



Semnan University



Research Article

Presenting New Approaches for Investigating the Lifespan and Crack Growth Behavior in Asphalt Pavements Using Fracture Mechanics

Hassan Ziari^a, Neda Kamboozia^{b*}, Mohammad Reza Khakbaz^c, Mohammad Reza Mohammad Aliha^d

^aProfessor, school of Highway and Transportation Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, I. R. Iran.

^bAssistant Professor, school of Highway and Transportation Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, I. R. Iran.

^cPhD Student in Highway and Transportation Engineering, Faculty of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, I. R. Iran.

^dAssociate Professor, school of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2025-01-23

Revised: 2025-04-11

Accepted: 2025-05-28

Keywords:

Asphalt pavement,
Fracture mechanics,
Fracture toughness,
Fracture mechanics-
geometry.

ABSTRACT

With the increase in the road transportation fleet, asphalt pavements with longer lifespans have gained significant importance. In this regard, in recent years, the science of fracture mechanics has greatly contributed to the research process in pavement engineering. Based on studies in the technical literature, the SCB and ENDB specimens have been recognized as the top samples for conducting fracture mechanics tests under various pure and mixed-mode conditions. Furthermore, determining fracture toughness is considered the most critical aspect in understanding the condition and estimating the lifespan and behavioral criteria of asphalt pavements. However, most existing research has only focused on investigating the fracture toughness of asphalt specimens with different geometries, fibers, and additives, as well as the effects of specimen size on fracture toughness. Studies have shown that neglecting non-singular stress parameters in classical models can lead to up to 30% error in predicting pavement lifespan. Therefore, employing more advanced approaches such as GMTS, which account for these parameters, is essential. Future research can contribute to reducing maintenance costs and enhancing the durability and efficiency of road infrastructure by improving pavement design and performance prediction.

* Corresponding author.

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



Semnan University

مجله زیر ساخت‌های حمل و نقل

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

شاپا: 2821-0549



مقاله پژوهشی

ارائه رویکردهایی جدید در بررسی طول عمر و رفتار رشد ترک در روسازی‌های آسفالتی به روش مکانیک شکست

حسن زیاری^۱، ندا کامبوزیا^{۲*}، محمدرضا خاکباز^۳، محمدرضا محمدعلیها^۴

^۱ استاد، گروه راه و ترابری، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

^۲ استادیار، گروه راه و ترابری، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

^۳ دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

^۴ دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۰۴ بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۲۲ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۰۷	با افزایش ناوگان حمل‌ونقل جاده‌ای، روسازی‌های آسفالتی با طول عمر بالاتر، اهمیت ویژه‌ای دارند. در این راستا، در سال‌های اخیر، علم مکانیک شکست به روند تحقیقات مهندسی روسازی کمک‌های فراوانی کرده است. با تحقیقات صورت گرفته در این تحقیق، دو نمونه SCB و ENDB به عنوان نمونه‌های برتر برای انجام آزمایش‌های مکانیک شکست در مودهای مختلف خالص و ترکیبی شناخته شده‌اند. ضمن اینکه تعیین چقرمگی شکست، مهم‌ترین نکته در شناخت وضعیت و تخمین طول عمر و معیارهای رفتاری روسازی‌های آسفالتی محسوب می‌گردد. اما اکثر تحقیقات موجود، تنها به بررسی چقرمگی شکست نمونه‌های آسفالتی با هندسه‌های مختلف و الیاف و افزودنی‌های مختلف و همچنین، تأثیرات اندازه نمونه‌ها در چقرمگی شکست پرداخته است. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که عدم توجه به پارامترهای غیرتکین تنش در مدل‌های کلاسیک، تا ۳۰ درصد خطا در پیش‌بینی عمر روسازی ایجاد می‌کند. از این رو، به‌کارگیری رویکردهای پیشرفته‌تری مانند GMTS که اثرات این پارامترها را لحاظ می‌کنند، ضروری است. تحقیقات آینده می‌تواند با بهبود طراحی و پیش‌بینی عملکرد روسازی‌ها، به کاهش هزینه‌های نگهداری و افزایش پایداری و کارایی زیرساخت‌های جاده‌ای کمک کند.

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

استناد به این مقاله: زیاری، حسن، کامبوزیا، ندا، خاکباز، محمدرضا و محمدعلیها، محمدرضا (۱۴۰۴). ارائه رویکردهایی جدید در بررسی طول عمر و رفتار

رشد ترک در روسازی‌های آسفالتی به روش مکانیک شکست. مهندسی زیر ساخت‌های حمل و نقل، ۱۱(۲)، ۶۵-۸۴

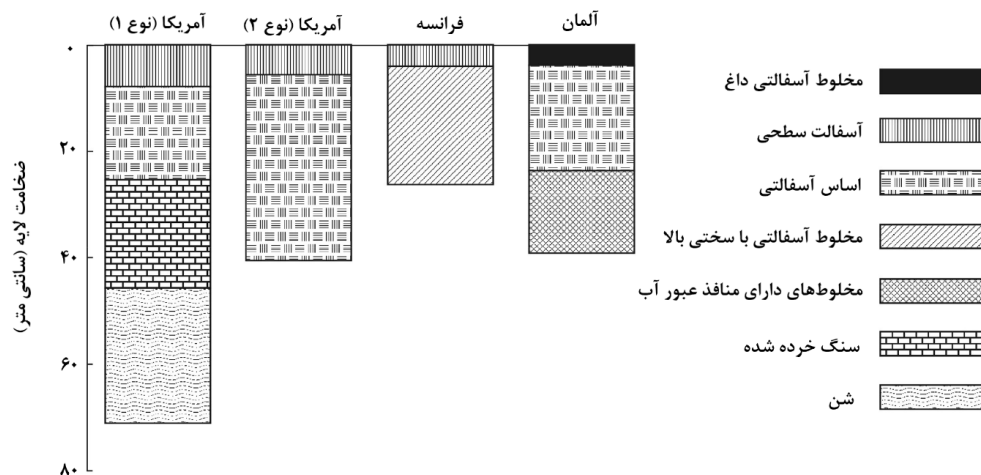
<https://doi.org/10.22075/jtie.2025.36692.1713>

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

۱. مقدمه

جاده‌ها، شریان‌های حیاتی هر کشور هستند که تأمین شرایط مناسب برای عملکرد آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. مهندسی روسازی، فرآیند طراحی، ساخت و نگهداری ساختارهای روسازی است که با هدف تأمین نیازهای ترافیکی و محیطی انجام می‌شود. با توسعه صنعت خودروها، مالکیت وسایل نقلیه به طور مداوم در حال افزایش است و نیاز به طراحی و ساخت روسازی‌های با کیفیت بالا برای پاسخگویی به شرایط ترافیکی سنگین و بارگذاری‌های مختلف، بیشتر احساس می‌شود. به همین دلیل، روسازی‌های آسفالتی از یک سطح تک‌لایه در زمان‌های گذشته به یک ساختار چندلایه در زمان حاضر تکامل یافته‌اند. در ۱۰۰ سال گذشته، مهندسی روسازی دگرگونی‌های عظیمی را تجربه کرده است که شامل ترکیب‌های ساختاری، مواد جدید، فناوری‌های ساخت، روش‌های طراحی، نیازهای ترافیکی، شرایط محیطی و بازیافت مواد می‌شود. بنابراین، همواره یکی از انگیزه‌های مهندسين، بهبود قابلیت‌های روسازی‌های آسفالتی بوده است. به عبارت دیگر، هدف این است که روسازی‌های قوی‌تری

ایجاد شود. اما بایستی منظور از روسازی قوی‌تر مشخص گردد. بر اساس تحقیقات صورت گرفته، ساختارهای روسازی متعددی که در ایالات متحده و کشورهای اروپایی استفاده می‌شود، دارای عمر طولانی (با تعمیر و نگهداری صحیح) بیش از ۴۰ سال هستند. چهار مثال از چنین روسازی‌های با عمر طولانی در شکل ۱ نشان داده شده است. ضخامت‌های این نوع از روسازی‌ها از ۲۶ تا ۷۱/۱ سانتی‌متر متغیر است. بدون استفاده از محاسبات پیچیده، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که روسازی‌های مورد استفاده در آمریکا با ضخامت کل ۷۱/۱ سانتی‌متر، دارای سختی بیشتری نسبت به روسازی‌های مورد استفاده در فرانسه با ضخامت ۲۶ سانتی‌متر است. با این حال، این نکته بسیار قابل توجه است که تمام چهار ساختار روسازی، دارای طول عمر مشابهی بیش از ۴۰ سال تحت شرایط بار ترافیکی بسیار سنگین هستند. بنابراین روسازی آسفالتی قوی باید به اندازه کافی بادوام باشد تا خدمات طولانی‌مدتی را ارائه دهد. صرف ضخامت بیشتر، دلیلی بر سختی و استحکام بالاتر نیست (لیو و همکاران، ۲۰۲۰؛ شن، ۲۰۰۴). اینجاست که مکانیک شکست می‌تواند چنین رویکردهایی را مورد واکاوی قرار دهد.



شکل ۱. انواع مختلفی از روسازی‌ها با عمر طولانی بیش از ۴۰ سال در چهار کشور مختلف دنیا (لیو و همکاران، ۲۰۲۰)

ترک خوردگی، یکی از جدی‌ترین چالش‌هایی است که تأثیر قابل‌توجهی بر کاهش طول عمر و عملکرد روسازی‌های آسفالتی دارد. این پدیده که به صورت شبکه‌ای از ترک‌ها در سطح و عمق روسازی ظاهر می‌شود، نتیجه تأثیرات متقابل عوامل داخلی و خارجی است. عوامل داخلی شامل ویژگی‌های ذاتی مواد تشکیل‌دهنده آسفالت می‌باشد که از جمله آن‌ها می‌توان به نوع و دانه‌بندی مصالح سنگی، نوع قیر، مقدار آسفالت و استفاده از افزودنی‌ها اشاره کرد. انتخاب مناسب مصالح سنگی و طراحی دقیق دانه‌بندی، می‌تواند توزیع تنش در روسازی را بهبود بخشد و از تمرکز تنش در نقاط خاص جلوگیری کند. قیر به عنوان عامل چسباننده در مخلوط آسفالتی، باید دارای خواصی باشد که در دماهای مختلف بتواند انعطاف‌پذیری و استحکام را فراهم کند. اصلاح قیر با استفاده از پلیمرها و افزودنی‌هایی مانند لاستیک بازیافتی، می‌تواند مقاومت آن را در برابر پیرشدگی و ترک خوردگی افزایش دهد. همچنین، استفاده از الیاف، پلیمرها یا نانوذرات به عنوان افزودنی‌های تقویت‌کننده، نقش مهمی در بهبود مقاومت کششی و استحکام مخلوط‌های آسفالتی ایفا می‌کند و با تقویت ساختار میکروسکوپی، مقاومت در برابر رشد ترک را افزایش می‌دهد. عوامل خارجی شامل شرایط محیطی و بارگذاری‌های وارد بر روسازی می‌شود. عبور مکرر وسایل نقلیه سنگین می‌تواند تنش‌های تکراری و تغییرشکل‌های پلاستیک در روسازی ایجاد کند که به مرور زمان منجر به ترک خوردگی ناشی از خستگی می‌شود. علاوه بر این، نوسانات شدید دما، انبساط و انقباض مکرر آسفالت را تسریع کرده و در دماهای کم، شکست ترد و در دماهای زیاد، شیارشدگی و تغییرشکل دائمی را به دنبال دارد. فرآیندهای پیرشدگی قیر که تحت تأثیر تابش خورشید و اکسیداسیون رخ می‌دهند، باعث سخت شدن و شکننده شدن آسفالت می‌شوند که این امر

ترک خوردگی را تسریع می‌کند. همچنین، نفوذ آب به داخل روسازی و یخ‌زدگی و ذوب متناوب، از جمله عواملی هستند که می‌توانند توسعه ترک‌ها را تشدید کنند. برای مقابله با ترک خوردگی و افزایش دوام روسازی‌های آسفالتی، استفاده از راهکارهای چندجانبه ضروری است. طراحی مخلوط‌های بهینه با بهره‌گیری از روش‌های پیشرفته می‌تواند خواص مواد را بهینه‌سازی کند. اصلاح قیر با افزودنی‌هایی نظیر پلیمرها و نانوذرات می‌تواند انعطاف‌پذیری و دوام آسفالت را به میزان قابل‌توجهی بهبود دهد. علاوه بر این، استفاده از رویکردهای مکانیک شکست، به مهندسان امکان می‌دهد تا رفتار ترک‌ها را پیش‌بینی کرده و روسازی‌هایی با مقاومت بالاتر در برابر شکست طراحی کنند. انجام عملیات نگهداری پیشگیرانه و ترمیم ترک‌ها در مراحل اولیه می‌تواند از گسترش آن‌ها جلوگیری کرده و هزینه‌های نگهداری و بازسازی را کاهش دهد. این اقدامات، همراه با تحقیقات مستمر در زمینه رفتار مکانیکی و دوام مصالح، می‌تواند به بهبود عملکرد و افزایش طول عمر روسازی‌های آسفالتی منجر شود (علیها، رزمی و منصوریان، ۲۰۱۷؛ زیاری و همکاران، ۲۰۲۰؛ عامری و همکاران، ۲۰۱۲؛ رادیف و همکاران، ۲۰۲۱). همانطور که اشاره گردید، مکانیک شکست به عنوان یک شاخه مهم از مهندسی، می‌تواند به بهبود طراحی روسازی‌ها کمک شایانی کند. بطور کلی، اگر تحقیقات آسفالتی به سمت رویکردهای دقیق مکانیک شکست حرکت کند، می‌توان پاشنه آشیل روسازی‌ها را مشخص نمود و با اصلاح مخلوط آسفالتی با انجام تحقیقات متعدد، عمر بالاتر روسازی‌های آسفالتی را شاهد بود. با توجه به محدودیت‌های موجود در روش‌های طراحی کنونی (مشکلات موجود در طراحی و ساخت به روش‌های ژیراتوری^۱ و سوپرپیو^۲)، به-کارگیری مفاهیم مکانیک شکست می‌تواند تحولی بزرگ در این زمینه ایجاد کند. مکانیک شکست به عنوان یک

1- Gyrotory compactor

2- Superpave

متفاوتی را ارائه می‌دهند (علیها و همکاران، ۲۰۱۵). همچنین، بررسی اهمیت دما در انجام آزمایش‌های شکست مربوط به مخلوط‌های آسفالتی یکی دیگر از جنبه‌های کلیدی است. تغییرات دما به دلیل خاصیت ویسکوالاستیک قیر، می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر رفتار مخلوط‌های آسفالتی داشته باشد و در نتیجه، نتایج حاصل از آزمایش‌ها را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین، توجه به دما در زمان آزمایش و نیز در شرایط واقعی عملکرد آسفالت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با در نظر گرفتن تمامی این جوانب، می‌توان به توسعه روسازی‌های آسفالتی با کیفیت و عملکرد مطلوب دست یافت (علیها و همکاران، ۲۰۱۵).

۲. مکانیک شکست و کاربرد آن در مباحث روسازی‌های آسفالتی

مخلوط‌های آسفالتی عمدتاً از ترکیب قیر با ویژگی منحصر به فرد ویسکوالاستیک و سنگدانه‌ها تشکیل می‌شوند. قیر، به‌عنوان یک ماده ویسکوالاستیک، تحت تأثیر شرایط محیطی و دمایی رفتارهای مختلفی از خود نشان می‌دهد (بهبهانی و همکاران، ۲۰۱۶؛ کامبوزیا و همکاران، ۲۰۱۸). در شرایط دمای کم، این مواد معمولاً به‌عنوان سیستم‌های مرکب شکننده یا شبه‌شکننده عمل می‌کنند. این ویژگی باعث می‌شود که در شرایط سرد، خصوصاً در مناطق با تغییرات دمایی شدید، ترک‌خوردگی و رشد ترک‌ها به یکی از مهم‌ترین مکانیزم‌های تخریبی در روسازی‌های آسفالتی تبدیل شود. ترک‌خوردگی ناشی از انقباض و تغییرات دمایی و همچنین ناشی از عبور بارهای ترافیکی، به‌ویژه در فصول سرد سال، می‌تواند آسیب‌های جدی به سازه‌های روسازی وارد کند و موجب کاهش عمر مفید روسازی‌ها شود. در این راستا، یکی از چالش‌های عمده مهندسين عمران، طراحی و تولید مخلوط‌های آسفالتی با مقاومت بالا در برابر ترک‌خوردگی است. برای بهبود مقاومت

رشته مهندسی که سرآغاز آن به مهندسی مکانیک برمی‌گردد، پتانسیل بالایی برای انتقال نوآوری‌ها به فعالیت‌های مربوط به روسازی دارد. با این حال، پیشرفت‌های صورت گرفته در این زمینه به طور کلی کند بوده و نیاز است که مهندسان روسازی به روز باشند و در فعالیت‌های مکانیک شکست مشارکت کنند (علیها و همکاران، ۲۰۱۵). در این مقاله، به بررسی وضعیت فعلی استفاده از رویکردهای مکانیک شکست در روسازی‌های آسفالتی و چشم‌انداز روشن این علم در بهبود طول عمر روسازی پرداخته می‌شود. همچنین، موضوع مورد بحث دیگر در این مقاله، ضرورت‌های کلیدی قبل از ورود به موضوعاتی مانند استفاده از الیاف و افزودنی‌های مختلف در بتن آسفالتی جهت بهبود چقرمگی شکست و پارامترهای مرتبط با ترک است. در این راستا، لازم است که ابتدا به چندین مسئله اساسی‌تر پرداخته شود که این مسائل اساسی می‌توانند مشخص کنند که مقادیر محاسبه شده در مکانیک شکست همانند ضریب شدت تنش، چه مفهومی دارند و این مقادیر همانند پارامترهای سرعت و زمان برای محققین ملموس‌تر شوند. فهم این موضوع می‌تواند نتایج مثبتی داشته باشد. یکی از این نتایج مثبت، رسیدن به رابطه بین طول عمر روسازی و چقرمگی شکست است. در صورت فهم عمیق از اعداد به‌دست آمده از ضریب شدت تنش مخلوط‌های آسفالتی، می‌توان عمر مخلوط‌های آسفالتی را تخمین زد (علیها و همکاران، ۲۰۱۵). همچنین، یکی دیگر از مهم‌ترین نکات، انتخاب نوع نمونه مناسب (همانند نمونه‌های SCB^1 ، نمونه $ENDB^2$ و غیره) جهت انجام آزمایش‌های مکانیک شکست مخلوط‌های آسفالتی است. انتخاب صحیح نوع نمونه‌های آسفالتی جهت انجام آزمایش می‌تواند به طور مستقیم بر نتایج و اعتبار آزمایش‌های انجام شده تأثیر بگذارد. همچنین، بایستی دید که چرا نتایج نمونه‌های آسفالتی با هندسه‌های مختلف، چقرمگی شکست

2- Edge Notched Disc Bend (ENDB)

1- Semi-Circular Bending (SCB)

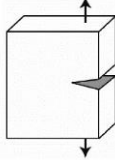
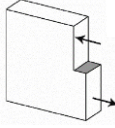
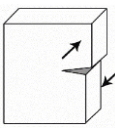
مخلوط‌های آسفالتی در برابر ترک خوردگی، رویکردهای مختلفی وجود دارد که یکی از مهم‌ترین آن‌ها، استفاده از معیارهای مکانیک شکست است. مکانیک شکست که به مطالعه رفتار مواد در هنگام ایجاد و رشد ترک‌ها می‌پردازد، ابزاری مناسب برای ارزیابی و بهینه‌سازی مخلوط‌های آسفالتی است. از طریق این معیارها، می‌توان ویژگی‌هایی مانند مقاومت به کشش، چقرمگی و انعطاف‌پذیری مواد را تحلیل کرده و از آن‌ها برای طراحی مخلوط‌های مقاوم‌تر استفاده نمود. به‌علاوه، استفاده از مواد افزودنی مانند پلیمرها، الیاف یا مواد نانو می‌تواند به تقویت خاصیت ویسکوالاستیک مخلوط‌های آسفالتی کمک کند و عملکرد آن‌ها را در برابر ترک خوردگی بهبود بخشد. بطور کلی، طراحی و تولید مخلوط‌های آسفالتی با مقاومت بالا در برابر ترک خوردگی نیازمند ترکیبی از شناخت دقیق ویژگی‌های مواد، تحلیل مکانیزم‌های تخریبی و بهره‌گیری از تکنیک‌های نوین مهندسی مواد است. از این رو، تحقیقات در زمینه بهبود خواص مکانیکی و افزایش دوام روسازی‌های آسفالتی در برابر شرایط محیطی سخت، همچنان یکی از موضوعات اصلی در علم و فناوری مهندسی عمران باقی مانده است.

۱-۲. مودهای بارگذاری در مکانیک شکست

در علم مکانیک شکست، یکی از مهم‌ترین جنبه‌ها، بررسی مودهای مختلف بارگذاری است که در اثر آن‌ها ترک‌ها در اجسام جامد به روش‌های مختلف رشد

می‌کنند. به‌طور کلی، مود به چگونگی رشد و انتشار ترک‌ها و همچنین طرز و شکل جداشدن و از هم گسیختگی هندسی یک عضو اشاره دارد. در واقع، هنگامی که یک جسم تحت بارگذاری قرار می‌گیرد، ترک‌ها ممکن است به شیوه‌های مختلفی رشد کنند و این رشد به نوع بارگذاری و ویژگی‌های ماده بستگی دارد. در این راستا، بارگذاری قطعات ترک‌دار، معمولاً به سه حالت کلی تقسیم‌بندی می‌شود (جدول ۱). این سه مود بارگذاری پایه‌ای‌ترین تقسیم‌بندی‌ها در مکانیک شکست هستند که در تحلیل رفتار ترک‌ها و پیش‌بینی رشد آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین، لازم به ذکر است که در بسیاری از شرایط عملی، بارگذاری‌ها ممکن است ترکیبی از مودهای فوق‌الذکر باشند. به این ترتیب، در فرآیند تحلیل مکانیک شکست، مودهای ترکیبی نیز به‌عنوان انواع دیگری از مودهای بارگذاری در نظر گرفته می‌شوند. این ترکیب‌ها می‌توانند پیچیدگی‌های بیشتری را در رفتار ترک‌ها و رشد آن‌ها ایجاد کنند. چرا که ممکن است رفتار ترک تحت تأثیر هم‌زمان چند نوع تنش قرار گیرد. در مجموع، درک و شبیه‌سازی دقیق مودهای مختلف بارگذاری در اجسام ترک‌دار، به مهندسان کمک می‌کند تا رفتار ترک‌ها را پیش‌بینی کرده و اقداماتی برای جلوگیری از گسترش آسیب در ساختارها و بهبود دوام آن‌ها اتخاذ کنند (فخری و همکاران، ۲۰۱۷).

جدول ۱. سه مود اصلی بارگذاری در علم مکانیک شکست و وضعیت آن‌ها

مود بارگذاری	نوع	وضعیت	منابع
مود I بارگذاری	حالت بازشدگی		فان و همکاران، ۲۰۲۱؛ حقیقت‌پور و علیها، ۲۰۲۲
مود II بارگذاری	حالت برشی در داخل صفحه و لغزش روی یکدیگر		علیها، ۲۰۱۹؛ هی و همکاران، ۲۰۲۲؛ پیرمحمد و آیت‌اللهی، ۲۰۲۰
مود III بارگذاری	حالت برشی خارج از صفحه و لغزش روی یکدیگر		علیها و همکاران، ۲۰۱۵؛ علیها و همکاران، ۲۰۱۶

در قطعات متداول و استاندارد شکست، قطعات دوبعدی در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین $\sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0$ (تنش صفحه‌ای است). این حالت را می‌توان به دو قسمت کرنش سطح و تنش سطح تقسیم‌بندی کرد. در کرنش سطح برای قطعاتی که دارای ضخامت زیاد هستند و در آن‌ها $\epsilon_{zz} = 0$ است. همچنین، در تنش سطح برای قطعاتی که ضخامت کم دارند و در آن‌ها $\sigma_{zz} = 0$ است. بنابراین تنش در بعد سوم به صورت معادله ۴ می‌باشد.

$$\begin{cases} \sigma_{zz} = 0 \text{ (تنش صفحه‌ای)} \\ \sigma_{zz} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \text{ (تغییر شکل صفحه‌ای)} \end{cases} \quad (۴)$$

همچنین، معادلات تنش در مود II بارگذاری به صورت معادلات ۵ الی ۸ می‌باشد.

$$\sigma_{xx} = -\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left[2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right] + T \quad (۵)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (۶)$$

۲-۲. روابط مورد نظر در مکانیزم رشد ترک

در این بخش، مکانیزم کلی رشد ترک در علم مکانیک شکست مورد بررسی قرار می‌گیرد. معادلات تنش مربوط به مودهای اول، دوم و سوم بارگذاری در حالات خالص و ترکیبی، با استناد به شکل ۳ تشریح شده است. به‌ویژه، معادلات تنش در مود I بارگذاری در روابط شماره ۱ تا ۳ ارائه شده‌اند (خاکباز و همکاران، ۲۰۲۴).

$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] + T \quad (۱)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (۲)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (۳)$$

که T ، ترم تنش است که مستقل از r و θ بوده و K_I ضریب شدت تنش مود I می‌باشد. ضریب K_I بستگی به بار و هندسه قطعه ترک‌دار دارد. معمولاً برای بررسی حالت تنش

$$\sigma_{yy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (10)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (7)$$

$$\sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0$$

$$\sigma_{yz} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \quad (11)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{zz} = 0 \text{ (تنش صفحه‌ای)} \\ \sigma_{zz} = v(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \text{ (تغییر شکل صفحه‌ای)} \end{array} \right. \quad (8)$$

میدان تنش الاستیک اطراف نوک ترک تحت شرایط بارگذاری در حالت ترکیبی عمومی را می‌توان به صورت معادلات ۱۲ الی ۱۷ نوشت.

همچنین، معادلات تنش در مود III بارگذاری به صورت معادلات ۹ الی ۱۱ است.

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{xy} = 0 \quad (9)$$

$$\sigma_r = \frac{1}{4\sqrt{2\pi r}} [K_I(5 \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2}) + K_{II}(-5 \sin \frac{\theta}{2} + 3 \sin \frac{3\theta}{2})] + T \cos^2 \theta + H.O.T \quad (12)$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{4\sqrt{2\pi r}} [K_I(3 \cos \frac{\theta}{2} + \cos \frac{3\theta}{2}) - K_{II}(3 \sin \frac{\theta}{2} + 3 \sin \frac{3\theta}{2})] + T \sin^2 \theta + H.O.T \quad (13)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{8v}{4\sqrt{2\pi r}} [K_I \cos \frac{\theta}{2} - K_{II} \sin \frac{\theta}{2}] + T + H.O.T \text{ (تغییر شکل صفحه‌ای)} \\ 0 \text{ (تنش صفحه‌ای)} \end{array} \right. \quad (14)$$

$$\sigma_{r\theta} = \frac{1}{4\sqrt{2\pi r}} [K_I(\sin \frac{\theta}{2} + \sin \frac{3\theta}{2}) + K_{II}(\cos \frac{\theta}{2} + 3 \cos \frac{3\theta}{2})] - T \sin \theta \cos \theta + H.O.T \quad (15)$$

$$\sigma_{z\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} K_{III} \cos \frac{\theta}{2} + H.O.T \quad (16)$$

$$\sigma_{rz} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} K_{III} \sin \frac{\theta}{2} + H.O.T \quad (17)$$

همچنین، K_I ، K_{II} و K_{III} به ترتیب ضرایب شدت تنش مربوط به حالت‌های I، II و III بارگذاری هستند که از اهمیت بسزایی در تجزیه و تحلیل مسائل مربوط به مکانیک

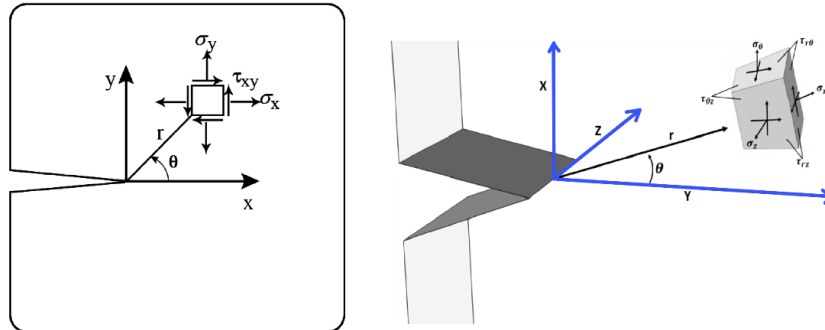
که در آن‌ها r و θ مختصات نوک ترک هستند و σ (با تمامی زیربخش‌ها)، اجزای تنش برای یک عنصر در مجاورت جبهه ترک هستند که در شکل ۳ نشان داده شده است.

ترک‌های داخلی می‌باشد. واحد ضریب شدت تنش در سیستم بین‌المللی (SI) به صورت $MPa\sqrt{m}$ می‌باشد. برای هندسه‌ها و بارگذاری‌های ساده، مقدار Y_i و در نتیجه مقدار ضرایب شدت تنش از طریق روش‌های تحلیلی قابل محاسبه است (عامری و همکاران، ۲۰۱۲).

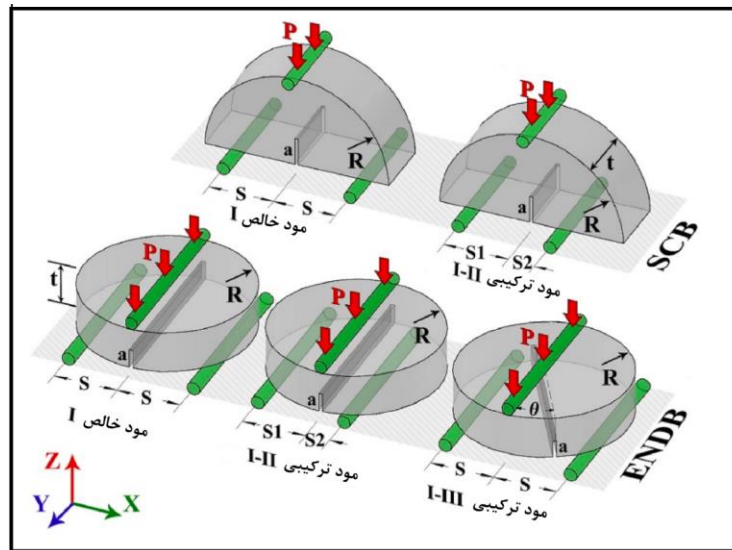
شکست برخوردارند. فرم عمومی نمایش ضریب شدت تنش به صورت معادله ۱۸ می‌باشد (خاکباز و همکاران، ۲۰۲۴).

$$K_i = Y_i \sigma \sqrt{\pi a} \quad i = I, II, III \quad (18)$$

که در آن σ ، تنش اعمالی بر قطعه و Y_i ، ضریب هندسی و a ، طول ترک برای ترک‌های لبه‌ای و یا نصف طول ترک برای



شکل ۲. موقعیت سه‌بعدی در مجاورت یک ترک جهت نمایش روابط مربوط به حالات ترکیبی بارگذاری (سمت راست) و تنش‌های الاستیک در اطراف نوک ترک در مختصات کارتزین جهت نمایش حالات خالص بارگذاری (سمت چپ) (علیها و همکاران، ۲۰۱۶؛ عامری و همکاران، ۲۰۱۲)



شکل ۳. پارامترهای محاسبه روابط شدت تنش در نمونه‌های SCB و نمونه‌های ENDB در مودهای خالص و ترکیبی مختلف (یانگ و همکاران، ۲۰۲۱؛ کریمی و همکاران، ۲۰۲۳)

$$K_i(\text{ENDB}) = \frac{3PS}{2Rt^2} \sqrt{\pi a} Y_i \left(\frac{a}{t}, \frac{S}{R} \right) \quad (18)$$

روابط شدت تنش موجود در نمونه‌های SCB و ENDB مطابق با روابط ۱۸ الی ۱۹ است (یانگ و همکاران، ۲۰۲۱).

$$K_i(\text{SCB}) = \frac{P}{2Rt} \sqrt{\pi a} Y_i \left(\frac{a}{R}, \frac{S}{R} \right) \quad (19)$$

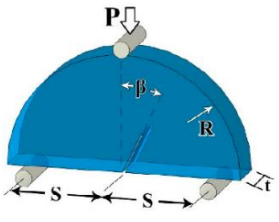
که در آن ضریب شدت تنش (K_i) و ضریب هندسی (Y_i) می‌تواند مربوط به حالات اول تا سوم بارگذاری ($i = I, II, III$) باشد و سایر پارامترها در شکل ۳ مشخص است.

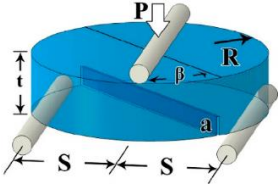
۲-۳. انتخاب هندسه نمونه‌های آسفالتی جهت انجام آزمایش‌های مکانیک شکست

انتخاب هندسه نمونه‌های آسفالتی برای انجام آزمایش‌های مرتبط با مکانیک شکست از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این انتخاب به دلیل تأثیر مستقیم بر دقت نتایج و تحلیل رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی نیازمند بررسی دقیق است. بنابراین، تعیین هندسه‌ای که از جنبه‌های مختلف برای انجام آزمایش ایده‌آل باشد، اهمیت بسیاری دارد. در این راستا، پارامترهای متعددی باید مورد توجه قرار گیرند. جهت تراکم ژیراتوری و جهت انجام بارگذاری در آزمایش مکانیک شکست، یکی از این عوامل است که نقش مهمی در نتایج حاصله دارد (شکل‌های ۴ و ۵). همچنین، سادگی ساخت نمونه اهمیت دارد، چرا که فرآیند تولید نمونه باید تا حد امکان یکنواخت باشد. از دیگر عوامل مهم، سادگی ایجاد

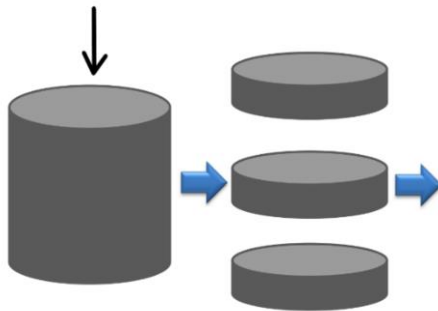
ترک در نمونه است که تأثیر زیادی بر قابلیت انجام آزمایش و ارزیابی دقیق رفتار مکانیکی نمونه دارد. علاوه بر این، سادگی انجام آزمایش نیز یکی از معیارهای کلیدی است. زیرا مراحل آزمایش باید بدون پیچیدگی‌های غیرضروری انجام شود تا احتمال بروز خطا کاهش یابد. در تحقیقات، هندسه‌های مختلفی برای اندازه‌گیری مقاومت در برابر شکست مواد و تحت حالت‌های مختلف ترک استفاده شده است. با این حال، معمولاً از نمونه‌های استوانه‌ای یا دیسکی برای مواد ژئولوژیک مانند سنگ، بتن و مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شود. دو نوع هندسه متداول برای نمونه‌های آسفالتی که در آزمایش‌های مکانیک شکست به کار می‌روند در جدول ۲ ارائه شده است. این دو هندسه به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که تعادلی مناسب بین معیارهای فوق برقرار شود و بتوانند رفتار مکانیکی و شکست مخلوط‌های آسفالتی را به خوبی نشان دهند (یانگ و همکاران، ۲۰۲۱؛ فخری و همکاران، ۲۰۱۷؛ علیها و همکاران، ۲۰۱۰؛ علیها و همکاران، ۲۰۱۴؛ علیها و همکاران، ۲۰۱۸؛ وی و همکاران، ۲۰۱۸؛ شاکر و همکاران، ۲۰۲۳؛ یانگ و ژائو، ۲۰۲۲).

جدول ۲. دو نمونه متعارف و قابل اطمینان برای انجام تست مکانیک شکست روی نمونه‌های آسفالتی

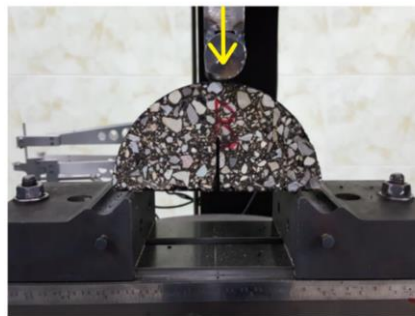
نام نمونه	شکل	نقاط قوت نمونه	نقاط ضعف نمونه	منابع
SCB		<ul style="list-style-type: none"> ■ سادگی ساخت ■ نمونه به تعداد زیاد ■ جای‌گیری بهتر ■ اهرم بالایی حین شکست 	<ul style="list-style-type: none"> ■ دشواری ایجاد شکست با مودهای ترکیبی و مود سوم ■ ناهم‌سویی جهت بارگذاری با جهت تراکم آسفالت ■ عدم امکان انجام آزمایش در مود سوم بارگذاری 	<ul style="list-style-type: none"> علیها و همکاران، ۲۰۲۰؛ فخری و همکاران، ۲۰۱۷؛ مبارکی و سلام، ۲۰۲۰

<p>حقیقت‌پور و همکاران، ۲۰۱۸؛ معمدی و همکاران، ۲۰۲۱؛ همکاران، ۲۰۲۳</p>	<p>احتمال قرارگیری نامناسب اهرم بالایی حین شکست</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ سادگی ساخت نمونه با تعداد بالا ▪ سادگی انجام شکست در تمامی مودها ▪ همسویی جهت بارگذاری با جهت تراکم آسفالت ▪ امکان انجام آزمایش در مود سوم بارگذاری 	 <p style="text-align: center;">ENDB</p>	
--	---	--	--	--

جهت تراکم آسفالت

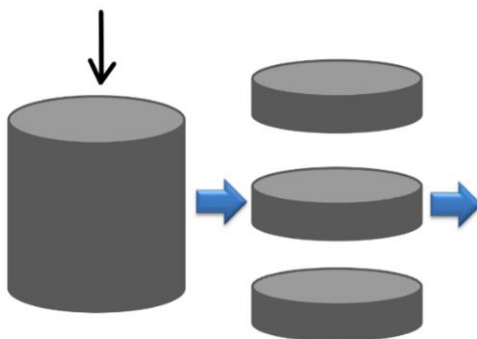


جهت بارگذاری (غیرهمراستا با جهت تراکم آسفالت)

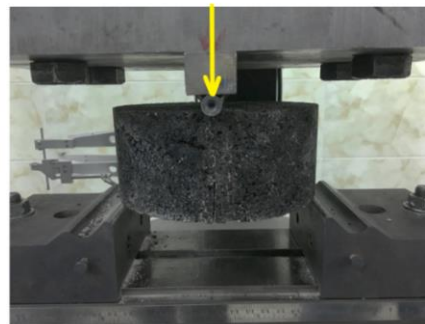


شکل ۴. آزمایش مکانیک شکست با نمونه SCB، غیرهمراستا بودن جهت بارگذاری با جهت تراکم نمونه‌ها

جهت تراکم آسفالت



جهت بارگذاری (همراستا با جهت تراکم آسفالت)



شکل ۵. آزمایش مکانیک شکست با نمونه ENDB، همراستا بودن جهت بارگذاری با جهت تراکم نمونه‌ها

۲-۴. آزمایش‌های مکانیک شکست صورت گرفته روی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از نمونه‌های ENDB و SCB

در سال‌های اخیر، آزمایش‌های متعددی در حوزه مکانیک شکست مخلوط‌های آسفالتی انجام شده است. این آزمایش‌ها که عمدتاً بر جنبه‌های آزمایشگاهی و مکانیکی متمرکز بوده‌اند، به درک بهتر رفتار شکست این مواد کمک کرده‌اند. تعدادی از آخرین تحقیقات در این حوزه با استفاده از نمونه‌های ENDB و SCB انجام شده است (کامبوزیا و همکاران، ۲۰۲۲؛ موسوی راد و همکاران، ۲۰۲۲؛ ساعد و همکاران، ۲۰۲۱). با این حال، دستیابی به نتایج کاربردی‌تر که بتوانند مستقیماً در طراحی، ساخت و نگهداری روسازی‌های آسفالتی مورد استفاده قرار گیرند، همچنان به‌عنوان یک چالش بزرگ باقی مانده است. اگرچه این تحقیقات تا کنون توانسته‌اند مفاهیم پایه‌ای مکانیک شکست را روشن‌تر کنند، اما اغلب محدود به شرایط آزمایشگاهی و پارامترهای کنترل‌شده بوده‌اند. این در حالی است که در دنیای واقعی، مخلوط‌های آسفالتی تحت تأثیر عواملی همچون شرایط محیطی متغیر، بارگذاری‌های ترافیکی پیچیده و اثرات طولانی‌مدت تخریب قرار دارند. بنابراین، برای تطبیق نتایج آزمایشگاهی با شرایط واقعی، نیازمند دیدگاه‌هایی جامع‌تر و روش‌هایی هستیم که فراتر از محدوده‌های موجود عمل کنند. به عبارت دیگر، نیاز به رویکردهایی وجود دارد که بتوان ترک در روسازی‌های آسفالتی را با دقت خوبی تخمین زد.

مطالعات متعددی روی رفتار شکست و مقاومت در برابر ترک مخلوط‌های آسفالتی روی نمونه‌های SCB انجام شده است. یائو و همکاران (۲۰۲۵) به بررسی اثر پارامترهای طراحی بر مقاومت در برابر ترک در دمای پایین در مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی پرداختند و نشان دادند که کاهش محتوای تراشه آسفالتی، افزایش محتوای

آسفالت، افزایش دمای اختلاط و طولانی‌تر کردن مدت زمان اختلاط، بهبود قابل توجهی در مقاومت ترک در دمای کم ایجاد می‌کند. برادران و علیها (۲۰۲۴) در پژوهشی، عملکرد مخلوط‌های آسفالتی حاوی پلی‌اتیلن ترفتالات بازیافتی (PBA) و تراشه آسفالتی (RAP) را ارزیابی کردند و نتیجه گرفتند که افزودن ۲ درصد PBA و ۲۵ درصد تراشه آسفالتی، بهترین مقاومت در برابر رشد ترک را در دماهای کم و متوسط ارائه می‌دهد. مالک و کی‌منش (۲۰۲۳) نشان دادند که چقرمگی شکست و کار شکست با افزایش ضخامت، کاهش دما و کاهش فضای خالی افزایش می‌یابد، در حالی که مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار به ترتیب دما، نرخ بارگذاری، محتوای فضای خالی و ضخامت هستند. همچنین، بوی و صالح (۲۰۲۱) دریافتند که آزمون نیمه خمشی (SCB) با نمونه‌های ۱۰۰ میلی‌متری برای ارزیابی رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی مناسب است و ویژگی‌های شکست بین نمونه‌های ۱۰۰ میلی‌متری و ۱۵۰ میلی‌متری قابل تبدیل است. در پژوهشی دیگر، پیرمحمد و همکاران (۲۰۲۴) تأثیر اندازه نمونه SCB بر ویژگی‌های شکست بتن آسفالتی را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش اندازه نمونه، چقرمگی شکست، کار شکست و انرژی شکست افزایش می‌یابد؛ اما این تأثیر با افزایش دما کاهش می‌یابد. همچنین، واتقی و همکاران (۲۰۲۴)، تأثیر اندازه نمونه، نوع بارگذاری و نرخ بارگذاری را بر شاخص‌های شکست آسفالت در دماهای بسیار پایین بررسی کردند و با استفاده از روش سطح پاسخ مدل‌های پیش‌بینی دقیقی ارائه داده و نشان دادند که افزایش اندازه نمونه و کاهش نرخ بارگذاری موجب افزایش کار شکست و انرژی شکست می‌شود؛ در حالی که استحکام شکست با اندازه نمونه و نرخ بارگذاری رابطه مستقیم و با نوع بارگذاری رابطه معکوس دارد (یائو و همکاران، ۲۰۲۵؛ برادران و علیها، ۲۰۲۴؛ مالک و کی‌منش، ۲۰۲۳؛

بوی و صالح، ۲۰۲۱؛ پیرمحمد و همکاران، ۲۰۲۴؛ واثقی و همکاران، ۲۰۲۴).

همچنین، مطالعات متعددی در مورد رفتار شکست و مقاومت در برابر ترک مخلوط‌های آسفالتی روی نمونه‌های ENDB انجام شده است. معتمدی و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی تأثیر افزودن الیاف، دما و نرخ بارگذاری بر مقاومت شکست مود اول و سوم پرداختند. یافته‌ها نشان داد که افزودن الیاف، مقاومت شکست را در هر دو مود بهبود می‌دهد، اما این تأثیر در مود سوم بیشتر است. همچنین، کاهش دما و افزایش نرخ بارگذاری باعث افزایش مقاومت شکست می‌شود، به‌ویژه در مود سوم که تأثیر دما برجسته‌تر بود. حقیقت‌پور و همکاران (۲۰۱۸) در تحقیق خود با تمرکز بر تأثیر درصد فضای خالی، دمای کم و اندازه نمونه دریافتند که کاهش فضای خالی و دمای آزمایش یا افزایش اندازه نمونه باعث افزایش KIC می‌شود. مدل رگرسیون خطی ارائه شده در این مطالعه نشان داد که اندازه نمونه تأثیرگذارترین عامل بر KIC است و پراکندگی نتایج نیز نشان‌دهنده قابلیت نمونه ENDB برای اندازه‌گیری مقاومت شکست است. در پژوهشی دیگر، اقبالی و همکاران (۲۰۱۹) تأثیر هندسه نمونه ENDB بر چقرمگی و انرژی شکست مخلوط‌های HMA و SMA در دماهای کم را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که ضخامت نمونه‌ها تأثیر زیادی بر این ویژگی‌ها دارد. ضخامت ۷۰ میلی‌متر و نسبت عمق ترک ۰/۴ برای HMA و SMA و نسبت ۰/۲ برای SMA با ضخامت ۷۰ میلی‌متر بهترین عملکرد را نشان داد. زارعی و همکاران (۲۰۲۱)، رفتار شکست بتن آسفالتی کامپوزیتی (ACC) در مودهای I و III را در دماهای ۱۸- و ۲۵+ درجه سلسیوس بررسی کردند. یافته‌ها حاکی از این بود که در دمای ۱۸-، مود III بیشترین پتانسیل ترک‌خوردگی را دارد؛ در حالی که در دمای ۲۵+، رفتار ترک در مود I

و III متفاوت است. افزودنی‌های پلی‌استر و لیگنوسولفونات کلسیم نیز باعث کاهش شکنندگی و بهبود عملکرد شکست شدند. در ادامه این موضوع، زارعی و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که مخلوطی حاوی ۰/۲۵ درصد لیگنوسولفونات کلسیم و ۶ درصد پلی‌استر، به دلیل چقرمگی و انرژی شکست بالا، بهترین عملکرد را در دماهای ۱۸- و ۲۵+ ارائه می‌دهد. در پژوهش دیگری، یانگ و همکاران (۲۰۲۱) به مقایسه اثر روش‌های مختلف آزمایش بر چقرمگی شکست مود I پرداختند و دریافتند که شکل نمونه تأثیر چندانی بر KIC ندارد، اما نوع بارگذاری تأثیر قابل توجهی دارد. نمونه‌های دیسکی با بارگذاری فشاری مقاومت کمتری نسبت به بارگذاری خمشی داشتند و کاهش دما به‌طور خطی باعث افزایش KIC شد (معتمدی و همکاران، ۲۰۲۰؛ حقیقت‌پور و همکاران، ۲۰۱۸؛ اقبالی و همکاران، ۲۰۱۹؛ زارعی و همکاران، ۲۰۲۲؛ زارعی و همکاران، ۲۰۲۱؛ یانگ و همکاران، ۲۰۲۱).

۳. تفاوت نتایج آزمایش چقرمگی شکست در

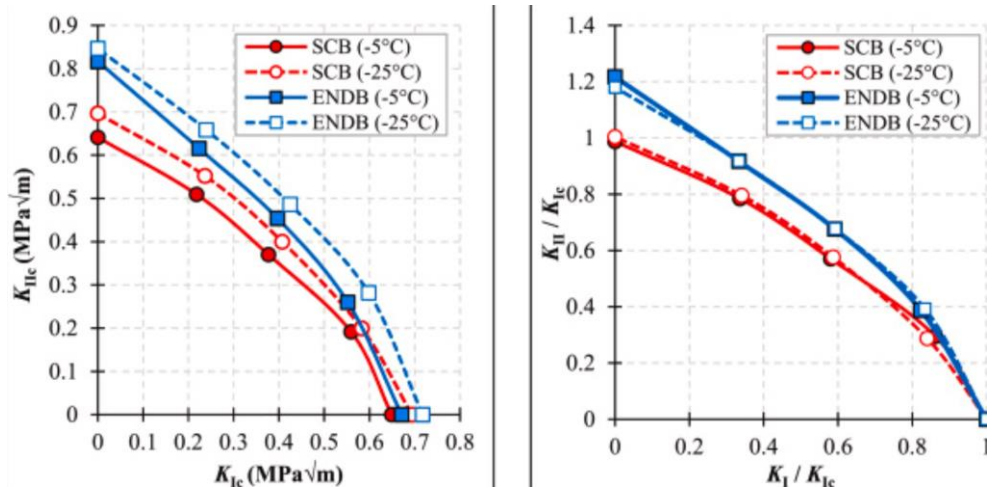
نمونه‌های SCB و ENDB

هندسه و شرایط بارگذاری نمونه‌های ترک‌دار، تأثیر قابل توجهی بر مقادیر مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی دارند. در یک پژوهش، برای ارزیابی مقاومت به شکست در حالت‌های خالص I، II، III و حالت‌های ترکیبی I/II و I/III، از دو نوع نمونه ENDB و SCB آزمایشی استفاده شد. آزمایش‌ها در دماهای ۵- و ۲۵- درجه سلسیوس انجام و داده‌ها با استفاده از اصول مکانیک شکست خطی الاستیک تحلیل شدند. نتایج نشان داد که چقرمگی شکست در حالت خالص I بین دو نمونه بسیار نزدیک بود. در حالت خالص II، چقرمگی شکست نمونه ENDB حدود ۲۰ درصد بیشتر از SCB بود. این

می‌شود که اهمیت آن‌ها به ترتیب کاهش می‌یابد. عبارت اول تکین است و به ضرایب شدت تنش وابسته است. عبارت دوم، که اغلب به عنوان تنش T شناخته می‌شود، یک مؤلفه تنش غیرتکین است که به فاصله از نوک ترک وابسته نیست. سایر عبارات مرتبه بالاتر، که معمولاً با عبارت نمایش داده می‌شوند، اهمیت بسیار کمتری در تحلیل‌ها دارند.

موضوع در شکل ۶ قابل ملاحظه است (کریمی و همکاران، ۲۰۲۳).

این تفاوت به پیش‌بینی مدل‌های MTS^1 و $GTMS^2$ بازمی‌گردد. برای بررسی دلیل اختلاف میان پیش‌بینی‌های مدل‌های MTS و $GMTS$ ، باید چارچوب ریاضیاتی آن‌ها مورد بازنگری قرار گیرد. با توجه به فرمول‌بندی مؤلفه تنش مماسی ($\sigma_{\theta\theta}$) در نوک ترک، مطابق با رابطه ۴، سه عبارت کلی برای توصیف این مؤلفه استفاده



شکل ۶. تفاوت نتایج چقرمگی شکست در نمونه‌های SCB و ENDB (کریمی و همکاران، ۲۰۲۳)

(KII)، سهم تنش T نیز در نظر گرفته شده است. در واقع، علت اصلی اختلاف بین داده‌های تجربی و پیش‌بینی‌های تئوری‌های شکست حالت مختلط در نمونه‌های مورد بررسی، اثر تنش T است که با معیار MTS نادیده گرفته می‌شود. با توجه به فرمول‌بندی معیار $GMTS$ ، هم علامت و هم بزرگی تنش T می‌تواند بر چقرمگی شکست حالت مخلوط تأثیر بگذارد. علامت و بزرگی تنش T به هندسه و حالت بارگذاری نمونه ترک خورده بستگی دارد. بنابراین، تحت بارگذاری حالت مخلوط، چقرمگی شکست نمونه‌های ترک خورده با مقادیر تنش T منفی، افزایش می‌یابد و با مقادیر تنش T مثبت، کاهش

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[\underbrace{K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta}_{MTS} + T \sin^2 \theta + H.O.T \right] \quad (20)$$

همانطور که در رابطه (۲۰) مشاهده می‌شود، معیار MTS فقط شامل اولین عبارت است که عبارت مفرد شامل پارامترهای KI و KII است. با افزودن عبارت دوم، برای در نظر گرفتن اثرات غیرمفرد، معیار MTS به معیار $GMTS$ تبدیل می‌شود. مقادیر چقرمگی شکست حالت مخلوط I/II را می‌توان تحت تأثیر شکل نمونه و شرایط بارگذاری قرار داد و تأثیر چنین اثراتی را می‌توان با وضوح بیشتری شناسایی کرد و این موضوع در صورتی محقق می‌گردد که علاوه بر متغیرهای شدت تنش (KI و

2- Generalized Maximum Tangential Stress (GMTS)

1- Maximum Tangential Stress (MTS)

معکوس باشد. این موضوع اهمیت انتخاب هندسه مناسب نمونه را برای شبیه‌سازی شرایط واقعی بارگذاری در روسازی‌ها آشکار می‌سازد.

۴-۲. نقش دما و شرایط محیطی

تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که دما به‌عنوان یک پارامتر کلیدی، رفتار ویسکوالاستیک قیر و در نتیجه چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. در دماهای کم (مانند ۲۵- درجه سلسیوس)، افزایش چقرمگی شکست در مود I ناشی از غالب شدن رفتار شکننده قیر است. در حالی که در دماهای زیاد، کاهش چقرمگی به دلیل رفتار ویسکوز قیر رخ می‌دهد. این نتایج تأیید می‌کند که انتخاب دمای آزمایش باید متناسب با شرایط اقلیمی منطقه مورد نظر باشد تا داده‌های آزمایشگاهی به شرایط واقعی روسازی تعمیم پذیرند. علاوه بر این، تأثیر نرخ بارگذاری بر چقرمگی شکست، لزوم شبیه‌سازی دقیق بارهای ترافیکی (مانند بارهای دینامیک و استاتیکی) در آزمایش‌ها را برجسته می‌سازد.

۴-۳. ارتباط داده‌های آزمایشگاهی با عملکرد

واقعی روسازی‌ها

یکی از چالش‌های اصلی در پژوهش‌های موجود، عدم ارتباط مستقیم بین داده‌های چقرمگی شکست آزمایشگاهی و طول عمر روسازی‌ها در شرایط عملیاتی است. برای مثال، اگرچه افزودن الیاف یا پلیمرها به طور کلی چقرمگی شکست را افزایش می‌دهد. اما این بهبود لزوماً به معنای افزایش طول عمر روسازی نیست. دلیل این امر را می‌توان در تفاوت بین شرایط کنترل شده آزمایشگاهی (مانند بارگذاری ساده و دمای ثابت) و شرایط پیچیده واقعی (مانند بارگذاری چرخه‌ای، نفوذ آب، و نوسانات دمایی) جستجو کرد. برای پر کردن این شکاف، توسعه مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر مکانیک شکست که اثرات ترکیبی پارامترهای محیطی، هندسی و

می‌یابد. تنش T در نمونه‌های SCB و ENDB تابعی از طول ترک (a) و محل تکیه‌گاه‌های پایین (S1 و S2) است و اغلب با مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود مانند ABAQUS محاسبه می‌شود (کریمی و همکاران، ۲۰۲۳).

۴. بحث و جمع‌بندی

نتایج حاصل از بررسی مطالعات پیشین و تحلیل‌های انجام شده در این پژوهش نشان می‌دهد که علیرغم پیشرفت‌های چشمگیر در حوزه مکانیک شکست روسازی‌های آسفالتی، شکاف‌های علمی قابل توجهی در درک رفتار ترک و ارتباط آن با عملکرد واقعی روسازی‌ها وجود دارد. در این بخش، یافته‌های کلیدی و تحلیل‌های مرتبط با آنها به صورت نظام‌مند ارائه می‌شود.

۴-۱. تفاوت چقرمگی شکست در هندسه‌های

مختلف نمونه‌ها

مقایسه نتایج آزمایش‌های انجام شده روی نمونه‌های SCB و ENDB نشان داد که تفاوت در هندسه و شرایط بارگذاری، تأثیر مستقیمی بر مقادیر چقرمگی شکست دارد. برای مثال، در مود خالص II، نمونه‌های ENDB نسبت به SCB حدود ۲۰ درصد چقرمگی شکست بالاتری نشان دادند. این اختلاف را می‌توان با تحلیل میدان تنش در نوک ترک و تأثیر تنش T (جزء غیرتکین تنش) در چارچوب مدل GMTS توضیح داد. در حالی که مدل سنتی MTS تنها به مؤلفه تکین تنش (وابسته به ضرایب شدت تنش) توجه می‌کند. مدل GMTS با در نظر گرفتن تنش T، پیش‌بینی دقیق‌تری از رفتار شکست ارائه می‌دهد. این تنش به‌طور مستقیم تحت تأثیر هندسه نمونه و شرایط بارگذاری قرار می‌گیرد. برای نمونه، در هندسه ENDB، علامت و مقدار تنش T به گونه‌ای است که مقاومت شکست در مودهای ترکیبی را افزایش می‌دهد؛ در حالی که در SCB این اثر ممکن است

در درک رفتار ترک خوردگی و بهبود مقاومت مصالح حاصل شده است، اما چالش‌های بنیادین متعددی هنوز پابرجاست. پژوهش‌های گذشته، عمدتاً بر بهینه‌سازی ترکیبات آسفالت از طریق افزودنی‌های شیمیایی و الیاف تقویت‌کننده متمرکز بوده‌اند تا چقرمگی شکست را افزایش دهند. با این حال، دو مسئله کلیدی به صورت حل‌نشده باقی مانده است:

۱. عدم درک مکانیسم‌های بنیادی تفاوت رفتار شکست در هندسه‌های مختلف روسازی
۲. شکاف بین داده‌های آزمایشگاهی و عملکرد واقعی روسازی‌ها تحت بارگذاری‌های پیچیده و شرایط محیطی متنوع

با توجه به این چالش‌ها، این مقاله بر اهمیت پرداختن به تحلیل علل اختلاف چقرمگی شکست در هندسه‌های مختلف، بررسی ارتباط داده‌های مکانیک شکست با طول عمر واقعی روسازی‌ها و توسعه مدل‌های پیشرفته برای پیش‌بینی عملکرد بلندمدت این سازه‌ها تأکید داشته است. تحقیقات آینده می‌تواند با استفاده از رویکردهایی مانند مدل GMTS و بهره‌گیری از ابزارهای پیشرفته مدل‌سازی و شبیه‌سازی، به درک بهتر رفتار شکست و بهبود طراحی روسازی‌ها کمک کند. این تلاش‌ها نه تنها افق‌های جدیدی در توسعه روسازی‌های پایدار باز خواهد کرد، بلکه می‌تواند به کاهش هزینه‌های نگهداری و افزایش ایمنی و کارایی زیرساخت‌های حمل‌ونقل منجر شود. در نهایت، با توجه به اینکه علم مکانیک شکست در روسازی‌های آسفالتی هنوز در مراحل اولیه توسعه قرار دارد، سرمایه‌گذاری در این حوزه تحقیقاتی می‌تواند نقشی کلیدی در ارتقای کیفیت زیرساخت‌های جاده‌ای و افزایش بهره‌وری آن‌ها ایفا کند. همانطور که در بررسی ادبیات فنی ملاحظه شد، علی‌رغم انجام تحقیقات گسترده در زمینه مکانیک شکست روسازی‌ها، تمرکز عمده پژوهش‌ها بر تأثیر استفاده از افزودنی‌ها و الیاف و تراشه‌های آسفالتی بر

مواد را در نظر می‌گیرند، ضروری است. مدل GMTS به دلیل در نظر گرفتن تنش T و اثرات غیرتکین، گامی رو به جلو در این زمینه محسوب می‌شود.

۴-۴. ضرورت توجه به مودهای ترکیبی بارگذاری

بیشتر پژوهش‌های موجود بر مود خالص I (کششی) متمرکز شده‌اند. در حالی که در شرایط واقعی، روسازی‌ها اغلب تحت تأثیر مودهای ترکیبی (مانند I/II یا I/III) قرار می‌گیرند. به عنوان مثال، در پیچ‌های جاده یا نقاطی که بارهای برشی غالب هستند، مودهای ترکیبی نقش تعیین‌کننده‌ای در رشد ترک ایفا می‌کنند. نتایج این مطالعه نشان داد که نمونه ENDB به دلیل امکان ایجاد مودهای ترکیبی و همسویی جهت بارگذاری با فرآیند تراکم آسفالت، ابزار مناسبی برای شبیه‌سازی این شرایط است. این یافته بر لزوم توسعه استانداردهای آزمایشی جدید برای مودهای ترکیبی تأکید دارد.

این پژوهش نشان داد که بهبود طول عمر روسازی‌های آسفالتی تنها با تمرکز بر افزودنی‌ها یا ضخامت لایه‌ها محقق نمی‌شود، بلکه نیازمند درک عمیق‌تر از مکانیزم‌های رشد ترک و ارتباط آن با پارامترهای طراحی است. مدل GMTS به عنوان یک ابزار تحلیلی پیشرفته، امکان در نظر گرفتن اثرات غیرخطی و غیرتکین تنش را فراهم می‌کند و می‌تواند به عنوان پایه‌ای برای توسعه استانداردهای طراحی روسازی در آینده مورد استفاده قرار گیرد. در نهایت، همسویی داده‌های آزمایشگاهی با شرایط واقعی از طریق شبیه‌سازی چندمقیاسی و در نظر گرفتن اثرات محیطی، کلید دستیابی به روسازی‌های پایدار و کم‌هزینه خواهد بود.

۵. نتیجه‌گیری

مطالعات اخیر در حوزه مکانیک شکست روسازی‌های آسفالتی نشان می‌دهد هرچند پیشرفت‌های چشمگیری

۳- توسعه مدل‌های جامع‌تر برای پیش‌بینی طول عمر روسازی‌ها بر اساس داده‌های آزمایشگاهی مکانیک شکست.

پرداختن به این موضوعات می‌تواند افق‌های جدیدی را در طراحی و نگهداری روسازی‌های پایدارتر باز کند و زمینه‌ساز ارتقای عملکرد و افزایش طول عمر روسازی‌ها در شرایط مختلف ترافیکی و اقلیمی شود. با توجه به اینکه بسیاری از جنبه‌های مرتبط با رفتار شکست در روسازی‌های آسفالتی هنوز به‌طور جامع و کاربردی مورد مطالعه قرار نگرفته‌اند، می‌توان گفت که علم مکانیک شکست در روسازی‌های آسفالتی همچنان در مراحل اولیه رشد خود قرار دارد. این علم با بهره‌گیری از مدل‌سازی‌های پیشرفته، آزمایش‌های دقیق‌تر و تحلیل‌های مبتنی بر داده‌های واقعی می‌تواند به بهبود قابل‌توجه روش‌های طراحی و نگهداری روسازی‌ها کمک کند.

چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی با دانه‌بندی‌های گوناگون معطوف بوده است. با این حال، علل بنیادی اختلاف در چقرمگی شکست برای هندسه‌های مختلف روسازی کمتر به‌صورت عمیق مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این، داده‌های به‌دست آمده از آزمایش‌های مکانیک شکست، اغلب صرفاً در قالب مقایسه‌های عددی ارائه می‌شوند و ارتباط این داده‌ها با طول عمر واقعی روسازی‌ها در شرایط عملیاتی تا کنون به‌طور جامع در تحقیقات بررسی نشده است. این در حالی است که تحلیل این ارتباط می‌تواند نقش مهمی در بهبود طراحی و پیش‌بینی عملکرد بلندمدت روسازی‌ها ایفا کند. بنابراین، پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات آینده به این موارد توجه ویژه‌ای شود:

۱- تحلیل عمیق‌تر چرایی اختلاف در چقرمگی شکست میان هندسه‌های مختلف روسازی و استفاده از رویکرد GMTS بجای MTS

۲- بررسی کاربردی‌تر و واقع‌بینانه‌تر داده‌های مکانیک شکست و ارتباط آن‌ها با طول عمر و رفتار واقعی روسازی‌ها تحت شرایط محیطی و بارگذاری متغیر

۶. مراجع

- Aliha, M. R. M. 2019. "On predicting mode II fracture toughness (KIIc) of hot mix asphalt mixtures using the strain energy density criterion". *Theor. Appl. Fract. Mech.*, 99: 36-43.
- Aliha, M. R. M., Ayatollahi, M. R., Smith, D. J. and Pavier, M. J. 2010. "Geometry and size effects on fracture trajectory in a , rock under mixed mode loading". *Eng. Fract. Mech.*, 77(11): 2200-2212.
- Aliha, M. M., Behbahani, H., Fazaeli, H. and Rezaifar, M. H. 2014. "Study of characteristic specification on mixed mode fracture toughness of asphalt mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 54: 623-635.
- Aliha, M. R. M., Fazaeli, H., Aghajani, S. and MoghadasNejad, F. 2015a. "Effect of temperature and air void on mixed mode fracture toughness of modified asphalt mixtures". *Constr Build. Mater.*, 95: 545-555.
- Aliha, M. R. M., Behbahani, H., Fazaeli, H. and Rezaifar, M. H. 2015b. "Experimental study on model fracture toughness of different asphalt mixtures". *Sci. Iran.*, 22(1): 120-130.
- Aliha, M. R. M., Bahmani, A. and Akhondi, S. 2016. "A novel test specimen for investigating the mixed mode I+ III fracture toughness of hot mix asphalt composites-Experimental and theoretical study". *Int. J. Solids Struct.*, 90: 167-177.

- Aliha, M. R. M., Razmi, A. and Mansourian, A. 2017. "The influence of natural and synthetic fibers on low temperature mixed mode I+ II fracture behavior of warm mix asphalt (WMA) materials. *Eng. Fract. Mech.*, 182: 322-336.
- Aliha, M. R. M., Mahdavi, E. and Ayatollahi, M. R. 2018a. "Statistical analysis of rock fracture toughness data obtained from different chevron notched and straight cracked mode I specimens". *Rock Mech. Rock Eng.*, 51: 2095-2114.
- Aliha, M. R. M., Linul, E., Bahmani, A. and Marsavina, L. 2018b. "Experimental and theoretical fracture toughness investigation of PUR foams under mixed mode I+ III loading". *Polym. Testing*, 67: 75-83.
- Aliha, M. R. M., Ziari, H., Mojaradi, B. and Sarbijan, M. J. 2020. "Heterogeneity effects on mixed-mode I/II stress intensity factors and fracture path of laboratory asphalt mixtures in the shape of SCB specimen". *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 43(3): 586-604.
- Aliha, M. R. M., Zalnezhad, M. and Haghightapour, P. J. 2023. "Fracture toughness of colored slurry seal at low temperatures and different loading modes: Comparative study with warm and hot mix asphalt materials". *Const. Build. Mater.*, 409: 133786.
- 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.
- Baradaran, S. and Aliha, M. R. M. 2024. "Mode I and mode II fracture assessment of green asphalt pavements containing plastic waste and RAP at low and intermediate temperature". *Results Eng.*, 103734.
- Behbahani, H., Ziari, H. and Kamboozia, N. 2016. "Evaluation of the visco-elasto-plastic behavior of glasphalt mixtures through generalized and classic Burger's models modification". *Constr. Build. Mater.*, 118: 36-42.
- Bui, H. H. and Saleh, M. 2021. "Effects of specimen size and loading conditions on the fracture behaviour of asphalt concretes in the SCB test". *Eng. Fract. Mech.*, 242: 107452.
- Eghbali, M. R., Tafti, M. F., Aliha, M. R. M. and 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.
- Fakhri, M., Amosoltani, E. and Aliha, M. R. M. 2017. "Crack behavior analysis of roller compacted concrete mixtures containing reclaimed asphalt pavement and crumb rubber". *Eng. Fract. Mech.*, 180: 43-59.
- Fuan, S., Ke, M., Kanghe, L., Kun, L. and Aliha, M. R. M. 2021. "Influence of specimen geometry on mode I fracture toughness of asphalt concrete". *Constr. Build. Mater.*, 276: 122181.
- Haghightapour, P. J. and Aliha, M. R. M. 2022. "Assessment of freezing and thawing cycle (FTC) effects on mixed mode I/III fracture toughness and work of fracture of HMA asphalt mixtures". *Theor. Appl. Fract. Mech.*, 118: 103261.
- Haghightapour, P. J., Aliha, M. R. M. and Keymanesh, M. R. 2018. "Evaluating mode I fracture resistance in asphalt mixtures using edge notched disc bend ENDB specimen with different geometrical and environmental conditions". *Eng. Fract. Mech.*, 190: 245-258.
- He, J., Liu, L., Yang, W. and Aliha, M. R. M. 2022. "Influence of testing method on mode II fracture toughness (KIIc) of hot mix asphalt mixtures". *Fatig. Fract. Eng. Mater. Struct.*, 45(10): 2940-2957.
- Kamboozia, N., Ziari, H. and Behbahani, H. 2018. "Artificial neural networks approach to predicting rut depth of asphalt concrete by using of visco-elastic parameters". *Constr. Build. Mater.*, 158: 873-882.
- Kamboozia, N., Mousavi Rad, S. and Saed, S. A. 2022. "Laboratory investigation of the effect of nano-ZnO on the fracture and rutting resistance of porous asphalt mixture under the aging condition and freeze-thaw cycle". *J. Mater. Civ. Eng.*, 34(5): 04022052.
- Karimi, H. R., Bidadi, J., Aliha, M. R. M., Mousavi, A., Mohammadi, M. H. and Haghightapour, P. J. 2023. "An experimental study and theoretical evaluation on the effect of specimen geometry and loading configuration on recorded fracture toughness of brittle construction materials". *J. Build. Eng.*, 75: 106759.

- Khakbaz, M., Kamboozia, N., Mohammad Aliha, M. R. and Taheriyani, A. R. 2024. "A review of the application of fracture mechanics in investigating the behavior of flexible and rigid pavements". *Road*, 32(121): 115-136.
- Liu, Y., Su, P., Li, M., You, Z. and Zhao, M. 2020. "Review on evolution and evaluation of asphalt pavement structures and materials". *J. Traffic Transport. Eng. (English Edition)*, 7(5): 573-599.
- Malek, M. and Keymanesh, M. 2023. "Impact of thickness, void content, temperature and loading rate on tensile fracture toughness and work of fracture of asphalt mixtures-An experimental study using the SCB test". *Eng Solid Mech.*, 11(2): 163-174.
- Motamedi, H., Fazaeli, H., Aliha, M. R. M. and Amiri, H. R. 2020. "Evaluation of temperature and loading rate effect on fracture toughness of fiber reinforced asphalt mixture using edge notched disc bend (ENDB) specimen". *Constr. Build. Mater.*, 234, 117365.
- Motamedi, H., Amiri, H. R., Fazaeli, H. and Mohammad Aliha, M. R. 2021. "Providing a prediction model for stress intensity factor of fiber-reinforced asphalt mixtures under pure mode III loading using the edge notched disc beam (ENDB)". *Civ. Eng. Infrastruct. J.*, 54(1): 43-58.
- Mousavi Rad, S., Kamboozia, N., Anupam, K. and Saed, S. A. 2022. "Experimental evaluation of the fatigue performance and self-healing behavior of nanomodified porous asphalt mixtures containing RAP materials under the aging condition and freeze-thaw cycle". *J. Mater. Civ. Eng.*, 34(12): 04022323.
- Mubaraki, M. and Sallam, H. E. M. 2020. "Reliability study on fracture and fatigue behavior of pavement materials using SCB specimen". *Int. J. Pavement Eng.*, 21(13): 1563-1575.
- Pirmohammad, S. and Ayatollahi, M. R. 2020. "Fracture behavior of asphalt materials". Springer International Publishing.
- Pirmohammad, S., Momeni, R. and Khanghahi, S. H. 2024. "Effect of SCB specimen size on mode I fracture parameters of asphalt concrete at low and intermediate temperatures". *Theor. Appl. Fract. Mech.*, 130: 104314.
- Radeef, H. R., Hassan, N. A., Mahmud, M. Z. H., Abidin, A. R. Z., Ismail, C. R., Abbas, H. F. and Al-Saffar, Z. H. 2021. "Characterisation of cracking resistance in modified hot mix asphalt under repeated loading using digital image analysis". *Theor. Appl. Fract. Mech.*, 116: 103130.
- Saed, S. A., Kamboozia, N., Ziari, H. and Hofko, B. 2021. "Experimental assessment and modeling of fracture and fatigue resistance of aged stone matrix asphalt (SMA) mixtures containing RAP materials and warm-mix additive using ANFIS method". *Mater. Struct.*, 54: 1-19.
- Shaker, H., Ameri, M., Aliha, M. R. M. and Rooholamini, H. 2023. "Evaluating low-temperature fracture toughness of steel slag aggregate-included asphalt mixture using response surface method". *Constr. Build. Mater.*, 370: 130647.
- Shen, J. 2004. "Collection of foreign asphalt pavement design method". China Communications Publishing & Media Management Co., Ltd., Beijing.
- Vaseghi, Z., Pirmohammad, S. and Momeni, R. 2024. "Impact of SCB specimen size, temperature, loading rate, and loading mode on fracture behavior of asphalt mixture using response surface method". *Fatig. Fract. Eng. Mater. Struct.*, 48(1): 382-403.
- Wei, M. D., Dai, F., Xu, N. W., Liu, Y. and Zhao, T. 2018. "A novel chevron notched short rod bend method for measuring the mode I fracture toughness of rocks". *Eng. Fract. Mech.*, 190: 1-15.
- Yang, Q. and Zhao, W. 2022. "Research on the crack resistance of semi-flexible pavement based on bonding and rheological properties of asphalt". *Constr. Build. Mater.*, 356: 129093.
- Yang, D., Karimi, H. R. and Aliha, M. R. M. 2021. "Comparison of testing method effects on cracking resistance of asphalt concrete mixtures". *Appl. Sci.*, 11(11): 5094.
- Yao, Y., Yang, J., Gao, J., Xu, J., Zhang, Y. and Yu, S. 2025. "Effect of design parameters on low-temperature cracking resistance of recycled hot-mix asphalt mixtures". *Mater. Struct.*, 58(1): 24.

- Zarei, M., Kordani, A. A., Zahedi, M., Akbarinia, F. and Khanjari, M. 2021. "Evaluation of low and intermediate temperatures fracture indices for modified warm mix asphalt (WMA) using edge notched disc bend (ENDB) specimen". *Theor. Appl. Fract. Mech.*, 116: 103137.
- Zarei, M., Abdi Kordani, A. and Zahedi, M. 2022. "Evaluating the fracture behaviour of modified asphalt concrete composites (ACC) at low and intermediate temperatures using edge notched disc bend (ENDB) specimen". *Road Mater. Pavement Design*, 23(8): 1917-1941.
- Ziari, H., Aliha, M. R. M., Moniri, A. and Saghafi, Y. 2020. "Crack resistance of hot mix asphalt containing different percentages of reclaimed asphalt pavement and glass fiber". *Constr. Build. Mater.*, 230: 117015.