



Semnan University

Journal of Transportation Infrastructure Engineering

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

ISSN: 2821-0549



Research Article

Evaluation of the Fracture Performance of Basalt Fiber-Reinforced Asphalt Mixtures Based on the Semi-Circular Bending Test

Alireza Motie^a , Yousef Sajed^{*b} , Reaz Saleh Ahari^c

^a Department of Civil Engineering, Ta. C., Islamic Azad University, Tabriz, I. R. Iran.

^b Department of Civil Engineering, Ard. C., Islamic Azad University, Ardebil, I. R. Iran.

^c Department of Civil Engineering, Ta. C., Islamic Azad University, Tabriz, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2026-02-17

Revised: 2026-04-25

Accepted: 2026-04-25

Keywords:

Hot mix asphalt,
Basalt fibers,
SCB,
Cracking.

ABSTRACT

Cracking is one of the main failure mechanisms in asphalt pavements, leading to reduced service life and increased maintenance costs. The objective of this research is to comprehensively evaluate the fracture behavior of basalt fiber-reinforced asphalt mixtures using the Semi-Circular Bending (SCB) test. The main innovation of this study lies in the simultaneous analysis of fracture mechanics parameters in different modes and determination of the optimal range of basalt fiber content to improve fracture behavior. Asphalt samples with different percentages of basalt fibers (0.2%, 0.3%, 0.4%, and 0.5% by weight) were prepared, and key fracture parameters including critical load (P_{cr}), fracture energy (G_f), fracture toughness (K_{IC}), and Crack Resistance Index (CRI) were analyzed at low temperatures (-10 and 0 °C) and intermediate temperature (10 °C). Results showed that basalt fibers, by creating a reinforcing network in the mixture, prolong the crack propagation path and increase energy absorption capacity. At low temperatures, the most positive effect of fibers was observed in tensile mode (Mode I), while shear mode (Mode II) showed less sensitivity to increasing fiber content. Fracture energy and fracture toughness increased with increasing fiber content up to an optimal range (0.3%-0.4%) and stabilized or slightly decreased beyond that. The CRI index at 10 °C reflected the combined effect of critical load and fracture energy and showed a significant improvement with increasing fiber content. The results of analyzing different fracture modes indicated that basalt fibers play an effective role in reducing stress concentration and increasing the structural stability of asphalt mixtures.

× Corresponding author.

E-mail address: yousefsajed@iaau.ac.ir

How to cite this article: Motie, A., Sajed, Y., & Saleh Ahari, R. (2026). Evaluation of fracture performance of basalt fiber-reinforced asphalt mixtures based on the semi-circular bending test. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 12(1), 69-91.

<https://doi.org/10.22075/jtie.2026.40599.1754>

© 2025 The Author(s). Journal of Transportation Infrastructure Engineering published by Semnan University Press.

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



مقاله پژوهشی

ارزیابی عملکرد شکست مخلوط‌های آسفالتی مسلح شده با الیاف بازالت بر پایه آزمون خمش نیم‌دایره‌ای

علیرضا مطیع^۱، یوسف ساجد^{۲*}، رضا صالح اهری^۳

^۱ گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران.

^۲ گروه مهندسی عمران، واحد اردبیل، دانشگاه آزاد اسلامی، اردبیل، ایران.

^۳ گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران.

چکیده

ترک‌خوردگی یکی از اصلی‌ترین مکانیزم‌های خرابی در روسازی‌های آسفالتی است که کاهش عمر سرویس‌دهی و افزایش هزینه‌های نگهداری را به دنبال دارد. هدف از این تحقیق، ارزیابی جامع رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی تقویت‌شده با الیاف بازالت با استفاده از آزمایش خمشی نیم‌دایره‌ای (SCB) است. نوآوری اصلی این پژوهش در تحلیل هم‌زمان پارامترهای مکانیک شکست در مدهای مختلف و تعیین محدوده بهینه درصد الیاف بازالت برای بهبود رفتار شکست می‌باشد. نمونه‌های آسفالتی با درصد‌های مختلف الیاف بازالت (۰.۲، ۰.۳، ۰.۴ و ۰.۵ درصد وزنی) تهیه شدند و پارامترهای کلیدی شکست شامل بار بحرانی (Pcr)، انرژی شکست (Gf)، چقرمگی شکست (KIC) و شاخص مقاومت در برابر ترک‌خوردگی (CRI) در دماهای پایین (۱۰- و صفر درجه سلسیوس) و دمای متوسط (۱۰ درجه سلسیوس) مورد تحلیل قرار گرفتند. نتایج نشان داد که الیاف بازالت با ایجاد شبکه تقویتی در مخلوط، مسیر انتشار ترک را طولانی‌تر کرده و ظرفیت جذب انرژی را افزایش می‌دهد. در دماهای پایین، بیشترین اثر مثبت الیاف در مد کششی (Mode I) مشاهده شد. در حالی که مد برشی (Mode II) حساسیت کمتری به افزایش درصد الیاف داشت. انرژی شکست و چقرمگی شکست با افزایش درصد الیاف تا محدوده بهینه (۰.۳-۰.۴ درصد) افزایش یافت و فراتر از آن، تثبیت یا کاهش جزئی مشاهده شد. شاخص CRI در دمای ۱۰ درجه سلسیوس اثر ترکیبی بار بحرانی و انرژی شکست را منعکس کرده و با افزایش درصد الیاف، بهبود محسوسی نشان داد. نتایج تحلیل مدهای مختلف شکست نشان داد که الیاف بازالت نقش مؤثری در کاهش تمرکز تنش و افزایش پایداری سازه‌ای مخلوط آسفالتی دارند.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۱۱/۲۵

بازنگری مقاله: ۱۴۰۵/۰۲/۰۵

پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۲/۰۵

واژه‌های کلیدی:

مخلوط آسفالتی،

الیاف بازالت،

آزمون خمش نیم‌دایره،

ترک‌خوردگی.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: yousef.sajed@iaau.ac.ir

استناد به این مقاله: مطیع، علی رضا، ساجد، یوسف و صالح اهری، رضا. (۱۴۰۵). ارزیابی عملکرد شکست مخلوط‌های آسفالتی مسلح شده با الیاف بازالت بر پایه آزمون خمش نیم‌دایره‌ای. مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۱۲(۱)، ۶۹-۹۱.

<https://doi.org/10.22075/jtie.2026.40599.1754>

۱. مقدمه

ترک خوردگی یکی از مهم ترین و پیچیده ترین مکانیزم های خرابی در روسازی های آسفالتی محسوب می شود که نقش تعیین کننده ای در کاهش عمر سرویس دهی و افزایش هزینه های نگهداری ایفا می کند (حامدی پور و همکاران، ۲۰۲۳؛ محمدی و همکاران، ۲۰۲۳؛ سیتلری، ۲۰۲۵). این پدیده عمدتاً ناشی از تمرکز تنش، رشد ریزترک ها و ناتوانی مخلوط آسفالتی در اتلاف انرژی ناشی از بارگذاری و تنش های حرارتی است (ریکاردی و همکاران، ۲۰۲۳؛ لی و همکاران، ۲۰۲۴؛ سونگ و همکاران، ۲۰۲۵). در چنین شرایطی، ارزیابی رفتار شکست مخلوط آسفالتی، به ویژه در مراحل آغاز و گسترش ترک، اهمیت ویژه ای پیدا می کند؛ چرا که بسیاری از خرابی های زودرس روسازی ریشه در ضعف مقاومت ترک خوردگی دارند (فن و همکاران، ۲۰۲۳؛ سونگ و همکاران، ۲۰۲۲؛ سونگ و همکاران، ۲۰۲۳).

در سال های اخیر، رویکردهای مبتنی بر مکانیک شکست به عنوان ابزارهای کارآمد برای تحلیل رفتار ترک خوردگی مخلوط های آسفالتی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته اند (عامری و همکاران، ۲۰۱۲؛ علیها و همکاران، ۲۰۱۹؛ برادران و همکاران، ۲۰۲۵). برخلاف شاخص های سنتی مقاومت، این رویکردها امکان بررسی هم زمان ظرفیت تحمل بار، جذب انرژی و پایداری ترک را فراهم می کنند. در این میان، آزمایش خمش نیم دایره ای (SCB) به دلیل سادگی اجرا، تکرارپذیری مناسب و قابلیت استخراج پارامترهای متنوع شکست، به عنوان یکی از روش های استاندارد برای ارزیابی رفتار ترک خوردگی مخلوط های آسفالتی شناخته می شود (شفابخش و همکاران، ۲۰۲۱؛ رن و همکاران، ۲۰۲۴؛ مودی و همکاران، ۲۰۲۴). این آزمون امکان محاسبه پارامترهایی نظیر بار بحرانی، انرژی شکست و چقرمگی شکست را فراهم کرده و دیدگاه

عمیق تری نسبت به فرآیند شروع و گسترش ترک ارائه می دهد (یوان و همکاران، ۲۰۲۰؛ شفابخش و همکاران، ۲۰۲۴).

یکی از راهکارهای مؤثر برای بهبود رفتار شکست مخلوط های آسفالتی، استفاده از الیاف تقویت کننده است. الیاف می توانند با ایجاد پل تنش در ناحیه ترک، توزیع یکنواخت تر تنش و افزایش ظرفیت جذب انرژی، روند رشد ترک را کند کرده و مقاومت شکست مخلوط را ارتقا دهند (لی و همکاران، ۲۰۲۳؛ خالد و همکاران، ۲۰۲۴). با این حال، میزان تأثیرگذاری الیاف به شدت به نوع الیاف، مقدار مصرف و نحوه توزیع آن ها در مخلوط آسفالتی وابسته است و انتخاب نامناسب این عوامل می تواند حتی منجر به تضعیف عملکرد ترک خوردگی شود (جکیل و احمدزاده، ۲۰۲۰؛ الندیش و همکاران، ۲۰۲۳).

اسماعیلی و همکاران (۲۰۲۵) در تحقیقی به ارزیابی تأثیر الیاف پلی استر بر رفتار ترک خوردگی مخلوط های آسفالتی تحت حالت های شکست Mode I و حالت ترکیبی Mode I/II و با استفاده از آزمون خمشی نیم دایره ای (SCB) پرداختند. نمونه های این تحقیق دارای عمق ناچ ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی متر بودند. ارزیابی مخلوط ها از طریق مقایسه شاخص های شناخته شده رفتار شکست، مانند بار اوج، انرژی شکست و چقرمگی شکست انجام گرفت. نتایج نشان داد که افزودن الیاف، مقاومت ترک مخلوط ها را افزایش داده و موجب افزایش قابل توجه انرژی شکست پس از رسیدن به بار اوج می شود (اسماعیلی و همکاران، ۲۰۲۵). در تحقیقی دیگر، اکرم و همکاران (۲۰۲۴) به بررسی تأثیر مقادیر مختلف الیاف پلی پروپیلن بر پارامترهای شاخص آزمون خمشی نیم دایره ای (SCB) پرداختند. در این مطالعه، نمونه های SCB با عمق ناچ استاندارد تهیه شدند و پارامترهای شکست مانند بار اوج، انرژی شکست و شاخص های مقاومت ترک مورد تحلیل قرار

استخراج شده از آزمون SCB، به‌ویژه در ارتباط با مکانیزم آغاز ترک و ظرفیت جذب انرژی، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این خلأ پژوهشی، لزوم انجام مطالعاتی را برجسته می‌سازد که به‌صورت متمرکز و نظام‌مند، اثر مقدار الیاف بازالت بر شاخص‌های مختلف شکست را مورد ارزیابی قرار دهد.

بر این اساس، هدف از تحقیق حاضر، ارزیابی جامع رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی مسلح شده با الیاف بازالت با استفاده از آزمایش SCB است. در این پژوهش، مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر مختلف الیاف بازالت تهیه شده و پارامترهای کلیدی شکست شامل بار بحرانی شروع ترک، انرژی شکست و چقرمگی شکست استخراج و تحلیل گردیدند.

۲. مواد و روش تحقیق

در این مطالعه، برای ساخت مخلوط‌های آسفالتی، از ترکیب سنگدانه، قیر و الیاف بازالت استفاده شد. سنگدانه‌های انتخاب شده دارای منشأ آهکی بوده و به‌منظور اطمینان از یکنواختی خواص، همگی از یک منبع واحد تهیه شدند. این مصالح از کارخانه ماکادام شرق در منطقه ورامین (استان تهران) تأمین گردیدند تا تغییرپذیری ناشی از تفاوت منبع سنگدانه به حداقل برسد. طرح دانه‌بندی مخلوط سنگی بر اساس الزامات آیین نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴) انتخاب شد، به‌گونه‌ای که منحنی دانه‌بندی در محدوده میانی این استاندارد قرار گیرد (صادق‌نژاد و شفاعخش، ۲۰۱۷). حداکثر اندازه اسمی سنگدانه ۱۹ میلی‌متر در نظر گرفته شد که متناسب با کاربرد مخلوط در لایه توپکا می‌باشد. به‌منظور بررسی صحت طرح اختلاط سنگی، توزیع اندازه ذرات با استفاده از آزمایش الک انجام شد. این آزمایش مطابق دستورالعمل AASHTO T27 اجرا شد و برای بخش ریزدانه، شستشوی مصالح به‌عنوان مرحله تکمیلی در نظر گرفته شد تا اثر ذرات

گرفتند. نتایج نشان داد که نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن مقادیر بیشتری از انرژی شکست و مقاومت ترک نسبت به نمونه‌های بدون الیاف دارند (اکرم و همکاران، ۲۰۲۴). اکرم و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهشی دیگر، به بررسی اثر الیاف شیشه بر مقاومت ترک مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از آزمون SCB پرداختند. نمونه‌ها با درصد بهینه قیر (۵٪) طراحی شدند و الیاف به روش اختلاط خشک به مخلوط اضافه گردیدند. پارامترهای بررسی شامل بار اوج، انرژی شکست، کار شکست و شاخص‌های ترک مانند FI^۱ و CRI^۲ بودند. نتایج نشان داد که افزودن الیاف شیشه‌ای موجب افزایش قابل‌توجه انعطاف‌پذیری و مقاومت ترک مخلوط شد، به‌طوری‌که مقادیر FI، CRI و CT Index به ترتیب ۲۴۷.۵٪، ۵۵٪ و ۱۰۱.۳۵٪ افزایش یافتند (اکرم و همکاران، ۲۰۲۴).

در میان انواع مختلف الیاف، الیاف بازالت به دلیل خواص مکانیکی مناسب، پایداری حرارتی و سازگاری مطلوب با قیر، به‌عنوان گزینه‌ای امیدبخش برای بهبود رفتار مخلوط‌های آسفالتی مطرح شده‌اند (هوپی و همکاران، ۲۰۲۲). مطالعات پیشین نشان داده‌اند که افزودن الیاف بازالت می‌تواند منجر به افزایش انرژی شکست و بهبود مقاومت در برابر گسترش ترک شود (رن و همکاران، ۲۰۲۴). با این حال، نتایج گزارش شده همواره یکنواخت نبوده و در برخی موارد، افزایش مقدار الیاف موجب کاهش کارایی شکست شده است. این مسئله بیانگر آن است که رفتار ترک‌خوردگی مخلوط‌های حاوی الیاف بازالت تابعی از مقدار الیاف بوده و نیازمند بررسی دقیق مبتنی بر پارامترهای شکست است. علاوه بر این، بخش قابل‌توجهی از مطالعات موجود، صرفاً به مقایسه کلی عملکرد ترک‌خوردگی پرداخته‌اند و تحلیل تفصیلی پارامترهای

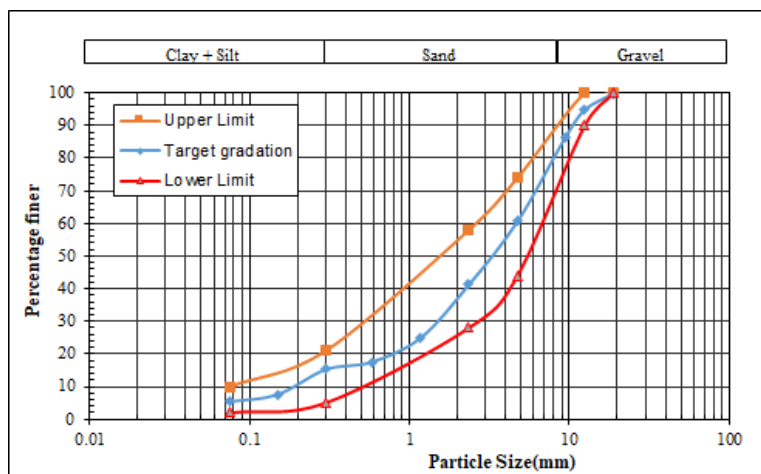
1- Flexibility Index

2- Crack Resistance Index

(علیزاده و همکاران، ۲۰۲۳). مشخصات فیزیکی و مکانیکی اصلی این قیر در جدول ۲ ارائه شده است. برای افزایش مقاومت ترک خوردگی در مخلوط آسفالتی این مطالعه، از الیاف بازالت طبیعی به عنوان ماده تقویت کننده استفاده شد. این الیاف به طور مستقیم و به روش خشک به مخلوط اضافه گردیدند تا یک شبکه تقویت کننده در مخلوط آسفالتی ایجاد کنند (ژائو و همکاران، ۲۰۲۰). از نظر فیزیکی، سطح الیاف صاف و یکنواخت بوده و ساختار شیمیایی آن ها پایدار است، بنابراین در برابر اکسیداسیون و شرایط محیطی مقاومت خوبی نشان می دهند. تصویری از الیاف مورد استفاده در مقیاس واقعی و میکروسکوپی در شکل های ۲ و ۳ ارائه شده است. همچنین برخی از خصوصیات فیزیکی الیاف در جدول ۳ نشان داده شده است.

ریز چسبیده حذف گردد. شکل ۱، نمودار دانه بندی مصالح سنگی این تحقیق را نشان می دهد. ویژگی های حجمی سنگدانه ها به عنوان پارامترهای پایه در طراحی مخلوط مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور، وزن مخصوص و جذب آب اجزای مختلف مخلوط سنگی اندازه گیری شد. برای سنگدانه های درشت، روش پیشنهادی در استاندارد AASHTO T85 و برای بخش ریزدانه، رویه ارائه شده در استاندارد AASHTO T84 مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از این اندازه گیری ها به منظور استفاده در مراحل بعدی تحلیل، در جدول ۱ ارائه شده است.

قیر پایه مورد استفاده در این مطالعه، PG64-16 تولید پالایشگاه نفت پاسارگاد است. این نوع قیر به دلیل خواص عملکردی مناسب، به طور گسترده در پروژه های روسازی راه در ایران به کار گرفته می شود



شکل ۱. منحنی دانه بندی مورد استفاده برای مصالح سنگی مخلوط آسفالتی در این تحقیق

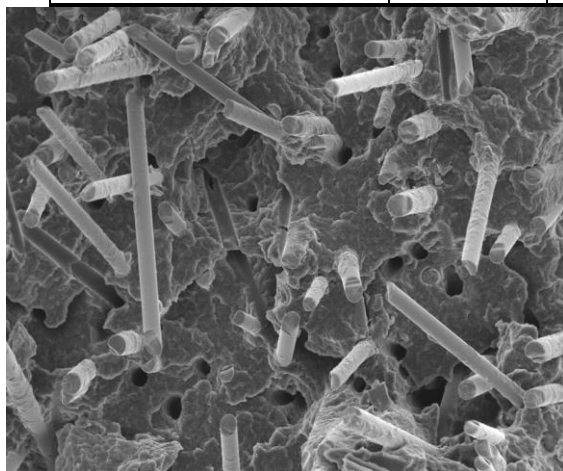
جدول ۱. خصوصیات فیزیکی مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق

نوع مصالح سنگی	وزن مخصوص حجمی (Kg/m^3)	وزن مخصوص ظاهری (Kg/m^3)	جذب آب (%)
مانده روی الک ۸	۲.۶۸۵	۲.۶۳۸	۰.۷
رد شده از الک ۸ و مانده روی الک ۲۰۰	۲.۷۰۸	۲.۶۱۹	۱.۳
رد شده از الک ۲۰۰	۲.۷۲۳	—	—
ترکیب مصالح (Gsb)	—	۲.۶۳۵	—

ارزیابی عملکرد شکست مخلوط‌های آسفالتی مسلح شده با الیاف بازالت بر پایه آزمون خمش نیم دایره‌ای

جدول ۲. خصوصیات قیر پایه مورد استفاده در این تحقیق

مقدار آزمایش	محدوده استاندارد	استاندارد	خصوصیات
۶۴	۶۰-۷۰	ASTM D5	درجه نفوذ در 25°C (0.1 mm)
۵۲	۴۹-۵۶	ASTM D36	نقطه نرمی ($^{\circ}\text{C}$)
۱۲۳	$100 \leq$	ASTM D113	شکل پذیری در 25°C (cm)
۱.۳۴	$3 \geq$	ASTM D4402	ویسکوزیته دورانی در 135°C (Pa.s)
۱.۰۲۵	-	ASTM D70	چگالی (g/cm^3)



شکل ۳. تصویر SEM از الیاف بازالت در زوم $100\mu\text{m}$

شکل ۲. تصویر الیاف بازالت مورد استفاده در این تحقیق

جدول ۳. خصوصیات الیاف بازالت مورد استفاده در این تحقیق

مقدار	خصوصیات
۸	طول متوسط (mm)
۱۵	قطر متوسط (μm)
۲/۷	چگالی (g/cm^3)
۳۳۵۰	مقاومت کششی (MPa)
۹۲	مدول الاستیسیته (GPa)
تا ۷۰۰ بدون تخریب	دمای کاربرد ($^{\circ}\text{C}$)

۱.۲. ساخت مخلوط آسفالتی

ویژگی‌های فیزیکی هر جزء انجام شد. ابتدا سنگدانه‌ها پیش گرم شدند تا رطوبت سطحی حذف و شرایط برای پوشش یکنواخت قیر فراهم گردد. سپس دانه‌بندی

در این تحقیق، مراحل آماده‌سازی مخلوط‌های آسفالتی با تمرکز بر توزیع یکنواخت الیاف بازالت و کنترل

سنگدانه‌ها بررسی و تنظیم شد تا با منحنی هدف مطابقت داشته باشد.

الیاف بازالت در مقادیر ۰.۲، ۰.۳، ۰.۴ و ۰.۵ درصد وزنی مخلوط، پیش از افزودن قیر با سنگدانه‌های گرم ترکیب شدند تا همگنی در سراسر مخلوط تضمین شود. پس از این مرحله، قیر پایه در دمای کنترل شده به ترکیب اضافه گردید. اختلاط با میکسر مکانیکی برای مدتی کوتاه ادامه یافت تا از تجمع الیاف جلوگیری شود و پوشش کامل قیر روی سنگدانه‌ها حاصل گردد. نمونه‌ها سپس با استفاده از دستگاه تراکم مارشال تحت ۷۵ ضربه در هر سمت خودشان متراکم شدند. آزمایش‌های مارشال مقدار بهینه قیر را مشخص کرد که برای تمامی نمونه‌ها یکسان در نظر گرفته شد. این مقدار ۵.۲ درصد بدست آمد. در نهایت، نمونه‌ها برای انجام آزمایش‌های عملکردی SCB و دیگر ارزیابی‌ها آماده شدند.

۲.۲. آزمون خمش نیم‌دایره‌ای (SCB)

آزمایش SCB به دلیل سادگی و قابلیت اطمینان داده‌ها معمولاً برای تعیین مکانیک شکست در مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شود. برای انجام این آزمایش، ابتدا نمونه‌ی آسفالتی استوانه‌ای مارشال به قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۶.۳۵ سانتی‌متر ایجاد و به نمونه‌های نیم‌دایره به ضخامت ۳ سانتی‌متر و شعاع ۵ سانتی‌متر تبدیل و در مرکز نمونه‌ها ترکی به‌اندازه‌ی ۱ سانتی‌متر و به ضخامت ۲ میلی‌متر ایجاد شد. قبل از انجام آزمایش نمونه‌ها به مدت ۴ ساعت در دماهای ۱۰، صفر و ۱۰- درجه قرار گرفتند و پس از طی شدن شرایط دمایی، نمونه نیم‌دایره روی تکیه‌گاه‌های ثابت که فاصله مرکز تا مرکز آن ۸ سانتی‌متر است جای گذاری شد. در ادامه، نمونه با سرعت ۴۳.۹۵ میلی‌متر بر دقیقه تحت بارگذاری شکسته و پارامترهای نیرو و جابه‌جایی ثبت شد. قابل ذکر است

که تمام مراحل این آزمایش طبق استاندارد AASHTO TP105 انجام پذیرفت. پارامترهای مختلف مکانیک شکست مانند بار بحرانی، انرژی شکست، چقرمگی شکست و نشانه مقاومت در برابر ترک‌خوردگی با استفاده از نمودار نیرو-جابه‌جایی که از آزمایش SCB به دست می‌آید، محاسبه می‌گردد. انرژی شکست (G_f) با توجه به معادله‌های ۱ تا ۳ قابل محاسبه می‌باشد که در آن G_f انرژی شکست (J/m^2)، W_f مقدار کار لازم برای شکست (J)، و A_{lig} مساحت ناحیه شکست (m^2)، r شعاع نمونه، a طول ترک و t ضخامت نمونه هر سه بر حسب m می‌باشند.

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

$$W_f = \int P du \quad (2)$$

$$A_{lig} = (r - a) \times t \quad (3)$$

همچنین، چقرمگی شکست در مدهای اول و دوم (K_{II} و K_I) بر حسب $MPa.m^{0.5}$ که شاخص‌های تعیین مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر شکست در دماهای پایین (در این تحقیق صفر و ۱۰- درجه) می‌باشند، از معادلات ۴ و ۵ قابل محاسبه بوده که در آن P_c بار بحرانی (MN)، و Y_I و Y_{II} پارامترهای بی‌بعد ضریب شدت تنش می‌باشند که مطابق رابطه ۵ قابل تعیین می‌باشند. علاوه بر آن، چقرمگی شکست در مد ترکیبی نیز از طریق معادله ۶ محاسبه می‌گردد.

$$K_I = \frac{P_c}{2rt} \sqrt{\pi a Y_I} \quad (4)$$

$$K_{II} = \frac{P_c}{2rt} \sqrt{\pi a Y_{II}} \quad (5)$$

$$K_{I/II} = \sqrt{(K_I^2 + K_{II}^2)} \quad (6)$$

علاوه بر این، برای ارزیابی مقاومت مخلوط آسفالتی در

برابر ترک‌خوردگی در دمای متوسط (در این تحقیق ۱۰ درجه سلسیوس) نیز از شاخص CRI استفاده می‌شود که طبق معادله ۷ تعیین می‌گردد که در آن G_f برحسب ژول بر مترمربع و P_c برحسب کیلونیوتن است.

$$CRI = \frac{G_f}{P_c} \quad (7)$$

۳. نتایج و تحلیل‌ها

۳.۱. ارزیابی بار بحرانی (P_{cr})

بار بحرانی (P_{cr}) یکی از شاخص‌های کلیدی در ارزیابی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر شروع ترک تحت تنش کششی است و نشان‌دهنده توان مخلوط برای تحمل بار پیش از شروع شکست می‌باشد. تغییرات این پارامتر تحت تأثیر دما و درصد الیاف بازالت مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن در شکل‌های ۴ تا ۶ برای سه دمای ۱۰-، ۰ و ۱۰ درجه و سه حالت بارگذاری Mode I، Mode II و ترکیبی Mode I/II ارائه شده است.

در دمای پایین (۱۰-°C) و در حالت Mode I و ترکیبی، P_{cr} نمونه‌ها با افزودن ۰.۲ درصد الیاف دچار کاهش جزئی حدود ۶-۵٪ نسبت به نمونه کنترل گردید. این کاهش ابتدایی می‌تواند به دلیل پراکندگی ناقص الیاف و تشکیل نقاط تمرکز تنش موضعی در خوشه‌های کوچک الیاف رخ داده باشد. در مقدار الیاف کم و ناچیز، شبکه سه‌بعدی تقویتی مورد انتظار هنوز به طور کامل فعال نشده و اثرگذاری تقویتی محدود است. با افزایش درصد الیاف به ۰.۳، ۰.۴ و ۰.۵، P_{cr} به ترتیب حدود ۵٪، ۶٪ و ۱۳٪ افزایش یافت و بیشترین مقدار در ۰.۵٪ مشاهده شد. در Mode II، افزایش P_{cr} با درصدهای بالاتر حدود ۴-۳٪ بود، که نشان‌دهنده اثر محدودتر الیاف در شکست‌های غالب برشی است، چرا

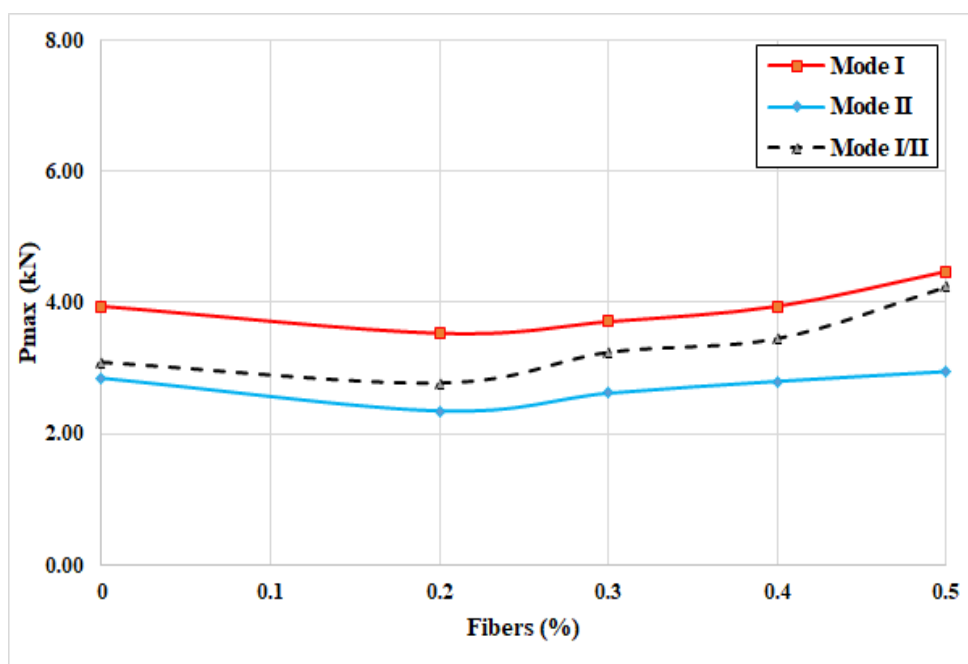
که شبکه الیاف در شرایط برشی کمتر فعال می‌شود. نمونه‌های ترکیبی الگو مشابه Mode I داشتند اما افزایش P_{cr} در ۰.۵ درصد حدود ۱۵٪ بود، که به دلیل اثر همزمان شبکه الیاف و توزیع تنش چندمحوره است. در دمای میانی (۰°C)، روند تغییرات پیچیده‌تر است. در Mode I، P_{cr} تا ۰.۳ درصد الیاف حدود ۸٪ افزایش یافت، اما در ۰.۴ و ۰.۵ درصد کاهش جزئی حدود ۳-۲٪ مشاهده شد. نمونه حاوی ۰.۲ درصد الیاف در وضعیت مد برشی (II) کاهش قابل توجه حدود ۴۰٪ را در مقدار بار بحرانی ثبت نمود. سپس در ۰.۳ درصد الیاف حدود ۶٪ افزایش رخ داد و در درصدهای بالاتر کاهش جزئی ادامه یافت. نمونه‌های ترکیبی رفتار مشابهی داشتند و حاکی از وجود مقدار بهینه‌ای حدود ۰.۳ درصد الیاف برای بیشترین P_{cr} هستند. این الگو نشان می‌دهد که در دماهای متوسط، پراکندگی ناقص و احتمال تشکیل خوشه‌های کوچک الیاف می‌تواند به کاهش جزئی بار بحرانی در درصدهای پایین و بالاتر منجر شود، در حالی که درصدهای متوسط الیاف باعث ایجاد تقویت مؤثر شبکه‌ای و افزایش P_{cr} می‌شوند.

در دمای بالاتر (۱۰°C)، همه نمونه‌ها کاهش کلی P_{cr} حدود ۲۰-۱۵٪ را نسبت به شرایط سردتر (دمای پایین تر) نشان می‌دهند که ناشی از نرم شدن قیر و کاهش مقاومت مخلوط است. در Mode I و ترکیبی، P_{cr} در درصدهای متوسط الیاف (۰.۳-۰.۴) حدود ۱۰-۵٪ افزایش داشت، در حالی که در Mode II کاهش ۱۰-۵٪ با افزایش درصد الیاف مشاهده شد. این روند بیانگر آن است که اثرگذاری الیاف به شدت وابسته به دما و نوع شکست است؛ شبکه الیاف در دماهای پایین و تحت بارگذاری کششی بیشترین بهبود را ایجاد می‌کند، اما در دماهای بالا و تحت بار برشی، اثر آن محدود می‌شود.

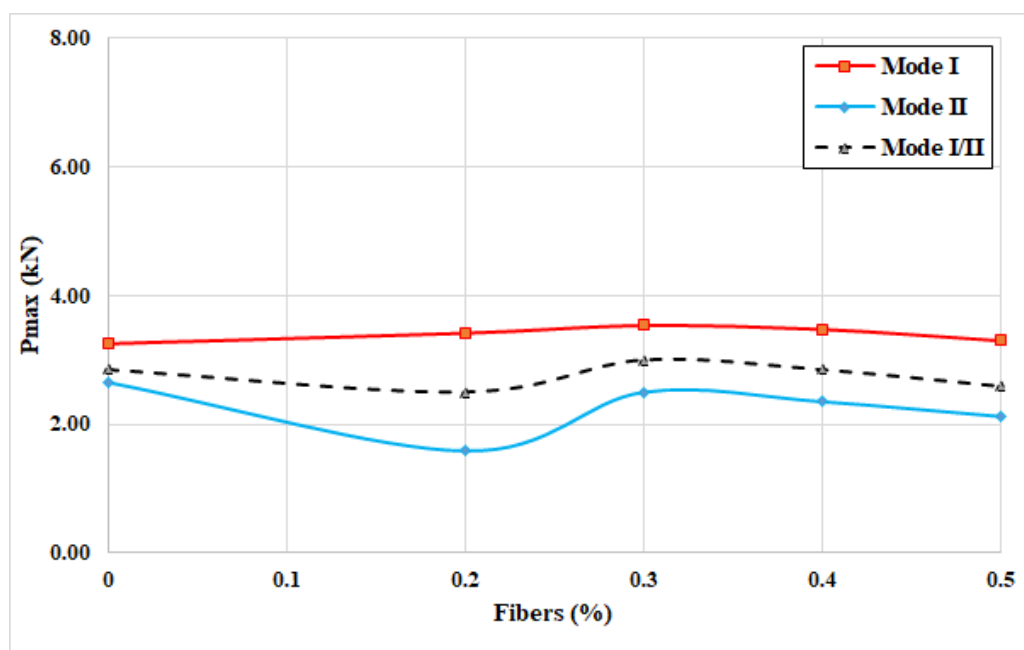
تحلیل یکپارچه نشان می‌دهد که درصد پایین الیاف

سازگاری شیمیایی با قیر، باعث چسبندگی بهتر و افزایش اثربخشی الیاف می‌شوند. به ویژه در دماهای پایین، این ویژگی‌ها اثر مثبت بیشتری دارند. در حالی که در دماهای بالا، نرم شدن قیر باعث محدود شدن نسبت الاستیسیته مخلوط و اثرگذاری الیاف می‌شود.

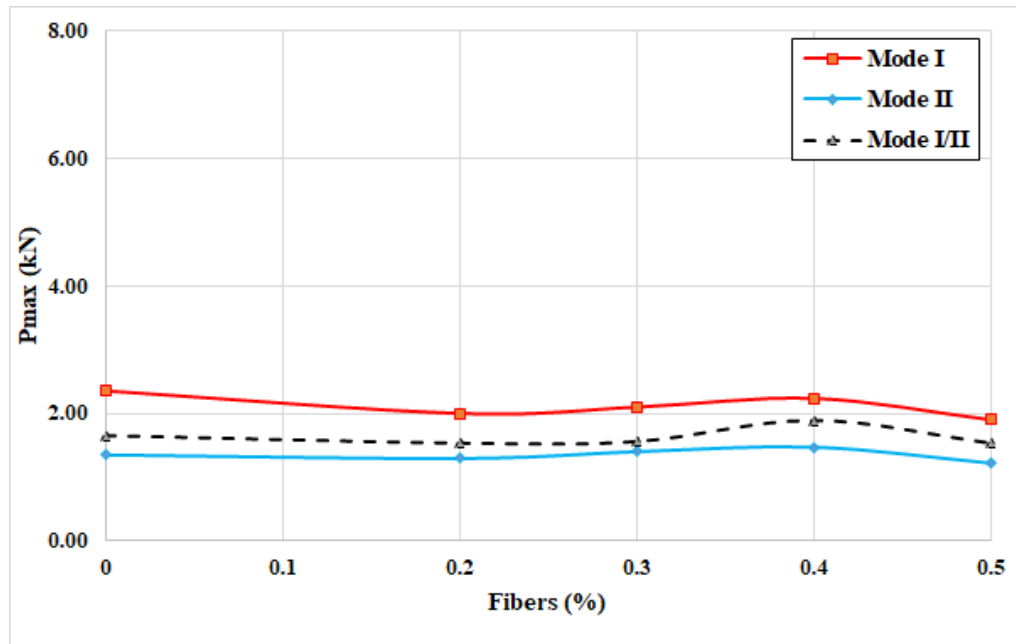
(۰.۲٪) ممکن است کاهش جزئی P_{cr} نسبت به نمونه بدون الیاف را به همراه داشته باشد، افزایش درصد الیاف به ۰.۳-۰.۵٪ باعث بهبود ۵-۱۵٪ در P_{cr} می‌شود. ویژگی‌های مکانیکی الیاف بازالیت، شامل مقاومت کششی بالا، مدول الاستیسیته مناسب، سطح صاف و



شکل ۴. مقادیر P_{cr} نمونه‌های آسفالتی در دمای ۱۰- درجه سلسیوس



شکل ۵. مقادیر P_{cr} نمونه‌های آسفالتی در دمای صفر درجه سلسیوس



شکل ۶. مقادیر Pcr نمونه‌های آسفالتی در دمای ۱۰+ درجه سلسیوس

با افزایش درصد الیاف از ۰.۳ به بالا، اختلاف بین Mode I و Mode II تا حدی کاهش می‌یابد، به‌طوری‌که میزان افت Pcr از Mode I به Mode II در مخلوط‌های دارای الیاف بالا، کمتر از نمونه‌های بدون الیاف است. این موضوع نشان می‌دهد که الیاف بازالت توانسته‌اند تا حدی حساسیت مخلوط به تغییر مد شکست را کاهش دهند و رفتار سازه‌ای پایداری ایجاد کنند. به بیان دیگر، حضور شبکه الیاف می‌تواند باعث توزیع یکنواخت‌تر تنش و تأخیر در تمرکز تنش‌های بحرانی در ناحیه ترک شود.

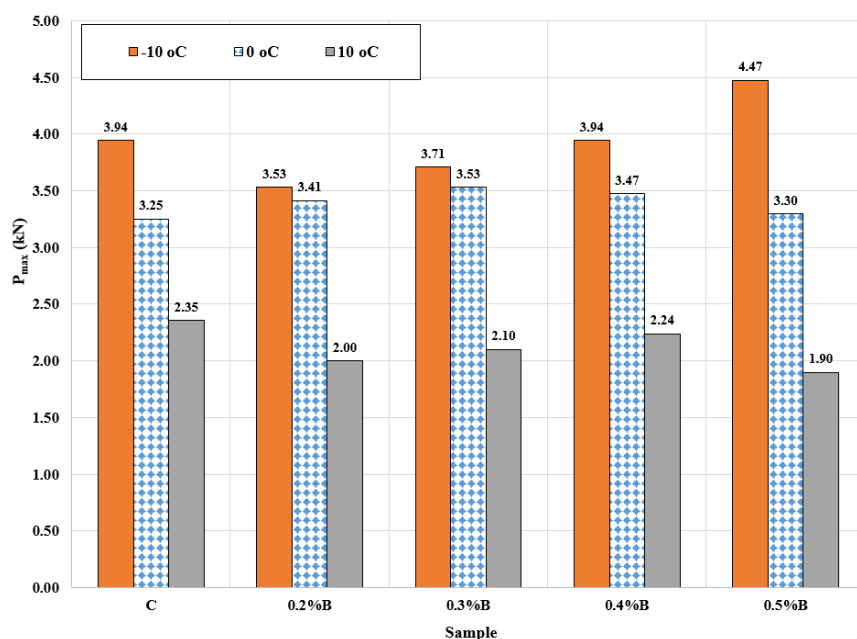
در Mode I، افزودن الیاف منجر به افزایش محسوس بار بحرانی شده است؛ به‌طوری‌که در بالاترین درصد الیاف، افزایش Pcr نسبت به نمونه بدون الیاف به حدود ۱۵ تا ۳۰ درصد می‌رسد. این بهبود قابل توجه را می‌توان به فعال شدن مؤثر مکانیزم پل‌زنی الیاف در امتداد بازشدگی ترک نسبت داد؛ به‌گونه‌ای که الیاف با انتقال تنش کششی از مخلوط آسفالتی، مانع از گسترش سریع ترک شده و شروع شکست را به تعویق می‌اندازند.

به‌منظور بررسی اثر نوع مد شکست بر بار بحرانی مخلوط‌های آسفالتی مسلح‌شده با الیاف بازالت، نتایج Pcr در سه مد Mode I، Mode II و Mode I/II در شکل‌های ۷ تا ۹ مورد بررسی قرار گرفتند. در این بخش، تمرکز اصلی بر مقایسه پاسخ بار بحرانی در مدهای مختلف و تبیین نقش الیاف در هر مد است.

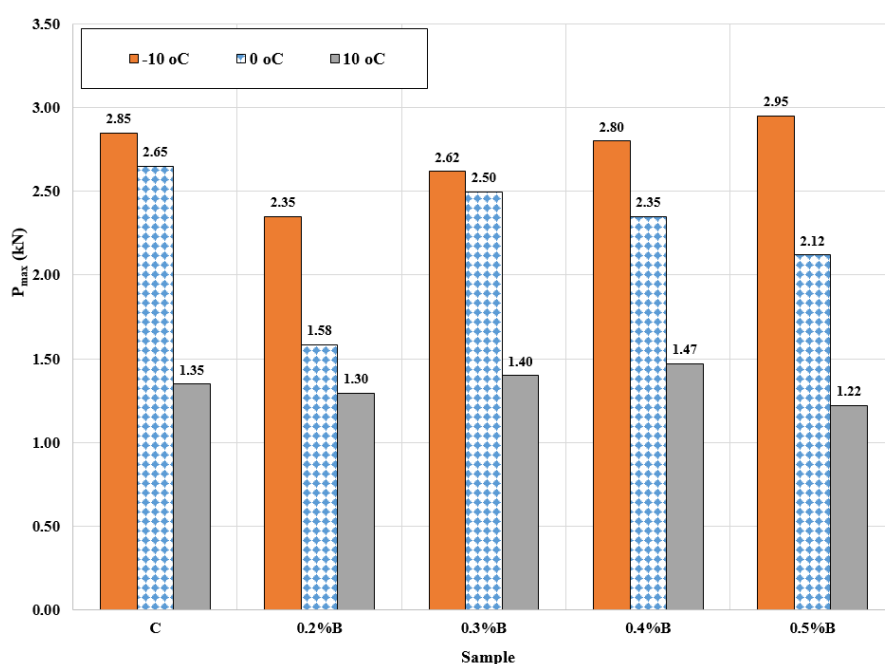
نتایج نشان می‌دهد که در تمامی درصدهای الیاف، تغییر مد شکست از Mode I به Mode II با کاهش قابل توجه بار بحرانی همراه است. به‌طور متوسط، مقادیر Pcr در Mode II حدود ۲۵ تا ۴۰ درصد کمتر از Mode I بوده‌اند که این اختلاف بیانگر حساسیت بالاتر مخلوط آسفالتی به تنش‌های برشی نسبت به تنش‌های کششی است. در حالت Mode I/II، بار بحرانی معمولاً بین این دو مد قرار گرفته و در مقایسه با Mode I کاهش حدود ۱۰ تا ۲۵ درصدی را نشان می‌دهد، در حالی که نسبت به Mode II افزایش حدود ۱۰ تا ۳۰ درصدی دارد. این رفتار میانی نشان‌دهنده مشارکت هم‌زمان مکانیزم‌های کششی و برشی در شروع شکست است.

شکست‌های غالب برشی نقش ثانویه‌ای ایفا می‌کنند. در این مد، مقاومت مخلوط بیشتر تابع قفل و بست سنگدانه‌ها و پیوستگی قیر است و الیاف تنها در درصدهای بالاتر می‌توانند به صورت غیرمستقیم در افزایش انسجام داخلی مؤثر واقع شوند.

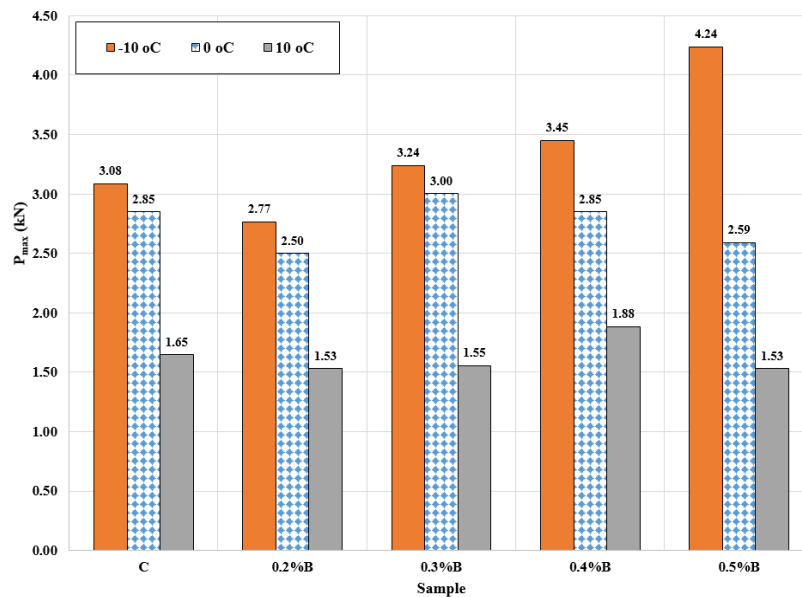
در Mode II، اگرچه روند کلی با افزایش درصد الیاف صعودی است، اما میزان بهبود بار بحرانی محدودتر بوده و معمولاً در بازه ۵ تا ۱۵ درصد قرار دارد. این رفتار نشان می‌دهد که الیاف بازالت، که عمدتاً در برابر تنش کششی عملکرد مؤثری دارند، در



شکل ۷. مقادیر Pcr نمونه‌های آسفالتی در حالت بارگذاری کششی (Mode I)



شکل ۸. مقادیر Pcr نمونه‌های آسفالتی در حالت بارگذاری برشی (Mode II)



شکل ۹. مقادیر Pcr نمونه‌های آسفالتی در حالت بارگذاری ترکیبی (Mode I/II)

۲.۳. ارزیابی انرژی شکست

انرژی شکست به‌عنوان شاخصی از توانایی مخلوط آسفالتی در جذب و اتلاف انرژی پیش از گسیختگی کامل، نقش مهمی در ارزیابی مقاومت ترک‌خوردگی، به‌ویژه در شرایط دمایی مختلف، ایفا می‌کند. شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ تغییرات انرژی شکست را در سه دمای ۱۰-، صفر و ۱۰ درجه سلسیوس و برای مدهای مختلف شکست، در برابر درصدهای مختلف الیاف بازالیت نشان می‌دهند.

در دمای ۱۰- درجه، انرژی شکست در هر سه مد شکست مقادیر نسبتاً پایین‌تری نسبت به دماهای بالاتر دارد که این موضوع با رفتار تردتر قیر در دماهای پایین هم‌خوانی دارد. با این حال، افزودن الیاف بازالیت تأثیر مشخصی بر بهبود ظرفیت جذب انرژی مخلوط نشان می‌دهد. در هر سه مد شکست، نمونه‌های حاوی ۰.۲٪ الیاف کاهش قابل توجهی در انرژی شکست نسبت به نمونه شاهد از خود نشان می‌دهند؛ به‌طوری که این افت در برخی حالات به حدود ۳۰-۳۵٪ می‌رسد. این رفتار بیانگر آن است که در سطوح پایین الیاف، هنوز شبکه

رفتار نمونه‌های حاوی ۰.۲ درصد الیاف در هر سه مد شکست قابل توجه است. در این درصدها، بار بحرانی در بسیاری از موارد نسبت به نمونه بدون الیاف کاهش یافته یا بهبود معناداری نشان نمی‌دهد. این کاهش که در برخی مدها به حدود ۵ تا ۱۵ درصد نیز می‌رسد، بیانگر آن است که مقدار الیاف کمتر از حد آستانه لازم برای تشکیل شبکه تقویتی پیوسته بوده است. در چنین شرایطی، الیاف پراکنده می‌توانند به‌عنوان ناپیوستگی موضعی عمل کرده و با ایجاد تمرکز تنش در فصل مشترک قیر-الیاف، موجب کاهش ظرفیت تحمل بار شوند. با افزایش درصد الیاف به ۰.۳ و بالاتر، این اثر منفی برطرف شده و روند افزایشی Pcr در تمامی مدهای شکست تثبیت می‌شود.

در مجموع، تحلیل نتایج نشان می‌دهد که تغییر مد شکست تأثیر چشمگیری بر مقدار بار بحرانی دارد و این تأثیر در حضور الیاف بازالیت تعدیل می‌شود. بیشترین حساسیت به تغییر مد در نمونه‌های بدون الیاف و کمترین حساسیت در مخلوط‌های دارای درصد بالاتر الیاف مشاهده می‌شود.

تقویتی مؤثری در مخلوط شکل نگرفته و حتی حضور غیرهمگن الیاف می‌تواند باعث تسریع تمرکز تنش و کاهش انرژی قابل جذب پیش از شکست شود. با افزایش درصد الیاف به ۰.۳٪، روند انرژی شکست معکوس شده و افزایش محسوسی مشاهده می‌شود، به‌گونه‌ای که انرژی شکست در این سطح حدود ۲۵-۱۵٪ نسبت به نمونه ۰.۲٪ افزایش می‌یابد. این روند افزایشی در درصدهای ۰.۴ و ۰.۵٪ ادامه یافته و در این سطوح، بیشترین مقادیر انرژی شکست در دمای ۱۰- درجه ثبت شد.

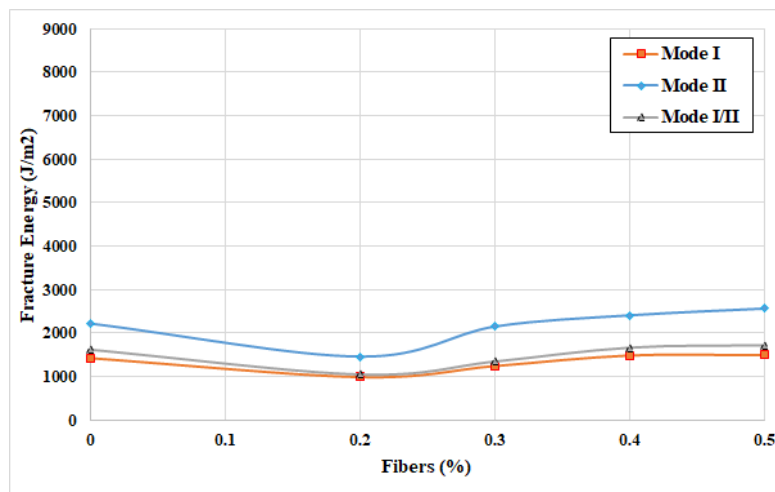
در دمای صفر درجه، سطح کلی انرژی شکست در تمامی مدهای شکست نسبت به دمای ۱۰- درجه افزایش یافت که بیانگر افزایش انعطاف‌پذیری مخلوط آسفالتی و بهبود توان تغییرشکل آن است. در این دما نیز الگوی رفتاری مشابهی در ارتباط با درصد الیاف مشاهده می‌شود. در مد I و مد ترکیبی، افزودن ۰.۲٪ الیاف منجر به افت انرژی شکست در حدود ۲۵-۲۰٪ نسبت به نمونه بدون الیاف شد، در حالی که با افزایش درصد الیاف به ۰.۳٪ و ۰.۴٪، انرژی شکست رشد قابل توجهی پیدا کرده و به مقادیر بیشینه رسیده است. در مد II، این افزایش حتی بارزتر بوده و رشد انرژی شکست از ۰.۲٪ به ۰.۴٪ الیاف در حدود ۳۰٪ قابل مشاهده است. با این حال، در برخی حالات، در درصد ۰.۵٪ الیاف، کاهش نسبی انرژی شکست نسبت به ۰.۴٪ رخ می‌دهد که می‌تواند ناشی از افزایش سفتی موضعی مخلوط و محدود شدن توان تغییرشکل پلاستیک پیش از شکست باشد. این موضوع نشان می‌دهد که در دمای میانی، ۰.۴ درصد الیاف برای بیشینه‌سازی انرژی شکست مقداری بهینه است.

در دمای ۱۰ درجه سلسیوس، بیشترین مقادیر انرژی شکست در تمامی مدهای شکست مشاهده می‌شود که

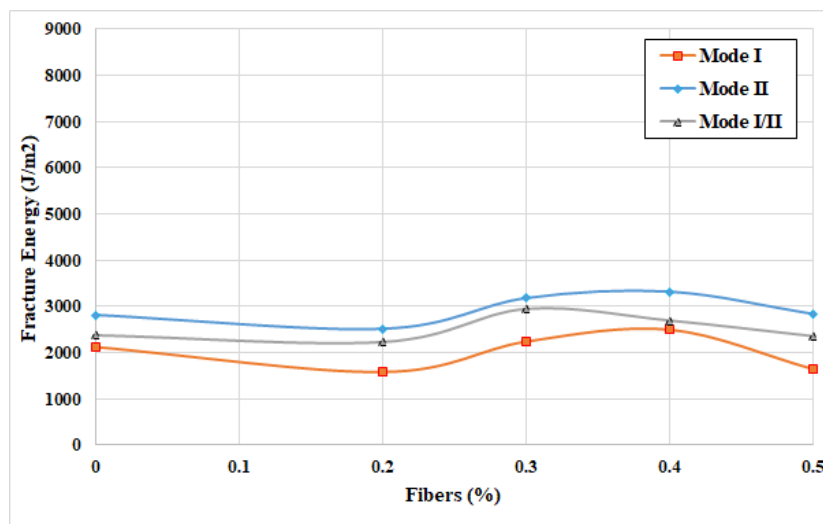
ناشی از نرم‌تر شدن قیر و افزایش سهم تغییرشکل‌های غیرخطی در فرآیند شکست است. در این دما، اگرچه روند کلی افزایش انرژی شکست با افزودن الیاف همچنان حفظ می‌شود، اما شدت اثر الیاف نسبت به دماهای پایین‌تر تا حدی کاهش می‌یابد. در مد I، افزودن ۰.۲٪ الیاف باعث افت انرژی شکست در حدود ۳۰٪ می‌شود، اما با افزایش درصد الیاف به ۰.۳٪ و ۰.۴٪، انرژی شکست به‌طور قابل توجهی افزایش یافته و در برخی حالات بیش از ۷۰٪ نسبت به نمونه ۰.۲٪ رشد نشان داده است. در مد II و مد ترکیبی نیز بیشترین انرژی شکست عمدتاً در نمونه با ۰.۴٪ الیاف مشاهده شده و در ۰.۵٪، کاهش جزئی یا تثبیت مقادیر رخ داده است. این رفتار بیانگر آن است که در دماهای بالاتر، اگرچه الیاف همچنان به افزایش انرژی شکست کمک می‌کنند، اما افزایش بیش از حد درصد الیاف می‌تواند با افزایش سختی مخلوط و کاهش ظرفیت اتلاف انرژی، اثر معکوس ایجاد کند.

به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که انرژی شکست با افزایش دما روند افزایشی دارد، اما حساسیت آن به درصد الیاف در دماهای پایین و میانی بیشتر است. افت مشاهده‌شده در نمونه حاوی ۰.۲٪ الیاف را می‌توان به عدم شکل‌گیری شبکه پیوسته الیاف، پراکندگی ناقص و ایجاد ناپیوستگی‌های موضعی نسبت داد؛ در حالی که در درصدهای بالاتر، الیاف بازال با ایجاد مکانیزم‌های پل‌زنی ترک، افزایش مسیر انتشار ترک و جذب انرژی از طریق کشش و لغزش الیاف، موجب افزایش معنی‌دار انرژی شکست می‌شوند. در عین حال، کاهش یا تثبیت انرژی شکست در نمونه ۰.۵٪ در برخی دماها نشان‌دهنده وجود یک محدوده بهینه الیاف است که فراتر از آن، افزایش سفتی و کاهش قابلیت تغییرشکل مخلوط می‌تواند ظرفیت جذب انرژی را محدود کند.

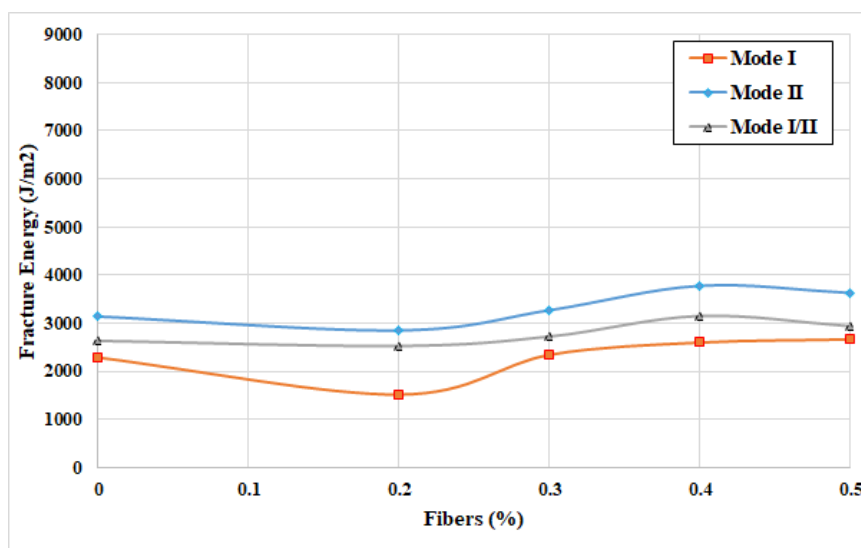
ارزیابی عملکرد شکست مخلوط‌های آسفالتی مسلح شده با الیاف بازالت بر پایه آزمون خمش نیم دایره‌ای



شکل ۱۰. مقادیر انرژی شکست نمونه‌های آسفالتی در دمای ۱۰- درجه سلسیوس



شکل ۱۱. مقادیر انرژی شکست نمونه‌های آسفالتی در دمای صفر درجه سلسیوس



شکل ۱۲. مقادیر انرژی شکست نمونه‌های آسفالتی در دمای ۱۰+ درجه سلسیوس

به منظور بررسی نقش مد بارگذاری بر انرژی شکست، نتایج آزمون SCB برای سه مد شکست I، II و حالت ترکیبی، در درصدهای مختلف الیاف بازالت در شکل های ۱۳ تا ۱۵ مورد مقایسه قرار گرفتند. در تمامی دماها، مد II به طور کلی بیشترین انرژی شکست را نسبت به مد I نشان می دهد، در حالی که مقادیر مربوط به مد ترکیبی بین این دو مد قرار می گیرند. این موضوع بیانگر آن است که مکانیزم های برشی، نسبت به مکانیزم های کششی، ظرفیت بالاتری برای جذب و اتلاف انرژی پیش از شکست فراهم می کنند. از منظر عددی، تغییر مد از Mode I به Mode II منجر به افزایش انرژی شکست در حدود ۲۵ تا ۴۰ درصد (بسته به دما و درصد الیاف) شده است، که نشان دهنده حساسیت بالای انرژی شکست به نوع تنش حاکم بر نمونه است.

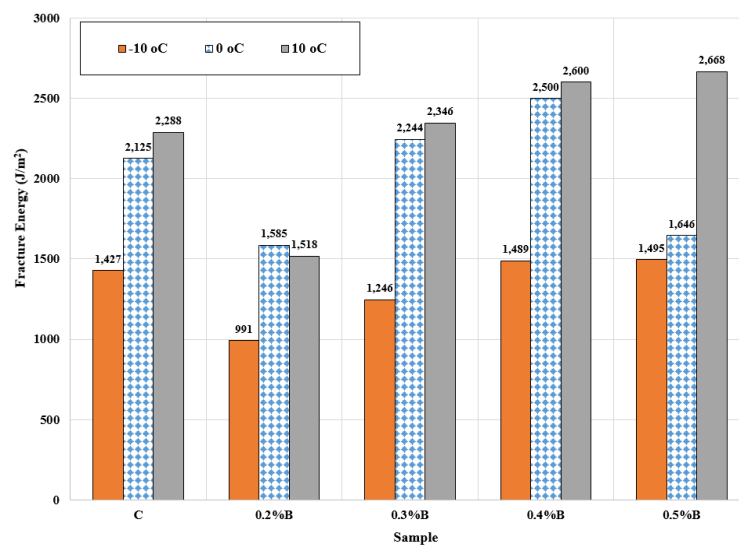
بررسی اثر درصد الیاف در هر مد شکست نشان می دهد که رفتار انرژی شکست به شدت وابسته به ماهیت مد بارگذاری است. در مد I، انرژی شکست نسبت به تغییرات درصد الیاف حساس تر بوده و افت مشاهده شده در نمونه ۰.۲٪ الیاف در تمامی دماها کاملاً مشهود است؛ به طوری که در مقایسه با نمونه بدون الیاف، کاهش انرژی شکست در این مد به حدود ۲۰ تا ۳۵ درصد می رسد. این رفتار مشابه آن چیزی است که در تحلیل دمایی اشاره شد و نشان می دهد که در شرایط غالب کششی، شبکه الیاف در درصدهای پایین قادر به مهار رشد ترک و افزایش مسیر شکست نیست. با افزایش درصد الیاف به ۰.۳ و ۰.۴٪، انرژی شکست در مد I افزایش قابل توجهی پیدا نمود (حدود ۳۰ تا ۶۰ درصد نسبت به ۰.۲٪)، که بیانگر فعال شدن مکانیزم های تقویتی الیاف در برابر بازشدگی ترک است. در مد II، اثر الیاف بر انرژی شکست پایدارتر و یکنواخت تر از مد I مشاهده شد. حتی در نمونه ۰.۲٪

الیاف، افت انرژی شکست نسبت به نمونه شاهد کمتر از مد I است و در برخی حالات به کمتر از ۱۵ درصد محدود شده است. این موضوع نشان می دهد که در میدان تنش غالب برشی، تعامل بین الیاف و ماتریس قیری کاراتر بوده و الیاف حتی در مقادیر کمتر نیز توانسته است در برابر لغزش نسبی سطوح ترک، بخشی از انرژی اعمالی را جذب کنند. با افزایش درصد الیاف تا ۰.۴٪، انرژی شکست در مد II به طور پیوسته افزایش یافت و بیشترین مقادیر در این مد ثبت شدند. در نمونه ۰.۵٪ الیاف، اگرچه همچنان انرژی شکست بالا باقی مانده است، اما نرخ افزایش نسبت به درصدهای قبلی کاهش یافته یا حتی در برخی دماها افت جزئی مشاهده شد که رفتاری مشابه بخش قبل دارد.

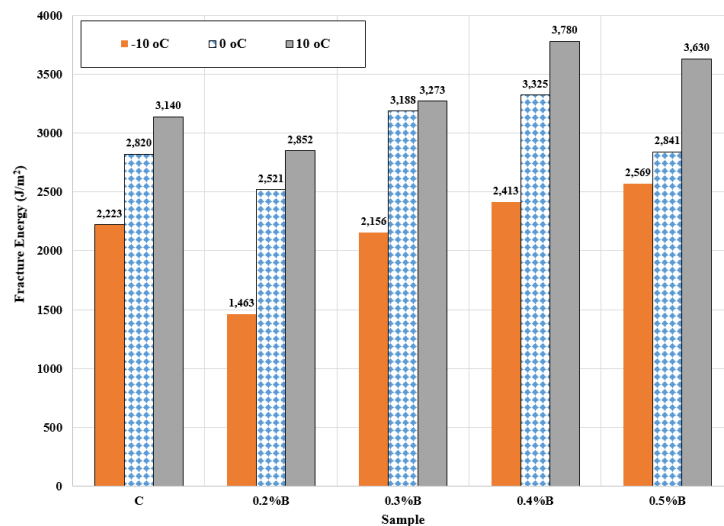
در حالت بارگذاری ترکیبی (Mode I/II)، انرژی شکست رفتاری میانی بین دو مد خالص از خود نشان داد. افزایش درصد الیاف از ۰.۲٪ به ۰.۴٪ در این مد موجب رشد انرژی شکست در حدود ۲۰ تا ۴۵ درصد شد، که نشان می دهد ترکیب مکانیزم های کششی و برشی شرایط مناسبی برای فعال شدن هم زمان پل زنیالیاف و افزایش مسیر انتشار ترک فراهم کرده است. با این حال، مشابه سایر مدها، در نمونه ۰.۵٪ الیاف، افزایش انرژی شکست به حالت اشباع نزدیک شده و در برخی موارد کاهش نسبی مشاهده شد.

به طور کلی، نتایج این بخش نشان داد که تأثیر الیاف بازالت بر انرژی شکست به شدت تابع مد بارگذاری است. در مدهای برشی و ترکیبی، الیاف حتی در درصدهای متوسط عملکرد پایدارتری از خود نشان دادند، در حالی که در مد کششی، بهبود انرژی شکست مستلزم عبور از یک حد آستانه در مقدار الیاف است؛ رفتاری که دلایل مکانیزمی آن در بخش تحلیل دمایی به تفصیل مورد بحث قرار گرفت.

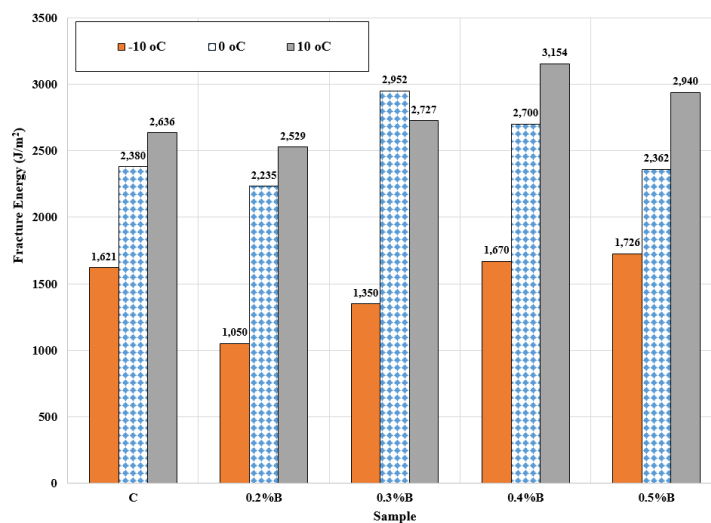
ارزیابی عملکرد شکست مخلوط‌های آسفالتی مسلح شده با الیاف بازالیت بر پایه آزمون خمش نیم دایره‌ای



شکل ۱۳. مقادیر انرژی شکست نمونه‌های آسفالتی در حالت بارگذاری کششی (Mode I)



شکل ۱۴. مقادیر انرژی شکست نمونه‌های آسفالتی در حالت بارگذاری برشی (Mode II)



شکل ۱۵. مقادیر انرژی شکست نمونه‌های آسفالتی در حالت بارگذاری ترکیبی (Mode I/II)

۳.۳. ارزیابی چقرمگی شکست در دماهای پایین

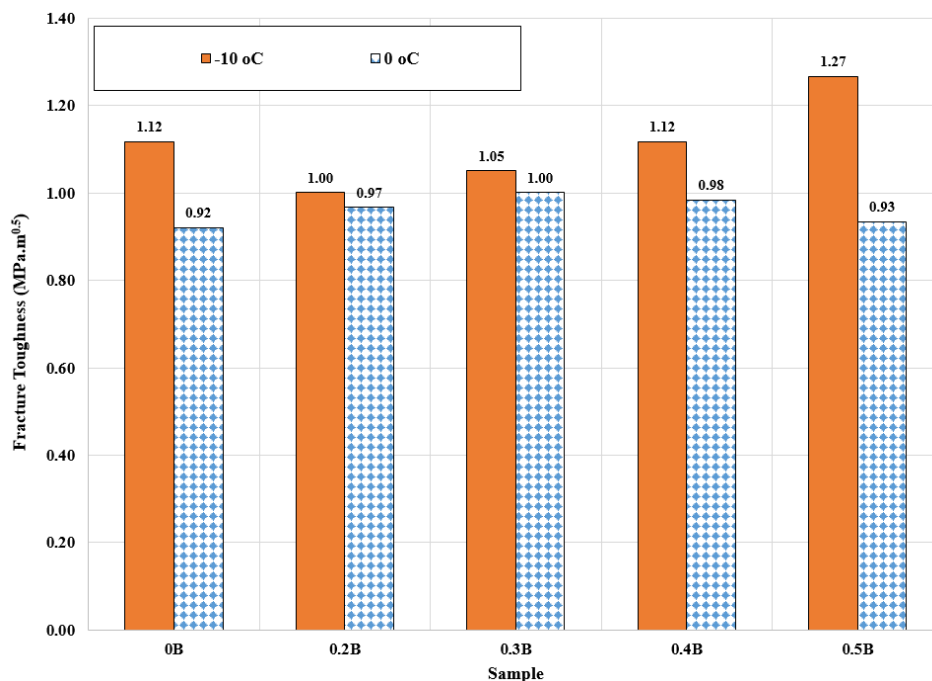
چقرمگی شکست به عنوان شاخصی از مقاومت ذاتی مخلوط آسفالتی در برابر آغاز و گسترش ترک، به ویژه در شرایط دمایی پایین، بیانگر ظرفیت تحمل تنش در نوک ترک پیش از شکست است. نتایج چقرمگی شکست در دماهای ۱۰- و ۰ درجه سلسیوس برای سه مد شکست و درصدهای مختلف الیاف بازالت در شکل های ۱۶ تا ۱۸ نشان داده شده است.

در دمای ۱۰- درجه، بیشترین مقادیر چقرمگی شکست در مد I مشاهده می شود، در حالی که مد II کمترین مقادیر را نشان می دهد و نتایج مد ترکیبی بین این دو قرار گرفته است. این توزیع بیانگر آن است که در دمای بسیار پایین، مقاومت مخلوط در برابر بازشدگی ترک (Mode I) نسبت به لغزش برشی (Mode II) بالاتر است. همچنین انتقال از مد I به مد II منجر به کاهش چقرمگی شکست در حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد شد که اهمیت نوع تنش در کنترل رفتار شکست را نشان می دهد. بررسی اثر درصد الیاف نشان می دهد که در هر سه مد، افزودن ۰.۲٪ الیاف موجب کاهش جزئی چقرمگی شکست نسبت به نمونه بدون الیاف شده است؛ این کاهش در مد II محسوس تر بوده و به حدود ۱۵-۲۰ درصد می رسد. همان گونه که در تحلیل بار بحرانی اشاره شد، این رفتار را می توان به ناکافی بودن مقدار الیاف برای ایجاد یک مسیر مؤثر انتقال تنش در نوک ترک نسبت داد. با افزایش درصد الیاف به ۰.۳ و ۰.۴٪، چقرمگی شکست در تمامی مدها

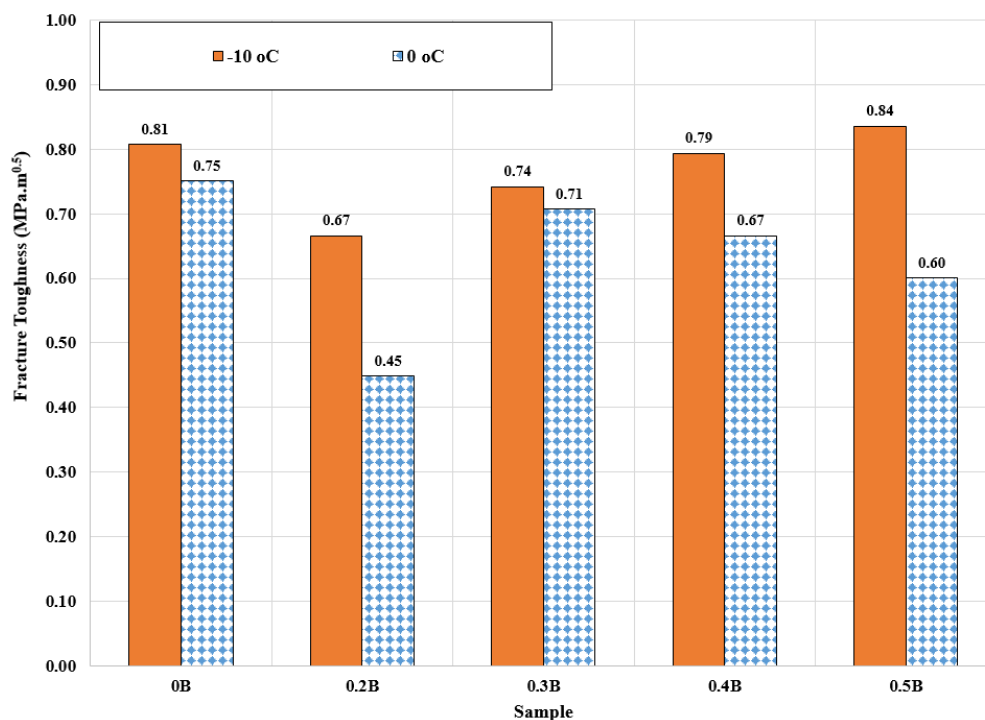
افزایش یافته و در برخی حالات به سطح نمونه شاهد یا بالاتر از آن می رسد. بیشترین مقادیر چقرمگی شکست در دمای ۱۰- درجه معمولاً در درصد ۰.۵٪ الیاف مشاهده شد که نشان دهنده نقش الیاف در افزایش مقاومت اولیه مخلوط در برابر شروع ناپایداری شکست است.

در دمای صفر درجه سلسیوس، سطح کلی چقرمگی شکست در تمامی مدها کاهش یافت که این موضوع با نرم تر شدن قیر و کاهش تمرکز تنش در نوک ترک سازگار است. با این حال، الگوی نسبی بین مدهای شکست همچنان حفظ شد؛ به طوری که مد I بیشترین و مد II کمترین چقرمگی شکست را نشان دادند. در این دما، افزودن ۰.۲٪ الیاف به ویژه در مد II باعث افت قابل توجه چقرمگی شکست (حدود ۴۰-۳۵ درصد نسبت به نمونه بدون الیاف) شد که بیانگر حساسیت بالای شکست برشی به ناپیوستگی های موضعی در ساختار مخلوط آسفالتی است. افزایش درصد الیاف به ۰.۳٪ موجب بازیابی بخش قابل توجهی از چقرمگی شکست شد و در مد I و مد ترکیبی، مقادیر به حدود ۱۰-۵ درصد بالاتر از نمونه شاهد رسید. با این حال، برخلاف دمای ۱۰- درجه، در دمای صفر افزایش بیشتر درصد الیاف تا ۰.۴ و ۰.۵٪ لزوماً منجر به افزایش بیشتر چقرمگی شکست نشد و در برخی حالات حتی افت جزئی مشاهده گردید. این رفتار نشان می دهد که در دمای صفر، افزایش بیش از حد سختی ناشی از الیاف می تواند تمرکز تنش در نوک ترک را تشدید کرده و آغاز شکست را تسریع کند.

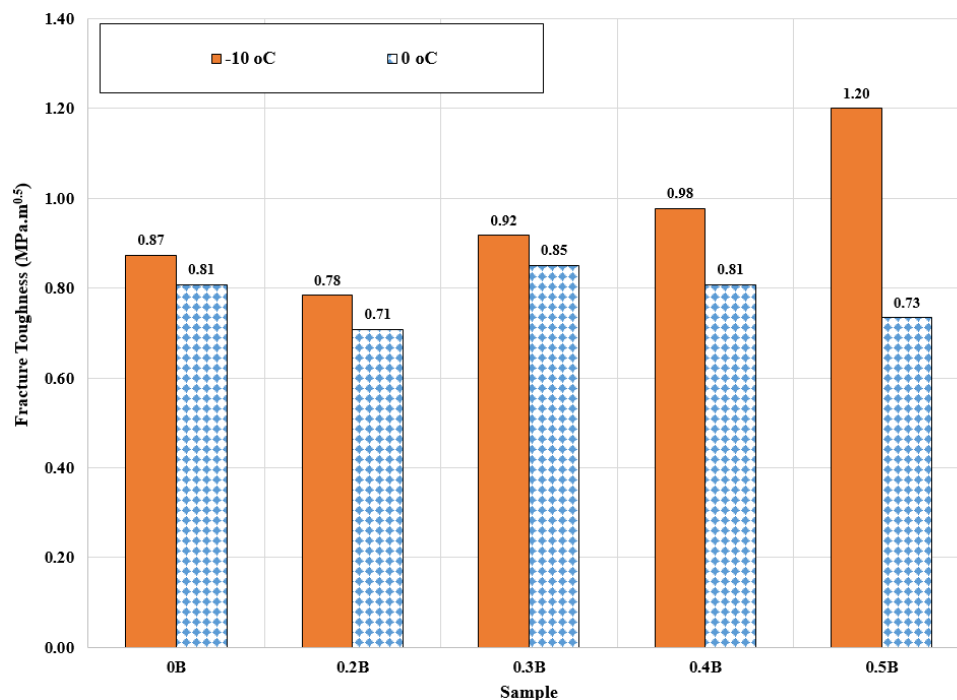
ارزیابی عملکرد شکست مخلوط‌های آسفالتی مسلح شده با الیاف بازالیت بر پایه آزمون خمش نیم دایره‌ای



شکل ۱۶. مقادیر چقرمگی شکست نمونه‌های آسفالتی در حالت بارگذاری کششی (Mode I)



شکل ۱۷. مقادیر چقرمگی شکست نمونه‌های آسفالتی در حالت بارگذاری برشی (Mode II)



شکل ۱۸. مقادیر چقرمگی شکست نمونه‌های آسفالتی در حالت بارگذاری ترکیبی (Mode I/II)

مورد بررسی قرار می‌گیرد. CRI پارامتری ترکیبی است که به‌طور هم‌زمان نقش بار بحرانی (Pc) و انرژی شکست (Gf) را در برابر ترک‌خوردگی مخلوط آسفالتی منعکس می‌کند. شکل ۱۹ تغییرات CRI را برحسب درصد الیاف بازالت برای سه مد بارگذاری (Mode I)، Mode II و مد ترکیبی) نشان می‌دهد.

نتایج نشان می‌دهد که در مد I (کششی)، افزودن الیاف بازالت به‌طور کلی منجر به بهبود شاخص CRI شده است. اگرچه در نمونه حاوی ۰.۲ درصد الیاف کاهش محسوسی نسبت به مخلوط شاهد مشاهده می‌شود (در حدود ۲۰ درصد افت)، اما با افزایش درصد الیاف، روند CRI صعودی بوده و در درصدهای ۰.۴ و ۰.۵ درصد الیاف، افزایش قابل‌توجهی رخ داده است؛ به‌گونه‌ای که در بیشترین درصد الیاف، مقدار CRI نسبت به حالت بدون الیاف بیش از ۴۰ درصد بهبود نشان داده است. این رفتار حاکی از آن است که در دمای ۱۰ درجه، سهم انرژی شکست در مد کششی با افزایش مقدار الیاف پررنگ‌تر شده و اثر افت اولیه PC

در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که چقرمگی شکست، مشابه بار بحرانی، به‌شدت به مد بارگذاری وابسته است، اما نسبت به انرژی شکست حساسیت بیشتری به آغاز ترک دارد تا گسترش آن. افت مشاهده‌شده در نمونه حاوی ۰.۲٪ الیاف در هر دو دما و به‌ویژه در مد II، تأیید می‌کند که برای بهبود مقاومت اولیه در برابر شکست، وجود یک مقدار حداقل مؤثر از الیاف ضروری است؛ موضوعی که پیشتر در تحلیل Pcr نیز به آن اشاره شد. از سوی دیگر، تفاوت رفتار چقرمگی شکست در دماهای ۱۰- و صفر درجه نشان می‌دهد که نقش الیاف در کنترل شکست اولیه در دماهای بسیار پایین پررنگ‌تر بوده و با افزایش دما، این نقش تا حدی تحت تأثیر رفتار نرم‌تر قیر قرار می‌گیرد.

۴.۳. ارزیابی شاخص مقاومت ترک خوردگی در دماهای میانی (CRI)

در این بخش، نتایج شاخص مقاومت در برابر ترک‌خوردگی (CRI) در دمای ۱۰ درجه سلسیوس

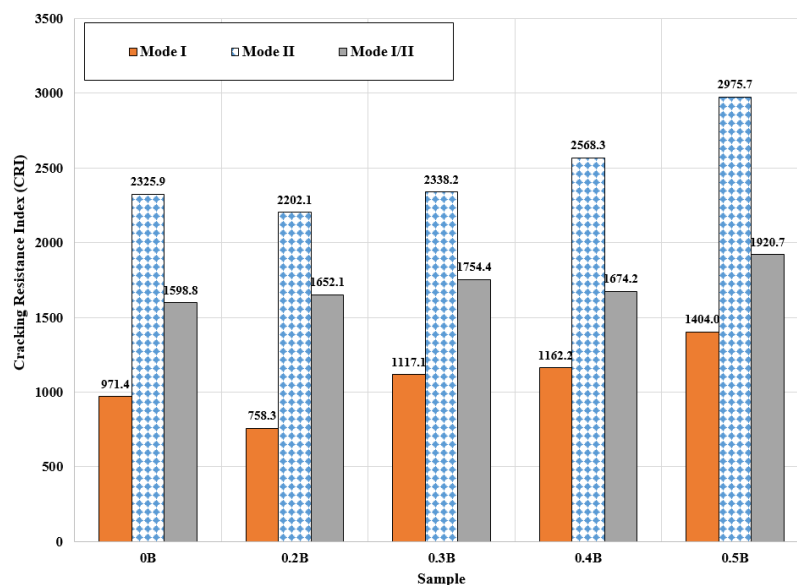
در ۰.۴ درصد الیاف افت جزئی (حدود ۵ درصد) رخ می‌دهد، اما در ۰.۵ درصد الیاف مجدداً CRI افزایش یافته و نسبت به مخلوط شاهد بهبودی در حدود ۲۰ درصد حاصل می‌شود. این نوسان محدود را می‌توان به رقابت میان اثرات مثبت افزایش انرژی شکست و تغییر در سازوکار انتقال تنش در ناحیه نوک ترک نسبت داد که پیشتر در تحلیل‌های بار بحرانی و انرژی شکست نیز به آن اشاره شد.

در مجموع، نتایج این بخش نشان داد که در دمای ۱۰ درجه سلسیوس، افزودن الیاف بازالت (به‌ویژه در درصدهای بالاتر) منجر به بهبود شاخص CRI در هر سه مد بارگذاری شد. کاهش CRI در ۰.۲ درصد الیاف که در همه مدها مشاهده شد، رفتاری سازگار با نتایج بخش‌های قبلی است و می‌تواند ناشی از پخش ناکامل الیاف، ایجاد تمرکز تنش موضعی و عدم شکل‌گیری شبکه الیافی مؤثر باشد. با افزایش درصد الیاف، این محدودیت برطرف شده و نقش الیاف در پل‌زنی ترک‌ها، افزایش ظرفیت جذب انرژی و بهبود مقاومت کلی در برابر ترک‌خوردگی برجسته‌تر می‌شود.

در درصدهای کم الیاف، در مقادیر بالاتر جبران شده است.

در مد خالص II (برشی)، مقادیر CRI به‌طور کلی بزرگ‌تر از مد I هستند که بیانگر مقاومت بالاتر مخلوط در برابر ترک‌خوردگی برشی در این دماست. در این مد نیز در نمونه ۰.۲ درصد الیاف کاهش جزئی CRI نسبت به مخلوط شاهد مشاهده شد (حدود ۵ درصد)، اما با افزایش درصد الیاف، شاخص CRI روندی افزایشی و پایدار دارد. بیشترین مقدار CRI در ۰.۵ درصد الیاف ثبت شده که نسبت به حالت بدون الیاف، افزایشی در حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد را نشان می‌دهد. این رفتار با نتایج بخش‌های پیشین بار بحرانی و انرژی شکست هم‌خوانی دارد، جایی که نشان داده شد الیاف در مد برشی نقش مؤثرتری در مهار رشد ترک و افزایش ظرفیت جذب انرژی ایفا می‌کنند.

در مد ترکیبی (I/II)، تغییرات CRI رفتاری میانی بین دو مد خالص از خود نشان داد. در درصدهای پایین الیاف، افزایش تدریجی CRI مشاهده شد و در ۰.۳ درصد الیاف به مقداری نسبتاً بهینه رسیده است. هرچند



شکل ۱۹. مقادیر CRI نمونه‌های آسفالتی در دمای ۱۰ درجه سلسیوس

۴. نتیجه گیری

این مطالعه به بررسی رفتار ترک خوردگی مخلوط های آسفالتی مسلح شده با الیاف بازالت در دماهای مختلف و تحت مدهای مختلف شکست پرداخت. نمونه های آسفالتی ساخته شده با درصد های مختلف الیاف (۰.۲، ۰.۳، ۰.۴ و ۰.۵ درصد وزنی مخلوط آسفالتی) تحت آزمایش SCB قرار گرفتند. عمده نتایج حاصل از این تحقیق عبارتند از:

- نتایج نشان داد که افزودن الیاف بازالت می تواند تأثیر قابل توجهی بر پارامترهای کلیدی شکست داشته باشد و مکانیزم های مقاومتی مخلوط را تغییر دهد. تحلیل داده ها، همگرایی بین پارامترهای بار بحرانی، انرژی شکست، چقرمگی شکست و شاخص CRI را نشان داد و نشان می دهد که الیاف نقش مهمی در افزایش ظرفیت جذب انرژی و تأخیر در گسترش ترک ها ایفا می کنند.

- با افزایش درصد الیاف از ۰.۲ به ۰.۵ درصد، بار بحرانی در دمای پایین (-10°C) و در مد کششی (Mode I) حدود ۱۳ تا ۱۵٪ افزایش یافت. این افزایش ناشی از تشکیل شبکه سه بعدی تقویتی و توزیع یکنواخت تنش در ناحیه ترک بود که اجازه داد مخلوط پیش از شروع شکست توان باربری بیشتری داشته باشد. در دمای صفر درجه، بیشترین بار بحرانی در نمونه حاوی ۰.۳ درصد الیاف مشاهده شد و درصد های بالاتر باعث کاهش جزئی ۲-۳٪ شد که دلیل آن پراکندگی ناکافی و ایجاد خوشه های موضعی بود.

- انرژی شکست با افزایش درصد الیاف تا ۰.۴ درصد در دمای -10°C تا 25°C و در دمای 0°C تا ۳۰٪ افزایش یافت، در حالی که در ۰.۲ درصد الیاف افت قابل توجهی حدود ۲۰-۳۵٪ مشاهده شد. این افزایش به دلیل اثر پل زنی الیاف و جذب بیشتر انرژی در فرآیند رشد ترک ها رخ داد، در

حالی که کاهش در درصد های پایین نشان دهنده عدم تشکیل شبکه موثر و تمرکز تنش در نقاط ضعف بود.

- چقرمگی شکست در دمای 10°C - بیشترین مقدار خود را در نمونه با ۰.۵ درصد الیاف نشان داد و افزایش نسبت به نمونه بدون الیاف قابل توجه بود. یافته ها نشان می دهد که الیاف با توزیع تنش و ایجاد پیوستگی در ناحیه نوک ترک، مقاومت اولیه مخلوط را در برابر شروع شکست افزایش دادند. در دمای صفر، افزودن ۰.۲ درصد الیاف باعث کاهش ۴۰-۳۵٪ چقرمگی شکست شد، در حالی که افزایش به ۰.۳ درصد بخشی از این افت را جبران کرد.

- شاخص مقاومت در برابر ترک خوردگی (CRI) در دمای 10°C با افزایش درصد الیاف روند افزایشی داشت و بیشترین بهبود در محدوده ۰.۴-۰.۵ درصد مشاهده شد؛ به گونه ای که در مد کششی (Mode I) CRI حدود ۴۰٪ و در مد برشی (Mode II) ۲۵-۳۰ درصد افزایش یافت. این تغییرات نشان می دهد که ترکیب بار بحرانی و انرژی شکست با افزایش درصد الیاف، مقاومت کلی مخلوط را در برابر ترک خوردگی بهبود می بخشد و شبکه الیاف با کاهش تمرکز تنش، نقش کلیدی در این بهبود دارد.

- این مطالعه نشان می دهد که به کارگیری الیاف بازالت یک راهبرد مؤثر برای بهبود رفتار شکست مخلوط های آسفالتی است. نتایج کلیدی حاکی از آن است که محدوده بهینه ۰/۳ تا ۰/۴ درصد وزنی الیاف، نقطه تعادلی را فراهم می کند که در آن مزایای تقویت کنندگی (افزایش بار بحرانی، انرژی شکست و چقرمگی) بدون چالش های ناشی از تجمع الیاف یا کاهش کارایی اختلاط، به حداکثر می رسد. بنابراین، استفاده هدفمند از الیاف بازالت

در این محدوده بهینه می‌تواند به افزایش عمر خدمت‌دهی روسازی‌ها و کاهش هزینه‌های بلندمدت نگهداری بینجامد.

- این مطالعه تحت شرایط آزمایشگاهی کنترل‌شده انجام شد. محدودیت‌های اصلی شامل دامنه محدود درصد الیاف (۰/۲ تا ۰/۵٪)، عدم بررسی اثر رطوبت و تمرکز بر رفتار شکست کوتاه‌مدت است. برای تحقیقات آتی، بررسی عملکرد در شرایط میدانی و رطوبتی، مطالعه دامنه وسیع‌تری از درصد الیاف و ارزیابی دوام بلندمدت (خستگی) پیشنهاد می‌شود.

۵. تأییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می‌شوند که مطالب این مقاله را در

۸. مراجع

- Akram, H., Hozayen, H. A., Akmal, A., and Khodary, F. (2024a). "Fiber showdown: A comparative analysis of glass vs. polypropylene fibers in hot-mix asphalt fracture resistance". *Build.*, 14(9): 2732. doi:https://doi.org/10.3390/buildings14092732.
- Akram, H., Hozayen, H. A., Abdellah, M. Y., & Khodary, F. (2024b). "Unraveling the strength secrets: How polypropylene fiber-reinforced asphalt mixtures defy fracture". *J. Fail. Anal. Prevent.*, 24(6): 2649–2668. doi:https://doi.org/10.1007/s11668-024-02020-7.
- Aliha, M. R. M., Ziari, H., Mojaradi, B., & Jebalbarez Sarbijan, M. (2019). "Modes I and II stress intensity factors of semi-circular bend specimen computed for two-phase aggregate/mastic asphalt mixtures". *Theor. Appl. Fract. Mech.*, 106, 102437. doi:https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2019.102437.
- Alizadeh, S., Shafabakhsh, Gh., & Sadeghnejad, M. (2023). "Sustainable asphalt mixtures: Enhancing environmental impact by partial fine aggregate substitution with rubber powder and bitumen modification using nano-SiO₂". *Int. J. Pavement Eng.*, 24(2). doi:https://doi.org/10.1080/10298436.2023.2257851.
- Alnadish, A. M., Singh, N. S. S., & Alawag, A. M. (2023). "Applications of synthetic, natural, and waste fibers in asphalt mixtures: A citation-based review". *Polym.*, [online] 15(4): 1004. https://doi.org/10.3390/polym15041004.
- Ameri, M., Mansourian, A., Pirmohammad, S., Aliha, M. R. M. and Ayatollahi, M. R. (2012). "Mixed mode fracture resistance of asphalt concrete mixtures". *Eng. Fract. Mech.*, 93: 153–167. doi:https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2012.06.015.
- Baradaran, S., & Ziaee, S. A. (2025). "Comprehensive evaluation of cracking performance in modified HMA and WMA asphalt mixtures using the SCB test". *Alexandria Eng. J.*, 133: 349–369. doi:https://doi.org/10.1016/j.aej.2025.11.029.
- Ceittlari, A. (2025). "Exploring cracking resistance in modified asphalt mixtures through a comparative assessment of mechanical behavior and performance screening indicators". *Constr. Build. Mater.*, 464: 140187. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140187
- Esmaeili, N., Alavi, M. Z., & Samadzad, M. (2025). "Evaluation of the impacts of polymeric fibers and modifiers on the fracture properties of asphalt mixtures". *Results Eng.*, 103862. doi:https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103862.
- Fan, Y., Chen, H., Yi, X., Xu, G., Cai, X., Zhou, Y., Huang, S., Wu, Y., Wang, H., Yang, J., & Huang, W. (2023). "Cracking resistance evaluation of epoxy asphalt mixtures with 100% reclaimed asphalt pavement (RAP)". *Constr. Build. Mater.*, 395: 132320. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132320.
- Geckil, T., & Ahmedzade, P. (2020). "Effects of carbon fibre on performance properties of asphalt mixtures". *Baltic J. Road Bridge Eng.*, 15(2): 49–65. doi:https://doi.org/10.7250/bjrbe.2020-15.472.

هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده‌اند.

۶. مشارکت‌های نویسندگان

یوسف ساجد: طراحی پژوهش، نظرات علمی، بازنگری نهایی

علیرضا مطیع: اجرای پژوهش، تحلیل داده‌ها، نگارش مقاله

رضا صالح اهری: تحلیل روش شناسی، مشاوره تخصصی، ارزیابی نتایج

۷. تعارض منافع

نویسندگان مقاله اعلام می‌کنند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

- Hamedipour, A. M., Shafabakhsh, G., & Sadeghnejad, M. (2023). "The impact of nano-TiO₂ particles on the moisture susceptibility and fracture toughness of HMA under mixed-mode I/II loading and various crack geometry and temperatures". *J. Mater. Civ. Eng.*, 35(3).
- Hui, Y., Men, G., Xiao, P., Tang, Q., Han, F., Kang, A., & Wu, Z. (2022). "Recent advances in basalt fiber reinforced asphalt mixture for pavement applications". *Mater.*, 15(19): 6826. <https://doi.org/10.3390/ma15196826>.
- Li, C., Liu, H., Xiao, Y., Li, J., Wang, T., & Peng, L. (2023). "Modification and enhancing contribution of fiber to asphalt binders and their corresponding mixtures: A study of viscoelastic properties". *Mater.*, 16(16): 5727. doi:<https://doi.org/10.3390/ma16165727>.
- Li, A., Song, W., & Zhou, L. (2024). "Investigation of the fracture performance of reclaimed asphalt mixture at the intermediate temperature using multi-parameters". *Constr. Build. Mater.*, 412: 134872. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.134872>.
- Modi, S. H., Orešković, M., Dave, E. V., & Sias, J. E. (2024). "Application of time-temperature superposition principle for cracking characterization of asphalt mixtures using semi-circular bend test". *Constr. Build. Mater.*, 443: 137647. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137647>.
- Mohammadi, M., Shafabakhsh, G. A., & Sadeghnejad, M. (2023). "Application of nano CaO and nano CaCO₃ in HMA in order to improve the strength against cracking and moisture susceptibility- an experimental study". *J. Transport. Infrastruct. Eng.*, 9(1): 43–56.
- Ren, D., Luo, W., Su, S., Wang, Z., Kong, L., & Ai, C. (2024a). "Study on crack resistance of basalt fiber reinforced asphalt mixture modified by titanate coupling agent based on digital image correlation". *Constr. Build. Mater.*, 437: 136934. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136934>.
- Ren, H., Qian, Z., Huang, W., Bo, W., Chen, T., & Cao, H. (2024b). "Evaluation of fracture behavior in asphalt concrete through the combination of semi-circular bending test and digital image correlation technology". *Constr. Build. Mater.*, 451: 138854. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138854>.
- Riccardi, C., Indacoechea, I., Wang, D., Lastra-González, P., Cannone Falchetto, A., & Castro-Fresno, D. (2023). "Low temperature performances of fiber-reinforced asphalt mixtures for surface, binder, and base layers". *Cold Reg. Sci. Technol.*, 206. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103738>.
- Sadeghnejad, M., & Shafabakhsh, Gh. (2017). "Estimation the fatigue number of stone mastic asphalt mixtures modified with nano SiO₂ and nano TiO₂". *J. Rehab. Civ. Eng.*, 5(1): 17–32.
- Shafabakhsh, Gh., Sadeghnejad, M., & Ebrahimmia, R. (2021). "Fracture resistance of asphalt mixtures under mixed-mode I/II loading at low-temperature: Without and with nano SiO₂". *Constr. Build. Mater.*, 266: 120954. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120954>.
- Shafabakhsh, Gh., Sadeghnejad, M., Hejazi, S. K., & Shirazi, A. (2024). "Evaluation of the rheological behavior of asphalt binder, fracture resistance and moisture susceptibility of asphalt mixtures: before and after adding nano Fe₂O₃". *Int. J. Pavement Res. Technol.* <https://doi.org/10.1007/s42947-024-00437-9>.
- Song, W., Deng, Z., Wu, H., & Zhan, Y. (2022). "Extended finite element modeling of hot mix asphalt based on the semi-circular bending test". *Constr. Build. Mater.*, 340: pp.127462–127462. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127462>.
- Song, W., Deng, Z., Wu, H., & Xu, Z. (2023). "Cohesive zone modeling of I-II mixed mode fracture behaviors of hot mix asphalt based on the semi-circular bending test". *Theor. Appl. Fract. Mech.*, 124: 103781. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2023.103781>.
- Song, W., Yan, W., Cui, Z., Chen, X., & Wu, H. (2025). "Investigating the fracture behaviors of asphalt mixtures at the intermediate temperature considering the detection of crack initiation". *Eng. Fract. Mech.*, 316: 110892. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2025.110892>.
- Teba Tariq, K., Kareem, A. I., Mohamad, S. A., Rwayda, Kh., Al-Hamd, S., & Minto, A. (2024). "The performance of modified asphalt mixtures with different lengths of glass fiber". *Int. J. Pavement Res. Technol.* doi:<https://doi.org/10.1007/s42947-024-00443-x>.
- Yuan, F., Cheng, L., Shao, X., Dong, Z., Zhang, L., Wu, G., & He, X. (2020). "Full-field measurement and fracture and fatigue characterizations of asphalt concrete based on the SCB test and stereo-DIC. 235: 107127. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107127>.
- Zhao, H., Guan, B., Xiong, R., & Zhang, A. (2020). "Investigation of the performance of basalt fiber reinforced asphalt mixture". *Appl. Sci.*, 10(5): 1561. <https://doi.org/10.3390/app10051561>.