



Research Article

Investigating Mode I and Mode II of Fracture Toughness of Asphalt Concrete Containing Steel Slag Powder at Low Temperature

Shahin Shabani^{a,*}, Mohammad Reza Malek^b, Mahmoud Reza Keymanesh^c

^aAssociate Professor in Road and Transportation, Department of Civil Engineering, Payame Noor University, North Tehran Branch, I. R. Iran.

^bPhD Student in Road and Transportation, Department of Civil Engineering, Payame Noor University, North Tehran Branch, I. R. Iran.

^cProfessor in Road and Transportation, Department of Civil Engineering, Payame Noor University, North Tehran Branch, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2025-02-08

Revised: 2025-03-31

Accepted: 2025-04-06

Keywords:

Hot mix asphalt;
Steel slag powder;
Low temperature fracture toughness.

ABSTRACT

Various waste and recycled materials are used in concrete mixtures to produce green building materials, and among them, steel slag is a favorite material that can be used as a partial replacement for natural stone aggregates. In this study, the effect of adding steel slag powder as a filler on the Mode I and Mode II fracture toughness of hot mix asphalt (HMA) was investigated. A semicircular bending specimen with a vertical edge crack was used for the tests. Different HMA mixtures containing 0, 3, and 5 wt.% steel slag filler were prepared using the gyratory compaction method with a void ratio of 3%. Mode I and Mode II fracture toughness tests were performed using symmetric and asymmetric half-disk loading at two low temperatures of -12 °C and -24 °C. According to the results, by adding steel slag powder and increasing its percentage for both temperatures, the values of K_{IC} and K_{IIC} increase, but the values of K_{IC} and K_{IIC} increase more and more significantly with decreasing temperature. For each mixture and temperature, the fracture toughness of Mode II was lower than K_{IC} so that K_{IIC} / K_{IC} fluctuates in a small range from 0.8 to 0.87. These results show good agreement with the predictions of each of the conventional fracture criteria of basic stress and basic energy.

* Corresponding author.

E-mail address: cv.amir1995@gmail.com



مقاله پژوهشی

بررسی پارامتر چقرمگی شکست مود های I و II شکست مخلوط آسفالتی حاوی پودر سرباره فولادی در دمای پایین

شاهین شعبانی^{۱*}، محمدرضا ملک^۲، محمدرضا کی‌منش^۳

^۱دانشیار، گروه راه و ترابری، دانشگاه پیام نور تهران، ایران.

^۲دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشگاه پیام نور تهران، ایران.

^۳دانشیار، گروه راه و ترابری، دانشگاه پیام نور تهران، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۲۰	از مواد زائد و بازیافتی مختلف در مخلوط‌های بتنی برای تولید مصالح ساختمانی سبز استفاده می‌شود و در بین آنها سرباره فولادی ماده مورد علاقه‌ای است که می‌تواند به عنوان جایگزین بخشی از سنگدانه‌های طبیعی سنگی مورد استفاده قرار گیرد. در این تحقیق، تأثیر افزودن پودر سرباره فولادی به عنوان ماده پرکننده بر چقرمگی شکست مود I و مود II مخلوط آسفالتی گرم (HMA) بررسی شده است. برای انجام آزمایش‌ها از نمونه خمشی نیم‌دایره با ترک لبه عمودی استفاده شده است. مخلوط‌های مختلف HMA حاوی صفر، ۳ و ۵ درصد وزنی پرکننده سرباره فولادی با استفاده از روش تراکم ژیراتوری با درصد فضای خالی ۳٪ ساخته شدند. آزمایش‌های چقرمگی شکست مود I و مود II با استفاده از بارگذاری متقارن و غیرمتقارن نیم‌دیسک در دو دمای کم ۱۲- و ۲۴- درجه سلسیوس انجام شد. بر اساس نتایج، با افزودن پودر سرباره فولادی و افزایش درصد آن برای هر دو دما، مقادیر K_{IC} و K_{IIC} افزایش می‌یابد؛ اما مقادیر مربوط به K_{IC} و K_{IIC} با کاهش دما، افزایش بیشتر و قابل توجه‌تری می‌یابد. برای هر مخلوط و دمایی، چقرمگی شکست مود II کمتر از K_{IC} بود به طوری که K_{IIC} / K_{IC} در محدوده کوچکی که از ۰/۸ تا ۰/۸۷ متغیر است، نوسان دارد. این نتایج با پیش‌بینی‌های هر یک از معیارهای شکست متداول تنش پایه و انرژی پایه توافق خوبی نشان می‌دهد.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: cv.amir1995@gmail.com

استناد به این مقاله: شعبانی، شاهین، ملک، محمدرضا و کی‌منش، محمدرضا. (۱۴۰۴). بررسی پارامتر چقرمگی شکست مود های I و II شکست مخلوط آسفالتی حاوی پودر سرباره فولادی در دمای پایین. مهندسی زیر ساخت‌های حمل و نقل، ۱۱(۲)، ۴۲-۲۱.

<https://doi.org/10.22075/jtie.2025.36844.1714>

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱. مقدمه

به دلیل محدودیت منابع طبیعی مانند سنگدانه‌های مورد نیاز برای ساخت مواد و سازه‌های عمرانی، مانند روسازی جاده‌ها یا سازه‌های بتنی، تقاضا برای جایگزینی سنگدانه‌های طبیعی با سایر مواد رو به افزایش است. استفاده از ضایعات صنعتی یا محصولات جانبی صنایع سنگین به عنوان جایگزین بخشی از سنگدانه‌ها، راه‌حلی مناسب برای تولید مصالح بتنی کم‌هزینه، تمیزتر و سازگارتر با محیط‌زیست است (رحمان و همکاران، ۲۰۲۰؛ تونجان و همکاران، ۲۰۰۳؛ طغرلی و همکاران، ۲۰۱۸؛ یاسانتی و همکاران، ۲۰۱۶؛ برادران و عامری، ۲۰۲۳). در واقع، استفاده از چنین موادی نه تنها حجم و میزان آلودگی‌های زیست‌محیطی را کاهش می‌دهد بلکه می‌تواند مصرف انرژی در تولید محصولات بتنی را نیز کاهش دهد. بر این اساس، انواع مختلف از مواد زائد طبیعی و صنعتی از جمله الیاف بازیافتی (برادران و ضیائی، ۲۰۲۵؛ کیم و همکاران، ۲۰۱۸؛ ژونگ و همکاران، ۲۰۱۵؛ عیار و همکاران، ۲۰۲۲؛ رجایی و همکاران، ۲۰۲۵)، الیاف طبیعی (برادران و ضیائی، ۲۰۲۵؛ علیها و همکاران، ۲۰۱۷)، الیاف مصنوعی ناروله و ویسپور، ۲۰۲۲؛ موسی و همکاران، ۲۰۱۹؛ روح‌الامینی و همکاران، ۲۰۱۸)، پلاستیک و لاستیک (احمدی نیا و همکاران، ۲۰۱۲؛ علیها، ۲۰۱۹؛ کریمی و همکاران، ۲۰۲۳؛ الف؛ کریمی و همکاران، ۲۰۲۳؛ ب؛ برادران و همکاران، ۲۰۲۴؛ الف؛ برادران و همکاران، ۲۰۲۴؛ ب)، سیم فولادی، شیشه و الیاف و ذرات چوب (حسینی و همکاران، ۲۰۲۲؛ علیها و همکاران، ۲۰۲۲؛ کرم‌زاده و همکاران، ۲۰۲۲؛ برادران و همکاران، ۲۰۲۳)، پُرکننده‌ها (داس و سینگ، ۲۰۱۷) و سرباره‌ها (ژائو و همکاران، ۲۰۲۲؛ روح‌الامینی و همکاران، ۲۰۱۹؛ عربانی و آذرهوش، ۲۰۱۲). در گذشته، در طراحی مخلوط آسفالت و بتن سیمانی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با این حال، بررسی تأثیر افزودن چنین مواد افزودنی بر خواص مکانیکی و شاخص‌های مقاومت

شکست قطعات بتنی حاصل، ضروری به نظر می‌رسد. برای مخلوط‌های آسفالتی که از ماده ویسکوالاستیک قیر می‌باشند، شرایط دمای کم، شرایط بحرانی و پرخوری را برای عملکرد ایمن و قابل اعتماد آن‌ها فراهم می‌کند. زیرا در چنین شرایطی، قیر عمدتاً به عنوان ماده شکننده عمل می‌کند و بنابراین ترک‌خوردگی فاجعه‌بار و گسترده روسازی‌ها در دمای کم، یک حالت رایج خرابی در مناطق سرد است (ماراستینو و همکاران، ۲۰۰۲؛ یوسفی و همکاران، ۲۰۲۱؛ شهریاری و همکاران، ۲۰۲۱؛ دیو و همکاران، ۲۰۱۱؛ هی و همکاران، ۲۰۲۲؛ الف؛ زارعی و همکاران، ۲۰۲۲؛ حقیقت‌پور و علیها، ۲۰۲۲؛ الف؛ فخری و همکاران، ۲۰۲۰). پدیده ترک‌خوردگی در سطح جاده‌ها با عبور وسایل نقلیه از جاده تسریع می‌شود. طبق مطالعات قبلی، هر بار عبور وسیله نقلیه از روی ترک بالا به پایین ایجاد شده در سطح روسازی، هر دو مود کششی یا مود I (تغییر شکل باز شدن ترک) و مود برشی درون صفحه‌ای یا مود II (تغییر شکل لغزش ترک) را تحریک می‌کند که در کارهای مختلف بیان شده است (علیها و همکاران، ۲۰۲۱؛ زیاری و همکاران، ۲۰۲۲؛ عامری و همکاران، ۲۰۱۱).

به منظور ارزیابی عملکرد روکش‌های آسفالتی در برابر حالت خرابی ترک‌خوردگی و تخمین چرخه عمر و زمان بازسازی جاده‌ها، دانستن مقدار چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی ضروری است. مقاومت به شکست که مقاومت هر ماده ترک‌دار در برابر ترک‌خوردگی را نشان می‌دهد، به عنوان پارامتر مشخصه ماده شناخته می‌شود و به عنوان یک خاصیت مکانیکی در نظر گرفته می‌شود. چقرمگی شکست مواد آسفالتی ممکن است به نوع طرح اختلاط، نوع مواد تشکیل‌دهنده، شرایط محیطی و حالت بارگذاری بستگی داشته باشد. بر این اساس، چندین محقق به طور تجربی، چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی را با طرح‌های مختلف اختلاط (علیها و همکاران، ۲۰۱۵؛ بهبهانی و همکاران، ۲۰۱۳؛

تحت دماهای کم و متوسط متفاوت (ملایم و همکاران، ۲۰۲۱؛ فخری و همکاران، ۲۰۱۸؛ علیها و همکاران، ۲۰۱۸؛ حامدی و همکاران، ۲۰۲۰؛ هی و همکاران، ۲۰۲۱؛ هی و همکاران، ۲۰۲۲ الف)، تحت شرایط ذوب و یخبندان (حقیقت‌پور و علیها، ۲۰۲۲؛ کریمی و همکاران، ۲۰۲۱) و تحت موده‌های کششی و برشی مختلف (نجار و همکاران، ۲۰۱۹؛ یوان و همکاران، ۲۰۲۱؛ امیردهی و همکاران، ۲۰۱۹؛ یانگ و همکاران، ۲۰۲۱؛ ساعد و همکاران، ۲۰۲۲؛ هی و همکاران، ۲۰۲۲؛ ون و همکاران، ۲۰۲۲) مطالعه و تعیین کرده‌اند. در مطالعات مربوط به تعیین چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی، برخی از نمونه‌های آزمایش از جمله نمونه کشش فشرده (ماندل و همکاران، ۲۰۱۹؛ صالحی آسانی و همکاران، ۲۰۲۲؛ دیو و همکاران، ۲۰۱۱)، خمشی دیسک با ترک گوشه (فوان و همکاران، ۲۰۲۱؛ حقیقت‌پور و همکاران، ۲۰۱۸؛ معتمدی و همکاران، ۲۰۲۰)، فشرده‌سازی قطر غیرمستقیم (فالچتو و همکاران، ۲۰۱۷؛ فالچتو و همکاران، ۲۰۱۸)، دیسک برزلی ترکی‌خورده (هی و همکاران، ۲۰۲۱؛ هی و همکاران، ۲۰۲۲؛ مبارکی و همکاران، ۲۰۱۳) و خمشی نیم‌دایره‌ای که اغلب به عنوان روش SCB شناخته می‌شود (ارارسلان و ویلیامز، ۲۰۱۲؛ ارارسلان و همکاران، ۲۰۱۵؛ ارارسلان و علیها، ۲۰۲۵؛ ارارسلان، ۲۰۱۹؛ ارارسلان، ۲۰۲۳؛ القدسی و همکاران، ۲۰۲۰؛ علیها و همکاران، ۲۰۲۰؛ بیلگیری و همکاران، ۲۰۱۲؛ عامری و همکاران، ۲۰۱۶؛ بویی و صالح، ۲۰۲۱؛ خاکباز و همکاران، ۲۰۲۴؛ محمد و همکاران، ۲۰۱۲؛ مبارکی و سلام، ۲۰۲۰؛ برادران و علیها، ۲۰۲۵)، توسط محققان شکست آسفالت به طور مکرر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در میان نمونه‌های ذکر شده، نمونه SCB یک نمونه ساده و رایج‌ترین نمونه‌ای است که توسط استانداردهای AASHTO و ASTM برای آزمایش چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی پیشنهاد شده است.

اگرچه چندین تحقیق، اثر افزودن سرباره فولادی بر

خواص مکانیکی (مانند روانی، حساسیت رطوبتی، مقاومت به سایش، پایداری مارشال، عمر خستگی) و عملکرد مصالح AC (علی و همکاران، ۱۹۹۲؛ ون و همکاران، ۲۰۲۲؛ کیم و همکاران، ۲۰۱۸؛ لو و همکاران، ۲۰۲۰؛ یان و هو، ۲۰۱۹؛ چای و همکاران، ۲۰۲۰؛ چن و همکاران، ۲۰۲۰؛ شفابخش و آنی، ۲۰۱۵؛ شو و همکاران، ۲۰۲۰؛ ون و همکاران، ۲۰۱۶) را بررسی کرده‌اند، اما بررسی ادبیات نشان می‌دهد که داده‌های آزمایشی محدودی در مورد مقاومت به شکست مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده از سرباره به عنوان جایگزین بخشی از سنگدانه‌های طبیعی وجود دارد. در میان آثار موجود و مرتبط، فالچتو و همکاران (۲۰۱۷) مقاومت به شکست مود I دمای کم بتن آسفالتی حاوی سرباره فولادی با دانه‌بندی و اندازه‌های مختلف در مخلوط آن را با استفاده از آزمایش SCB گزارش کرده‌اند.

آنها نشان دادند که افزودن سرباره می‌تواند مقاومت به شکست مخلوط آسفالتی را بهبود بخشد. فالچتو و همکاران (۲۰۱۷) از نمونه SCB برای بررسی چقرمگی شکست و رفتار ترک‌خوردگی مخلوط آسفالت گرم ساخته شده از سنگدانه‌های درشت سرباره فولادی در دمای متوسط استفاده کردند. آنها همچنین تأثیر چرخه‌های ذوب و یخبندان بر مقاومت ترک‌خوردگی چنین مخلوط آسفالتی را بررسی کردند. لی و همکاران (۲۰۱۸) نیز استفاده از پودر سرباره فولادی را بر عملکرد ترک‌خوردگی حالت کششی ماستیک آسفالتی بررسی کردند. بر اساس یافته‌های آنها، افزودن پودر سرباره می‌تواند مقاومت به شکست را در مقایسه با حالت شاهد بهبود بخشد. در کار مشابه دیگری، با استفاده از نمونه SCB، محققان (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۲) اخیراً تأثیر اضافه کردن مواد افزودنی ترکیبی سرباره فولادی و الیاف پلی‌استر را بر عملکرد ترک‌خوردگی دمای کم مواد AC در شرایط دمای کم در محدوده صفر تا ۲۰- درجه سلسیوس بررسی کردند. لی و همکاران (۲۰۱۶) نیز

انرژی شکست (به عنوان شاخص ترک خوردگی) مخلوط های آسفالتی ساخته شده از سرباره فولادی را بررسی کردند.

با این حال، تأثیر افزودن درصد های مختلف سرباره فولادی بر شکست مود I و به ویژه تحت بارگذاری مود II مخلوط های آسفالتی در شرایط دمای کم هنوز به طور جامع بررسی نشده است. بنابراین، در این تحقیق، از طریق انجام یک کار تجربی، مقادیر مقاومت به شکست مود I و مود II (K_{IIC} و K_{IIC}) برای مخلوط های آسفالتی ساخته شده از درصد های مختلف سرباره فولادی به دست می آید. همچنین، تأثیر درصد سرباره بر مقادیر چقرمگی شکست دمای کم در مود های شکست کششی و برشی، مقایسه و بررسی می شود.

این دانه بندی ۱۹ میلی متر می باشد. گرمایش و درصد وزنی مصالح در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین، پودر سرباره فولادی با اندازه عبوری از الک شماره ۲۰۰، به عنوان پُرکننده با سه درصد وزنی صفر، ۳ و ۵ درصد با مصالح مخلوط گردید. مشخصات سرباره استفاده شده در این پژوهش در جدول ۳ نمایش داده شده است. قیر مورد استفاده آسفالت گرم، قیر معمولی با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ و درجه عملکردی ۲۲-۶۴ می باشد. این نوع قیر معمولاً در ساخت جاده ها در بسیاری از کشورها با دامنه دمایی و شرایط محیطی مختلف و عمدتاً با آب و هوای سرد و معتدل استفاده می شود. برخی از خواص اصلی این نوع ماده قیری در جدول ۴ ارائه شده است.

۲-۲. طرح اختلاط و ساخت نمونه های ژیراتوری

پس از دانه بندی اندازه های الک برای پرکننده سرباره و مصالح سنگی، روش استاندارد طرح اختلاط مارشال به کار گرفته شد و مصالح با قیر در دمای ۱۵۵ درجه سلسیوس مخلوط شدند. سپس، مخلوط حاصل در قالب های استوانه ای با قطر ۱۵۰ میلی متر و ارتفاع ۱۳۰ میلی متر ریخته شد و با استفاده از دستگاه تراکم ژیراتوری سوپریو جهت دستیابی به درصد فضای خالی ۳ درصد برای نمونه های آسفالت گرم متراکم گردید.

۲. مواد و روش ها

۲-۱. مصالح و مواد خام

جهت تولید نمونه های آسفالت گرم (HMA) این پژوهش، از مصالح سنگی آهکی با دانه بندی شماره ۴ (مطابق استاندارد راه و ترابری جمهوری اسلامی ایران، نشریه ۲۳۴) استفاده گردید. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مصالح سنگی مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است. حداکثر اندازه اسمی مصالح در

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

شرح آزمایش	حدود مجاز آیین نامه	مصالح سنگی
سایش لس آنجلس (%)	حداکثر ۲۵ درصد	۱۶
جذب آب درشت دانه (%)	حداکثر ۲/۵ درصد	۲/۳۷۵
جذب آب ریزدانه (%)	حداکثر ۲/۵ درصد	۲/۵۰
میزان شکستگی (یک وجهه) (%)	۱۰۰ درصد	۹۸
میزان شکستگی (دو وجهه)	۱۰۰ درصد	۹۷
ارزش ماسه ای	حداقل ۵۰	۸۱
افت وزنی در برابر سولفات سدیم	حداکثر ۸٪ درشت دانه، حداکثر ۱۲٪ ریزدانه	درشت دانه ۰/۳۲، ریزدانه ۱/۱۵

جدول ۲. دانه بندی مصالح سنگی آهکی مورد استفاده در طراحی مخلوط آسفالتی این پژوهش

اندازه دانه (mm)	میزان عبوری (%)
۱۹	۱۰۰
۱۲/۵	۹۰-۱۰۰
۹	۷۸-۸۲
۴/۷۵	۴۴-۷۴
۲/۳۶	۲۸-۵۸
۰/۳	۵-۲۱
۰/۰۷۵	۲-۱۰

جدول ۳. خصوصیات سرباره مورد استفاده در این پژوهش

پودر سرباره فولادی	اجزای شیمیایی
۵/۳۱	L.O.I*
۰/۴۵	Na ₂ O
۴/۲۵	MgO
۴/۸۸	Al ₂ O ₃
۱۹/۵۰	SiO ₂
۰/۵۹	K ₂ O
۳۳/۲۷	CaO
۲۵/۹۳	Fe ₂ O ₃

جدول ۴. خصوصیات رئولوژیک قیر ۷۰/۶۰ (معادل PG64-22) مورد استفاده در این پژوهش

مقدار	استاندارد	خواص
۸۱۴ mm ² /s	ASTM D2170	ویسکوزیته کینماتیک در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس
۴۲۱ mm ² /s	ASTM D2170	ویسکوزیته کینماتیک در دمای ۱۳۵ درجه سلسیوس
۲۳۲ mm ² /s	ASTM D2170	ویسکوزیته کینماتیک در دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس
۱/۰۲ gr/cm ³	ASTM D70	وزن مخصوص در دمای ۲۵ درجه سلسیوس
۱۰۰ cm	ASTM D113	شکل پذیری در دمای ۲۵ درجه سلسیوس
-۱/۱۳	-	شاخص نفوذ
۳۰۵°C	ASTM D92	نقطه اشتعال
۶/۲۵ mm	ASTM D5	درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه سلسیوس

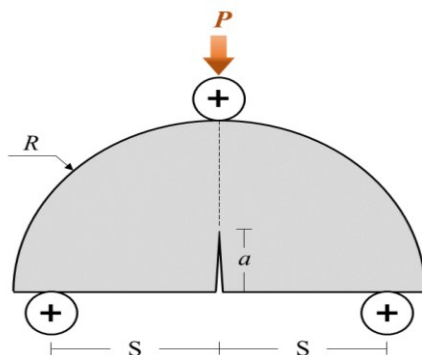
پس از ساخت نمونه های استوانه ای ژیراتوری، آن ها به صورت عمود و موازی با محور استوانه برش داده شدند تا نمونه های SCB تولید شوند. یک ترک لبه ای به طول ۲۲/۵ میلی متر با استفاده از تیغه اره الماسه دورانی در وسط هر نمونه ایجاد شد. بنابراین، نسبت طول ترک (a/R) در تمام نمونه های SCB ساخته شده مقدار ثابت

برای ایجاد شرایط مود I و مود II نشان می‌دهند. هندسه و شکل نمونه برای انجام هر دو حالت یکسان است. اما مکان تکیه‌گاه‌های بارگذاری پایین (فاصله‌های S_1 و S_2) می‌تواند نوع مود بارگذاری یا وضعیت تغییرشکل ترک را تغییر دهد. هنگامی که S_1 و S_2 برابر باشند، مود I رخ می‌دهد و هنگامی که S_2 به طور قابل توجهی کوچکتر از S_1 باشد، می‌توان مود خالص II یا تغییرشکل برشی خالص را به دست آورد. ضرایب شدت تنش مود I و II، یعنی K_I و K_{II} برای نمونه SCB به صورت روابط (۱) و (۲) نوشته می‌شوند (علیها، ۲۰۱۹؛ یوان و همکاران، ۲۰۲۱).

$$K_I = \frac{P}{2Rt} \sqrt{\pi a} Y_I(a/t, S/R) \quad (1)$$

$$K_{II} = \frac{P}{2Rt} \sqrt{\pi a} Y_{II}(a/t, S_I/R, S_{II}/R) \quad (2)$$

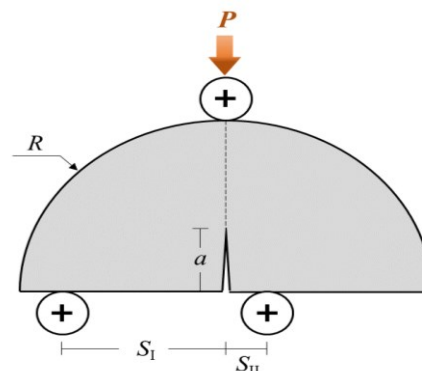
همچنین ناحیه پلاستیک نوک ترک و کانتور تنش فون مایز ایجاد شده در مقابل ترک مود I و مود II در نمونه SCB تحلیل شده را نشان می‌دهد. ضرایب هندسی مود I و مود II از طریق انتگرال J با اعمال بار مرجع $P = 1$ N به نمونه SCB و با در نظر گرفتن خواص مکانیکی $E = 3$ GPa (مدول الاستیسیته) و $\nu = 0.35$ (ضریب پواسون) که متناسب با خواص مکانیکی مخلوط آسفالتی می‌باشد، تعیین می‌گردد. جدول ۵، مقادیر مربوط به Y_I و Y_{II} را در شرایط مود خالص I و مود خالص II برای نسبت‌های مختلف a/R ، S_I/R و S_2/R نشان می‌دهد.

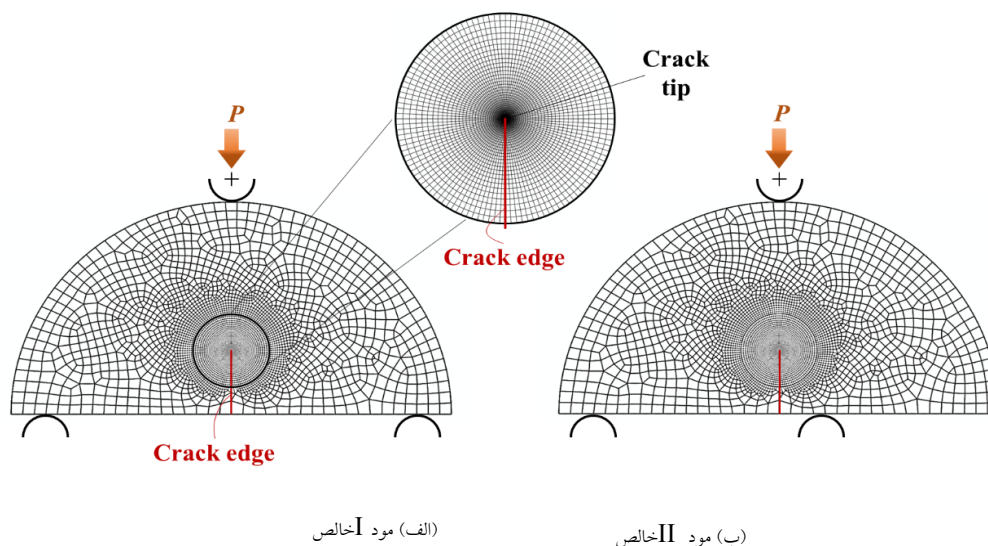


۰/۳ بود. برای بررسی مقاومت ترک‌خوردگی در دمای کم و عملکرد پودر سرباره روی نمونه‌های آسفالتی گرم ساخته شده، دو دمای زیر صفر (یعنی ۱۲- و ۲۴- درجه سلسیوس) برای انجام آزمایش‌های چقرمگی شکست در نظر گرفته شد. بر این اساس، نیمی از نمونه‌های تولید شده در دمای ۱۲- درجه سلسیوس و بقیه آنها در دمای ۲۴- درجه سلسیوس به مدت تقریباً یک روز نگهداری شدند.

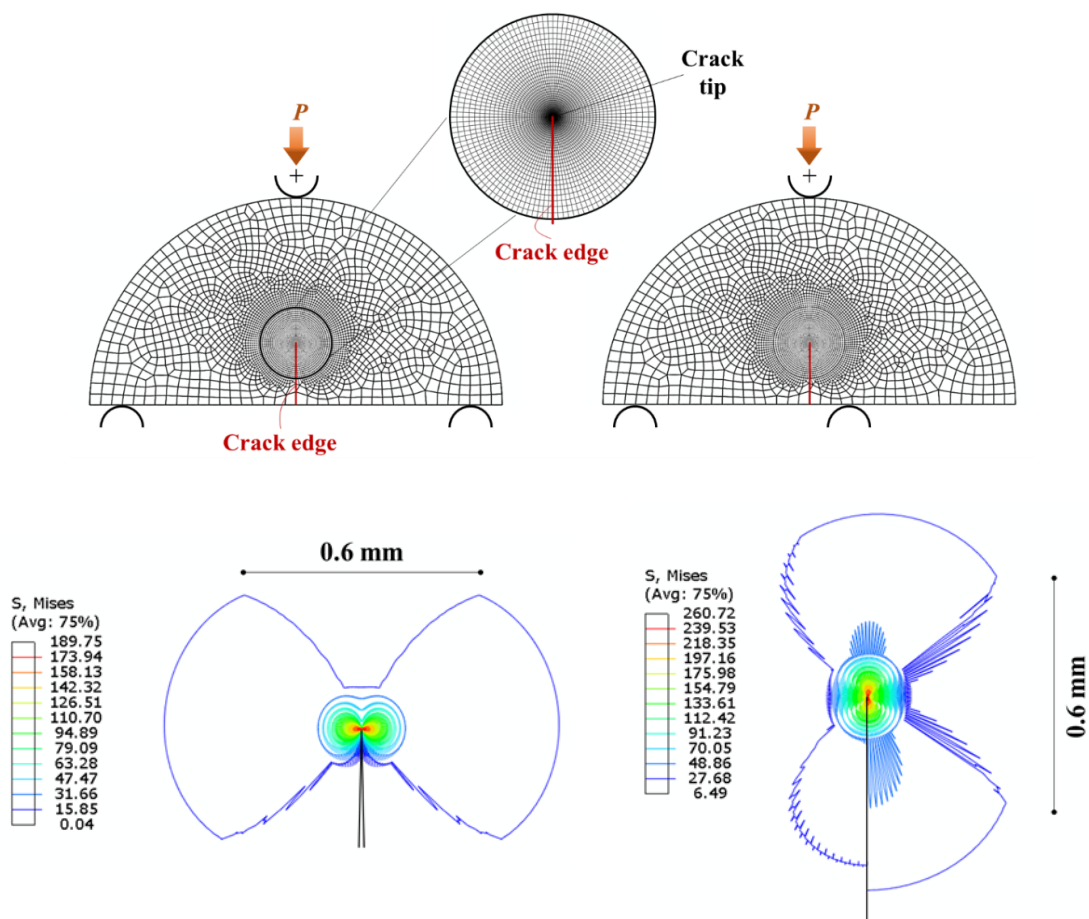
۳-۲. نمونه آزمایشی برای مطالعه شکست مخلوط‌های آسفالتی گرم (HMA)

در این تحقیق، از نمونه خمشی نیم‌دایره‌ای (SCB) برای انجام آزمایش‌های چقرمگی شکست مود I و مود II روی مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شود. شکل‌های ۱- الف و ب، هندسه و شرایط بارگذاری این نمونه را به ترتیب در معادلات فوق، P بار اعمال شده، R شعاع نیم‌دایره، t ضخامت نمونه، a طول ترک و Y_I و Y_{II} ضرایب هندسی مود I و مود II می‌باشند. این دو ضریب هندسی تابعی از a/R ، S_1/R و S_2/R بوده و می‌توانند با استفاده از نرم‌افزارهای تجاری مانند ABAQUS به صورت عددی تعیین شوند. شکل ۲، مدل اجزای محدود نمونه SCB و شرایط مرزی مربوطه برای ایجاد حالات مود I و مود II را نشان می‌دهد. در مجموع، ۵۷۸۳ المان (CPE8: چهارضلعی کرنش صفحه‌ای دوخطی ۸ گره‌ای) برای مدل‌سازی عددی نمونه SCB استفاده شد. شکل ۲





شکل ۱. هندسه و شرایط بارگذاری نمونه SCB مورد استفاده برای مطالعه رفتار شکست مود I خالص و مود II خالص مخلوط‌های آسفالتی



شکل ۲. مدل اجزای محدود (FEM) نمونه SCB برای تعیین ضرایب شدت تنش یا ضرایب شکل هندسی مود I و مود II خالص به همراه کانتور تنش فون مایز در اطراف نوک ترک در هر یک از مودهای شکست

جدول ۵. مقادیر متناظر ضرایب شکل هندسی قطعه SCB Y_I و Y_{II} در حالت‌های مربوط به مود I خالص و مود II خالص مخلوط‌های آسفالتی

مود I خالص			مود II خالص		
a/R	S/R	Y_I	S_I/R	S_{II}/R	Y_{II}
۰/۳	۰/۳	۰/۹۹۱	۰/۳	۰/۱۳۵	۱/۰۳
	۰/۴	۱/۸۱۲	۰/۴	۰/۱۲	۱/۴۱۶
	۰/۵	۲/۶	۰/۵	۰/۱۱۴	۱/۶۰۴
	۰/۶	۳/۳۵	۰/۶	۰/۱۱۲۵	۱/۷۱۷
	۰/۷	۴/۰۸۴	۰/۷	۰/۱۱	۱/۸۰۶
	۰/۸	۴/۸۴۵	۰/۸	۰/۱۰۷	۱/۸۲۸
۰/۴	۰/۳	۱/۲۳	۰/۳	۰/۱۰۲۸	۱/۱۲۸
	۰/۴	۲/۰۸۴	۰/۴	۰/۰۹۵	۱/۳۹۶
	۰/۵	۲/۹۲۷	۰/۵	۰/۰۹	۱/۵۵۴
	۰/۶	۳/۷۶۱	۰/۶	۰/۸۷۵	۱/۶۵۱
	۰/۷	۴/۵۹۶	۰/۷	۰/۰۸۵	۱/۷۲۳
	۰/۸	۵/۴۳۷	۰/۸	۰/۰۸۳۷	۱/۷۷۳

صورت یکنواخت با سرعت بارگذاری ۳ میلی‌متر در دقیقه بارگذاری شدند. پس از انجام آزمایش‌ها، منحنی‌های بار اعمال شده - جابجایی برای مخلوط‌های HMA مورد بررسی به‌دست آمد که برای نمونه‌های معمولی در شکل ۴ ارائه شده است. این منحنی‌ها نشان می‌دهند که پودر سرباره فولاد می‌تواند بار شکست هر دو مود را افزایش دهد. علاوه بر این، شکست مود II به بار بیشتری نسبت به مود I خالص نیاز دارد. همچنین، منحنی‌های شکست تمام نمونه‌های آزمایش شده رفتار غالباً خطی را تا شروع شکست و بار اوج نشان دادند. این رفتار نشان می‌دهد که چارچوب مکانیک شکست الاستیک خطی (LEFM) با دقت خوبی برای مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی در شرایط دمای کم معتبر است. مقادیر بحرانی ضرایب شدت تنش مود I و مود II در لحظه شکست به ترتیب به عنوان چقرمگی شکست مود I و مود II با نمادهای K_{IC} و K_{IIC} شناخته می‌شود. در نتیجه، مقادیر مقاومت در برابر شکست

۲-۴. آزمایش‌های چقرمگی شکست مود I و مود II

نمونه‌های SCB (با شعاع ۷۵ میلی‌متر، ضخامت ۳۰ میلی‌متر و طول ترک ۲۲,۵ میلی‌متر) ساخته شده از مخلوط HMA با درصد‌های مختلف سرباره فولاد برای آزمایش چقرمگی شکست مود I و مود II تهیه شدند. طول دهانه برای آزمایش بارگذاری مود I برابر $S = 60$ میلی‌متر در نظر گرفته شد. از این رو، آزمایش‌های مود I با استفاده از شرایط بارگذاری متقارن با پارامترهای هندسی $a/R = 0.3$ و $S/R = 0.8$ انجام شد. برای مود II خالص (با $a/R = 0.3$) دهانه‌های غلتک چپ و راست برابر با $S_1 = 37.5$ (یعنی $S_1/R = 0.5$) و $S_2 = 8.5$ میلی‌متر (یعنی $S_2/R = 0.114$) بر اساس تحلیل‌های اجزای محدود انتخاب شدند. تنظیم آزمایشی و نحوه قرارگیری نمونه برای بارگذاری مود I و مود II نمونه SCB در شکل ۳ نشان داده شده است. تمام نمونه‌های آزمایشی آسفالتی گرم مخلوط شده با مود I و مود II به

و $Y_{II} = 1.604$ داده شده در جدول ۱ برای شرایط آزمایش این تحقیق به دست آمد.

مخلوط‌های آسفالتی آزمایش شده با نمونه SCB با جایگزینی بار شکست (P_{cr}) هر نمونه در معادلات (۳) و (۴) و استفاده از ضرایب هندسی مربوطه ($Y_I = 4.845$)

$$K_{Ic} = \frac{4.845 P_{cr}}{2Rt} \sqrt{\pi a} \quad (۳)$$

$$K_{IIc} = \frac{1.604 P_{cr}}{2Rt} \sqrt{\pi a} \quad (۴)$$



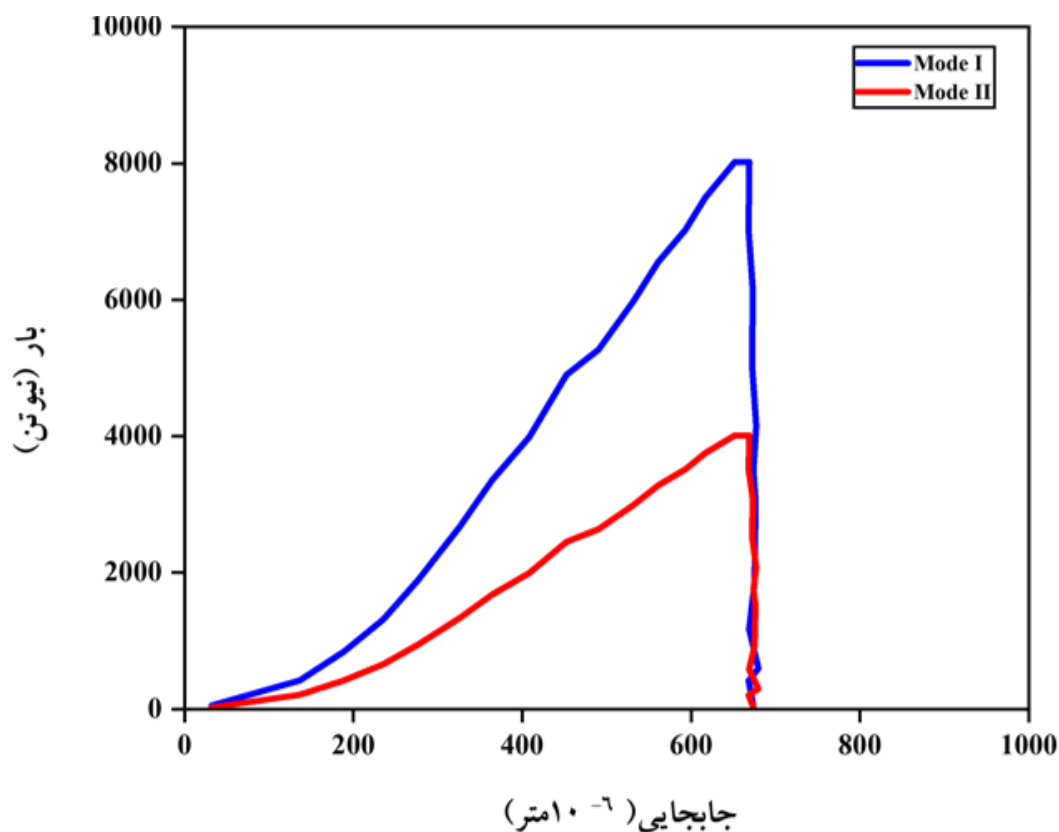
(الف) بارگذاری و نحوه شکست مود I کششی



(ب) بارگذاری و نحوه شکست مود II برشی

شکل ۳. (الف و ب) نحوه بارگذاری برای انجام آزمایش‌های شکست در مود I و II روی مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده از نمونه SCB

بررسی پارامتر چقرمگی شکست مود های I و II شکست مخلوط آسفالتی حاوی پودر سرباره فولادی در دمای پایین



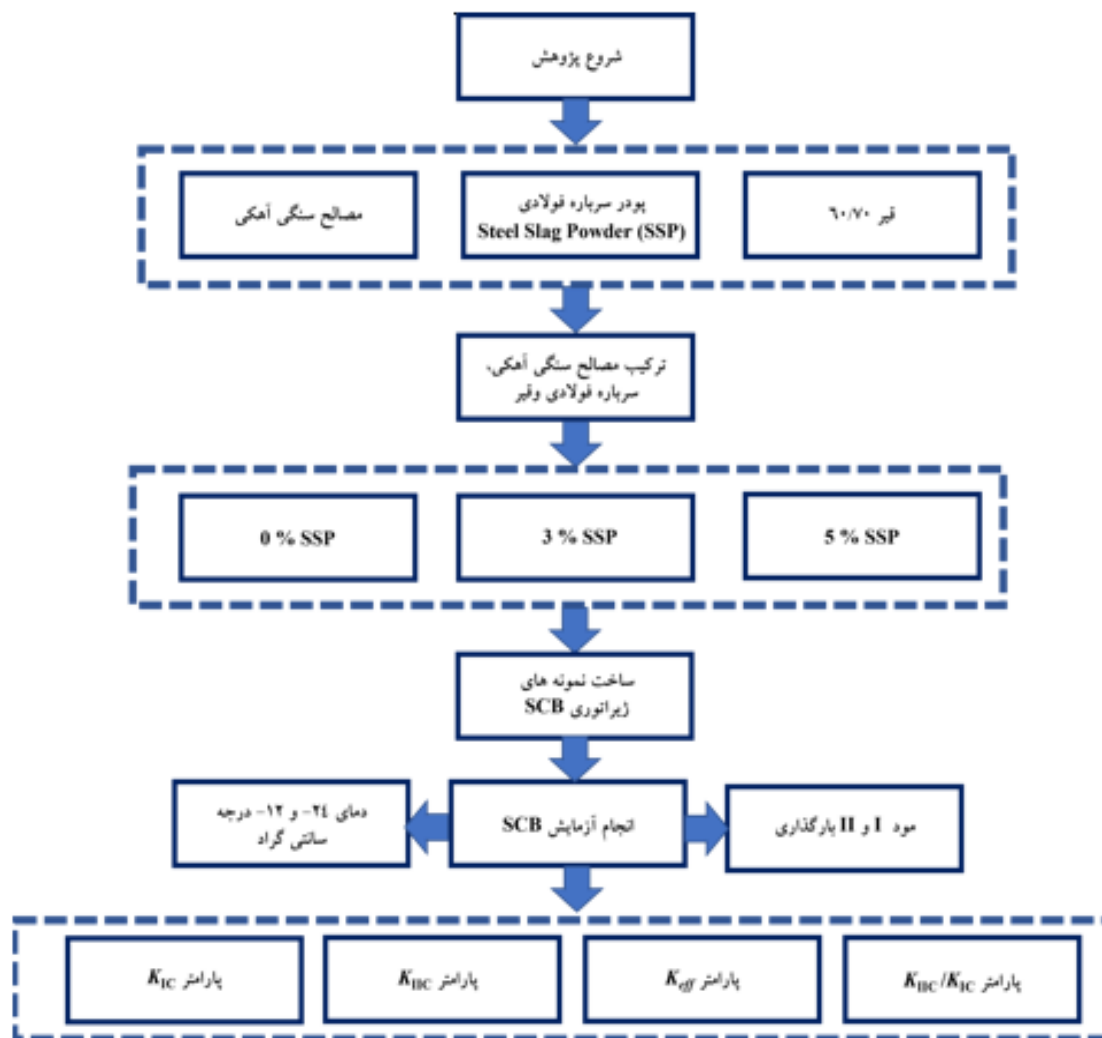
شکل ۴. نمونه‌ای از منحنی بار-جابجایی به دست آمده از آزمایش SCB در مودهای I و II در دمای کم

در جدول ۶، مشخصات نمونه‌های ساخته شده به همراه پارامترهای در نظر گرفته شده برای آزمایش نشان داده شده است.

جدول ۶. مشخصات نمونه‌های ساخته شده به همراه پارامترهای در نظر گرفته شده برای آزمایش

SCB	نمونه شکست مورد نظر
۳۰ میلی‌متر	ضخامت نمونه
۱۵۰ میلی‌متر	قطر نمونه
۲۲/۵ میلی‌متر	طول ترک
مود ۱ و مود ۲ خالص	مدهای بارگذاری در نظر گرفته شده
۱۲- و ۲۴- درجه سلسیوس	دمای آزمایش
۳ میلی‌متر بر دقیقه	نرخ بارگذاری
۴/۸۴۵	ضریب شکل مود ۱
۱/۶۰۴	ضریب شکل مود ۲

لازم به ذکر است که جهت بررسی بهتر مطالب موجود در این پژوهش، فلوچارت برنامه آزمایشگاهی پژوهش حاضر در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. فلوچارت برنامه آزمایشگاهی پژوهش حاضر

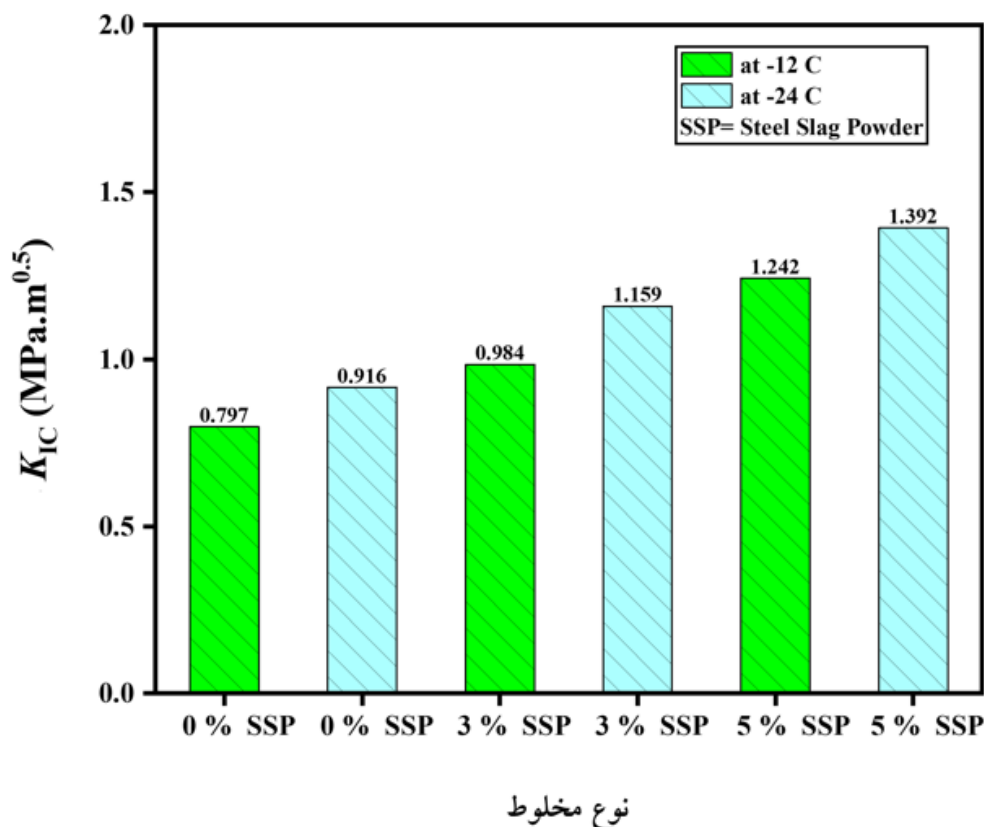
۳. نتایج و بحث

شکل های ۶ و ۷ به ترتیب نتایج آزمایشگاهی چقرمگی شکست مود I و مود II را برای مقاومت در برابر ترک خوردگی در دمای کم مخلوط آسفالت گرم با استفاده از آزمایش های SCB نشان می دهد. بر اساس این داده ها می توان نتیجه گرفت که افزودن پودر سرباره فولاد باعث افزایش مقاومت در برابر شکست در دمای کم هر دو مود کششی و برشی می شود. در واقع، افزودن ۳ و ۵ درصد پودر سرباره، مقدار K_{IC} را به ترتیب حدود ۲۳ و ۵۵ درصد بهبود می بخشد. این بهبودها برای مقادیر K_{IIC} به ترتیب ۱۸ و ۴۲ درصد است که عملکرد بهتر مخلوط

HMA سرباره فولادی اصلاح شده را در برابر شکست نوع کششی نشان می دهد. برخی از محققان نشان داده اند که افزودن سرباره فولاد به مخلوط مواد آسفالتی می تواند مقاومت و خصوصیات مکانیکی را بهبود بخشد (روح الامینی و همکاران، ۲۰۱۹؛ فخری و احمدی، ۲۰۱۷؛ ژائو و همکاران، ۲۰۲۲؛ علی و همکاران، ۱۹۹۲). با توجه به یافته های این تحقیق مشاهده می شود که افزودن پودر سرباره فولاد علاوه بر خصوصیات مکانیکی، نقش مهمی در بهبود مقاومت در برابر ترک خوردگی مخلوط های آسفالتی دارد.

ترک خوردگی مواد HMA یکسان نیست و با توجه به نتایج، مشاهده می شود که دمای آزمایش تأثیر بسیار قابل توجهی بر تغییرات K_{IC} و K_{IIC} در مقایسه با درصد پودر سرباره دارد. همچنین، در آزمایش های این تحقیق مشاهده شد که تأثیر دما برای تغییرات K_{IC} و K_{IIC} مخلوط های HMA با درصدهای مختلف سرباره فولاد مشابه است.

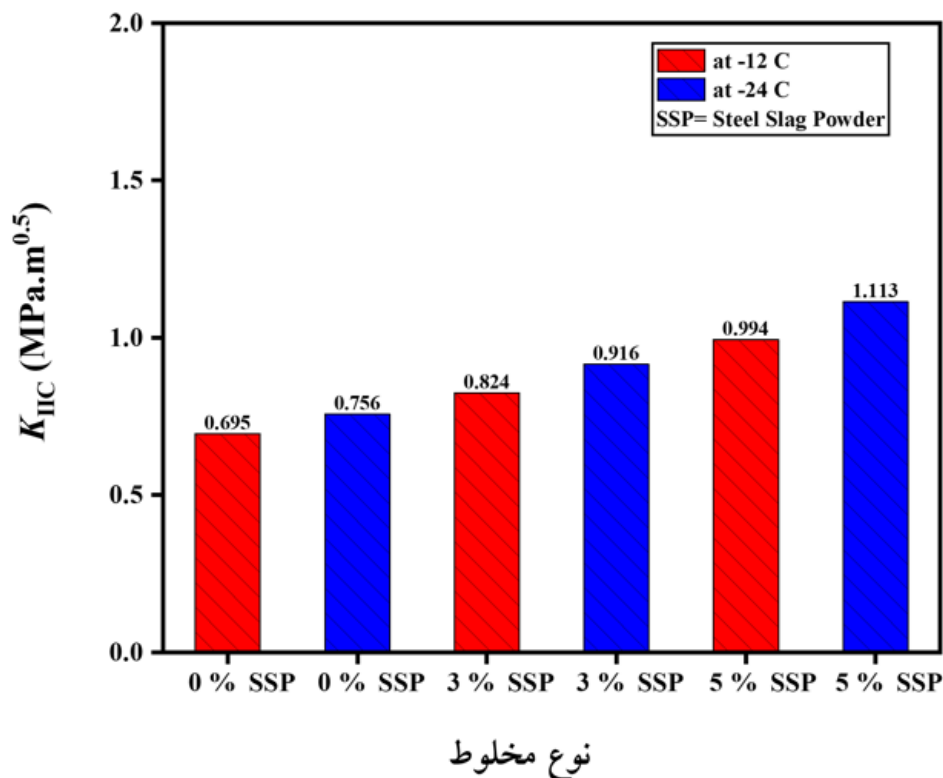
همچنین نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد که مقادیر K_{IC} و K_{IIC} با کاهش دمای آزمایش از ۱۲- درجه سلسیوس به ۲۴- درجه سلسیوس افزایش می یابد. این می تواند به دلیل افزایش سفتی قیر و بهبود استحکام قسمت ماستیک HMA با کاهش دمای آزمایش باشد. تأثیر پارامترهای ورودی مورد مطالعه در این تحقیق (یعنی درصد سرباره و دما) بر مقاومت در برابر



شکل ۶. مقادیر K_{IC} مرتبط با هر یک از انواع مخلوط آسفالتی بررسی شده در این پژوهش

که نسبت چقرمگی شکست مود II به مود I معمولاً در محدوده کوچکی بین ۰/۷۹ و ۰/۸۷ برای مخلوط ها و دماهای آزمایش مختلف نوسان دارد. بر اساس این شکل، دیده می شود که نسبت چقرمگی شکست مود II بر مود I به طور کلی با افزایش درصد سرباره و کاهش دما کاهش می یابد.

مقایسه نتایج چقرمگی شکست هر دو مود نشان می دهد که به طور کلی مقدار K_{IIC} کمتر از مقدار K_{IC} برای هر مقدار سرباره فولادی یا دما است. شکل ۸ مقادیر متناظر K_{IIC} / K_{IC} را برای مخلوط های آسفالت مورد آزمایش نشان می دهد. این نسبت تا حدودی به مقدار سرباره و دمای آزمایش بستگی دارد. اما می توان بیان کرد



شکل ۷. مقادیر K_{IIC} مرتبط با هر یک از انواع مخلوط آسفالتی بررسی شده در این پژوهش

جهت آغاز شکست و شروع شکست تحت طیف کاملی از اختلاط مد I و مد II هستند. این معیارها می‌توانند برای تخمین چقرمگی شکست مد II خالص بر حسب چقرمگی شکست مد I (K_{IIC}) به صورت معادلات زیر ساده‌سازی و ارائه شوند:

برخی نظریه‌ها و معیارهای شکست تئوری برای پیش‌بینی مود ترکیبی I/II وجود دارد. معیار بیشترین تنش مماسی، معیار کمترین چگالی انرژی کرنش و معیار حداکثر نرخ آزادسازی انرژی، سه معیار شکست شناخته شده و معروف در چارچوب LEFM برای پیش‌بینی

$$K_{Ic} = \left[\frac{1}{2(2-4\nu)} ((1 - \cos \cos \theta_{0II})(4 - 4\nu) + (1 + \cos \cos \theta_{0II})(3 \cos \cos \theta_{0II} - 1)) K_{IIc}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

MERR- بر اساس معیار

$$K_{Ic} = \left(\frac{2}{3 + \theta_{0II}} \right) \left(\frac{1 + \frac{\theta_{0II}}{\pi}}{1 - \frac{\theta_{0II}}{\pi}} \right)^{\frac{-\theta_{0II}}{2\pi}} [(9 - 5\theta_{0II}) K_{IIc}^2]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

MTS- بر اساس معیار

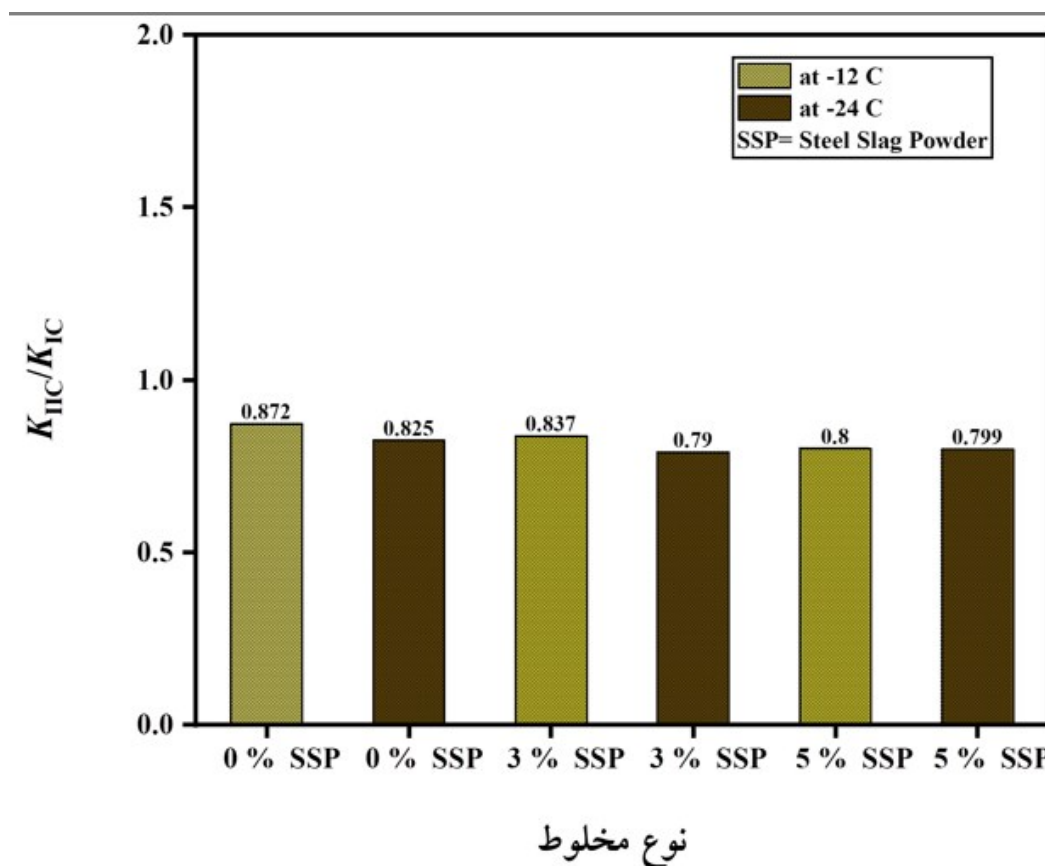
$$K_{Ic} = \frac{\theta_{0II}}{2} \sin \sin \theta_{0II} K_{IIc} \quad (7)$$

آمده در این پژوهش برای مخلوط آسفالتی تقویت شده با پودر سرباره در این محدوده قرار می‌گیرند. در واقع، هر سه معیار شکست متداول و رایج می‌توانند تخمین‌های خوبی برای رفتار شکست مود I و مود II مخلوط‌های

که در آنها، ν ضریب پواسون و θ_{0II} زاویه شروع شکست مود II خالص است. بر این اساس، این سه معیار اصلی شکست نشان می‌دهند که نسبت K_{IIC} / K_{Ic} بین ۰/۶۳ تا ۰/۹۳ متغیر است و نتایج آزمایشگاهی به‌دست

یک تغییر شکل بازشدگی خالص (مود I) و دو بار برش درون صفحه‌ای (یعنی مود II) را ایجاد کند (زیاری و همکاران، ۲۰۲۲؛ عامری و همکاران، ۲۰۱۱؛ علیها و همکاران، ۲۰۲۱). یک شاخص مشخصه شکست به نام چقرمگی شکست مؤثر (K_{eff}) که در رابطه زیر تعریف شده است، برای ارائه یک مقدار مؤثر برای میزان مقاومت ترک‌خوردگی هر دو مود I و II استفاده می‌شود.

HMA اصلاح شده با پودر سرباره آهن ارائه دهند. با این حال، پیش‌بینی معیار MTS که $K_{IIC} / K_{IC} = 0.87$ را پیش‌بینی می‌کند، نسبت به دو معیار دیگر به داده‌های تجربی تحقیق حاضر برای مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با پودر سرباره آهن نزدیک‌تر است. همانطور که قبلاً بیان شد، عبور هر وسیله نقلیه از یک روسازی ترک‌خورده دارای یک ترک عمقی می‌تواند



شکل ۸. مقادیر تغییرات نسبت چقرمگی شکست (K_{IIC} / K_{IC}) هر یک از انواع مخلوط آسفالتی بررسی شده در این پژوهش

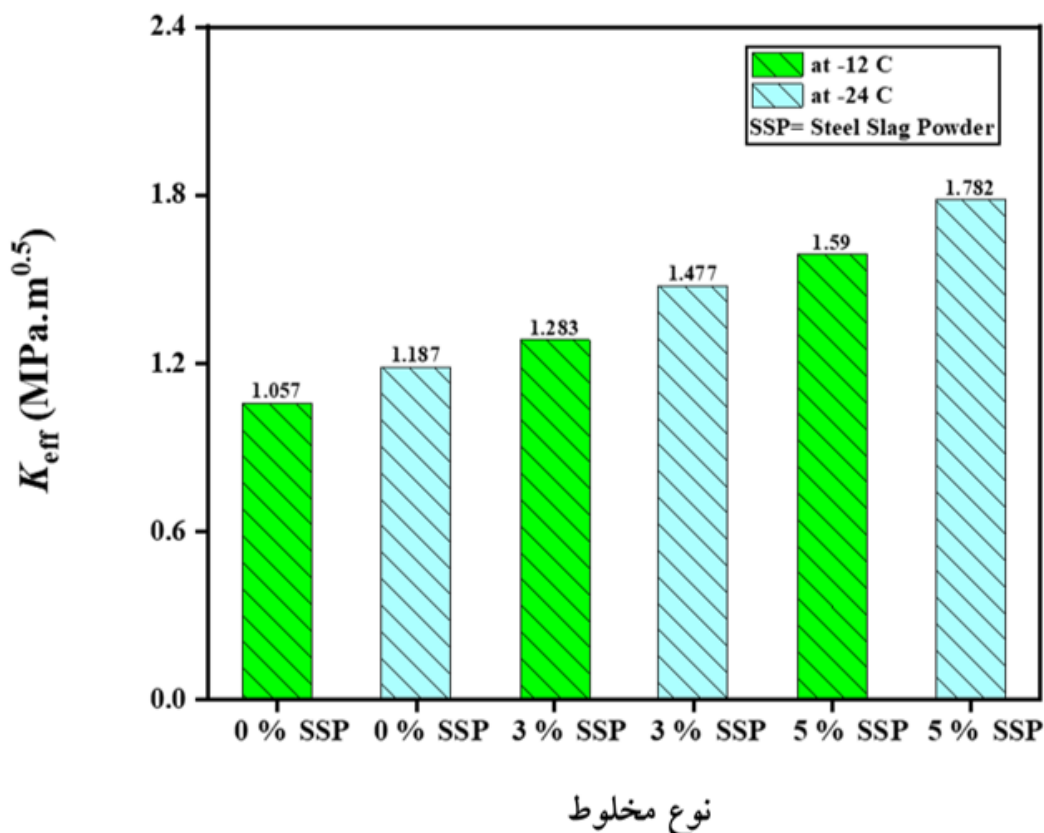
$$K_{eff} = \sqrt{K_{Ic}^2 + K_{IIc}^2} \quad (۸)$$

محققان، ضرایب شدت تنش ترک‌های رو به پایین ناشی از حرکت وسایل نقلیه و بار ترافیک عبوری از سطح روکش و روسازی آسفالتی را تحلیل کرده‌اند. بر اساس آن مطالعات، ضریب شدت تنش مؤثر ایجاد شده در نوک ترک بالا به پایین و تحت بار ترافیکی یک وسیله نقلیه

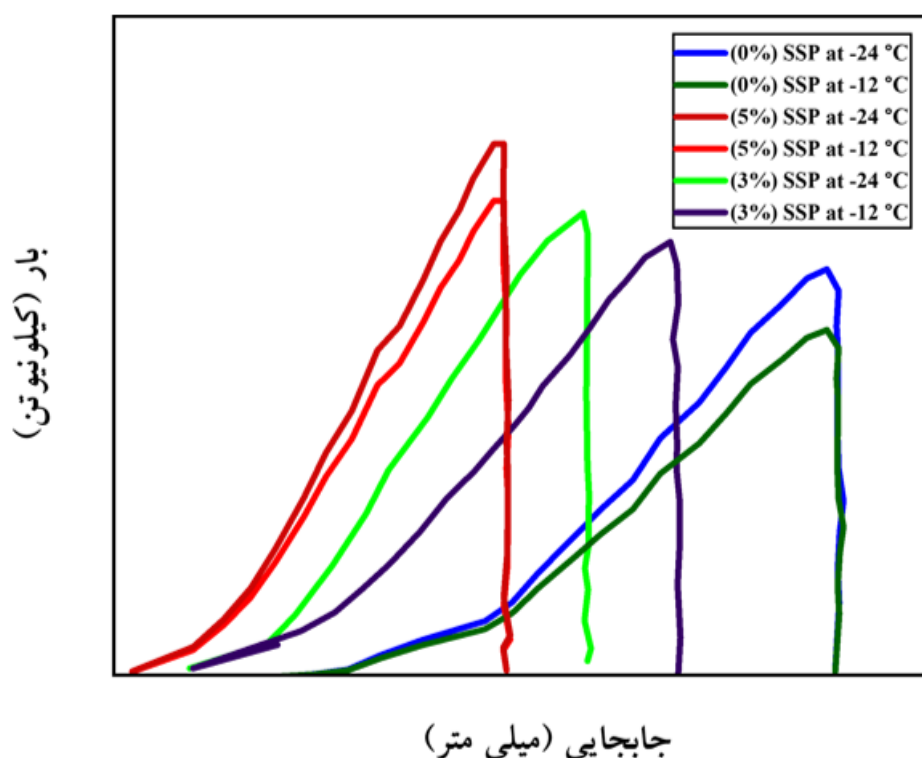
در شکل ۹ تغییرات K_{eff} برای مخلوط‌های آسفالت گرم (HMA) مورد بررسی در این تحقیق تحت دماهای مختلف نشان داده شده و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مقدار مربوط چقرمگی شکست مؤثر با افزایش مقدار سرباره و کاهش دمای آزمایش افزایش می‌یابد. برخی از

روش‌های موجود (مانند قانون پاریس) پیش‌بینی کرد، در صورتی که یک مقدار درست و معتبر برای چقرمگی شکست مؤثر مصالح روسازی در دسترس باشد. از آنجایی که مقدار مربوط به K_{eff} با افزودن پودر سرباره فولادی به مخلوط مصالح آسفالت گرم تا ۵۰ درصد افزایش یافت، می‌توان انتظار داشت که با استفاده از مقدار مناسبی از افزودنی سرباره فولادی، عمر خستگی مخلوط آسفالتی افزایش قابل توجهی پیدا کند و در واقع ترک خستگی دیرتر رشد کند. برخی از نمودارهای بار-جابجائی نمونه‌های مورد بررسی در این پژوهش جهت مقایسه در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

۱۰ تنی منتقل شده به سطح روکش روسازی آسفالتی، عددی در حدود $0.5 \text{ MPa.m}^{0.5}$ است. چقرمگی شکست مؤثر به دست آمده برای مخلوط آسفالت حاوی پودر سرباره فولادی در طرح اختلاط آن تقریباً ۱۵ برابر بزرگتر از ضریب شدت تنش اعمال شده توسط یک وسیله نقلیه ۱۰ تنی است. این بدان معناست که حرکت یک وسیله نقلیه سنگین از روی ترک بالا به پایین نمی‌تواند منجر به گسترش ترک در روسازی شود؛ اما اعمال مکرر چنین بارهای دینامیکی از طریق عبور وسایل نقلیه متحرک می‌تواند منجر به آسیب تجمعی خستگی و رشد ترک در روسازی شود. تعداد سیکل‌های بارگذاری ترافیک یا عمر خستگی روسازی را می‌توان بر اساس



شکل ۹. مقادیر چقرمگی شکست K_{eff} مؤثر هر یک از انواع مخلوط آسفالتی بررسی شده در این پژوهش



شکل ۱۰. برخی از نمودارهای بار-جابجایی مربوط به مخلوط‌های آسفالتی بررسی شده در این پژوهش تحت بارگذاری مود I در دماهای مختلف

۵ درصد اضافه شد. نتایج زیر از آزمایش‌های شکست حاصل گردید:

مقادیر مربوط به K_{IC} و K_{IIC} با افزایش مقدار سرباره و کاهش دمای آزمایش از ۱۲- درجه سلسیوس به ۲۴- درجه سلسیوس افزایش یافت. افزایش چقرمگی شکست مود I ناشی از افزودن پودر سرباره فولادی بیشتر از مقدار K_{IIC} برای هر دو دما بود که نشان‌دهنده عملکرد بهتر چنین ماده پرکننده‌ای در برابر شکست نوع کششی است. مقدار چقرمگی شکست مود II برای تمام دماها و درصدهای سرباره مورد آزمایش کمتر از چقرمگی شکست مود I مربوطه بود. نسبت چقرمگی شکست (K_{IIC} / K_{IC}) بسته به نوع مخلوط و دما از ۰/۸ تا ۰/۸۷ متغیر بود. این نسبت عموماً با افزایش درصد سرباره و کاهش دمای آزمایش کاهش یافت.

مقدار چقرمگی شکست مؤثر (K_{eff}) در مخلوط

در نهایت، شایان ذکر است که در این پژوهش نشان داده شد که افزودن حداکثر ۵ درصد پودر سرباره فولادی تأثیر مثبتی بر ظرفیت باربری و چقرمگی شکست مخلوط آسفالت گرم و بتن آسفالتی در شرایط دمای کم دارد. با این حال، هنوز برخی مطالعات تکمیلی و آتی برای یافتن مقدار بهینه یا حداکثر مجاز افزودنی سرباره فولادی یا اندازه و دانه‌بندی چنین ماده بازیافتی در مخلوط آسفالت گرم مورد نیاز است تا محدوده‌های مناسبی از K_{IC} و K_{IIC} حاصل شود.

۴. نتیجه‌گیری

تأثیر پودر سرباره فولادی بر چقرمگی شکست کششی (مود I) و برشی (مود II) مخلوط آسفالت گرم در دمای پایین با استفاده از نمونه‌های SCB متقارن و نامتقارن به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. پودر سرباره به عنوان پرکننده به طرح اختلاط با درصد وزنی صفر، ۳ و

آسفالت گرم مورد آزمایش با افزودن سرباره فولادی به
 طور قابل توجهی افزایش یافت. این امر نشان‌دهنده
 عملکرد خوب و عمر سرویس‌دهی بالاتر روکش‌های
 آسفالتی حاوی سرباره فولادی در ترکیب روسازی‌های
 آسفالتی در مناطق با دمای کم است.

۵. مراجع

- Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, M. R., Abdelaziz, M. and Ahmadinia, E. 2012. "Performance evaluation of utilization of waste Polyethylene Terephthalate (PET) in stone mastic asphalt". *Constr. Build. Mater.*, 36: 984-989.
- Ali, N. A., Bergan, A. T., Chan, J. S. S., Papagiannakis, T. and Theriault, E. G. 1992. "The use of steel slag in asphaltic concrete". ASTM International.
- Aliha, M. R. M. 2019. "On predicting mode II fracture toughness (K_{IIC}) of hot mix asphalt mixtures using the strain energy density criterion". *Theor. Appl. Fract. Mech.*, 99: 36-43.
- Aliha, M. R. M., Behbahani, H., Fazaeli, H. and Rezaifar, M. H. 2015. "Experimental study on mode I fracture toughness of different asphalt mixtures". *Sci. Iran.*, 22(1): 120-130.
- Aliha, M. R. M., Razmi, A. and 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., Fakhri, M., Kharrazi, E. H. and Berto, F. 2018. "The effect of loading rate on fracture energy of asphalt mixture at intermediate temperatures and under different loading modes". *Frattura ed Integrità Strutturale*, 12(43): 113-132.
- Aliha, M. R. M., Karimi, H. and 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., Ziari, H., Mojaradi, B. and 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". *Fatig. Fract. Eng. Mater. Struct.*, 43(3): 586-604.
- Aliha, M. R. M., Ziari, H., Sobhani Fard, E. and Jebalbarezzi 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". *Fatig. Fract. Eng. Mater. Struct.*, 44(5): 1349-1371.
- Al-Qudsi, A., Falchetto, A. C., Wang, D., Büchler, S., Kim, Y. S. and 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. and 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. and Aliha, M. R. M. 2016. "Investigation of fatigue and fracture properties of asphalt mixtures modified with carbon nanotubes". *Fatig. Fract. Eng. Mater. Struct.*, 39(7): 896-906.
- Amirdehi, H. F., Aliha, M. R. M., Moniri, A. and 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. and 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.
- Ayar, P., Baradaran, S. and 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.
- Baradaran, S. and Ameri, M. 2023. "Investigation of rutting failure in asphalt mixtures and its improvement strategies". *Road*, 31(114): 53-70.
- Baradaran, S. and 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. and 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*. [In Persian]
- Baradaran, M. S., Qazanfari, R. and Baradaran, S. 2023. "Study of soil reinforcement in the east of Mashhad using glass granule". *Mater. Res. Express*, 10(5): 055202. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/acd5af>

- Baradaran, S., Aliha, M. R. M., Maleki, A. and Underwood, B. S. 2024a. "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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138426>
- Baradaran, S., Rahimi, J., Ameri, M. and Maleki, A. 2024b. "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>
- Behbahani, H., Mohammad Aliha, M. R., Fazaeli, H. and Aghajani, S. 2013. "Experimental fracture toughness study for some modified asphalt mixtures". *Adv. Mater. Res.*, 723: 337-344.
- Biligiri, K. P., Said, S. and Hakim, H. 2012. "Asphalt mixtures' crack propagation assessment using semi-circular bending tests". *Int. J. Pavement Res. Tech.*, 5(4).
- Bui, H. H. and 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.
- Chai, C., Cheng, Y., Zhang, Y., Zhu, B. and Liu, H. 2020. "Mechanical properties of crumb rubber and basalt fiber composite modified porous asphalt concrete with steel slag as aggregate". *Polym.*, 12(11): 2552.
- Chen, Z., Gong, Z., Jiao, Y., Wang, Y., Shi, K. and Wu, J. 2020. "Moisture stability improvement of asphalt mixture considering the surface characteristics of steel slag coarse aggregate". *Constr. Build. Mater.*, 251: 118987.
- Das, A. K. and 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. and Reis, H. 2011. "Low temperature fracture evaluation of asphalt mixtures using mechanical testing and acoustic emissions techniques". *J. Assoc. Asphalt Paving Tech.*, 80: 193-220.
- Erarslan, N. 2019. "Analysing mixed mode (I-II) fracturing of concrete discs including chevron and straight-through notch cracks". *Int. J. Solids Struct.*, 167: 79-92. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2019.03.005>
- Erarslan, N. 2023. "Investigation of the tensile-shear failure of asphalt concrete base (ACB) construction materials using a non-linear cohesive crack model and critical crack threshold analysis. *Constr. Build. Mater.*, 364: 129901. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129901>
- Erarslan, N. and Williams, D. J. 2012. "The damage mechanism of rock fatigue and its relationship to the fracture toughness of rocks". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 56: 15-26. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.07.015>
- Erarslan, N. and 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". *Fatig. Fract. Eng. Mater. Struct.* <https://doi.org/10.1111/ffe.14598>
- Erarslan, N., Obligado, R., Li, Z. and Ghamgosar, M. 2015. "Experimental and numerical investigations on mixed mode fracturing of concrete and rocks by using semi-circular disc (SCD) and disc specimens. In *ARMA US Rock Mech./Geomech. Symposium* (pp. ARMA-2015). ARMA.
- Fakhri, M. and 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., Kharrazi, E. H. and 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. and 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., Wang, D., Riccardi, C., Kang, M. S. and Wistuba, M. P. 2017a. "Investigation on the combined recycling of reclaimed asphalt pavement and steel slag in asphalt mixture at low temperature". In *5th International Conference on Sustainable Solid Waste Management at Athens, Greece*.
- Falchetto, A. C., Moon, K. H., Lee, C. B. and Wistuba, M. P. 2017b. "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.
- Fuan, S., Ke, M., Kanghe, L., Kun, L. and Aliha, M. R. M. 2021. "Influence of specimen geometry on mode I fracture toughness of asphalt concrete". *Constr. Build. Mater.*, 276: 122181.
- Haghighatpour, P. J. H., Aliha, M. R. M. and 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.
- Haghighatpour, P. J. and 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. and 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.
- Hamed, G. H., Saedi, D. and 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.
- He, J., Liu, L., Yang, H., Aliha, M. R. M. and 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, H. and 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, W. and Aliha, M. R. M. 2022b. "Influence of testing method on mode II fracture toughness (K_{IIC}) of hot mix asphalt mixtures". *Fatig. Fract. Eng. Mater. Struct.*, 45(10): 2940-2957.
- Hoseini, S. O., Sohrabi, M. R., Mousavi, S. R. and 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.
- Karamzadeh, N. S., Aliha, M. R. M. and 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. and 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. and Ebneabbasi, P. 2023b. "Strength and cracking resistance of concrete containing different percentages and sizes of recycled tire rubber granules". *J. Build. Eng.*, 106033.
- Khakbaz, M., Kamboozia, N., Mohammad Aliha, M. R. and Taheriyani, A. R. 2024. "A review of the application of fracture mechanics in investigating the behavior of flexible and rigid pavements". *Road*, 32(121): 115-136.
- Kim, K., Jo, S. H., Kim, N. and 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, C., Xiao, Y., Chen, Z. and Wu, S. 2016. "Crack resistance of asphalt mixture with steel slag powder". *Emerg. Mater. Res.*, 6(1): 214-218.
- Li, Q., Qiu, Y., Rahman, A. and Ding, H. 2018. "Application of steel slag powder to enhance the low-temperature fracture properties of asphalt mastic and its corresponding mechanism". *J. Clean. Prod.*, 184: 21-31.
- Lou, B., Liu, Z., Sha, A., Jia, M. and Li, Y. 2020. "Microwave absorption ability of steel slag and road performance of asphalt mixtures incorporating steel slag". *Mater.*, 13(3): 663.
- Mandal, T., Hanz, A. J. and 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. and Li, X. 2002. "Determining the low-temperature fracture toughness of asphalt mixtures". *Transport. Res. Record*, 1789(1): 191-199.
- Mohammad, L. N., Kim, M. and 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, Dordrecht.
- Molayem, M., Ameri, M., Aliha, M. R. M. and Moghadas Nejad, F. 2021. "Prediction of load-CMOD curves for HMA mixtures at intermediate temperatures subjected to mixed mode loading". *Eng. Fract. Mech.*, 254: 107937.
- Motamedi, H., Fazaeli, H., Aliha, M. R. M. and 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.
- Mubarak, M. and 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.
- Mubarak, M., Abd-Elhady, A. A. and 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. and Noranai, Z. 2019. "Utilization of synthetic reinforced fiber in asphalt concrete- A review. *Int. J. Civ. Eng. Technol.*, 10(5): 678-694.

- Najjar, S., Moghaddam, A. M., Sahaf, A., Yazdani, M. R. and 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. and Visapure, A. N. 2022. "Experimental investigation on compressive and flexural performance of Forta-fiber reinforced concrete". *Mater. Today: Proceed.*, 56: 406-411.
- Rahman, M. T., Mohajerani, A. and Giustozzi, F. 2020. "Recycling of waste materials for asphalt concrete and bitumen: A review". *Mater.*, 13(7): 1495.
- Rajaei, A., Talebi, N. and Abrishami, S. 2025. "The impacts of freeze-thaw cycles on polypropylene fiber-reinforced clayey soil stabilized with alkali-activated fly ash". *Case Stud. Constr. Mater.*, 22: e04439. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04439>
- Rooholamini, H., Hassani, A. and 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. and 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. and 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.
- Salehi Ashani, S., Varamini, S., Elwardany, M. D. and Tighe, S. 2022. "Investigation of low-temperature cracking resistance of asphalt mixtures by conducting Disc-Shaped Compact Tension (DC (T)) and Semi-Circular Bend (SCB) tests". *Constr. Build. Mater.*, 359: 129275.
- Shafabakhsh, G. H. and Ani, O. J. 2015. "Experimental investigation of effect of Nano TiO₂/SiO₂ modified bitumen on the rutting and fatigue performance of asphalt mixtures containing steel slag aggregates". *Constr. Build. Mater.*, 98: 692-702.
- Shahryari, N., Keymanesh, M. R. and Aliha, M. R. M. 2021. "Specimen type effect on measured low-temperature fracture toughness of asphalt concrete". *Fatig. Fract. Eng. Mater. Struct.*, 44(2): 551-567.
- Sih G. C. 1974. "Strain-energy-density factor applied to mixed mode crack problems". *Int. J. Fract.*, 10: 305-321.
- Toghrli, A., Shariati, M., Sajedi, F., Ibrahim, Z., Koting, S., Mohamad, E. T. and Khorami, M. 2018. "A review on pavement porous concrete using recycled waste materials". *Smart Struct. Syst.*, 22(4): 433-440.
- Tuncan, M., Tuncan, A. and Cetin, A. 2003. "The use of waste materials in asphalt concrete mixtures". *Waste Manag. Res.*, 21(2): 83-92.
- Wan, J., Wu, S., Hu, X., Li, Y., Pan, P. and Gan, W. 2022. "Assessment on steel slag-based SMA-5 and AC-5 asphalt mixtures for maintenance and induction heating". *J. Mater. Civ. Eng.*, 34(3): 04021471.
- Wen, H., Wu, S. and Bhusal, S. 2016. "Performance evaluation of asphalt mixes containing steel slag aggregate as a measure to resist studded tire wear". *J. Mater. Civ. Eng.*, 28(5): 04015191.
- Wen, X., Feng, L., Yin, G., Liang, Q., Aliha, M. R. M. and Haghighatpour, P. J. 2022. "Relationship between low-temperature K_{IC} and K_{IIC} values of bitumen with different performance grades and comparison with naturally solid materials". *Theor. Appl. Fract. Mech.*, 117: 103169.
- Xu, H., Wu, S., Li, H., Zhao, Y. and Lv, Y. 2020. "Study on recycling of steel slags used as coarse and fine aggregates in induction healing asphalt concretes". *Mater.*, 13(4): 889.
- Yan, Z. and Hao, Z. 2019. "Study on preparation and performance of steel slag asphalt mixture based on steel slag aggregate". In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 631: 022067.
- Yang, D., Karimi, H. R. and Aliha, M. R. M. 2021. "Comparison of testing method effects on cracking resistance of asphalt concrete mixtures". *Appl. Sci.*, 11(11): 5094.
- Yasanthi, R. G., Rengarasu, T. M. and 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.*, 23(1): 252-267.
- Yousefi, A. A., Sobhi, S., Aliha, M. M., Pirmohammad, S. and 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.
- Yuan, X., Tian, Y., Liu, Q., Liu, S., Dou, Q. and Aliha, M. R. M. 2021. " K_{IC} and K_{IIC} measurement for hot mix asphalt mixtures at low temperature: Experimental and theoretical study using the semicircular bend specimen with different thicknesses". *Fatig. Fract. Eng. Mater. Struct.*, 44(3): 832-846.
- Zarei, M., Salehikalam, A., Tabasi, E., Naseri, A., Khordehbinan, M. W. and Negahban, M. 2022. "Pure mode I fracture resistance of hot mix asphalt (HMA) containing nano-SiO₂ under freeze-thaw damage (FTD)". *Constr. Build. Mater.*, 351: 128757.

- Zhang, T., Wu, J., Hong, R., Ye, S. and Jin, A. 2022. "Research on low-temperature performance of steel slag/polyester fiber permeable asphalt mixture". *Constr. Build. Mater.*, 334: 127214.
- Zhao, X., Sheng, Y., Lv, H., Jia, H., Liu, Q., Ji, X., ... and Meng, J. 2022. "Laboratory investigation on road performances of asphalt mixtures using steel slag and granite as aggregate". *Constr. Build. Mater.*, 315: 125655.
- Ziari, H., Aliha, M. R. M., Fard, E. S. and Sarbijan, M. J. 2022. "Mixed mode I+ II fracture parameters and cracking trajectory of heterogeneous multilayer pavement structure containing reflective crack". *Fatig. Fract. Eng. Mater. Struct.*, 45(10): 2958-2977.