



Semnan University



Research Article

Experimental Evaluation of Mode I Fracture Toughness and Fracture Energy of Hot Mix Asphalt Modified With Steel Slag Powder Using The ENDB Specimen at Low and Intermediate Temperatures

Seyed Miad Salehi^{a,*} M. R. M. Aliha^b

^aAssistant Professor, School of Management, Economics and Progress Engineering, Iran University of Science and Technology, Narmak, Tehran, I. R. Iran.

^bAssociate Professor, School of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Narmak, Tehran, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2026-04-16

Revised: 2026-05-01

Accepted: 2026-05-22

Keywords:

Hot mix asphalt,
Steel slag powder,
Low and Intermediate
temperature fracture
toughness,
Fracture Energy,
Edge notch disc bend
(ENDB)
.

ABSTRACT

Steel slag, as one of the most favorable recycled industrial by-product is widely used in green asphalt mixtures as a sustainable alternative to a portion of natural mineral aggregates. In this study, the effect of adding steel slag powder as a filler on Mode I fracture toughness of hot mix asphalt (HMA) was investigated. Edge-notch disc bend (ENDB) was utilized to perform the fracture tests. Different HMA mixtures containing 0%, 3%, and 5% steel slag powder by weight of total filler were prepared using the Superpave Gyratory Compactor at a target air void content of 7%. Mode I fracture experiments were conducted under symmetric loading at an intermediate temperature of +25 °C and a low temperature of -12 °C. Two key fracture parameters, fracture energy and fracture toughness, were calculated and analyzed to evaluate the cracking resistance of the asphalt mixtures. Results indicated that addition of steel slag powder and the increase in its percentage significantly improved both fracture toughness and fracture energy at both test temperatures. The highest values of fracture energy and fracture toughness were observed in the mixture containing 5% steel slag powder. Furthermore, increasing the test temperature resulted in a decrease in fracture toughness and an increase in fracture energy.

* Corresponding author.

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

How to cite this article: Salehi, S. M., & Aliha, M. R. M. (2026). Experimental evaluation of mode I fracture toughness and fracture energy of hot mix asphalt modified with steel slag powder using the ENDB specimen at low and intermediate temperatures. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 12(1), pp.1-19.
DOI: <https://doi.org/10.22075/jtie.2026.40908.1758>



مقاله پژوهشی

ارزیابی تجربی چقرمگی شکست مود I و انرژی شکست مخلوط آسفالت گرم حاوی پودر سرباره فولادی با استفاده از نمونه ENDB در دماهای پایین و میانی

سید میعاد صالحی^{۱*}، محمدرضا محمدعلیها^۲

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

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

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۵/۰۱/۲۷	سرباره فولادی به عنوان یکی از مطلوب ترین مواد زائد صنعتی بازیافتی، به طور گسترده در مخلوط های آسفالتی سبز به عنوان جایگزین پایدار بخشی از سنگدانه های معدنی طبیعی مورد استفاده قرار می گیرد. در این پژوهش، تأثیر افزودن پودر سرباره فولادی به عنوان ماده پرکننده بر چقرمگی شکست مود I مخلوط آسفالتی گرم (HMA) مورد بررسی قرار گرفت. برای انجام آزمایش ها از نمونه های خمشی دایره ای با ترک مستقیم (ENDB) استفاده شد. مخلوط های مختلف HMA حاوی صفر، ۳ و ۵ درصد وزنی پودر سرباره فولادی (نسبت به کل پرکننده) با استفاده از دستگاه تراکم ژیراتوری سوپریو و با درصد فضای خالی هدف ۷٪ ساخته شدند. آزمایش های چقرمگی شکست مود I تحت بارگذاری متقارن در دمای متوسط +۲۵ درجه سلسیوس و دمای پایین ۱۲- درجه سلسیوس انجام گردید. دو پارامتر کلیدی شکست، یعنی انرژی شکست و چقرمگی شکست، محاسبه و تحلیل شدند تا مقاومت ترک خوردگی مخلوط های آسفالتی ارزیابی شود. نتایج نشان داد که افزودن پودر سرباره فولادی و افزایش درصد آن، باعث بهبود قابل توجه هر دو پارامتر چقرمگی شکست و انرژی شکست در هر دو دمای آزمون می شود. بیشترین مقادیر انرژی شکست و چقرمگی شکست مربوط به مخلوط آسفالتی حاوی ۵ درصد پودر سرباره فولادی بود. همچنین، افزایش دمای آزمون منجر به کاهش چقرمگی شکست و افزایش انرژی شکست گردید.
واژه های کلیدی:	
مخلوط آسفالتی داغ،	
پودر سرباره فولادی،	
چقرمگی شکست دمای	
پایین و میانی،	
انرژی شکست،	
نمونه خمشی دایره ای با	
ترک مستقیم (ENDB).	

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

استناد به این مقاله: صالحی، سید میعاد و محمد علیها، محمد رضا. (۱۴۰۵). ارزیابی تجربی چقرمگی شکست مود I و انرژی شکست مخلوط آسفالت گرم حاوی پودر سرباره فولادی با استفاده از نمونه ENDB در دماهای پایین و میانی. مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، ۱۲(۱)، ۱۹-۱.

۱. مقدمه

با توجه به محدودیت منابع طبیعی سنگدانه‌های مورد استفاده در تولید مصالح و سازه‌های عمرانی (مانند روسازی جاده‌ها و سازه‌های بتنی)، تقاضا برای جایگزینی سنگدانه‌های طبیعی با مواد جایگزین به طور قابل توجهی افزایش یافته است. استفاده از ضایعات صنعتی یا محصولات جانبی صنایع سنگین به عنوان جایگزین جزئی سنگدانه‌ها، رویکردی مؤثر برای تولید مصالح بتنی با هزینه کمتر، پاکیزه‌تر و دوست‌دار محیط‌زیست به شمار می‌رود (تونجان و همکاران، ۲۰۰۳؛ یاسانتی و همکاران، ۲۰۱۶؛ طغرلی و همکاران، ۲۰۱۸؛ رحمان و همکاران، ۲۰۲۰؛ برادران و عامری، ۲۰۲۳؛ برادران و عامری، ۲۰۲۶). در واقع، به‌کارگیری این گونه مواد نه تنها حجم و شدت آلودگی‌های زیست‌محیطی را کاهش می‌دهد، بلکه می‌تواند مصرف انرژی مورد نیاز در فرآیند تولید محصولات بتنی را نیز به طور قابل ملاحظه‌ای پایین بیاورد.

بر این اساس، انواع مختلف مواد زائد طبیعی و صنعتی از جمله الیاف بازیافتی (ژونگ و همکاران، ۲۰۱۵؛ کیم و همکاران، ۲۰۱۸؛ ایار و همکاران، ۲۰۲۲؛ برادران و ضیائی، ۲۰۲۵)، الیاف طبیعی (علیها و همکاران، ۲۰۱۷؛ برادران و ضیائی، ۲۰۲۵)، الیاف مصنوعی (روح‌الامینی و همکاران، ۲۰۱۸؛ موسی و همکاران، ۲۰۱۹؛ نارول و ویساپور، ۲۰۲۲)، پلاستیک و لاستیک (احمدی نیا و همکاران، ۲۰۱۲؛ علیها، ۲۰۱۹؛ برادران و همکاران، ۲۰۲۴؛ الف؛ برادران و همکاران، ۲۰۲۴؛ ب)، سیم فولادی، شیشه، الیاف و ذرات چوب (حسینی و همکاران، ۲۰۲۲؛ کرم‌زاده و همکاران، ۲۰۲۲؛ برادران و همکاران، ۲۰۲۳)، پرکننده‌ها (داس و سینگ، ۲۰۱۷) و سرباره‌ها (عربانی و آذرهوش، ۲۰۱۲؛ روح‌الامینی و همکاران، ۲۰۱۹؛ ژائو و همکاران، ۲۰۲۲) در گذشته، در طراحی مخلوط‌های آسفالت و بتن سیمانی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با این حال، ارزیابی دقیق تأثیر افزودن

چنین مواد افزودنی بر خواص مکانیکی و شاخص‌های مقاومت شکست قطعات بتنی حاصل، همچنان ضروری به نظر می‌رسد.

مخلوط‌های آسفالتی به دلیل ماهیت ویسکوالاستیک قیر، در شرایط دمای پایین با شرایط بحرانی و پرخطری برای عملکرد ایمن و قابل اعتماد مواجه هستند. در این شرایط، قیر عمدتاً به صورت ماده‌ای شکننده رفتار می‌کند و در نتیجه، ترک‌خوردگی گسترده و فاجعه‌بار روسازی‌ها در دماهای پایین، یکی از شکل‌های رایج خرابی در مناطق سردسیر محسوب می‌شود (ماراستینو و همکاران، ۲۰۰۲؛ اقبالی و همکاران، ۲۰۱۹؛ یوسفی و همکاران، ۲۰۲۱؛ هی و همکاران، ۲۰۲۲؛ الف؛ زارعی و همکاران، ۲۰۲۲). پدیده ترک‌خوردگی در سطح جاده‌ها با عبور وسایل نقلیه از روی ترک‌های موجود تسریع می‌گردد. بر اساس مطالعات پیشین، هر بار عبور وسیله نقلیه از روی ترک ایجادشده در سطح روسازی، همزمان هر دو مود شکست کششی (مود I یا تغییرشکل باز شدن ترک) و مود شکست برشی درون صفحه‌ای (مود II یا تغییرشکل لغزش ترک) را تحریک می‌کند. این موضوع در تحقیقات متعددی مورد تأیید قرار گرفته است (اقبالی و همکاران، ۲۰۱۹؛ علیها و همکاران، ۲۰۲۱؛ زیاری و همکاران، ۲۰۲۲).

به منظور ارزیابی عملکرد روکش‌های آسفالتی در برابر حالت خرابی ترک‌خوردگی و همچنین تخمین چرخه عمر مفید و زمان بازسازی جاده‌ها، تعیین مقدار چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی ضروری است. مقاومت به شکست، که نشان‌دهنده توانایی یک ماده ترک‌دار در مقاومت در برابر گسترش ترک است، به عنوان پارامتر مشخصه ماده شناخته شده و به عنوان یک ویژگی مکانیکی مهم در نظر گرفته می‌شود. چقرمگی شکست مواد آسفالتی می‌تواند تحت تأثیر عواملی همچون نوع طرح اختلاط، ترکیب مواد تشکیل‌دهنده، شرایط محیطی، حالت بارگذاری و غیره قرار گیرد. بر این

حساسیت رطوبتی، مقاومت به سایش، پایداری مارشال و عمر خستگی را مورد بررسی قرار داده‌اند (علی و همکاران، ۱۹۹۲؛ ون و همکاران، ۲۰۲۲؛ کیم و همکاران، ۲۰۱۸؛ لو و همکاران، ۲۰۲۰؛ یان و هائو، ۲۰۱۹؛ چای و همکاران، ۲۰۲۰؛ شفابخش و آنی، ۲۰۱۵؛ ژائو و همکاران، ۲۰۲۰؛ ون و همکاران، ۲۰۱۶)، با این حال، مرور ادبیات نشان می‌دهد که داده‌های آزمایشی محدودی در خصوص مقاومت به شکست مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره به‌عنوان جایگزین جزئی سنگدانه‌های طبیعی وجود دارد.

در میان مطالعات موجود و مرتبط، فالچتو و همکاران (۲۰۱۷ الف) مقاومت به شکست در مود I تحت دمای پایین بتن آسفالتی حاوی سرباره فولادی با دانه‌بندی و اندازه‌های مختلف را با استفاده از آزمون SCB گزارش کردند. نتایج آنها نشان داد که افزودن سرباره فولادی می‌تواند مقاومت به شکست مخلوط آسفالتی را بهبود بخشد. فالچتو و همکاران (۲۰۱۷ ب) همچنین از نمونه SCB برای ارزیابی چقرمگی شکست و رفتار ترک‌خوردگی مخلوط آسفالت گرم حاوی سنگدانه‌های درشت سرباره فولادی در دمای متوسط استفاده کردند و تأثیر چرخه‌های ذوب و یخبندان را بر مقاومت ترک‌خوردگی این مخلوط آسفالتی مورد بررسی قرار دادند.

لی و همکاران (۲۰۱۸) نیز اثر استفاده از پودر سرباره فولادی را بر عملکرد ترک‌خوردگی در حالت کششی ماستیک آسفالتی مورد مطالعه قرار دادند. بر اساس یافته‌های آنها، افزودن پودر سرباره فولادی مقاومت به شکست ماستیک آسفالتی را نسبت به نمونه شاهد بهبود می‌بخشد.

در پژوهشی مشابه، ژانگ و همکاران (۲۰۲۲) با بهره‌گیری از نمونه SCB، تأثیر افزودن ترکیب سرباره فولادی و الیاف پلی‌استر را بر عملکرد ترک‌خوردگی در دمای پایین مخلوط‌های آسفالت بتنی (AC) در محدوده

اساس، محققان متعددی به صورت تجربی چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی را با طرح‌های اختلاط مختلف (بهبهانی و همکاران، ۲۰۱۳؛ علیها و همکاران، ۲۰۱۵؛ اقبالی و همکاران، ۲۰۱۹)، تحت دماهای پایین 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 (کریمی و همکاران، ۲۰۲۱) و تحت موده‌های کششی و برشی گوناگون (۲۰۱۹؛ ژونگزو و همکاران، ۲۰۲۱؛ امیردهی و همکاران، ۲۰۱۹؛ ساعد و همکاران، ۲۰۲۲؛ هی و همکاران، ۲۰۲۲ ب؛ ون و همکاران، ۲۰۲۲) مورد مطالعه و تعیین قرار داده‌اند.

در تحقیقات مرتبط با تعیین چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی، نمونه‌های آزمایشگاهی مختلفی توسط محققان حوزه شکست آسفالت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از جمله این نمونه‌ها می‌توان به نمونه کشش فشرده (ماندال و همکاران، ۲۰۱۹)، خمشی دیسک با ترک گوشه (فوان و همکاران، ۲۰۲۱؛ حقیقت‌پور و همکاران، ۲۰۱۸؛ معتمدی و همکاران، ۲۰۲۰)، فشرده‌سازی قطر غیرمستقیم (فالچتو و همکاران، ۲۰۱۷ الف؛ فالچتو و همکاران، ۲۰۱۷ ب)، دیسک برزلیی ترک‌خورده (هی و همکاران، ۲۰۲۱؛ هی و همکاران، ۲۰۲۲ ب؛ مبارکی و همکاران، ۲۰۱۳) و به‌ویژه نمونه خمشی نیم‌دایره‌ای (که معمولاً با عنوان SCB شناخته می‌شود) اشاره کرد (ارارسلان و علیها، ۲۰۲۵؛ 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؛ برادران و همکاران، ۲۰۲۶). اگرچه تحقیقات متعددی اثر افزودن سرباره فولادی بر خواص مکانیکی و عملکرد مصالح آسفالت بتنی (AC) از جمله روانی،

ارزیابی تجربی چقرمگی شکست مود I و انرژی شکست مخلوط آسفالت گرم حاوی پودر سرباره فولادی با استفاده از نمونه ENDB در دماهای پایین و میانی

شیمیایی مصالح سنگی مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است. گرمایش و درصد وزنی مصالح در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین، پودر سرباره فولادی با اندازه عبوری از الک شماره ۲۰۰، به عنوان پرکننده با سه مقدار وزنی صفر، ۳ و ۵ درصد با مصالح مخلوط گردید. مشخصات سرباره استفاده شده در این پژوهش در جدول ۳ نمایش داده شده است. پودر سرباره استفاده شده در این پژوهش در شکل ۱ نشان 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 جاده‌ها 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 نمونه‌های ژیراتوری

پس از دانه‌بندی اندازه‌های 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 قالب‌های استوانه‌ای با قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۳۰ میلی‌متر ریخته شد و با استفاده از دستگاه تراکم ژیراتوری سوپریو جهت دستیابی به درصد فضای خالی ۷ درصد برای نمونه‌های آسفالت گرم متراکم گردید.

دمایی صفر تا منفی ۲۰ درجه سلسیوس بررسی کردند. همچنین، لی و همکاران (۲۰۱۶) انرژی شکست (به عنوان یکی از شاخص‌های ترک‌خوردگی) مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با سرباره فولادی را مورد ارزیابی قرار دادند. با این حال، تأثیر افزودن درصدهای مختلف سرباره فولادی بر شکست مود I و به ویژه II مخلوط‌های آسفالتی در شرایط دمای پایین و میانه هنوز به طور جامع بررسی نشده است. بنابراین، در این تحقیق، از طریق انجام یک کار تجربی، مقادیر مقاومت به شکست مود I برای مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده از درصدهای مختلف سرباره فولادی به دست می آید. همچنین، تأثیر درصد سرباره بر مقادیر چقرمگی شکست دمای پایین و میانه در مود شکست کششی، مقایسه و بررسی می شود. یکی از نوآوری‌های دیگر این مطالعه استفاده از قطعه ENDB به عنوان قطعه شکست می باشد. استفاده از این قطعه با توجه به سهولت ساخت می تواند جایگزین سایر قطعات و آزمایش‌های شکست مخلوط آسفالتی گردد.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. مصالح و مواد خام

جهت تولید نمونه‌های آسفالت گرم (HMA) این پژوهش، از مصالح سنگی آهکی با دانه‌بندی شماره ۴ (مطابق استاندارد راه و ترابری جمهوری اسلامی ایران، نشریه ۲۳۴) استفاده گردید. خصوصیات فیزیکی و

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
۲/۳۷۰	حداکثر ۲/۵ درصد	جذب آب درشت‌دانه
۲/۴۵	حداکثر ۲/۵ درصد	جذب آب ریزدانه
۹۸	۱۰۰ درصد	درصد شکستگی (یک وجه)
۹۷	۱۰۰ درصد	درصد شکستگی (دو وجه)
۸۰	حداقل ۵۰	ارزش ماسه‌ای

درشت‌دانه ۰/۳۱، ریزدانه ۱/۱۴ حداکثر ۸ درصد درشت‌دانه، حداکثر ۱۲ درصد ریزدانه، درصد افت وزنی در برابر سولفات سدیم

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

اندازه دانه (mm)	درصد عبوری (%)
۱۹	۱۰۰
۱۲/۵	۹۷
۴/۷۵	۵۵
۲/۳۶	۳۸
۰/۳	۱۳
۰/۰۷۵	۷.۵

جدول ۳. خصوصیات سرباره مورد استفاده در این پژوهش

پودر سرباره فولادی	اجزای شیمیایی
۵/۲۱	L.O.I*
۰/۴۰	Na ₂ O
۴/۳۵	MgO
۴/۸۲	Al ₂ O ₃
۱۹/۴۵	SiO ₂
۰/۵۳	K ₂ O
۳۳/۲۲	CaO
۲۵/۹۸	Fe ₂ O ₃



شکل ۱. پودر سرباره استفاده شده در این پژوهش

ارزیابی تجربی چقرمگی شکست مود I و انرژی شکست مخلوط آسفالت گرم حاوی پودر سرباره فولادی با استفاده از نمونه ENDB در دماهای پایین و میانی

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

مقدار	استاندارد	خواص
۸۱۳ mm ² /s	ASTM D2170	ویسکوزیته کینماتیکی در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس
۴۲۰ mm ² /s	ASTM D2170	ویسکوزیته کینماتیکی در دمای ۱۳۵ درجه سلسیوس
۲۳۰ 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	شکل پذیری در دمای ۲۵ درجه سلسیوس
-۱/۱۳	—	شاخص نفوذ
۳۱۵°C	ASTM D92	نقطه اشتعال
۷/۴mm	ASTM D5	درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه سلسیوس

ترک خوردگی در دمای پایین و میانه و عملکرد پودر سرباره روی نمونه‌های آسفالتی گرم ساخته شده، دو دما (یعنی ۱۲- و ۲۵+ درجه سلسیوس) برای انجام آزمایش‌های چقرمگی شکست در نظر گرفته شد.

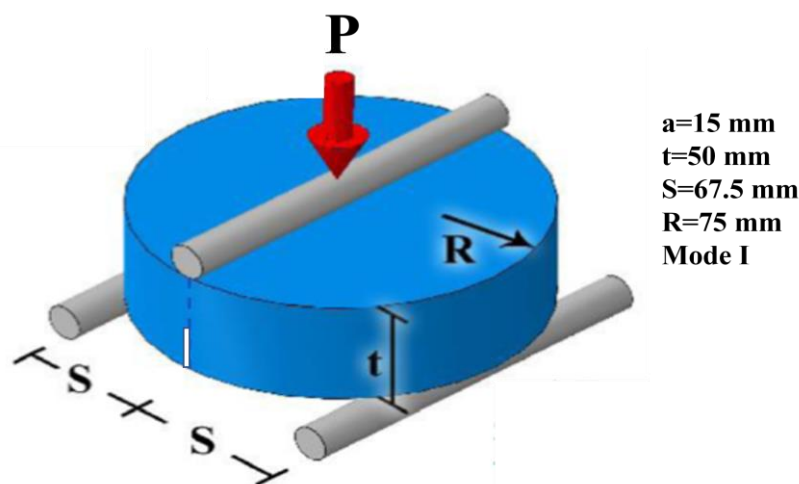
پس از ساخت نمونه‌های استوانه‌ای ژیراتوری، آن‌ها برش داده شده و دیسک‌هایی با ضخامت ۵۰ میلی‌متر از هر نمونه استوانه‌ای ژیراتوری بدست آمدند. یک ترک لبه‌ای با ارتفاع ۱۵ میلی‌متر با استفاده از تیغه اره الماسه دورانی در وسط هر نمونه ایجاد شد برای بررسی مقاومت

۳.۲. نمونه آزمایشی برای مطالعه شکست مخلوط‌های آسفالتی گرم (HMA)

برای آزمایش بارگذاری مود I برابر $S = 67.5$ میلی‌متر در نظر گرفته شد. از این رو، آزمایش‌های مود I با استفاده از شرایط بارگذاری متقارن با پارامترهای هندسی $a/B = 0.3$ و $S/R = 0.9$ انجام شد بر اساس تحلیل‌های اجزای محدود انتخاب شدند. تنظیم آزمایشی و نحوه قرارگیری نمونه برای بارگذاری مود I نمونه ENDB در شکل ۱ نشان داده شده است. تمام نمونه‌های آزمایشی آسفالتی گرم با مود I و مود II به صورت یکنواخت با سرعت بارگذاری ۲ میلی‌متر در دقیقه بارگذاری شدند. پس از انجام آزمایش‌ها، منحنی‌های بار اعمال شده - جابجایی برای مخلوط‌های HMA مورد بررسی به دست آمد که برای نمونه‌های معمولی در شکل ۳ ارائه شده است. این منحنی‌ها نشان می‌دهند که پودر سرباره فولاد می‌تواند بار شکست را در مود I و هر دو دما افزایش دهد. همچنین، منحنی‌های شکست تمام نمونه‌های آزمایش شده رفتار غالباً خطی را تا شروع شکست و بار اوج نشان دادند.

همانطور که بیان شد، در این پژوهش از قطعه شکست ENDB استفاده شد. مشخصات نمونه‌های ساخته شده به همراه پارامترهای در نظر گرفته شده برای آزمایش شکست در جدول ۵ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در این پژوهش از دو پارامتر مهم چقرمگی شکست و انرژی شکست جهت ارزیابی مخلوط‌های آسفالتی حاوی پودر سرباره فولاد در دو دمای پایین و میانه استفاده شده است. مد خالص I همچنین جهت ارزیابی رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی در نظر گرفته شده است. این مد مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی در برابر شکست را نشان می‌دهد. نحوه محاسبه هر یک از این پارامترها در ادامه بیان گردیده است.

نمونه‌های ENDB (با شعاع ۷۵ میلی‌متر و ضخامت ۵۰ میلی‌متر و طول ترک ۲۰ میلی‌متر) ساخته شده از مخلوط HMA با درصد‌های مختلف سرباره فولاد برای آزمایش چقرمگی شکست مود I تهیه شدند. طول دهانه



شکل ۲. نحوه بارگذاری برای انجام آزمایش‌های شکست در مود I نمونه‌های ENDB.

W_f : سطح زیر نمودار بار-جابجایی = کارشکست (ژول)

$$A_{lig} = (t-a) \times D \quad (\text{متر مربع})$$

t : ضخامت نمونه (متر)

a : ارتفاع ترک (متر)

D : قطر نمونه (متر)

$$K_{IC} = \frac{3P_{max} S_1 S_2}{R t^2 (S_1 + S_2)} \sqrt{\pi a} \times Y_1 \quad (2)$$

P_{max} : بار ماکزیمم در لحظه شکست (نیوتن)

S_1 & S_2 : طول اسپن‌ها از تکیه‌گاه‌های طرفین (میلی‌متر)

t : ضخامت نمونه (متر)

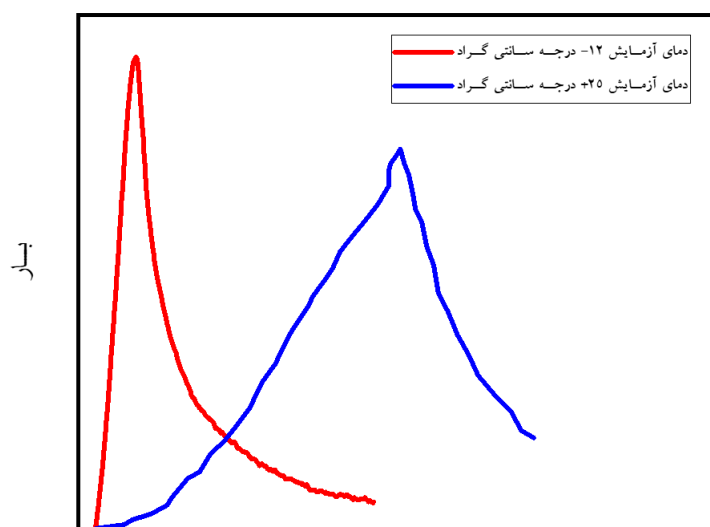
a : ارتفاع ترک (متر)

Y_1 : ضریب شکل نمونه شکست در حالت بارگذاری مود I

این رفتار نشان می‌دهد که چارچوب مکانیک شکست الاستیک خطی (LEFM) با دقت خوبی برای مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی در شرایط دمای پایین معتبر است. مقادیر بحرانی ضرایب شدت تنش مود I در لحظه شکست به ترتیب به عنوان چقرمگی شکست مود I و با نمادهای K_{IC} شناخته می‌شود. همچنین، انرژی شکست مود I با نماد G_f نشان داده می‌شود. نحوه محاسبه انرژی شکست و چقرمگی شکست مطابق روابط زیر می‌باشد.

$$G_f = \frac{W_f}{A_{lig}} \quad (1)$$

انرژی شکست (ژول بر متر مربع): G_f



جابجایی

شکل ۳. نمونه‌ای از منحنی بار-جابجایی به دست آمده از آزمایش ENDB در مود I و در دمای پایین و میانی

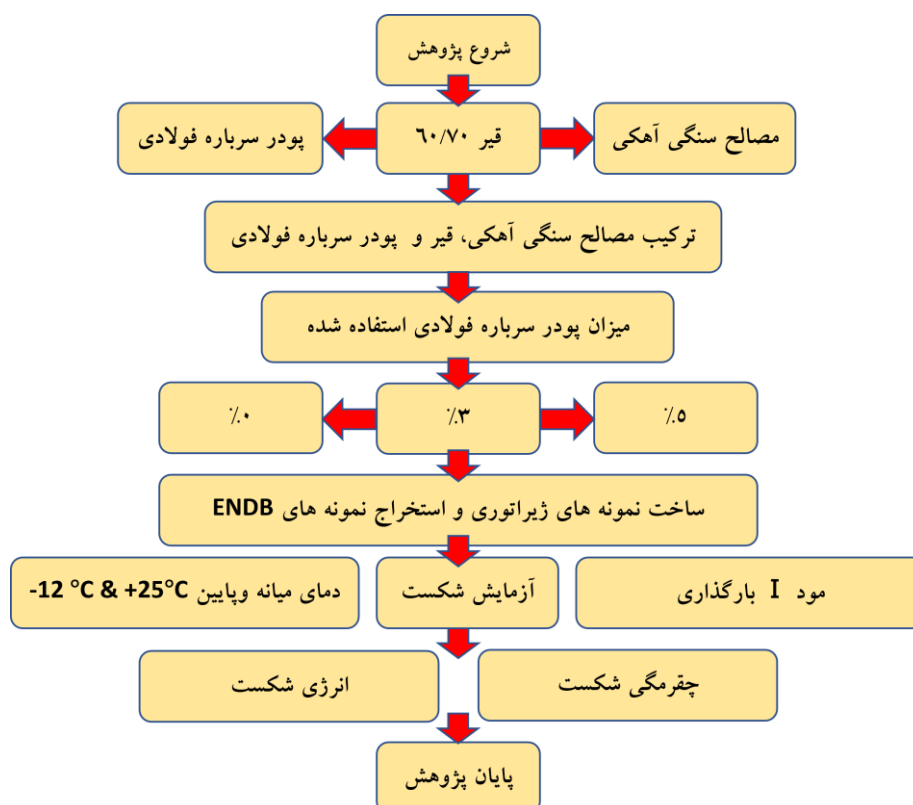
ارزیابی تجربی چقرمگی شکست مود I و انرژی شکست مخلوط آسفالت گرم حاوی پودر سرباره فولادی با استفاده از نمونه ENDB در دماهای پایین و میانی

در جدول ۵، مشخصات نمونه‌های ساخته شده به همراه پارامترهای در نظر گرفته شده برای آزمایش نشان داده شده است.

جدول ۵ مشخصات نمونه‌های ساخته شده به همراه پارامترهای در نظر گرفته شده برای آزمایش

ENDB	نمونه شکست مورد نظر
۵۰ میلی‌متر	ضخامت نمونه
۱۵۰ میلی‌متر	قطر نمونه
۱۵ میلی‌متر	طول ترک
مود ۱ خالص	مد های بارگذاری در نظر گرفته شده
۱۲- و ۲۵+ درجه سلسیوس	دمای آزمایش
۲ میلی‌متر بر دقیقه	نرخ بارگذاری

لازم به ذکر است که جهت بررسی بهتر مطالب موجود در این پژوهش، فلوچارت برنامه آزمایشگاهی در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴. فلوچارت برنامه آزمایشگاهی پژوهش حاضر

۳. نتایج و بحث

داده شده است. بر طبق نتایج می‌توان دریافت که چقرمگی شکست مخلوط آسفالتی با افزایش پودر سرباره فولاد افزایش یافته است. به عنوان مثال افزودن ۳ درصد و ۵ درصد پودر سرباره باعث افزایش ۲۶ درصد و ۴۰

نتایج چقرمگی شکست برای مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف پودر سرباره فولاد تحت بارگذاری مود ۱ در دمای ۱۲- درجه سلسیوس در شکل ۵ نمایش

درصد چقرمگی شکست مخلوط آسفالتی در دمای ۱۲- درجه سلسیوس گردید. علاوه بر این، نتایج چقرمگی شکست نشان داده شده در شکل ۶ در دمای ۲۵+ درجه سلسیوس نیز افزایش چقرمگی شکست ناشی از افزایش میزان پودر سرباره فولاد در مخلوط آسفالتی را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که با مقایسه چقرمگی شکست مخلوط آسفالتی در دماهای میانه و پایین در شکل ۷ می‌توان دریافت که دما یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار در رفتار شکست مخلوط آسفالتی می‌باشد. نکته دیگری که می‌توان از این مقایسه دریافت این است که افزایش دما منجر به کاهش چقرمگی شکست مخلوط آسفالتی می‌گردد. نتایج دیگر مطالعات نیز این یافته را تصدیق می‌کنند (برادران و علیها، ۲۰۲۵؛ برادران و عامری ۲۰۲۵؛ برادران و همکاران، ۲۰۲۵؛ علیها، ۲۰۱۹؛ علیها و همکاران، ۲۰۱۵؛ علیها و همکاران، ۲۰۲۰).

نتایج انرژی شکست مخلوط‌های آسفالتی حاوی پودر سرباره فولاد در شکل‌های ۸ و ۹ در دماهای به ترتیب ۱۲- درجه سلسیوس و ۲۵+ درجه سلسیوس را نشان می‌دهد. بر طبق این نتایج، انرژی شکست مخلوط‌های آسفالتی با افزودن پودر سرباره فولاد افزایش می‌یابد. این روند در همه دماهای مورد بررسی این پژوهش مشاهده گردید. به عنوان مثال، در دمای ۱۲- درجه سلسیوس، افزودن ۳ درصد و ۵ درصد پودر سرباره فولاد موجب افزایش انرژی شکست به میزان به ترتیب ۲۳ درصد و ۵۴ درصد گردید. همچنین، نتایج انرژی شکست در دمای ۲۵+ درجه سلسیوس نشان داد که افزایش ۳ درصد و ۵ درصد پودر سرباره فولاد می‌تواند انرژی شکست مخلوط شاهد را به میزان به ترتیب ۱۵ درصد و ۵۱ درصد افزایش دهد.

با مقایسه نتایج انرژی شکست در دمای میانی و پایین در شکل ۱۰ می‌توان دریافت که افزایش دما موجب افزایش انرژی شکست می‌شود. این می‌تواند به علت تغییر رفتار مخلوط آسفالتی با افزایش دما از حالت ترد و

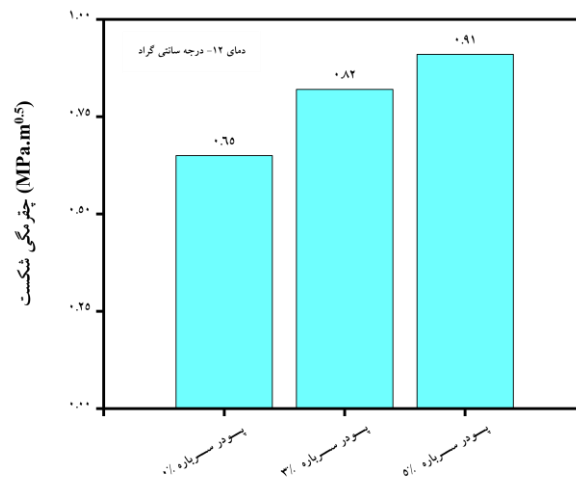
شکننده به حالت انعطاف‌پذیر باشد. این تغییر رفتار موجب افزایش جابجایی تحمل شده و همچنین کاهش بار اوج می‌گردد که در نهایت می‌تواند باعث افزایش انرژی شکست ناشی از افزایش سطح زیر نمودار بار-جابجایی گردد. سایر مطالعات نیز این تغییر رفتار ناشی از تغییرات دما را نشان داده‌اند (برادران و علیها، ۲۰۲۵؛ برادران و عامری ۲۰۲۵؛ برادران و همکاران، ۲۰۲۵؛ علیها، ۲۰۱۹؛ علیها و همکاران، ۲۰۱۵). برادران و همکاران (۲۰۲۵) طی پژوهشی روی رفتار شکست مخلوط آسفالتی با استفاده از نمونه ENDB تحت بارگذاری مود خالص ۱ و ۲ و همچنین دمای پایین ۱۵- درجه سلسیوس تا ۲۵+ درجه سلسیوس به نتایجی دست یافتند. آن‌ها عنوان کردند که تحقیقات قبلی به طور مداوم نشان می‌دهند که دماهای بالاتر، ظرفیت تحمل بار مخلوط‌های آسفالتی را قبل از شکست کاهش می‌دهند. بنابراین، نتیجه می‌شود که مقادیر چقرمگی شکست در دماهای پایین‌تر (زیر صفر) بالاتر هستند و با افزایش دما کاهش می‌یابند، یافته‌ای که با نتایج این مطالعه همسو است. دوم، رفتار مشاهده شده تحت تأثیر گذار وابسته به دما بین پاسخ‌های مواد شکننده و شکل‌پذیر قرار دارد. در دماهای زیر صفر، آسفالت عمدتاً ویژگی‌های شکننده را نشان می‌دهد. با افزایش دما، مخلوط به سمت رفتار شکل‌پذیرتر تغییر می‌کند. این تغییر نشان می‌دهد با افزایش دما، از ۱۵ درجه سلسیوس به ۲۵+ درجه سلسیوس، ظرفیت بار اوج کاهش می‌یابد. در حالی که جابجایی مربوطه افزایش می‌یابد. این نتایج این نتیجه را تقویت می‌کند که رفتار شکست آسفالتی به طور قابل توجهی تحت تأثیر دما قرار دارد. با افزایش شکل‌پذیری و کاهش چقرمگی شکست در دماهای بالاتر (برادران و همکاران، ۲۰۲۵). یکی دیگر از نتایجی که برادران و همکاران در سال ۲۰۲۵ و ۲۰۲۴ به آن اشاره داشتند، تأثیر قابل توجه دما بر انرژی شکست مخلوط آسفالتی بود. آنها طی مطالعات مختلف بیان کردند که انرژی

شکست مخلوط آسفالتی با افزایش دما از زیر صفر به سطوح میانی، افزایش قابل توجهی می‌یابد. این روند که توسط مطالعات متعدد قبلی تأیید شده است، ارتباط نزدیکی با تغییرات در کار شکست دارد که به صورت مساحت زیر منحنی بار-جابجایی اندازه‌گیری می‌شود. در دماهای بالا، اگرچه بار اوج قبل از شکست عموماً کاهش می‌یابد، جابجایی مربوطه در هنگام شکست به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این رفتار تغییر شکل گسترده منجر به مساحت بزرگتری در زیر منحنی بار-جابجایی می‌شود و در نتیجه کار محاسبه شده شکست و در نتیجه انرژی شکست را افزایش می‌دهد. مکانیسم اساسی این رفتار وابسته به دما در گذار از واکنش مکانیکی مخلوط آسفالتی از شکننده به شکل‌پذیر نهفته است. در دماهای زیر صفر، آسفالت عمدتاً به عنوان یک ماده الاستیک خطی و شکننده رفتار می‌کند. در چنین شرایطی، مخلوط با رسیدن به حد مقاومت کششی خود به طور ناگهانی دچار شکست می‌شود و امکان جذب حداقل انرژی در طول شکست را فراهم می‌کند. انتشار ترک معمولاً به دلیل ظرفیت تغییر شکل پلاستیک محدود، سریع و فاجعه‌بار است. با افزایش دما به سمت سطوح میانی (مثلاً حدود ۲۰ تا ۲۵ درجه سلسیوس)، ماده شروع به نشان دادن پاسخی شکل‌پذیرتر و غیرخطی غیرالاستیک می‌کند. این گذار، تجلی ماهیت ویسکوالاستیک مخلوط‌های آسفالتی است، که در آن هم مدول الاستیک و هم ویژگی‌های جریان ویسکوز به شدت تحت تأثیر دما قرار می‌گیرند. دماهای بالاتر، سفتی قیر را کاهش می‌دهند و امکان تغییر شکل بیشتر قبل از شکست را فراهم می‌کنند و مخلوط را قادر می‌سازند تا انرژی مکانیکی بیشتری را در طول شروع و انتشار ترک جذب و اتلاف کند. علاوه بر این، افزایش شکل‌پذیری در دماهای میانی، امکان کند شدن ریزترک‌ها و انحراف مسیر ترک را فراهم می‌کند که هر دو به مکانیسم‌های افزایش اتلاف انرژی کمک می‌کنند.

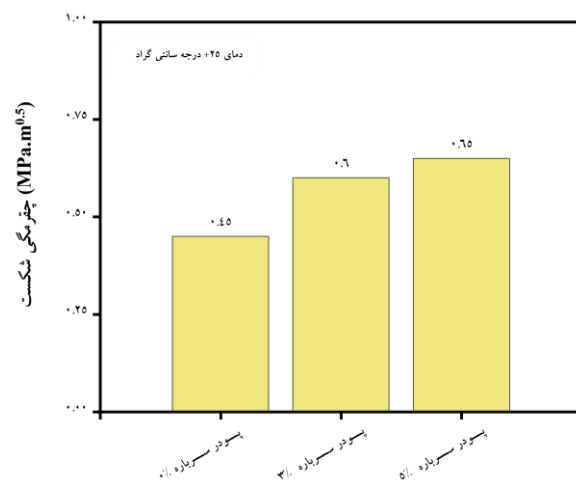
این رفتار شکل‌پذیر منجر به فرآیند شکست تدریجی‌تر می‌شود، که در آن ماده دچار تغییر شکل قابل توجه و اتلاف اصطکاک داخلی می‌شود و انرژی شکست را بیشتر افزایش می‌دهد. بنابراین، افزایش مشاهده‌شده در انرژی شکست با افزایش دما نه تنها نشان‌دهنده توانایی افزایش‌یافته مخلوط آسفالتی در مقاومت در برابر ترک‌خوردگی است، بلکه بر نقش حیاتی دما در تغییر مکانیک شکست اساسی ماده نیز تأکید دارد. درک این گذار برای طراحی روسازی‌ها با عملکرد بهینه در شرایط آب و هوایی مختلف، به‌ویژه در مناطقی با نوسانات دمایی قابل توجه، ضروری است (برادران و علیها، ۲۰۲۵؛ برادران و عامری ۲۰۲۵؛ برادران و همکاران، ۲۰۲۵؛ علیها، ۲۰۱۹؛ علیها و همکاران، ۲۰۱۵؛ علیها و همکاران، ۲۰۲۰).

در کارهای دیگر، برخی از محققان نشان داده‌اند که افزودن سرباره فولاد به مخلوط مواد آسفالتی می‌تواند مقاومت و خصوصیات مکانیکی را بهبود بخشد (روح‌الامینی و همکاران، ۲۰۱۹؛ ژائو و همکاران، ۲۰۲۲؛ علی و همکاران، ۱۹۹۲). با توجه به یافته‌های این تحقیق مشاهده می‌شود که افزودن پودر سرباره فولاد علاوه بر خصوصیات مکانیکی، نقش مهمی در بهبود مقاومت در برابر ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی دارد.

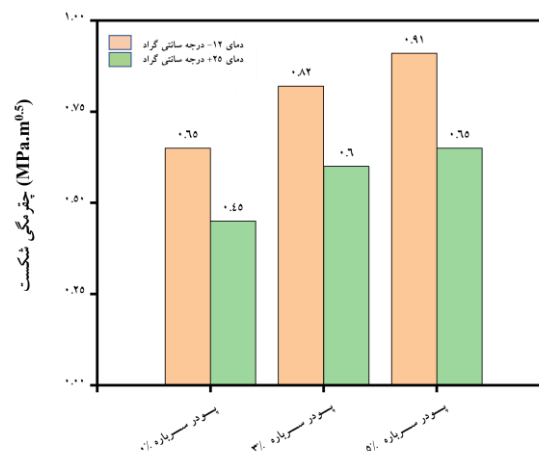
در نهایت، شایان ذکر است که در این پژوهش نشان داده شد که افزودن حداکثر ۵ درصد پودر سرباره فولادی تأثیر مثبتی بر انرژی شکست و چقرمگی شکست مخلوط آسفالتی گرم در شرایط دمای پایین و میانه دارد. با این حال، هنوز برخی مطالعات تکمیلی و آتی هنوز برای یافتن مقدار بهینه یا حداکثر مجاز افزودنی سرباره فولادی یا اندازه و دانه‌بندی چنین ماده بازیافتی در مخلوط آسفالت گرم مورد نیاز است.



شکل ۵. نتایج چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر مختلف پودر سرباره فولادی در دمای ۱۲- درجه سلسیوس

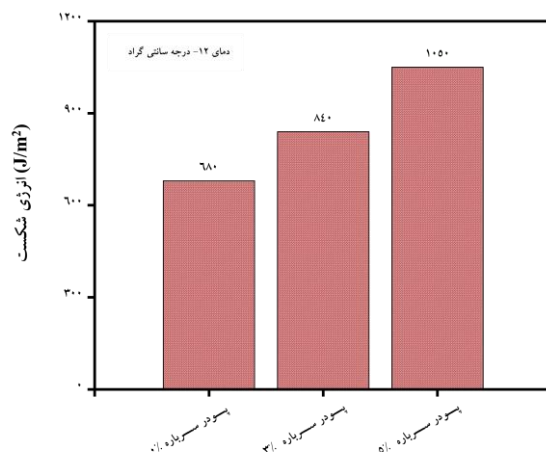


شکل ۶. نتایج چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر مختلف پودر سرباره فولادی در دمای ۲۵+ درجه سلسیوس

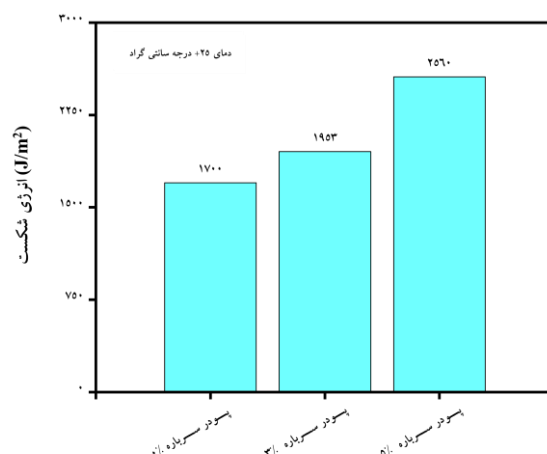


شکل ۷. مقایسه نتایج چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر مختلف پودر سرباره فولادی در دمای میانی و پایین

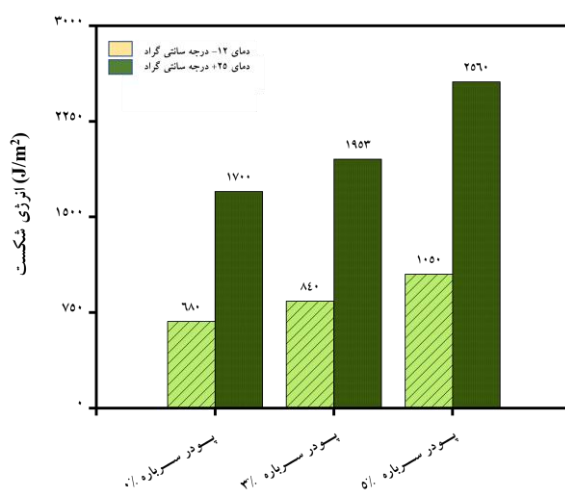
ارزیابی تجربی چقرمگی شکست مود I و انرژی شکست مخلوط آسفالت گرم حاوی پودر سرباره فولادی با استفاده از نمونه ENDB در دماهای پایین و میانی



شکل ۸. نتایج انرژی شکست مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر مختلف پودر سرباره فولادی در دمای ۱۲- درجه سلسیوس



شکل ۹. نتایج انرژی شکست مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر مختلف پودر سرباره فولادی در دمای ۲۵+ درجه سلسیوس



شکل ۱۰. مقایسه نتایج چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر مختلف پودر سرباره فولادی در دمای میانی و پایین

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش، تأثیر استفاده از پودر سرباره فولادی به عنوان ماده پرکننده بر رفتار شکست کششی مخلوط آسفالتی گرم در مود I مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفت. با توجه به افزایش حجم پسماندهای صنعتی و ضرورت استفاده مجدد از آن‌ها در پروژه‌های عمرانی، بهره‌گیری از سرباره فولادی می‌تواند علاوه بر کاهش آثار زیست‌محیطی، موجب بهبود برخی ویژگی‌های مکانیکی روسازی‌های آسفالتی شود. از این رو، در این مطالعه تلاش شد عملکرد مخلوط‌های آسفالتی حاوی پودر سرباره در دماهای پایین و میانه ارزیابی گردد تا امکان استفاده از این ماده در شرایط مختلف بهره‌برداری بررسی شود. برای انجام آزمایش‌ها، نمونه‌های ENDB به عنوان یکی از روش‌های معتبر ارزیابی رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی انتخاب شدند. پودر سرباره فولادی در سه سطح مختلف شامل صفر، ۳ و ۵ درصد وزنی به عنوان جایگزین بخشی از فیلر متداول به طرح اختلاط افزوده شد. سپس نمونه‌ها تحت آزمایش‌های شکست کششی مود I در دماهای پایین و میانه قرار گرفتند تا پارامترهایی نظیر چقرمگی شکست و انرژی شکست مورد تحلیل قرار گیرد. انتخاب این دماها به دلیل اهمیت رفتار روسازی آسفالتی در شرایط اقلیمی سرد و همچنین شرایط بهره‌برداری معمول انجام شد؛ زیرا ترک‌خوردگی حرارتی و رشد ترک‌ها از مهم‌ترین عوامل کاهش عمر روسازی در این شرایط محسوب می‌شوند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزودن پودر سرباره فولادی می‌تواند به طور قابل توجهی موجب افزایش چقرمگی شکست و انرژی شکست مخلوط آسفالتی شود. این موضوع بیانگر آن است که حضور ذرات سرباره در ساختار مخلوط باعث بهبود مقاومت در برابر شروع و گسترش ترک می‌شود. به نظر می‌رسد زبری سطحی و خواص فیزیکی مناسب سرباره فولادی سبب افزایش درگیری مکانیکی میان قیر و سنگدانه‌ها شده و در نتیجه

توان جذب و اتلاف انرژی در هنگام بارگذاری افزایش یافته است. همچنین مشاهده شد که نمونه‌های دارای ۵ درصد سرباره فولادی، در مقایسه با نمونه شاهد، عملکرد بهتری از خود نشان دادند و بیشترین مقدار انرژی شکست و مقاومت در برابر ترک‌خوردگی را ارائه کردند. از سوی دیگر، بررسی تأثیر دما نشان داد که با افزایش دما، انرژی شکست افزایش یافته اما چقرمگی شکست کاهش پیدا می‌کند. این رفتار را می‌توان به نرم‌تر شدن قیر و افزایش خاصیت تغییرشکل‌پذیری مخلوط در دماهای بالاتر نسبت داد. در دماهای پایین، مخلوط آسفالتی رفتار تردتری داشته و در برابر انتشار ترک حساس‌تر است، در حالی که در دماهای میانه، قابلیت جذب انرژی افزایش یافته و شکست با تغییرشکل بیشتری همراه می‌شود. بنابراین، تغییرات دمایی نقش مهمی در رفتار مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی داشته و باید در طراحی روسازی مورد توجه قرار گیرد. در مجموع، نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از حداکثر ۵ درصد پودر سرباره فولادی به عنوان فیلر می‌تواند اثر مثبتی بر خواص شکست مخلوط آسفالتی گرم داشته باشد و مقاومت آن را در برابر ترک‌خوردگی در شرایط دمای پایین و میانه بهبود بخشد. این موضوع نشان‌دهنده ظرفیت مناسب سرباره فولادی به عنوان یک ماده جایگزین پایدار در صنعت راه‌سازی است که علاوه بر مزایای فنی، می‌تواند به کاهش مصرف منابع طبیعی و مدیریت پسماندهای صنعتی کمک کند. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، دامنه بررسی‌ها به درصد‌های بالاتر پودر سرباره فولادی گسترش یابد تا مقدار بهینه این ماده از نظر عملکرد مکانیکی، دوام و صرفه اقتصادی مشخص شود. در این پژوهش تنها درصد‌های محدودی از سرباره مورد استفاده قرار گرفت، در حالی که ممکن است مقادیر بیشتر یا ترکیب‌های متفاوت بتوانند تأثیرات مطلوب‌تری بر مقاومت ترک‌خوردگی و رفتار شکست مخلوط آسفالتی داشته باشند. همچنین توصیه می‌شود اثر همزمان

بررسی گردد.

۵. تقدیر و قدردانی

نویسندگان مراتب سپاس و قدردانی خود را از تمامی پژوهشگران و متخصصانی که در پیشبرد این پژوهش یاری رسان بوده اند، ابراز می دارند. همچنین از همکاری و همراهی کلیه همکاران پژوهشی که بازخورد های سازنده ای در راستای بهبود کیفیت این مطالعه ارائه نموده اند، تشکر می گردد.

۶. تأییدیه اخلاقی

نویسندگان تأیید می کنند 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. مشارکت های نویسندگان

سید میعاد صالحی: ایده پردازی و مفهوم سازی، اعتبارسنجی، تحلیل داده ها، جمع آوری و آماده سازی داده ها، نگارش پیش نویس اصلی مقاله
محمدرضا محمدعلیها: ایده پردازی و مفهوم سازی، اعتبارسنجی، تحلیل داده ها، جمع آوری و آماده سازی داده ها، نگارش پیش نویس اصلی مقاله، نظارت و راهنمایی کلی پژوهش

۸. منابع مالی

این پژوهش هیچ بودجه مشخصی از سازمان های تامین کننده داخلی یا خارجی دریافت نکرده است.

۹. تعارض منافع

نویسندگان تأیید می کنند که هیچ گونه تعارض منافع مرتبط با انتشار این مقاله ندارند.

سرباره فولادی با سایر افزودنی های اصلاح کننده نظیر الیاف پلیمری، الیاف طبیعی، نانومواد و یا قیرهای اصلاح شده مورد ارزیابی قرار گیرد؛ زیرا این ترکیبات می توانند موجب بهبود خواص مکانیکی و افزایش دوام روسازی شوند. از سوی دیگر، بررسی عملکرد بلندمدت مخلوط های آسفالتی حاوی سرباره فولادی تحت شرایط واقعی بهره برداری از اهمیت زیادی برخوردار است. انجام آزمایش های مربوط به بارگذاری تکراری، خستگی، شیارشدگی و سیکل های یخبندان و ذوب می تواند اطلاعات جامع تری درباره دوام این مخلوط ها در شرایط محیطی مختلف (شرایط سخت دمایی) ارائه دهد. همچنین، مطالعه رفتار این مخلوط ها در برابر رطوبت و حساسیت به آب، به ویژه در مناطق با بارندگی زیاد، می تواند نقش مهمی در ارزیابی قابلیت کاربرد آنها در پروژه های اجرایی داشته باشد. علاوه بر جنبه های فنی، پیشنهاد می شود مطالعات اقتصادی و زیست محیطی نیز به صورت گسترده تر انجام شود. استفاده از سرباره فولادی به عنوان یک محصول جانبی صنعتی می تواند موجب کاهش مصرف مصالح طبیعی و کاهش هزینه های دفع پسماندهای صنعتی گردد. بنابراین، ارزیابی چرخه عمر، میزان کاهش آلاینده های زیست محیطی و تحلیل هزینه-فایده استفاده از این ماده، می تواند زمینه را برای کاربرد گسترده تر آن در صنعت راه سازی و توسعه روسازی های پایدار فراهم سازد. یکی دیگر از نکات فنی که می تواند در پژوهش های آتی مورد بررسی قرار بگیرد، اثر سرباره بر پارامترهای حجمی مخلوط آسفالتی و تأثیر آن بر درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی می باشد. در مطالعات آینده، با طراحی مجدد طرح اختلاط بر اساس حجم معادل و تنظیم مجدد درصد قیر بهینه، اثر مستقل سرباره فولادی و فضای خالی با دقت بیشتری تفکیک و

- 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.
- Ali, N. A., Bergan, A. T., Chan, J. S. S., Papagiannakis, T., & 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". *Theo. Appl. Fract. Mech.*, 99: 36-43.
- Aliha, M. R. M., Behbahani, H., Fazaeli, H., & Rezaifar, M. H. (2015). "Experimental study on mode I fracture toughness of different asphalt mixtures". *Scien. Iran.*, 22(1): 120-130.
- Aliha, M. R. M., Fakhri, M., Kharrazi, E. H., & 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., 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., 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". *Fatig. Fract. Eng. Mater. Struct.*, 43(3): 586-604.
- Aliha, M. R. M., Ziari, H., Sobhani Fard, E., & 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., & 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., & 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., & 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., & 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.
- 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.
- Baradaran, M. S., Qazanfari, R., & Baradaran, S. (2023). "Study of soil reinforcement in the east of Mashhad using glass granule". *Mater. Res. Exp.*, 10(5): 055202. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/acd5af>
- Baradaran, S., & Aliha, M. R. M. (2025a). "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. (2025b). "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. (2025c). "Comprehensive evaluation of cracking performance in modified HMA and WMA asphalt mixtures using the SCB test". *Alex. Eng. J.*, 133: 349-369.
- Baradaran, S., & Ziaee, S. A. (2025d). "Review of the mechanical properties of asphalt pavement reinforced with natural plant fibers as an eco-friendly solution in pavement engineering". *Road*, 33(2): 167-192.
- Baradaran, S., Aliha, M. R. M., Ameri, M., Erarslan, N., & Sadowski, T. (2025a). "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., Aliha, M. R. M., Maleki, A., & 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., & 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>
- Baradaran, S., Ziaee, S. A., & Aliha, M. R. M. (2026). Enhancing mechanical performance of rubberized asphalt pavement by using recycled plastic waste. *Construction and Building Materials*, 539, 147464.
- Baradaran, S., Ziaee, S. A., Ameri, M., & Aliha, M. R. M. (2025b). "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.
- Behbahani, H., Mohammad Aliha, M. R., Fazaeli, H., & Aghajani, S. (2013). "Experimental fracture toughness study for some modified asphalt mixtures". In *Advanced Materials Research (Vol. 723, pp. 337-344)*. Trans Tech Publications Ltd.
- 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).
- 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.
- Chai, C., Cheng, Y., Zhang, Y., Zhu, B., & 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.
- 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.
- 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.
- 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". *Fatig. Fract. Eng. Mater. Struct.*, 14598. <https://doi.org/10.1111/ffe.14598>
- 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.
- Falchetto, A. C., Moon, K. H., Wang, D., Riccardi, C., Kang, M. S., & 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, Athens, Greece*.
- Falchetto, A.C., Moon, K. H., Lee, C. B., & 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., & Aliha, M. R. M. (2021). "Influence of specimen geometry on mode I fracture toughness of asphalt concrete". *Constr. Build. Mater.*, 276: 122181.
- Goli, H., Latifi, M., & Sadeghian, M. (2022). "Moisture characteristics of warm mix asphalt containing reclaimed asphalt pavement (RAP) or steel slag". *Mater. Struct.*, 55(2): 53.
- Haghighatpour, P. H., 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.
- Hamed, 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.
- 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". *Theo. 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 (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., & 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". *Theo. Appl. Fract. Mech.*, 121: 103421.

- 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, 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. *Engineering Fracture Mechanics*, 241, 107418.
- Khakbaz, M., Kamboozia, N., Mohammad Aliha, M. R., & 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., & 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., & 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., & 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., & 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., & 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, 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, Dordrecht.
- 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.
- 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.
- Mubarak, 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.
- Mubarak, 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.
- 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.
- Rahman, M. T., Mohajerani, A., & Giustozzi, F. (2020). "Recycling of waste materials for asphalt concrete and bitumen: A review". *Mater.*, 13(7): 1495.
- 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.
- Shafabakhsh, G. A., & 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.
- Togholi, 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.

- Wan, J., Wu, S., Hu, X., Li, Y., Pan, P., & 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., & 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., & 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". *Theo. 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). " 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.
- Xu, H., Wu, S., Li, H., Zhao, Y., & 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., & 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* (Vol. 631, No. 2, p. 022067). IOP Publishing.
- 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., Salehikalam, A., Tabasi, E., Naseri, A., Khordehbinan, M. W., & 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., & 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., ... & 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., & 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.