بارگذاری	شعاع (میلی‌متر) R	ضخامت (میلی‌متر) H	a/H	S_1/R	S_2/R	Y_I	Y_{II}
مود خالص ۱	۵۰	۳۰	۰/٤	۰/۸	۰/۸	۱/۲٤۸	–
مود خالص ۲	۵۰	۳۰	۰/٤	۰/۸	۰/۰۹	–	۲/۱۱٤



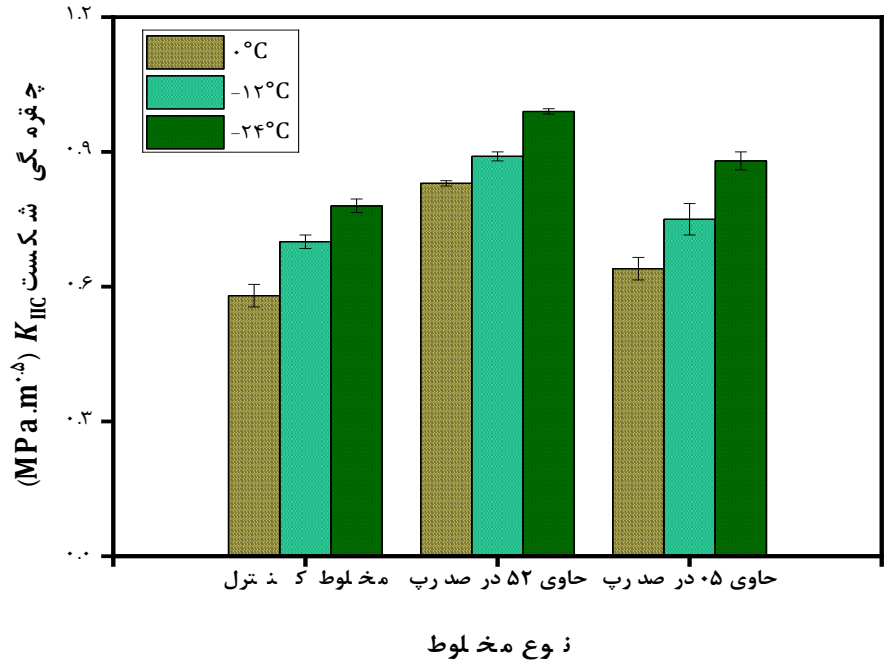
شکل ۲. نحوه بارگذاری برای انجام آزمایش‌های شکست مود اول خالص و مود دوم خالص روی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از نمونه ENDB

۳. نتایج و بحث

نتایج چقرمگی شکست برای مخلوط‌های آسفالتی تحت بارگذاری مود خالص ۱ در دماهای پایین مختلف در شکل ۳ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که تمامی نوارهای خطا در این پژوهش نشان‌دهنده انحراف معیار می‌باشد که با استفاده از بررسی سه تکرار آزمایش برای هر نمونه بدست آمده است. بر طبق این نتایج، می‌توان دریافت که افزودن تراشه آسفالت بازیافتی به مخلوط آسفالتی به میزان ۲۵ درصد وزنی مخلوط می‌تواند موجب افزایش چقرمگی شکست گردد. لازم به ذکر است که افزودن مقدار بیشتری از تراشه آسفالت بازیافتی به میزان ۵۰ درصد وزنی که جزو میزان تراشه آسفالت زیاد در مخلوط آسفالتی محسوب می‌شود نیز چقرمگی شکست را نسبت به مخلوط شاهد افزایش می‌دهد. اما باید توجه داشت که چقرمگی شکست نسبت به مخلوط‌های حاوی ۲۵ درصد تراشه آسفالت بازیافتی کاهش می‌یابد. این نتایج در مطالعات دیگر نیز گزارش شده است (برادران و علیها، ۲۰۲۵؛ برادران و همکاران، ۲۰۲٤ب). طبق نتایج چقرمگی شکسست برای دماهای مختلف در حالت مود ۱ بارگذاری می‌توان دریافت که این پارامتر در این مود بارگذاری و برای دماهای بررسی شده از ۰/٦۲ تا ۱/۰۵ ($MPa.m^{0.5}$) متغیر می‌باشد. علاوه بر این نتایج چقرمگی شکست نشان داده شده در شکل ٤ برای مخلوط‌های مختلف بررسی شده در این پژوهش در دماهای پایین مختلف، می‌توان دریافت که میزان چقرمگی شکست در مود ۲ بارگذاری نسبت به مود ۱ کاهش می‌یابد. اما باید توجه داشت روند تغییر چقرمگی شکست ناشی از افزودن تراشه آسفالت بازیافتی همان روند تغییرات برای مود ۱ بارگذاری می‌باشد. نکته مهم دیگر که از نتایج این پژوهش استنتاج می‌گردد، تأثیر دما بر چقرمگی شکست مخلوط آسفالتی می‌باشد. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، با افزایش دما از ۲٤- درجه سلسیوس تا صفر درجه سلسیوس چقرمگی شکست مخلوط‌های مختلف بررسی شده در این پژوهش کاهش می‌یابد.

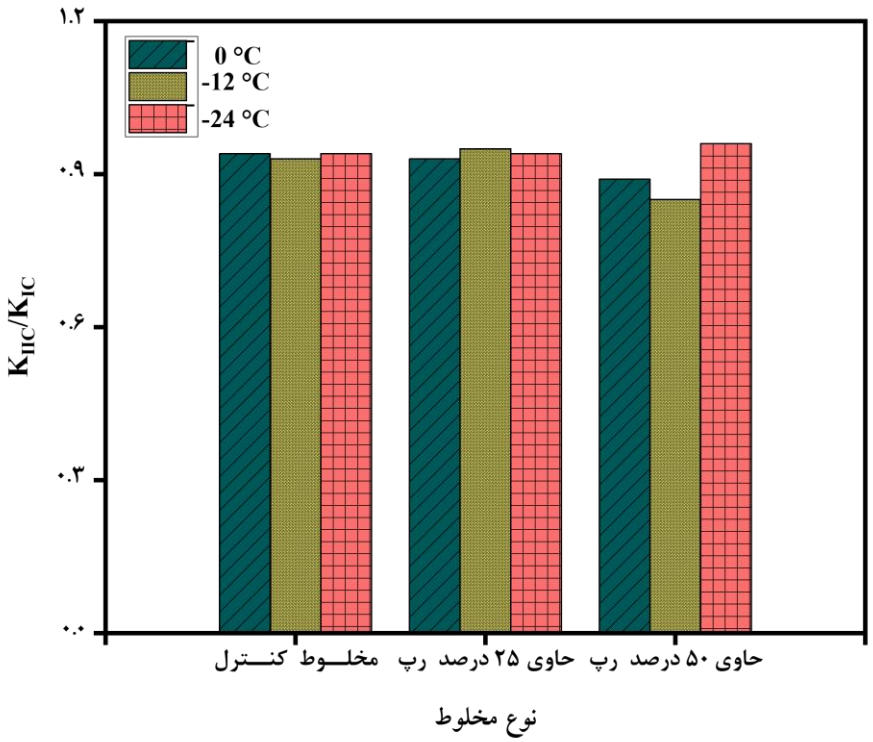


شکل ۳. نتایج چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی در این پژوهش تحت بارگذاری مود ۱



شکل ٤. نتایج چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی در این پژوهش تحت بارگذاری مود ۲

پژوهشگران برای بررسی بهتر رفتار شکست مخلوط آسفالتی تحت مودهای مختلف بارگذاری، پارامترهای مختلفی را ارائه کرده‌اند (برادران و علیها، ۲۰۲۵؛ برادران و همکاران، ۲۰۲۵؛ برادران و ضیایی، ۲۰۲۵؛ برادران و همکاران، ۲۰۲٤ب، برادران و همکاران، ۲۰۲۵ ب) . یکی از این پارامترها نسبت چقرمگی شکست مود ۲ به مود ۱ می‌باشد. این شاخص‌ها می‌توانند به محققان در درک بهتر مکانیسم شکست مخلوط‌های آسفالتی تحت حالت‌های بارگذاری و شرایط آزمایش مختلف کمک کنند. نتایج این نسبت چقرمگی شکست در شکل ۵ نشان داده شده است. بر طبق این نتایج، نسبت K_{IIc}/K_{Ic} برای مخلوط‌های مختلف مورد بررسی در این پژوهش در دماهای پایین مختلف از میزان ۰/۸۵ تا ۰/۹٦ متغیر می‌باشد.



شکل ۵. نسبت چقرمگی شکست مود ۲ به مود ۱ برای انواع مخلوط آسفالتی مورد بررسی در این پژوهش

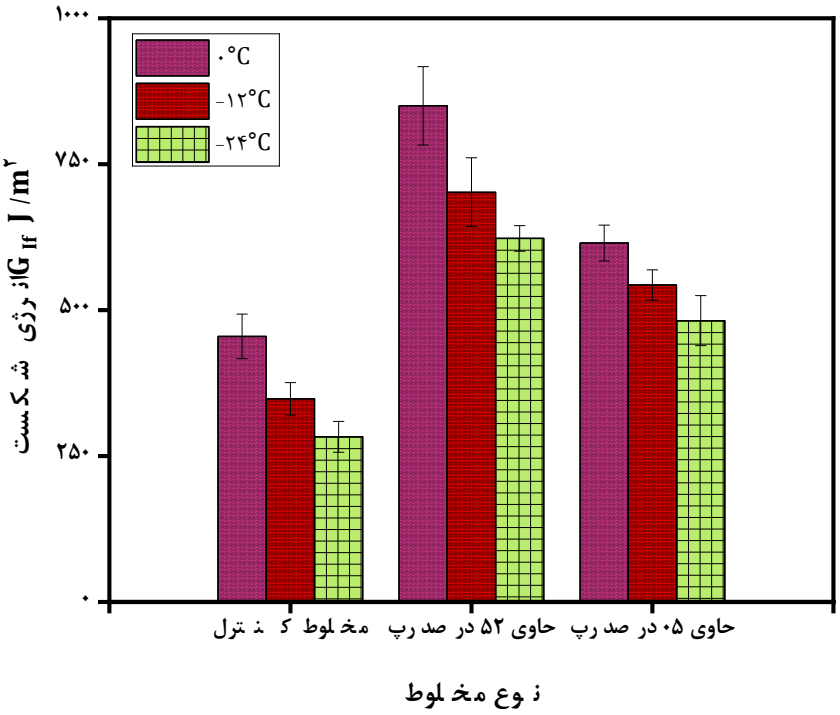
دیگر پارامتر شکست اساسی بررسی شده در این پژوهش، انرژی شکست می‌باشد. همانطور که بیان شد، انرژی شکست یکی از اساسی‌ترین پارامترهای استفاده شده جهت ارزیابی رفتار شکست مخلوط آسفالتی می‌باشد. نتایج انرژی شکست برای مود ۱ بارگذاری در دماهای پایین مختلف در این پژوهش در شکل ٦ نشان داده شده است. بر اساس این نتایج، افزودن تراشه آسفالت بازیافتی موجب افزایش انرژی شکست می‌گردد. لازم به ذکر است که این افزایش انرژی شکست در مخلوط‌های حاوی ۲۵ درصد تراشه آسفالت بازیافتی بیشترین مقدار را به خود اختصاص داد. پس از آن مخلوط‌های حاوی ۵۰ درصد تراشه آسفالت بازیافتی بیشترین انرژی شکست را داشتند. به عنوان مثال، در دمای ۲٤- درجه سلسیوس، افزودن ۲۵ درصد تراشه آسفالت بازیافتی موجب افزایش انرژی شکست به میزان ۵۸ درصد شد، که این میزان افزایش نسبت به مخلوط

کنترل برای مخلوط‌های حاوی ۵۰ درصد تراشه آسفالت بازیافتی، ۲۲ درصد بود. روند تغییرات بین مخلوط‌های آسفالتی حاوی تراشه آسفالت بازیافتی و مخلوط کنترل تحت مود بارگذاری ۲ در دماهای مختلف نیز مشابه مود بارگذاری ۱ بود (شکل ۷).

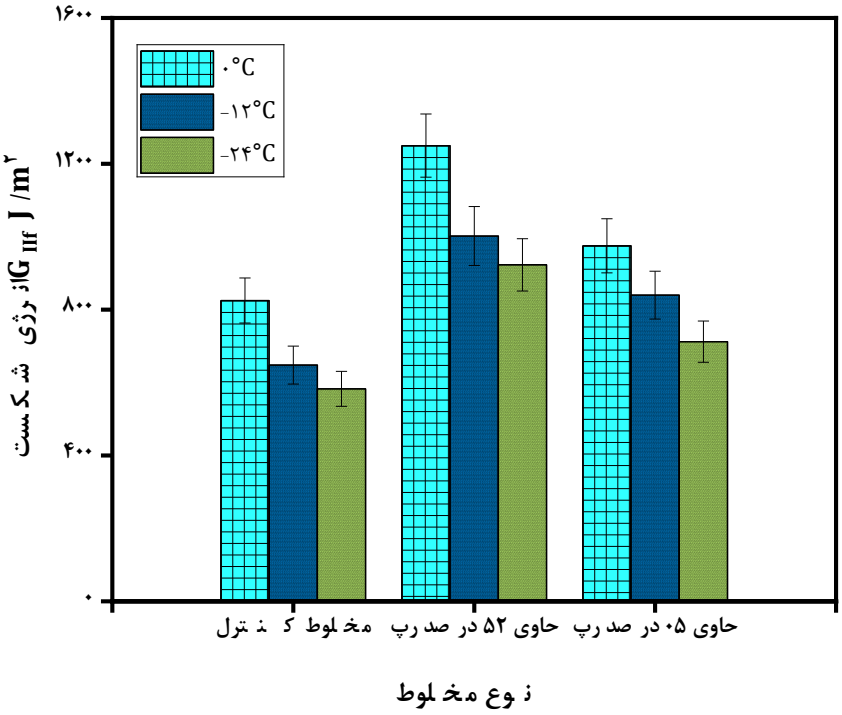
رفتار مشاهده شده در مخلوط حاوی ۲۵ درصد RAP را می‌توان با توجه به تأثیر هم‌زمان قیر پیرشده موجود در RAP و قیر تازه بر سفتی و رفتار ویسکوالاستیک مخلوط تفسیر کرد. قیر موجود در RAP در طول دوره بهره‌برداری و در اثر فرآیندهای پیرشدگی و اکسیداسیون، عموماً سفت‌تر از قیر تازه بوده و از قابلیت کمتری برای آرامش تنش برخوردار است؛ موضوعی که به‌ویژه در شرایط دمای پایین می‌تواند نقش مهمی در رفتار شکست مخلوط آسفالتی داشته باشد (الکاشف و همکاران، ۲۰۱۸؛ مون و همکاران، ۲۰۱۷). با این حال، حضور مقدار متوسط RAP لزوماً به کاهش مقاومت شکست منجر نمی‌شود و می‌تواند از طریق افزایش متعادل سفتی مخلوط و بهبود انتقال تنش در ساختار آن، مقاومت در برابر شروع و گسترش ترک را افزایش دهد. بر این اساس، به نظر می‌رسد در مخلوط حاوی ۲۵ درصد RAP، تعادل مناسبی میان اثر افزایش سفتی ناشی از قیر پیرشده RAP و قابلیت تغییرشکل ویسکوالاستیک بخش قیری مخلوط ایجاد شده است؛ به‌طوری که مخلوط قادر به تحمل تنش بیشتر و جذب انرژی بیشتری پیش از گسترش ناپایدار ترک بوده و در نتیجه مقادیر چقرمگی شکست و انرژی شکست آن افزایش یافته است. روندهای مشابهی در مطالعات پیشین در باره رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی حاوی RAP در دماهای پایین و میانی گزارش شده است (بازوبندی و همکاران، ۲۰۲۳؛ برادران و علیها، ۲۰۲۵؛ برادران و همکاران، ۲۰۲۴ب؛ لی و همکاران، ۲۰۲٤).

در مقابل، با افزایش مقدار RAP از ۲۵ به ۵۰ درصد، سهم قیر پیرشده و سفت‌تر در مخلوط افزایش می‌یابد و در نتیجه رفتار مخلوط می‌تواند به سمت سفتی بیشتر و انعطاف‌پذیری کمتر سوق پیدا کند. در شرایط دمای پایین، این افزایش سفتی همراه با کاهش قابلیت آرامش تنش و محدودشدن تغییرشکل ویسکوالاستیک می‌تواند توانایی مخلوط در اتلاف انرژی در ناحیه اطراف نوک ترک را کاهش داده و گسترش ترک را تسهیل کند. از این‌رو، اگرچه مخلوط حاوی ۵۰ درصد RAP در پژوهش حاضر همچنان مقادیر چقرمگی شکست و انرژی شکست بیشتری نسبت به مخلوط شاهد نشان داد، افزایش RAP از ۲۵ به ۵۰ درصد موجب کاهش نسبی این پارامترها نسبت به مخلوط ۲۵ درصد RAP شد. این رفتار با نتایج مطالعات پیشین درباره اثر مقادیر بالای RAP بر پاسخ شکست مخلوط‌های آسفالتی نیز همخوانی دارد (برادران و همکاران، ۲۰۲٤ب؛ برادران و علیها، ۲۰۲۵؛ بازوبندی و همکاران، ۲۰۲۳). بنابراین، نتایج نشان می‌دهد که تأثیر RAP بر رفتار شکست صرفاً تابع مقدار آن نیست، بلکه به ایجاد تعادل مناسب میان افزایش سفتی ناشی از قیر پیرشده و حفظ قابلیت تغییرشکل و آرامش تنش در رفتار ویسکوالاستیک مخلوط وابسته است.

یکی دیگر از نتایج مهم بدست آمده از این پژوهش، تأثیر دما بر انرژی شکست مخلوط های آسفالتی می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش دما موجب افزایش انرژی شکست می‌گردد. دلیل این امر بر اساس مطالعات پیشین می‌تواند ناشی از تغییر رفتار مخلوط آسفالتی از حالت ترد و شکننده به سمت حالت نرم و کشسان ناشی از افزایش دما باشد (برادران و علیها، ۲۰۲۵؛ برادران و همکاران، ۲۰۲۵؛ برادران و ضیایی، ۲۰۲۵؛ برادران و همکاران، ۲۰۲٤ب و ۲۰۲۵ ب).



شکل ٦. نتایج انرژی شکست مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی در این پژوهش تحت بارگذاری مود ۱



شکل ۷. نتایج انرژی شکست مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی در این پژوهش تحت بارگذاری مود ۲

٤. آنالیز آماری

به‌منظور بررسی معنی‌داری اثر درصد تراشه آسفالت بازیافتی (RAP) بر پارامترهای شکست مخلوط‌های آسفالتی، نتایج تحلیل واریانس برای پارامترهای چقرمگی شکست (مود I و II K_{IC} و K_{IIC}) و انرژی شکست (مود I و II (G_{IF} و G_{IIF}) در دماهای صفر، ۱۲- و ۲٤- درجه سلسیوس مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر F-Value و P-Value حاصل از تحلیل آماری و وضعیت معنی‌داری اثر RAP در جدول ٤ ارائه شده‌اند. نتایج نشان داد که اثر درصد RAP بر چقرمگی شکست مود (K_{IC}) I در هر سه دمای مورد بررسی معنی‌دار بوده است. در دماهای صفر، ۱۲- و ۲٤- درجه سلسیوس، مقادیر F-Value به‌ترتیب برابر با ۱۵۱/۲٦، ٦۷/٦۱ و ۱۰٦/۵۳ به دست آمد و در تمامی حالات مقدار P-Value کمتر از ۰/۰۰۱ بود. بنابراین، تغییر درصد RAP تأثیر آماری معنی‌داری بر K_{IC} در تمامی دماهای مورد مطالعه داشته است. در میان این شرایط، بیشترین مقدار F-Value مربوط به دمای صفر درجه سلسیوس بود. برای چقرمگی شکست مود (K_{IIC}) II نیز اثر درصد RAP در تمامی دماها معنی‌دار به دست آمد. مقادیر F-Value در دماهای صفر، ۱۲- و ۲٤- درجه سلسیوس به‌ترتیب ۱۱۷/٤۱، ٦۱/۳٤ و ۱٤۸/۸۵ بود و مقدار P-Value در هر سه حالت کمتر از ۰/۰۰۱ گزارش شد. بیشترین مقدار F-Value برای K_{IIC} در دمای ۲٤- درجه سلسیوس مشاهده شد. نتایج تحلیل آماری انرژی شکست مود (G_{IF}) I نیز نشان داد که درصد RAP در هر سه دمای مورد بررسی اثر معنی‌داری بر این پارامتر داشته است. مقادیر F-Value برای دماهای صفر، ۱۲- و ۲٤- درجه سلسیوس به‌ترتیب برابر با ۵۱/۵۱، ۵۷/۵٦ و ۸٦/۷۰ بود و در تمامی موارد مقدار P-Value کمتر از ۰/۰۰۱ به دست آمد. بیشترین مقدار F-Value مربوط به G_{IF} در دمای ۲٤- درجه سلسیوس بود.

برای انرژی شکست مود II (G_{IIF}) نیز نتایج نشان‌دهنده اثر معنی‌دار درصد RAP در تمامی دماهای مورد مطالعه بود. مقادیر F-Value در دماهای صفر، ۱۲- و ۲٤- درجه سلسیوس به‌ترتیب ۲٤/۷۹، ۲۰/۹۷ و ۲٤/۹۲ و مقادیر P-Value به‌ترتیب ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲ و ۰/۰۰۱ به دست آمد. بنابراین، اثر درصد RAP بر G_{IIF} نیز در هر سه دما از نظر آماری معنی‌دار بوده است. کمترین مقدار F-Value در میان نتایج ارائه‌شده در جدول مربوط به G_{IIF} در دمای ۱۲- درجه سلسیوس با مقدار ۲۰/۹۷ بود. به‌طور کلی، نتایج تحلیل آماری نشان داد که اثر درصد RAP بر تمامی پارامترهای K_{IC}، K_{IIC}، G_{IF} و G_{IIF} در دماهای صفر، ۱۲- و ۲٤- درجه سلسیوس معنی‌دار بوده است. در میان تمامی شرایط بررسی‌شده، بیشترین مقدار F-Value مربوط به K_{IC} در دمای صفر درجه سلسیوس با مقدار ۱۵۱/۲٦ و پس از آن K_{IIC} در دمای ۲٤- درجه سلسیوس با مقدار ۱٤۸/۸۵ بود. از سوی دیگر، کمترین مقدار F-Value مربوط به G_{IIF} در دمای ۱۲- درجه سلسیوس با مقدار ۲۰/۹۷ بود. با وجود تفاوت در مقادیر F-Value، تمامی مقادیر P-Value گزارش‌شده نشان‌دهنده معنی‌دار بودن اثر درصد RAP بر پارامترهای شکست مورد بررسی هستند.

۵. نتیجه‌گیری

تأثیر میزان RAP بر دو مود شکست (K_{Ic} و K_{IIc}) بتن آسفالتی داغ به صورت آزمایشگاهی در شرایط دمای پایین مختلف (صفر، ۱۲- و ۲٤- درجه سلسیوس) با استفاده از روش و نمونه شکست ENDB مورد مطالعه قرار گرفت. RAP به عنوان جایگزین جزئی سنگدانه‌ها به طرح اختلاط HMA با درصدهای وزنی صفر، ۲۵ و ۵۰ درصد اضافه شد. تکیه‌گاه‌های بارگذاری متقارن و نامتقارن غلتک‌ها در آزمایش ENDB می‌توانند هر دو مود بارگذاری را با قطعه شکست با هندسه یکسان معرفی کنند.

- مقادیر متناظر K_{Ic} و K_{IIc} با افزایش میزان RAP و کاهش دمای آزمایش از صفر به ۲۴- درجه سلسیوس کاهش یافتند. با این حال، تأثیر دما بر تغییرات تمام مقادیر چقرمگی شکست مؤثرتر از میزان RAP بود.
- مقدار چقرمگی شکست به نوع حالت بارگذاری بستگی داشت. بسته به نوع و دمای مخلوط، چقرمگی شکست حالت اول و حالت دوم (K_{Ic} و K_{IIc}) در محدوده ۰/۵۸ و ۱/۰۵مگاپاسکال بر متر مربع متغیر بود.
- انرژی شکست مخلوط‌های آسفالتی حاوی تراشه آسفالت بازیافتی تا ۲۵ درصد افزایش یافت. پس از آن با افزایش میزان تراشه آسفالت بازیافتی تا ۵۰ درصد وزن، انرژی شکست کاهش یافت.
- انرژی شکست نمونه‌های آسفالتی حاوی تراشه آسفالت بازیافتی و بدون تراشه آسفالت بازیافتی،با افزایش دما افزایش یافت.
- تغییرات و روند شاخص‌های شکست مختلف مانند: K_{IIc} / K_{Ic} برای مخلوط‌های مختلف HMA با یا بدون RAP بدست آمده و بررسی شدند. این شاخص‌ها می‌توانند به محققان در درک بهتر مکانیسم شکست مخلوط‌های آسفالتی تحت حالت‌های بارگذاری و شرایط آزمایش مختلف کمک کنند.

جدول ٤. نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) اثر درصد تراشه آسفالت بازیافتی (RAP) بر پارامترهای چقرمگی شکست و انرژی شکست در دماهای مختلف

پاسخ	دما	F-Value	P-Value	معنی‌داری اثر
K_{IC} 0	۰ °C	151.26	<0.001	معنی‌دار
K_{IC} -12	-۱۲ °C	67.61	<0.001	معنی‌دار
K_{IC} -24	-۲٤ °C	106.53	<0.001	معنی‌دار
K_{IIC} 0	۰ °C	117.41	<0.001	معنی‌دار
K_{IIC} -12	-۱۲ °C	61.34	<0.001	معنی‌دار
K_{IIC} -24	-۲٤ °C	148.85	<0.001	معنی‌دار
G_{IF} 0	۰ °C	51.51	<0.001	معنی‌دار
G_{IF} -12	-۱۲ °C	57.56	<0.001	معنی‌دار
G_{IF} -24	-۲٤ °C	86.70	<0.001	معنی‌دار
G_{IIF} 0	۰ °C	24.79	0.001	معنی‌دار
G_{IIF} -12	-۱۲ °C	20.97	0.002	معنی‌دار
G_{IIF} -24	-۲٤ °C	24.92	0.001	معنی‌دار

۵. تقدیر و قدردانی

نویسندگان مراتب سپاس و قدردانی خود را از تمامی پژوهشگران و متخصصانی که در پیشبرد این پژوهش یاری رسان بوده‌اند، ابراز می‌دارند. همچنین از همکاری و همراهی کلیه همکاران پژوهشی که بازخوردهای سازنده‌ای در راستای بهبود کیفیت این مطالعه ارائه نموده‌اند، تشکر می‌گردد.

٦. تأییدیه اخلاقی

نویسندگان تأیید می‌کنند که این مقاله حاصل پژوهش اصیل آنها بوده و قبلاً در هیچ مجله یا کنفرانس دیگری

منتشر نشده و همچنین برای بررسی همزمان به مجله دیگری ارسال نشده است.

۷. مشارکت‌های نویسندگان

سید میعاد صالحی: ایده‌پردازی و مفهوم‌سازی، اعتبارسنجی، تحلیل داده‌ها، جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌ها، نگارش پیش‌نویس اصلی مقاله.
محمدرضا محمدعلیها: ایده‌پردازی و مفهوم‌سازی، اعتبارسنجی، تحلیل داده‌ها، جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌ها، نگارش پیش‌نویس اصلی مقاله، نظارت و راهنمایی کلی پژوهش.

۸. منابع مالی

این پژوهش هیچ بودجه مشخصی از سازمان‌های تأمین‌کننده داخلی یا خارجی دریافت نکرده است.

۹. تعارض منافع

نویسندگان تأیید می‌کنند که هیچگونه تعارض منافع مرتبط با انتشار این مقاله ندارند.

۱۰. مراجع

Aalinejadian, H., Aliha, M. M., Ameri, M., Karimi, H. R., Jafari Haghighatpour, P., & Choupani, N. (2023). "Comparison of mixed mode I/III fracture toughness data obtained from the ENDB specimens manufactured by gyratory cylinders with two diameters of 100 and 150 mm". Int. J. Pavement Eng., 24(2): 2281996.

Abtahi, S. M., Sheikhzadeh, M., & Hejazi, S. M. (2010). "Fiber-reinforced asphalt-concrete–a review". Constr. Build. Mater., 24(6), 871-877.

Afshar, R., Faramarzi, L., Mirsayar, M., Shahbazian, B., & Aliha, M. R. M. (2025). "Effect of aggregate size on the fracture behavior of concrete under modes I, III, and I/III conditions". Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., 48(10): 4259-4274.

Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, M. R., Abdelaziz, M., & Ahmadinia, E. (2012). "Performance evaluation of utilization of waste Polyethylene Terephthalate (PET) in stone mastic asphalt". Constr. Build. Mater., 36: 984-989.

Aliha, M. M., Ghoreishi, S. M. N., Tavana, A., Molayem, M., & Choupani, N. (2025). "On determination of critical strain energy release rate for mode II failure of asphaltic composite mixtures using assymetric SCB configuration". Theor. Appl. Fract. Mech., 138: 104936.

Aliha, M. R. M. (2019). "On predicting mode II fracture toughness (KIIc) of hot mix asphalt mixtures using the strain energy density criterion". Theor. Appl. Fract. Mech., 99: 36-43.

Aliha, M. R. M., Bahmani, A., & Akhondi, S. (2015). "Numerical analysis of a new mixed mode I/III fracture test specimen". Eng. Fract. Mech., 134: 95-110.

Aliha, M. R. M., Kouchaki, H. G., & Haghighatpour, P. J. (2023). "Designing a simple and suitable laboratory test specimen for investigating the general mixed mode I/II/III fracture problem". Mater. Design, 236: 112477.

Aliha, M. R. M., Kouchaki, H. G., Mohammadi, M. H., Haghighatpour, P. J., Choupani, N., Asadi, P. A. R. V. I. Z., ... & Sadowski, T. (2024). "Fracture toughness determination for epoxy-based polymer concrete mixtures: Applicability of different rectangular beam and circular disc specimens". Compos. Part C: Open Access, 14: 100446.

Aliha, M. R. M., Pietras, D., Rajabi-Kafshgar, A., & Sadowski, T. (2026). "Fracture toughness and fracture energy of polymeric concrete with variable mixtures designed by L32 Taguchi method and statistical analysis of pore sizes in the fracture surface". Constr. Build. Mater., 515: 145603.

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". Eng. Fract. Mech., 182: 322-336.

Aliha, M. R. M., reza Karimi, H., & Abedi, M. (2022). "The role of mix design and short glass fiber content on mode-I cracking characteristics of polymer concrete". Constr. Build. Mater., 317: 126139.

Aliha, M. R. M., Zalnezhad, M., & Haghighatpour, P. J. (2023). "Fracture toughness of colored slurry seal at low temperatures and different loading Modes: Comparative study with warm and hot mix asphalt materials". Constr. Build. Mater., 409: 133786.

Aliha, M. R. M., Ziari, H., Mojaradi, B., & Sarbijan, M. J. (2020). "Heterogeneity effects on mixed-mode I/II stress intensity factors and fracture path of laboratory asphalt mixtures in the shape of SCB specimen". Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct,, 43(3): 586-604.

Aliha, M. R. M., Ziari, H., Sobhani Fard, E., & Jebalbarezi Sarbijan, M. (2021). "Heterogeneity effect on fracture parameters of a multilayer asphalt pavement structure containing a top-down crack and subjected to moving traffic loading". Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., 44(5): 1349-1371.

Al-Qudsi, A., Falchetto, A. C., Wang, D., Büchler, S., Kim, Y. S., & Wistuba, M. P. (2020). "Finite element cohesive fracture modeling of asphalt mixture based on the semi-circular bending (SCB) test and self-affine fractal cracks at low temperatures". Cold Reg. Sci. Tech., 169: 102916.

Ameri, M., Mansourian, A., Khavas, M. H., Aliha, M. R. M., & Ayatollahi, M. R. (2011). "Cracked asphalt pavement under traffic loading–A 3D finite element analysis". Eng. Fract. Mech., 78(8): 1817–1826.

Ameri, M., Nowbakht, S., Molayem, M., & Mohammad Aliha, M. R. (2016). "Investigation of fatigue and fracture properties of asphalt mixtures modified with carbon nanotubes". Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., 39(7): 896–906.

Amirdehi, H. F., Aliha, M. R. M., Moniri, A., & Torabi, A. R. (2019). "Using the generalized maximum tangential stress criterion to predict mode II fracture of hot mix asphalt in terms of mode I results–A statistical analysis". Constr. Build. Mater., 213: 483–491.

Arabani, M., & Azarhoosh, A. R. (2012). "The effect of recycled concrete aggregate and steel slag on the

dynamic properties of asphalt mixtures". Constr. Build. Mater., 35: 1–7.
Ashani, S. S., Varamini, S., Elwardany, M. D., & Tighe, S. (2022). "Investigation of low-temperature cracking resistance of asphalt mixtures by conducting Disc-Shaped Compact Tension (DCT) and Semi-Circular Bend (SCB) tests". Constr. Build. Mater., 359: 129275.
Ayar, P., Baradaran, S., & Abdipour Vosta, S. (2022). "A review on the effect of various additives on mechanical properties of stone mastic asphalt (SMA)". Road, 30(110): 57-86.
Badeli, S., Carter, A., & Doré, G. (2018). "Complex modulus and fatigue analysis of asphalt mix after daily rapid freeze-thaw cycles". J. Mater. Civ. Eng., 30(4): 04018056.
Bahmani, A., & Nemati, S. (2021). "Fracture resistance of railway ballast rock under tensile and tear loads". Eng. Solid Mech., 9(3): 271–280.
Bahmani, A., Aliha, M. R. M., Sarbijan, M. J., & Mousavi, S. S. (2020). "An extended edge-notched disc bend (ENDB) specimen for mixed-mode I+II fracture assessments". Int. J. Solids Struct., 193–194: 239–250.
Bahmani, A., Farahmand, F., Kouchaki, H. G., Nazari, Z., Yousefi, R., & Aliha, M. R. M. (2026). "Heterogeneous fracture toughness of aggregate-reinforced materials via efficient mesoscopic modeling". Cement Concrete Res. (In Press/Advance online publication)
Bakhshizadeh, M., Pirmohammad, S., Karimi, H. R., & Mohammad Aliha, M. R. (2024). "Effect of support friction on pure mode I, II, and III fracture toughness of cement concrete tested with edge-notched disc bend specimen". Theor. Appl. Fract. Mech., 104247.
Baradaran, M. S., Qazanfari, R., & Baradaran, S. (2023). "Study of soil reinforcement in the east of Mashhad using glass granule". Mater. Res. Express, 10(5): 055202. https://doi.org/10.1088/20531591/acd5af
Baradaran, S., & Aliha, M. R. M. (2025). "Mode I and Mode II fracture assessment of green asphalt pavements containing plastic waste and RAP at low and intermediate temperature". Results Eng., 25: 103734.
Baradaran, S., & Ameri, M. (2023). "Investigation of rutting failure in asphalt mixtures and its improvement strategies". Road, 31(114): 53-70.
Baradaran, S., & Ameri, M. (2025). "Durable and sustainable warm mix asphalt pavement using value-added recycled PET". Case Stud. Constr. Mater., e05362.
Baradaran, S., & Ameri, M. (2026). "Rejuvenators and the future of sustainable pavements: from the rejuvenation of aged asphalt binder to the enhanced performance of recycled asphalt mixtures". Road, 34(127): 527-548.
Baradaran, S., & Ziaee, S. A. (2025). "Comprehensive evaluation of cracking performance in modified HMA and WMA asphalt mixtures using the SCB test". Alexandria Eng. J., 133: 349-369.
Baradaran, S., & Ziaee, S. A. (2025). "Review of the mechanical properties of asphalt pavement reinforced with natural plant fibers as an eco-friendly solution in pavement engineering". Road, 23(123): 167-192.
Baradaran, S., Aliha, M. R. M., Ameri, M., Erarslan, N., & Sadowski, T. (2025). "Evaluation of crack resistance in asphalt mixtures modified with recycled PET granules at low and intermediate temperatures". In 4th International Civil Engineering & Architecture Conference (Vol. 1).
Baradaran, S., Mohammad Aliha, M. R., Maleki, A., & Underwood, B. S. (2024). "Fracture properties of asphalt mixtures containing high content of reclaimed asphalt pavement (RAP) and eco-friendly PET additive at low temperature". Constr. Build. Mater., 449: 138426.
Baradaran, S., Rahimi, J., Ameri, M., & Maleki, A. (2024). "Mechanical performance of asphalt mixture containing eco-friendly additive by recycling PET". Case Stud. Constr. Mater., 20: e02740. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02740
Baradaran, S., Ziaee, S. A., & Aliha, M. R. M. (2026). "Enhancing mechanical performance of rubberized asphalt pavement by using recycled plastic waste". Constr. Build. Mater., 539: 147464.
Baradaran, S., Ziaee, S. A., Ameri, M., & Aliha, M. R. M. (2025). "Mode I and II fracture behavior of green warm mix asphalt containing recycled plastic at various temperatures using ENDB testing method". Case Stud. Constr. Mater., e05549.
Bazoobandi, P., Karimi, H. R., Mousavi, S. R., Karimi, F., & Aliha, M. R. M. (2023). "Full range of mode I and II cracking performance of asphalt mixtures containing low to high reclaimed asphalt pavement (RAP) contents, modified by recycling agent and substituting of a softer binder". Case Stud. Constr. Mater., e02487.
Behbahani, H., Aliha, M. R. M., Fazaeli, H., & Aghajani, S. (2013). "Experimental fracture toughness study for some modified asphalt mixtures". Adv. Mater. Res. 723: 337–344.
Bidadi, J., Akbardoost, J., & Aliha, M. R. M. (2020). "Thickness effect on the mode III fracture resistance and fracture path of rock using ENDB specimens". Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., 43(2): 277–291.
Biligiri, K. P., Said, S., & Hakim, H. (2012). "Asphalt mixtures' crack propagation assessment using semi-circular bending tests". Int. J. Pavement Res. Tech., 5(4): 209–217.
Bui, H. H., & Saleh, M. (2021). "Effects of specimen size and loading conditions on the fracture behaviour of

asphalt concretes in the SCB test". Eng. Fract. Mech., 242: 107452.
Cao, R. H., Yao, R., Dai, H., Qiu, X., Lin, H., & Li, K. (2024). "Fracture behaviour of transversely isotropic rocks under pure mode III fracture: Experiment and numerical simulation". Theor. Appl. Fract. Mech., 129: 104208.
Daneshfar, M., Hassani, A., Aliha, M. M., & Berto, F. (2022). "Investigating flexural performance of fiber-reinforced concrete with different contents and types of macrosynthetic fiber". Strength Mater., 54(1): 1–12.
Daneshfar, M., Hassani, A., Aliha, M. R. M., & Sadowski, T. (2023). "Assessment of the specimen size effect on the fracture energy of macro-synthetic-fiber-reinforced concrete". Mater., 16(2): 673.
Das, A. K., & Singh, D. (2017). "Investigation of rutting, fracture and thermal cracking behavior of asphalt mastic containing basalt and hydrated lime fillers". Constr. Build. Mater., 141: 442–452.
Dave, E. V., Behnia, B., Ahmed, S., Buttlar, W. G., & Reis, H. (2011). "Low temperature fracture evaluation of asphalt mixtures using mechanical testing and acoustic emissions techniques". J. Assoc. Asphalt Paving Technol., 80: 1–28.
Eghbali, M. R., Tafti, M. F., Aliha, M. R. M., & Motamedi, H. (2019). "The effect of ENDB specimen geometry on mode I fracture toughness and fracture energy of HMA and SMA mixtures at low temperatures". Eng. Fract. Mech., 216: 106496.
Elkashef, M., Williams, R. C., & Cochran, E. (2018). "Investigation of fatigue and thermal cracking behavior of rejuvenated reclaimed asphalt pavement binders and mixtures". Int. J. Fatigue, 108: 90-95.
Erarslan, N., & Aliha, M. R. M. (2025). "Fracture and damage analysis of cement-stabilized fine and coarse grain soils under static and cyclic loading using chevron-notched SCB specimen". Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., 48(6): 2708–2724.
Fakhri, M., & Ahmadi, A. (2017). "Evaluation of fracture resistance of asphalt mixes involving steel slag and RAP: Susceptibility to aging level and freeze and thaw cycles". Constr. Build. Mater., 157: 748–756.
Fakhri, M., Haghighat Kharrazi, E., Aliha, M. R. M., & Berto, F. (2018). "The effect of loading rate on fracture energy of asphalt mixture at intermediate temperatures and under different loading modes". Frattura Integrita Struttur., 12(43): 113-132.
Fakhri, M., Kharrazi, E. H., & Aliha, M. R. M. (2018). "Mixed mode tensile–In plane shear fracture energy determination for hot mix asphalt mixtures under intermediate temperature conditions". Eng. Fract. Mech., 192: 98–113.
Fakhri, M., Siyadati, S. A., & Aliha, M. R. M. (2020). "Impact of freeze–thaw cycles on low temperature mixed mode I/II cracking properties of water saturated hot mix asphalt: An experimental study". Constr. Build. Mater., 261: 119939.
Falchetto, A. C., Moon, K. H., Lee, C. B., & Wistuba, M. P. (2017). "Correlation of low temperature fracture and strength properties between SCB and IDT tests using a simple 2D FEM approach". Road Mater. Pavement Design, 18(sup2): 329–338.
Falchetto, A. C., Moon, K. H., Wang, D., Riccardi, C., & Wistuba, M. P. (2018). "Comparison of low-temperature fracture and strength properties of asphalt mixture obtained from IDT and SCB under different testing configurations". Road Mater. Pavement Design, 19(3): 591–604.
Falchetto, A. C., Moon, K. H., Wang, D., Riccardi, C., Kang, M. S., & Wistuba, M. P. (2017). "Investigation on the combined recycling of reclaimed asphalt pavement and steel slag in asphalt mixture at low temperature". In Proceedings of the 5th International Conference on Sustainable Solid Waste Management. Athens, Greece.
Fattahi Amirdehi, H. R., Ghoreishi, S. M. N., Aliha, M. R. M., Hesami, S., Jafari Haghighatpour, P., & Choupani, N. (2024). "On comparison of fracture energy measured for six hot mix asphalt composite mixtures using force–load line displacement and force–crack mouth opening displacement curves at intermediate temperatures and different loading rates". Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., 47(10): 3858–3873.
Fuan, S., Ke, M., Kanghe, L., Kun, L., & Aliha, M. R. M. (2021). "Influence of specimen geometry on mode I fracture toughness of asphalt concrete". Constr. Build. Mater., 276: 122181.
Gan, Z., Hua, W., Wang, A., Fan, Z., Huang, J., Dong, S., & Wu, H. (2024). "Experimental investigation on mixed mode I-III fracture behaviors and degradation mechanism of sandstone under thermal-chemical stimulation". Theor. Appl. Fract. Mech., 129: 104188.
García, A., Norambuena-Contreras, J., Partl, M. N., & Schuetz, P. (2013). "Uniformity and mechanical properties of dense asphalt concrete with steel wool fibers". Constr. Build. Mater., 43: 107–117.
Gu, X., Cheng, T., Zhang, F., & Aliha, M. R. M. (2023). "Experimental and theoretical framework for illustrating the dependency of fracture toughness with tensile, bending, and compression loading in asphaltic samples". Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., 46(9): 3321–3341.

Haghighatpour, P. J., & Aliha, M. R. M. (2022a). “Effect of marshal and gyratory compaction methods on cracking characteristics of hot mix asphalt concrete materials under all three basic modes of fracture”. Theor. Appl. Fract. Mech., 117: 103207.

Haghighatpour, P. J., & Aliha, M. R. M. (2022b). “Assessment of freezing and thawing cycle (FTC) effects on mixed mode I/III fracture toughness and work of fracture of HMA asphalt mixtures”. Theor. Appl. Fract. Mech., 118: 103261.

Haghighatpour, P. J., & Aliha, M. R. M. (2024). “The influence of recycled asphalt pavement materials on low and intermediate fracture behavior of asphalt concrete (AC) after exposing to different thawing and freezing periods”. Eng. Fract. Mech., 109715.

Haghighatpour, P. J., Aliha, M. R. M., & Keymanesh, M. R. (2018). “Evaluating mode I fracture resistance in asphalt mixtures using edge notched disc bend ENDB specimen with different geometrical and environmental conditions”. Eng. Fract. Mech., 190: 245–258.

Hamedi, G. H., Saedi, D., & Ghahremani, H. (2020). “Effect of short-term aging on low-temperature cracking in asphalt mixtures using mechanical and thermodynamic methods”. J. Mater. Civ. Eng., 32(10): 04020288.

Hassani, A., Ganjidoust, H., & Maghanaki, A. A. (2005). “Use of plastic waste (poly-ethylene terephthalate) in asphalt concrete mixture as aggregate replacement”. Waste Manag. Res., 23(4): 322–327.

He, J., Liu, L., Yang, H., & Aliha, M. R. M. (2022a). “Using two and three-parameter Weibull statistical model for predicting the loading rate effect on low-temperature fracture toughness of asphalt concrete with the ENDB specimen”. Theor. Appl. Fract. Mech., 121: 103471.

He, J., Liu, L., Yang, H., Aliha, M. R. M., & Karimi, H. R. (2021). “Contribution of interface fracture mechanism on fracture propagation trajectory of heterogeneous asphalt composites”. Appl. Sci., 11(7): 3013.

He, J., Liu, L., Yang, W., & Aliha, M. R. M. (2022b). “Influence of testing method on mode II fracture toughness (KIIc) of hot mix asphalt mixtures”. Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., 45(10): 2940–2957.

Hoseini, S. O., Mousavi, S. R., Sohrabi, M. R., & Ghasemi, M. (2023). “Using beam and ENDB specimens to evaluate fracture characteristics of wavy steel fiber-reinforced self-compacting concrete containing different coarse aggregate volumes”. Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., 46(5): 1669–1686.

Hoseini, S. O., Sohrabi, M. R., Mousavi, S. R., & Ghasemi, M. (2022). “Effects of coarse aggregate and wavy steel fiber volumes on the critical stress intensity factors of modes I and III cracks in self-compacting concrete using ENDB specimens”. Theor. Appl. Fract. Mech., 121: 103421.

Hoseini, S. O., Sohrabi, M. R., Mousavi, S. R., Ghasemi, M., & Aliha, M. R. M. (2025). “Comparing different procedures for calculating flexural cracking toughness using edge-notched disc bend specimen under modes I and III”. Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., 48(3): 1083–1097.

Karamzadeh, N. S., Aliha, M. R. M., & Karimi, H. R. (2022). “Investigation of the effect of components on tensile strength and mode-I fracture toughness of polymer concrete”. Arab. J. Geosci., 15(13): 1213.

Karimi, H. R., Aliha, M. R. M., Ebneabbasi, P., Salehi, S. M., Khedri, E., & Haghighatpour, P. J. (2023a). “Mode I and mode II fracture toughness and fracture energy of cement concrete containing different percentages of coarse and fine recycled tire rubber granules”. Theor. Appl. Fract. Mech., 123: 103722.

Karimi, H. R., Aliha, M. R. M., Khedri, E., Mousavi, A., Salehi, S. M., Haghighatpour, P. J., & Ebneabbasi, P. (2023b). “Strength and cracking resistance of concrete containing different percentages and sizes of recycled tire rubber granules”. J. Build. Eng., 106033.

Karimi, M. M., Dehaghi, E. A., & Behnood, A. (2021). “A fracture-based approach to characterize long-term performance of asphalt mixes under moisture and freeze-thaw conditions”. Eng. Fract. Mech., 241: 107418.

Kim, K., Jo, S. H., Kim, N., & Kim, H. (2018). “Characteristics of hot mix asphalt containing steel slag aggregate according to temperature and void percentage”. Constr. Build. Mater., 188: 1128–1136.

Li, A., Wang, H., & Song, W. (2024). “Long-term Freeze–thaw effect on fracture performance of asphalt mixture with reclaimed asphalt pavement, glass fiber and rejuvenator”. Theor. Appl. Fract. Mech., 133: 104560.

Liu, Z., & Ma, C. (2024). “Assessment of mode I/III fracture toughness of bi-material rock-like ENDB and ENDC specimens”. Theor. Appl. Fract. Mech., 129: 104235.

Mandal, T., Hanz, A. J., & Bahia, H. U. (2019). “Challenges in using the Disc-Shaped Compact Tension (DCT) test to determine role of asphalt mix design variables in cracking resistance at low temperatures”. Int. J. Pavement Eng., 20(11): 1275–1284.

Marasteanu, M. O., Dai, S., Labuz, J. F., & Li, X. (2002). “Determining the low-temperature fracture toughness of asphalt mixtures”. Transport. Res. Record, 1789(1): 191–199.

Mohammad Aliha, M. R., Ghesmati Kucheki, H., & Asadi, M. M. (2021). “On the use of different diametral compression cracked disc shape specimens for introducing mode III deformation”. Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., 44(11): 3135–3151.

Mohammad, L. N., Kim, M., & Elseifi, M. (2012). “Characterization of asphalt mixture’s fracture resistance using the semi-circular bending (SCB) test. In 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements (pp. 1–10). Springer.

Molayem, M., Ameri, M., Aliha, M. R. M., & Nejad, F. M. (2021). “Prediction of load-CMOD curves for HMA mixtures at intermediate temperatures subjected to mixed mode loading”. Eng. Fract. Mech., 254: 107937.

Moon, K. H., Falchetto, A. C., Marasteanu, M. O., & Wistuba, M. P. (2017). “Low temperature rheological properties of asphalt mixtures containing different recycled asphalt materials”. Int. J. Pavement Res. Tech., 10(1): 84-97.

Motamedi, H., Fazaeli, H., Aliha, M. R. M., & Amiri, H. R. (2020). “Evaluation of temperature and loading rate effect on fracture toughness of fiber reinforced asphalt mixture using edge notched disc bend (ENDB) specimen”. Constr. Build. Mater., 234: 117365.

Mousavi, A., Aliha, M. R. M., Khoramishad, H., & Karimi, H. R. (2025b). “The effect of non-singular term (T-stress) on mode I/III cracking parameters of brittle materials, numerical and experimental study using different beam and disc shape specimens made of marble rock”. Forces Mech., 18: 100303.

Mousavi, A., Aliha, M. R. M., Khoramishad, H., Karimi, H. R., Choupani, N., & Sadowski, T. (2025a). “Opening-tearing mixed-mode fracture behavior of rock using ENDB, ENDC, DNDC, SCB, TPB-IC, SENB, and ATPB specimens”. Eng. Solid Mech., 13(1): 1–14.

Mousavi, S., Ghasemi, M., & Dehghani, M. (2024). “Investigating the fracture toughness of the self compacting concrete using ENDB samples by changing the aggregate size and percent of steel fiber”. Eng. Solid Mech., 12(1): 17–26.

Mubaraki, M., & Sallam, H. E. M. (2020). “Reliability study on fracture and fatigue behavior of pavement materials using SCB specimen”. Int. J. Pavement Eng., 21(13): 1563–1575.

Mubaraki, M., Abd-Elhady, A. A., & Sallam, H. E. M. (2013). “Mixed mode fracture toughness of recycled tire rubber-filled concrete for airfield rigid pavements”. Int. J. Pavement Res. Tech., 6(1): 8–14.

Musa, N. F. A. A., Aman, M. Y., Shahadan, Z., Taher, M. N., & Noranai, Z. (2019). “Utilization of synthetic reinforced fiber in asphalt concrete—a review”. Int. J. Civ. Eng. Tech., 10(5): 678–694.

Najjar, S., Moghaddam, A. M., Sahaf, A., & Aliha, M. R. M. (2023). “Mixed mode (I&III) fracture behavior of cement emulsified asphalt mortar under freeze and thaw cycles”. Theor. Appl. Fract. Mech., 103952.

Najjar, S., Moghaddam, A. M., Sahaf, A., Yazdani, M. R., & Delarami, A. (2019). “Evaluation of the mixed mode (I/II) fracture toughness of cement emulsified asphalt mortar (CRTS-II) using mixture design of experiments”. Constr. Build. Mater., 225: 812–828.

Narule, G. N., & Visapure, A. N. (2022). “Experimental investigation on compressive and flexural performance of Forta-fiber reinforced concrete”. Mater. Today Proceed., 56: 406–411.

Pirmohammad, S., & Mengharpey, M. H. (2020). “Influence of natural fibers on fracture strength of WMA (warm mix asphalt) concretes using a new fracture test specimen”. Constr. Build. Mater., 251: 118927.

Pirmohammad, S., Shokorlou, Y. M., & Amani, B. (2020). “Influence of natural fibers (kenaf and goat wool) on mixed mode I/II fracture strength of asphalt mixtures”. Constr. Build. Mater., 239: 117850.

Raeisi, R., Rezaie, F., & Aliha, M. R. M. (2024). “Mixed mode I/II and I/III fracture toughness investigation for preplaced aggregate concrete mixtures: Experimental study and theoretical prediction”. Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., 47(8): 2873–2887.

Rahman, M. T., Mohajerani, A., & Giustozzi, F. (2020). “Recycling of waste materials for asphalt concrete and bitumen: A review”. Mater., 13(7): 1495.

Reis, J. M. L. D., & Jurumenh, M. A. G. (2011a). “Experimental investigation on the effects of recycled aggregate on fracture behavior of polymer concrete”. Mater. Res., 14(3): 326–330.

Reis, J. M. L., & Ferreira, A. J. M. (2003). “The influence of notch depth on the fracture mechanics properties of polymer concrete”. Int. J. Fract., 124(1): 33–42.

Reis, J. M. L., & Ferreira, A. J. M. (2004). “Assessment of fracture properties of epoxy polymer concrete reinforced with short carbon and glass fibers”. Constr. Build. Mater., 18(7): 523-528.

Reis, J. M. L., Chianelli-Junior, R., Cardoso, J. L., & Marinho, F. J. V. (2011b). “Effect of recycled PET in the fracture mechanics of polymer mortar”. Constr. Build. Mater., 25(6): 2799–2804.

Rooholamini, H., Hassani, A., & Aliha, M. R. M. (2018). “Evaluating the effect of macro-synthetic fibre on the mechanical properties of roller-compacted concrete pavement using response surface methodology”. Constr. Build. Mater., 159: 517–529.

Rooholamini, H., Sedghi, R., Ghobadipour, B., & Adresi, M. (2019). “Effect of electric arc furnace steel slag on the mechanical and fracture properties of roller-compacted concrete”. Constr. Build. Mater., 211: 88–98.

Saed, S. A., Karimi, H. R., Rad, S. M., Aliha, M. R. M., Shi, X., & Haghighatpour, P. J. (2022). “Full range

I/II fracture behavior of asphalt mixtures containing RAP and rejuvenating agent using two different 3-point bend type configurations". Constr. Build. Mater., 314: 125590.
Saesaei, A. H., Sahaf, A., Najjar, S., & Aliha, M. R. M. (2024). "Laboratory investigation on the fracture toughness (Mode I) and durability properties of eco-friendly cement emulsified asphalt mortar (CRTS II) exposed to acid attack". Case Stud. Constr. Mater., 20: e02719.
Shahryari, N., Keymanesh, M. R., & Aliha, M. R. M. (2021). "Specimen type effect on measured low-temperature fracture toughness of asphalt concrete". Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., 44(2): 551–567.
Stewart, C. M., Oputa, C. W., & Garcia, E. (2018). "Effect of specimen thickness on the fracture resistance of hot mix asphalt in the disk-shaped compact tension (DCT) configuration". Constr. Build. Mater., 160: 487–496.
Tabasi, E., Zarei, M., Naseri, A., Hosseini, S. G., Mirahmadi, M., & Khordehbinan, M. W. (2023). "Low temperature cracking behavior of modified asphalt mixture under modes I and III". Theor. Appl. Fract. Mech., 128: 104150.
Toghroli, A., Shariati, M., Sajedi, F., Ibrahim, Z., Koting, S., Mohamad, E. T., & Khorami, M. (2018). "A review on pavement porous concrete using recycled waste materials". Smart Struct. Syst., 22(4): 433–440.
Tuncan, M., Tuncan, A., & Cetin, A. (2003). "The use of waste materials in asphalt concrete mixtures". Waste Manag. Res., 21(2): 83–92.
Tutluoglu, L., & Keles, C. (2011). "Mode I fracture toughness determination with straight notched disk bending method". Int. J. Rock Mech. Mining Sci., 48(8): 1248–1261.
Wen, X., Feng, L., Yin, G., Liang, Q., Aliha, M. R. M., & Haghighatpour, P. J. (2022). "Relationship between low-temperature KIc and KIIc values of bitumen with different performance grades and comparison with naturally solid materials". Theor. Appl. Fract. Mech., 117: 103169.
Xiong, R., Fang, J., Xu, A., Guan, B., & Liu, Z. (2015). "Laboratory investigation on the brucite fiber reinforced asphalt binder and asphalt concrete". Constr. Build. Mater., 83: 44–52.
Xiongzhou, Y., Yuze, T., Qinglin, L., Song, L., Qianwen, D., & Aliha, M. R. M. (2021). "KIc and KIIc measurement for hot mix asphalt mixtures at low temperature: Experimental and theoretical study using the semicircular bend specimen with different thicknesses". Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., 44(3): 832–846.
Yang, D., Karimi, H. R., & Aliha, M. R. M. (2021). "Comparison of testing method effects on cracking resistance of asphalt concrete mixtures". Appl. Sci., 11(11): 5094.
Yang, Z., Yin, T., Zhuang, D., Wu, Y., Yin, J., & Chen, Y. (2022). "Effect of temperature on mixed mode I/III fracture behavior of diorite: An experimental investigation". Theor. Appl. Fract. Mech., 122: 103571.
Yasanthi, R. G., Rengarasu, T. M., & Bandara, W. M. K. R. T. W. (2016). "Study on the performance of waste materials in hot mix asphalt concrete". Amer. Sci. Res. J. Eng., Tech. Sci. (ASRJETS), 23(1): 252–267.
Yousefi, A. A., Sobhi, S., Aliha, M. M., Pirmohammad, S., & Haghshenas, H. F. (2021). "Cracking properties of warm mix asphalts containing reclaimed asphalt pavement and recycling agents under different loading modes". Constr. Build. Mater., 300: 124130.
Zarei, M., Abdi Kordani, A., & Zahedi, M. (2022c). "Evaluating the fracture behaviour of modified asphalt concrete composites (ACC) at low and intermediate temperatures using edge notched disc bend (ENDB) specimen". Road Mater. Pavement Design, 23(8): 1917–1941.
Zarei, M., Salehikalam, A., Tabasi, E., Naseri, A., Khordehbinan, M. W., & Negahban, M. (2022a). "Pure mode I fracture resistance of hot mix asphalt (HMA) containing nano-SiO2 under freeze–thaw damage (FTD)". Constr. Build. Mater., 351: 128757.
Zarei, M., Tabasi, E., Ghandehari, M., Rezaie, M., Khordehbinan, M. W., & Al-Bahrani, M. (2022b). "Effect of hospital waste pyrolysis hydrocarbon (HWPHC) on fracture behavior of Warm Mix asphalt (WMA) under freeze–thaw damage (FTD)". Constr. Build. Mater., 359: 129473.
Zhao, X., Sheng, Y., Lv, H., Jia, H., Liu, Q., Ji, X., ... & Meng, J. (2022). "Laboratory investigation on road performances of asphalt mixtures using steel slag and granite as aggregate". Constr. Build. Mater., 315: 125655.
Zhao, Y., Tang, W., Zhang, Y., Du, C., Li, Y., Wang, C., & Bi, J. (2024). "Evaluating fracture resistance of basalt fiber reinforced mortar to mode I/III load using edge notched disc bend (ENDB) specimen: Insights from acoustic emission and morphological analysis". Constr. Build. Mater., 411: 134421.
Zheng, K., Wang, C., Zhao, Y., Bi, J., & Liu, H. (2023). "Theoretical and experimental exploration on the combined mode I+III fracture toughness of shale using the edge-notched disk bending method with acoustic emission monitoring". Theor. Appl. Fract. Mech., 125: 103870.
Zheng, K., Wang, C., Zhao, Y., Bi, J., & Liu, H. (2024). "A modified three-dimensional mean strain energy density criterion for predicting shale mixed-mode I/III fracture toughness". J. Rock Mech. Geotech. Eng. (Advance online publication).

Ziaee, S. A., & Baradaran, S. (2026). Investigation of Cold Recycling Technology for Asphalt Pavements: From Materials and Design Methods to Performance and Durability Assessment. *Road*, e252195.

Ziari, H., Aliha, M. R. M., Fard, E. S., & Sarbijan, M. J. (2022). "Mixed mode I+II fracture parameters and cracking trajectory of heterogeneous multilayer pavement structure containing reflective crack". Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., 45(10): 2958–2977.