

مروری بر کاربرد مفاهیم مکانیک شکست در بررسی رفتار روسازی‌های

انعطاف‌پذیر و صلب

مقاله علمی - مروری

محمد رضا خاکباز، دانشجوی دکتری، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
ندا کامبوزیا*، استادیار، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
محمد رضا محمدعلیها، دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
علیرضا طاهریان، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: nkamboozia@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۸ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۰

صفحه ۱۳۶-۱۱۵

چکیده

در روسازی‌های صلب و انعطاف‌پذیر، علم مکانیک شکست می‌باشد. مکانیک شکست، علم بررسی قطعات ترک‌دار از جمله نمونه‌های آزمایشگاهی روسازی می‌باشد که با استفاده از پارامترهای آن از جمله چقرمگی و انرژی شکست، می‌توان رفتار روسازی‌های آسفالتی و بتنی در برابر رشد و انتشار ترک را مورد بررسی قرار داد. هدف از این مقاله، مروری بر مطالعات صورت گرفته در حالت‌های مختلف رشد ترک با تمرکز بر نمونه‌های جدید از جمله نمونه‌های SCB و ENDB است. مرور این مطالعات، به بهبود وضعیت تحقیقات آتی در زمینه مکانیک شکست روسازی کمک شایانی خواهد کرد. با توجه به رشد روزافزون روسازی‌های بتنی، بویژه روسازی‌های بتن غلتکی، انجام مطالعات تکمیلی در حوزه رفتار رشد ترک در این روسازی‌ها توصیه می‌گردد. همچنین استفاده از نمونه‌های ENDB در مباحث مکانیک شکست در حالت‌های مختلف بارگذاری در تحقیقات مختلف مربوط به روسازی‌ها به علت سادگی در انجام آزمایش‌ها توصیه شده است.

واژه‌های کلیدی: مکانیک شکست، روسازی بتنی، روسازی آسفالتی، مکانیزم رشد ترک، چقرمگی شکست

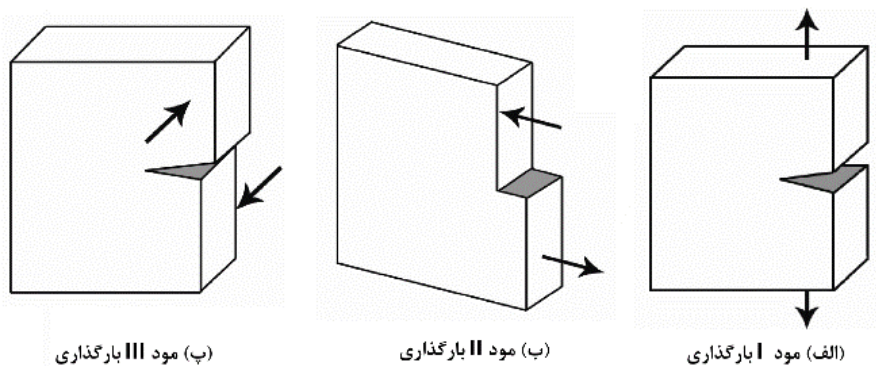
۱- مقدمه

از عبور و مرور خودروها، تنش‌های حرارتی ناشی از سرد شدن ناگهانی هوا و خستگی حرارتی ناشی از تغییرات درجه حرارت از جمله مهم‌ترین این عوامل هستند. یکی از رهیافت‌های مناسب برای بررسی تاثیرات عوامل ذکر شده بر فرایند گسترش ترک، علم مکانیک شکست می‌باشد که در سال‌های اخیر توسط محققان بسیاری جهت بررسی رشد ترک و کنترل آن‌ها در روسازی‌های انعطاف‌پذیر و صلب و همچنین بهبود بخشیدن خواص

ستر راه به دلیل ساختار فیزیکی خاص مصالح خود و همچنین به علت بارگذاری‌های ترافیکی مختلف و شرایط محیطی حاکم بر آن، در برابر ترک خوردگی آسیب‌پذیر می‌باشد. ترک خوردگی در روسازی زمانی رخ می‌دهد که آسیب تجمعی از آستانه ترک خوردگی مصالح روسازی فراتر رود (Sudarsanan and Kim, 2022). عوامل متعددی در ایجاد و گسترش ترک در روسازی‌های آسفالتی و بتنی نقش دارند که بارهای ترافیکی حاصل

همچنین مودهای بارگذاری به صورت ترکیبی از مودهای اشاره شده نیز می‌توانند به عنوان انواع دیگری از مودهای بارگذاری در مکانیک شکست محسوب شوند (Ayatollahi et al., 2012; Fakhri, Amosoltani and Aliha, 2017). مطابق با تحقیقات صورت گرفته، روسازی راه‌هایی که دارای ترک از بالا به پایین هستند و در معرض بارهای ترافیکی وسایل نقلیه در حال حرکت قرار دارند، ممکن است ترکیبی از لغزش صفحه را تجربه کنند که مود ترکیبی محسوب می‌گردد (Ameri et al., 2011; Aliha, 2015). به عنوان مثال روسازی‌های صلب و انعطاف‌پذیری که دارای ترک از بالا به پایین هستند، اغلب در معرض مود خالص I یا حالت شکست بازشدگی ترک قرار می‌گیرند و این رایج‌ترین حالت شکست به دلیل ترک‌خوردگی در سازه‌های روسازی (بتنی و آسفالتی) است. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، بارهای ترافیکی از طریق وسایل نقلیه عبوری و تغییرات دمای روزانه یا فصلی یا چرخه‌های یخبندان و ذوب، دو منبع اصلی انتشار ترک در داخل روسازی‌ها هستند. در واقع، دو روند تغییرات حرارتی و بارگذاری ترافیکی به تدریج و به طور مکرر سطوح ترک از بالا به پایین در سطح پوشش را باز می‌کنند (Braham, Buttlar, & Ni, 2010; Kim, Wagoner, & Wang et al., 2017; Buttlar, 2009). همچنین ترک‌های انعکاسی در روسازی‌ها، ترکیبی از شکستگی حالت I (بازشدگی) و حالت II (لغزشی) است. مثال‌های اشاره شده، اهمیت علم مکانیک شکست و حالات مختلف بارگذاری (مودهای اول تا سوم و مودهای ترکیبی) در روسازی‌ها را نشان می‌دهد.

مخلوط‌های آسفالتی و بتنی با هدف کاهش سرعت رشد ترک و افزایش استحکام شکست ترک‌ها به کار گرفته شده است. عوامل زیادی در پیدایش و گسترش ترک در روسازی‌های صلب و انعطاف‌پذیر موثر است. بطور کلی ترک‌ها در شکل، اندازه، نوع حرکت و مودهای مختلف و سرعت تغییرات با یکدیگر متفاوت می‌باشند. قبل از شناخت مودهای مختلف بارگذاری، لازم است یک طبقه‌بندی کلی از دو نوع مختلف از ترک‌های ایجادشده در روسازی به عمل آید. ترک‌های بوجود آمده در راه‌های انعطاف‌پذیر و ترک‌های بوجود آمده در راه‌های صلب، طبقه‌بندی کلی ترک‌ها در روسازی راه‌ها را تشکیل می‌دهند. همچنین سه مکانیزم مختلف به عنوان عوامل اصلی در ایجاد ترک در روسازی‌ها شناخته شده‌اند که تنش‌های حرارتی، خستگی حرارتی و بارهای ترافیکی را شامل می‌شوند (Ayatollahi et al., 2012; Pirmohammad and Ayatollahi 2020). در علم مکانیک شکست، مودهای مختلف بارگذاری در اجسام جامد قابل تصور است. مود یا چگونگی رشد ترک، طرز و شکل جداشدن و از هم گسیختگی هندسی عضو می‌باشد. بطور کلی ترک‌ها در داخل اجسام و قطعات، در اثر شرایط بارگذاری اعمالی به چندین صورت می‌توانند تغییر فرم دهند. بارگذاری قطعات ترک‌دار از جمله قطعات روسازی صلب و انعطاف‌پذیر به سه حالت تقسیم‌بندی می‌شوند. مود I بارگذاری (حالت باز شدگی)، مود II بارگذاری (حالت برشی در داخل صفحه و لغزش بر روی یکدیگر) و مود III بارگذاری (حالت برشی خارج از صفحه و لغزش بر روی یکدیگر)، تقسیم‌بندی‌های کلی بارگذاری قطعات ترک‌دار در علم مکانیک شکست هستند (شکل ۱).

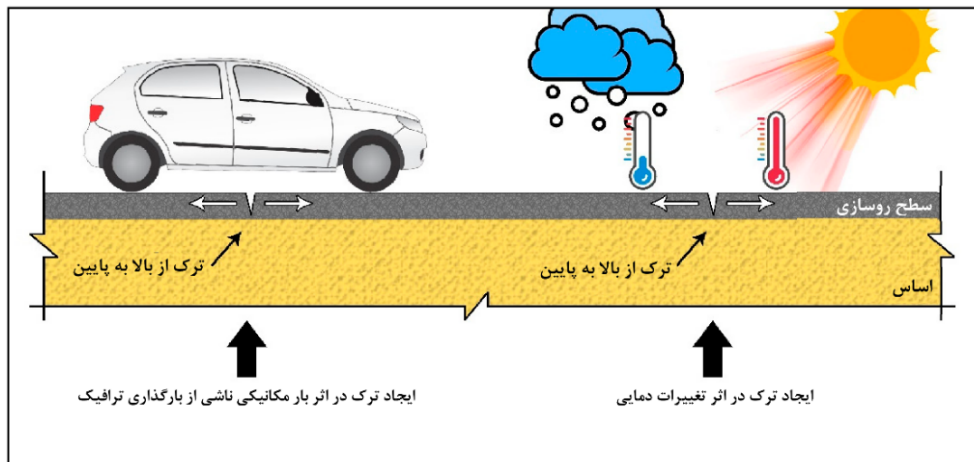


الف) مود I بارگذاری

ب) مود II بارگذاری

پ) مود III بارگذاری

شکل ۱. حالت‌های مختلف خالص بارگذاری در مکانیک شکست اجسام جامد (Ayatollahi et al., 2012; Pirmohammad and Ayatollahi 2020)



شکل ۲. مدل ترک کششی روسازی آسفالتی ناشی از ترافیک و تغییرات حرارت (Yang, Karimi & Aliha, 2021)

بنابراین هدف از این مقاله، بررسی جایگاه علم مکانیک شکست به عنوان یک روش بسیار مهم در آنالیز انواع مختلف روسازی‌های صلب و انعطاف‌پذیر در جهت شناخت رفتار رشد ترک در برابر بارگذاری‌های ترافیکی و شرایط مختلف جوی بویژه در دماهای پایین است. بدین ترتیب در ابتدا به رفتار مکانیک شکست روسازی‌های صلب و انعطاف‌پذیر پرداخته می‌شود. در ادامه نمونه‌های آزمایشگاهی مکانیک شکست روسازی معرفی خواهد شد و مهم‌ترین آن‌ها در میان مطالعات مشخص خواهد گردید. سپس روابط موردنظر در مکانیزم رشد ترک در نمونه‌های منتخب ذکر خواهد شد. سپس رفتار مکانیک شکست روسازی‌های صلب و انعطاف‌پذیر و مطالعات آزمایشگاهی آن‌ها مورد بحث قرار خواهد گرفت. در انتها، نتیجه‌گیری از ذکر مطالب مطروحه عنوان خواهد شد.

۲-۱- معرفی نمونه‌های آزمایشگاهی مکانیک شکست روسازی

برخلاف بسیاری از مواد مهندسی مانند فلزات، عدم وجود روش تحقیق و نمونه‌های استاندارد شده برای انجام آزمایشات چقرمگی شکست بر روی مخلوط‌های آسفالتی بسیار احساس می‌گردد. بررسی منابع مختلف در تحقیقات آزمایشگاهی مکانیک شکست و رفتار رشد ترک در روسازی‌های انعطاف‌پذیر و صلب نشان از نمونه‌های آزمایشگاهی متنوع می‌دهد (Eghbali et al., 2019). در علم مواد، چقرمگی شکست ضریب شدت تنش بحرانی یک ترک تیز است که در آن، انتشار ترک به‌طور ناگهانی سریع و نامحدود می‌شود. آزمون‌های چقرمگی شکست برای تعیین کمی مقاومت یک ماده در برابر شکست توسط ترک‌ها، انجام می‌شود.

بنابراین هدف از این مقاله، بررسی جایگاه علم مکانیک شکست به عنوان یک روش بسیار مهم در آنالیز انواع مختلف روسازی‌های صلب و انعطاف‌پذیر در جهت شناخت رفتار رشد ترک در برابر بارگذاری‌های ترافیکی و شرایط مختلف جوی بویژه در دماهای پایین است. بدین ترتیب در ابتدا به رفتار مکانیک شکست روسازی‌های صلب و انعطاف‌پذیر پرداخته می‌شود. در ادامه نمونه‌های آزمایشگاهی مکانیک شکست روسازی معرفی خواهد شد و مهم‌ترین آن‌ها در میان مطالعات مشخص خواهد گردید. سپس روابط موردنظر در مکانیزم رشد ترک در نمونه‌های منتخب ذکر خواهد شد. سپس رفتار مکانیک شکست روسازی‌های صلب و انعطاف‌پذیر و مطالعات آزمایشگاهی آن‌ها مورد بحث قرار خواهد گرفت. در انتها، نتیجه‌گیری از ذکر مطالب مطروحه عنوان خواهد شد.

۲- رفتار مکانیک شکست روسازی‌های صلب و انعطاف‌پذیر

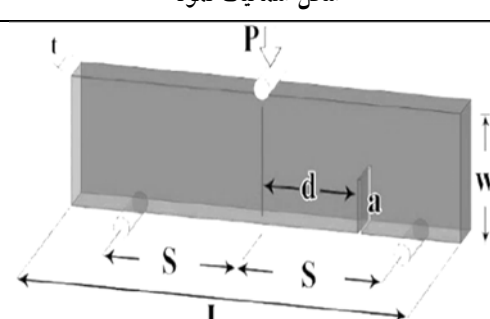
همانطور که اشاره شد، روش مکانیک شکست یکی از ابزارهای قدرتمند در تحلیل فرآیندهای رشد خرابی در مصالح مهندسی می‌باشد. مکانیک شکست علم مطالعه عکس‌العمل و گسیختگی سازه در نتیجه شروع و رشد ترک می‌باشد. علم مکانیک شکست به صورت مستقیم به ترک‌های موجود در بدنه جسم پرداخته و رشد آسیب از طریق یک معیار مشخص که بر پیش‌بینی رفتار ترک‌ها تمرکز دارد، مورد سنجش قرار می‌گیرد (Anderson, 2019).

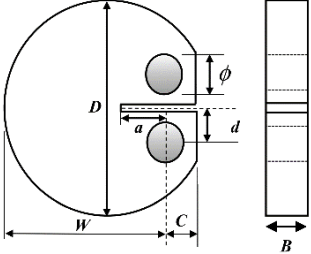
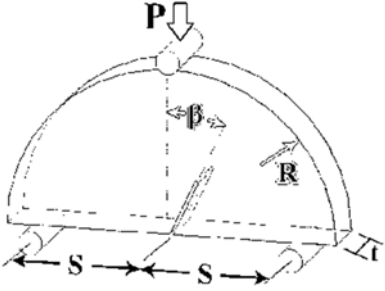
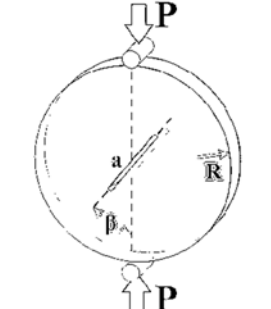

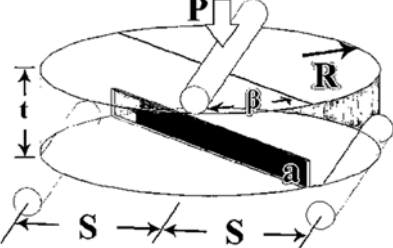
چنین تست‌هایی به یک مقدار واحد از چقرمگی شکست و یا یک منحنی مقاومت منجر می‌شوند. منحنی‌های مقاومت، نمودارهایی هستند که در آن‌ها پارامترهای چقرمگی شکست برحسب پارامترهایی ترسیم می‌شوند که انتشار ترک را توصیف می‌کنند. منحنی مقاومت یا مقدار واحد چقرمگی شکست، براساس مکانیزم و پایداری شکستگی به دست می‌آیند. چقرمگی شکست یک ویژگی مکانیکی بحرانی برای کاربردهای مهندسی از جمله در انواع مختلف روسازی‌ها است. چقرمگی شکست را می‌توان به صورت تجربی با استفاده از نمونه‌های مناسب و روش‌های آزمایشی مربوطه تعیین کرد (Ayatollahi et al., 2012). انواع مختلفی از آزمون‌ها برای اندازه‌گیری چقرمگی شکست مواد وجود دارد. در میان نمونه‌های آزمایشگاهی موجود برای به دست آوردن مقدار چقرمگی شکست، برخی از روش‌ها که در جدول ۱ عنوان شده، بسیار مورد توجه محققین مختلف قرار گرفته است.

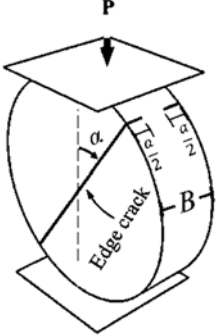
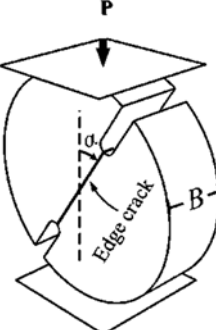
بر اساس مطالعات صورت گرفته، رفتار شکست مواد شکننده و شبه شکننده و مقدار چقرمگی شکست در حالت اندازه‌گیری شده می‌تواند به طور قابل توجهی تحت تاثیر نوع نمونه آزمایش و بارگذاری اعمالی قرار گیرد (Aliha et al., 2012). اگرچه تأثیر طراحی مخلوط و مصالح روسازی بر خواص مکانیکی و رفتار شکست روسازی‌ها به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است (Aliha et al., 2015; Pirmohammad, and Ayatollahi, 2014; Song and Huang & Shu, 2018; Wei et al., 2018; Aliha and Razmi & Mansourian, 2017; Guo et al.,

نمونه و روش آزمایش کمتر مورد توجه محققان روسازی در زمینه مکانیک شکست قرار گرفته است. بطور کلی سادگی شکل نمونه و هندسه آزمایش، موضوع مهمی برای انجام آزمایش‌های شکست در روسازی‌های آسفالتی و بتنی است. علاوه بر این، نمونه و نوع اعمال بارگذاری به آن باید نماینده خوبی برای بارگذاری در شرایط واقعی باشد. اکثر نمونه‌هایی که برای انجام آزمایش‌های چقرمگی شکست روی مخلوط‌های آسفالتی و بتنی استفاده می‌شوند، به صورت دیسک و تیر هستند. نمونه‌های دایره‌ای و نیمه دایره‌ای ENDB و SCB از مهم‌ترین این نمونه‌ها در آزمایش‌های مکانیک شکست هستند که در بسیاری از تحقیقات در سال‌های اخیر از آن‌ها استفاده شده است. علاوه بر این، تمامی نمونه‌های ذکر شده بصورت خمشی سه نقطه‌ای مرسوم مورد بارگذاری قرار می‌گیرند و بنابراین می‌توانند شبیه‌سازی خوبی برای پدیده ترک‌خوردگی از بالا به پایین در روسازی‌های آسفالتی و بتنی در شرایط واقعی تحت بار ترافیک باشند (Yang, Karimi & Aliha, 2021). همچنین با توجه به گستردگی تحقیقات صورت گرفته و اهمیت بالای نمونه‌های ENDB و SCB در تحقیقات مربوط به روسازی‌ها در سال‌های اخیر (Eghbali et al., 2019) (به علت سهولت ساخت نمونه‌ها و سادگی روند آزمایش‌ها در هر سه حالت بارگذاری)، مروری بر تحقیقات آزمایشگاهی دو نمونه ذکر شده در این مقاله عنوان شده است.

جدول ۱. نمونه‌های مورد توجه محققان در بررسی چقرمگی شکست در نمونه‌های صلب و انعطاف پذیر

منبع	شکل شماتیک نمونه	نام نمونه	ردیف
Marasteanu et al., 2002 Wagoner et al., 2005 Kim, Wagoner & Buttlar, 2009 Braham, Buttlar & Ni, 2010 Aliha et al., 2015 Aliha et al., 2021 Yang, Karimi & Aliha, 2021		تیرچه مستطیلی با ترک ثابت یا متغییر (SENB ¹)	۱

<p>Stewart, Oputa & Garcia, 2018 He et al., 2022a</p>		<p>نمونه با ترک لبه و تنش فشرده دایره‌ای با بارگذاری پین (DCT^۲)</p>	<p>۲</p>
<p>Aliha et al., 2015 Fakhri, Amoosoltani and Aliha, 2017 Aliha et al., 2020 Mubarak and Sallam, 2020 Saed et al., 2021 Xiongzhou et al., 2021 Najjar, Moghaddam & Sahaf, 2021 Kamboozia, Mousavi & Saed, 2022 Ziari et al., 2023 Bazoobandi et al., 2023</p>		<p>نمونه‌های نیم‌دایره‌ای ترک‌دار (SCB^۳)</p>	<p>۳</p>
<p>Aliha and Ayatollahi, 2010 Mubarak, Abd-Elhady & Sallam, 2013 He et al., 2021</p>		<p>نمونه دیسک برزیلی ترک خورده و در مرکز بارگذاری شده (BD^۴)</p>	<p>۴</p>
<p>Bahmani et al., 2021 Yang, Karimi & Aliha, 2021</p>		<p>نمونه دیسک ترک خورده لبه بارگذاری شده با فشرده سازی قطری (ENDC^۵)</p>	<p>۵</p>
<p>Pour, Aliha & Keymanesh, 2018 Eghbali et al., 2019 Bahmani et al., 2021 Yang, Karimi & Aliha, 2021 He et al., 2022b Haghighatpour and Aliha, 2022 Zarei, Abdi Kordani & Zahedi, 2022 Hoseini et al., 2023</p>		<p>قطعه ترک دار دیسک خمشی (ENDB^۶)</p>	<p>۶</p>

<p>Aliha, Kucheki & Asadi, 2021 Liu & Ma, 2023</p>		<p>قطعه با نیروی قطری با دو ترک از دو طرف (DNDC^v)</p>	<p>۷</p>
<p>Aliha, Kucheki & Asadi, 2021 Liu & Ma, 2023</p>		<p>قطعه با نیروی قطری با بریدگی U شکل (UNDC^h)</p>	<p>۸</p>

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 بصورت معادله ۴ می‌باشد.

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

همچنین معادلات تنش در مود II بارگذاری بصورت معادلات ۵ الی ۸ می‌باشد.

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

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

$$\sigma_{xy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (۷)$$

$$\begin{cases} \sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0 \\ \sigma_{zz} = 0 \text{ (تنش صفحه‌ای)} & (۸) \\ \sigma_{zz} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \text{ (تغییر شکل صفحه‌ای)} \end{cases}$$

۲-۲- روابط موردنظر در مکانیزم رشد ترک

روابط کلی در مکانیزم رشد ترک در علم مکانیک شکست وجود دارد که در این بخش به آن پرداخته می‌شود. معادلات تنش در مدهای اول تا سوم بارگذاری بصورت خالص و ترکیبی با توجه به شکل ۳ عنوان شده است. معادلات تنش در مود I بارگذاری در روابط ۱ الی ۳ نشان داده شده است.

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

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

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

که در آن T ، ترم تنشی 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 در قطعات متداول و استاندارد شکست، قطعات دو بعدی 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

شرایط بارگذاری در حالت ترکیبی عمومی را می‌توان به صورت معادلات ۱۲ الی ۱۷ نوشت.

همچنین معادلات تنش در مود III بارگذاری بصورت معادلات ۹ الی ۱۱ است. میدان تنش الاستیک اطراف نوک ترک تحت

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

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

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

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

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

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

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

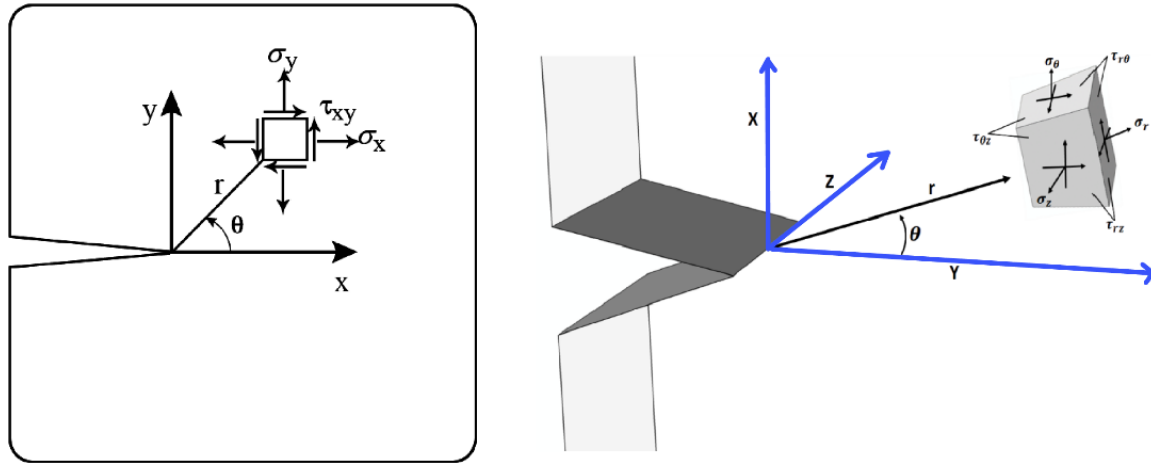
$$\sigma_{z\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} K_{III} \cos \frac{\theta}{2} + H.O.T \quad (16)$$

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

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

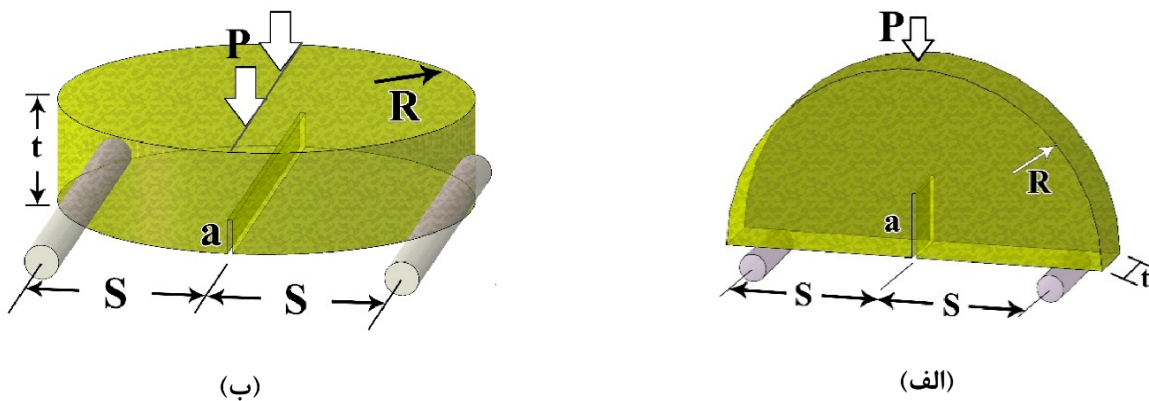
که در آن σ ، تنش اعمالی بر روی قطعه و Y_i ، ضریب هندسی و a ، طول ترک برای ترک‌های لبه‌ای و یا نصف طول ترک برای ترک‌های داخلی می‌باشد. واحد ضریب شدت تنش در سیستم بین‌المللی (SI) بصورت $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ می‌باشد. برای هندسه‌ها و بارگذاری‌های ساده، مقدار Y_i و در نتیجه مقدار ضرایب شدت تنش از طریق روش‌های تحلیلی قابل محاسبه است (Ayatollahi et al., 2012).

که در آن 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. همچنین K_I ، K_{II} و K_{III} به ترتیب ضرایب شدت تنش^۹ مربوط به حالت‌های I، II و III بارگذاری هستند که از اهمیت بسزایی در تجزیه و تحلیل مسائل مربوط به مکانیک شکست برخوردارند. فرم عمومی نمایش ضریب شدت تنش بصورت معادله ۱۸ می‌باشد.



شکل ۳. موقعیت سه بعدی در مجاورت یک ترک جهت نمایش روابط مربوط به حالات ترکیبی بارگذاری (سمت راست) و تنش های الاستیک در اطراف نوک ترک در مختصات کارتزین جهت نمایش حالات خالص بارگذاری (سمت چپ)

(Aliha, Bahmani & Akhondi, 2015; Ayatollahi et al., 2012)



شکل ۴. نمایش پارامترهای مورد نظر در محاسبه روابط شدت تنش در (الف) نمونه های SCB و (ب) نمونه های ENDB

(Yang, Karimi & Aliha, 2021)

که در آن ضریب شدت تنش (K_i) و ضریب هندسی (Y_i) می تواند مربوط به حالات اول تا سوم بارگذاری ($i = I, II, III$) باشد و سایر پارامترها در شکل ۴ مشخص است. همانطور که اشاره گردید، ترک های بوجود آمده در روسازی های انعطاف پذیر و ترک های بوجود آمده در روسازی های صلب، طبقه بندی کلی ترک ها در روسازی راه ها را تشکیل می دهند. بنابراین در این بخش رفتار مکانیک شکست روسازی های انعطاف پذیر و صلب تفکیک شده اند.

همانطور که در بخش قبل بیان شد، در این مقاله به بررسی نمونه های ENDB و SCB پرداخته خواهد شد. بطور خاص، روابط شدت تنش موجود در این نمونه ها مطابق با روابط ۱۸ الی ۱۹ است (Bahmani et al., 2021; Yang, Karimi & Aliha, 2021).

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

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

۳-۲- رفتار مکانیک شکست روسازی‌های انعطاف‌پذیر

آسفالت به عنوان یک ماده مرکب، پرمصرف‌ترین ماده برای روسازی راه‌ها می‌باشد. اجزای اصلی آسفالت، قیر و سنگدانه‌ها هستند. به دلیل شکنندگی آسفالت ماستیک و قیر در دماهای پایین، رفتار این ماده عمدتاً شکننده یا شبه شکننده است که این شکنندگی بویژه در دمای پایین نمود پیدا می‌کند (Wagoner et al., 2005; Li et al., 2008; Wagoner, Buttler & Paulino 2005; Aliha et al., 2014; Wang, Zhu & Liu, 2016).

۳-۲-۱- تقسیم‌بندی ترک‌ها در روسازی‌های انعطاف‌پذیر

پدیده شکست ترد ناشی از ترک خوردگی، یکی از مکانیسم‌های اصلی تخریب روسازی‌های آسفالتی بویژه در مناطق سردسیر یا در فصل زمستان است. از این رو طراحی و ساخت مخلوط آسفالتی با مقاومت بالا در برابر ترک‌خوردگی، دستاوردی برای مهندسان روسازی است. همانطور که اشاره شد، چقرمگی شکست یک پارامتر مهم در چارچوب علم مکانیک شکست است که مقاومت مواد در برابر انتشار ترک را توصیف می‌کند (Aliha et al., 2015; Mirsayar, Shi, & Zollinger, 2017; Xu et al., 2020).

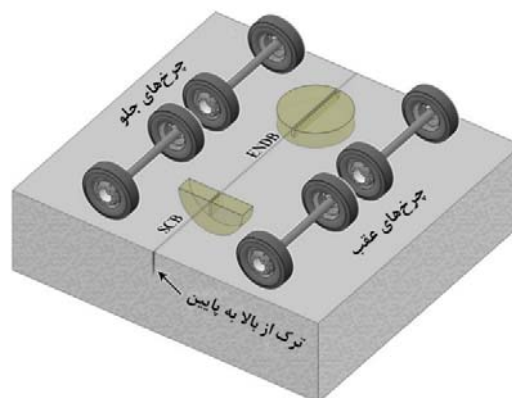
جهت بررسی مکانیک شکست روسازی‌های آسفالتی، بایستی تقسیم‌بندی کلی در مورد ترک‌ها صورت گیرد. ترک‌ها در روسازی‌های آسفالتی به سه دسته حرارتی، خستگی و انعکاسی تقسیم‌بندی می‌شوند. ترک حرارتی به دلیل تنش حرارتی ناشی از تغییرات دمای روزانه یا فصلی در لایه آسفالت بوجود می‌آید. ترک خستگی به دلیل بارگذاری چرخه‌ای ناشی از وسایل نقلیه در حال حرکت بوجود می‌آید. همچنین ترک انعکاسی از عیوب موجود در لایه‌های زیرین روسازی‌های آسفالتی ناشی از بارگذاری ترافیکی بوجود می‌آید (Braham, Buttler & Ni, 2010). تغییرات دما ممکن است تنش‌های حرارتی کششی را در لایه آسفالتی ایجاد کند و از این جهت، روسازی می‌تواند در معرض تغییر شکل حالت I (باز شدن ترک) قرار گیرد. همچنین، بارگذاری ترافیک می‌تواند ترکیب‌های مختلفی از تغییر شکل‌های برشی در داخل صفحه (حالت II) و برشی خارج صفحه (حالت III) و یا ترکیبی از آنها بسته به محل چرخ‌های خودرو نسبت به موقعیت ترک ایجاد کند (Ameri et al., 2011).

۳-۲-۲- تحقیقات آزمایشگاهی صورت گرفته در زمینه رفتار

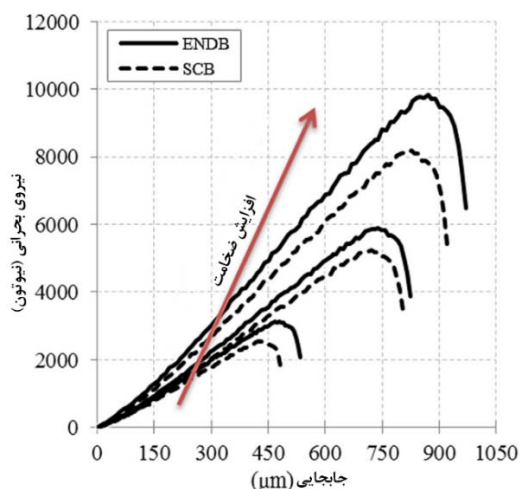
رشد ترک در روسازی‌های انعطاف‌پذیر

برای انجام آزمایش بر روی مخلوط‌های آسفالتی داغ^{۱۱} یا گرم^{۱۲}، شکل و هندسه نمونه آزمایشی باید ساده باشد. اکثریت قریب به اتفاق نمونه‌های آسفالتی برای انجام آزمایش‌های چقرمگی شکست به شکل دایره‌ای و دیسکی هستند. این موضوع عمدتاً به این دلیل است که نمونه‌های آزمایشگاهی مورد استفاده برای مشخصه‌سازی مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی، اغلب از نمونه‌های استوانه‌ای استخراج و تهیه می‌شوند که می‌توان با استفاده از دستگاه تراکم چرخشی^{۱۳} به دست آورد. در نتیجه، ساخت نمونه‌های دایره‌ای و نیمه‌دایره‌ای مانند نمونه‌های SCB و ENDB می‌تواند به راحتی با استفاده از دستگاه تراکم کننده چرخشی با لحاظ تراکم استاندارد در شرایط واقعی ساخته شوند. از سوی دیگر، نمونه‌های آزمایشی باید تا حد امکان شرایط بارگذاری واقعی اعمال شده بر روی یک لایه ترک‌خورده را شبیه‌سازی کنند. عبور ترافیک از روی ترک از بالا به پایین در یک روسازی انعطاف‌پذیر ممکن است عمدتاً یک بار خمشی روی روسازی ایجاد کند که منجر به باز شدن سطوح ترک می‌شود (Fuan et al., 2021). به اعتقاد محققان، نمونه‌های ENDB، شبیه‌سازی واقعی‌تری در مورد رفتار ترک‌های برشی را ارائه می‌دهد (He et al., 2022a). همانطور که در شکل ۵ به صورت شماتیک نشان داده شده است، نمونه‌های SCB و ENDB، نمونه‌های آزمایشی جهت شبیه‌سازی بار خمشی اعمال‌شده به ترک‌های از بالا به پایین تحت بارهای ناشی از خودروهای عبوری هستند. اگرچه این دو نمونه آزمایش شکست به طور کلی دارای اشکال دایره‌ای هستند و بصورت خمشی سه نقطه‌ای متقارن بارگذاری می‌شوند، اما هندسه‌های متفاوتی دارند و همانطور که اشاره شد، شیوه محاسبه چقرمگی شکست آن‌ها متفاوت است. با توجه به مطالعات شکست انجام شده بر روی مواد شکننده و شبه شکننده مانند سنگ‌ها، نوع نمونه آزمایشی می‌تواند به طور قابل توجهی بر مقدار چقرمگی شکست حالت اندازه‌گیری شده تاثیرگذار باشد (Aliha, Mahdavi & Ayatollahi, 2017; Aliha et al., 2012).

پارامترهای مربوط به ترک خوردگی مانند شاخص چقرمگی و شاخص مقاومت در برابر ترک رفتار شکننده مخلوط‌های آسفالتی، با استفاده از انرژی شکست به دست آمده از منحنی بار-جابجایی بدست می‌آید (Zarei, et al., 2021). منحنی‌های بار-جابجایی بدست آمده برای نمونه‌های SCB و ENDB آزمایش شده تحت شرایط بارگذاری مختلف در شکل ۸ نشان داده شده است. از این منحنی‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که رفتار شکست در دمای پایین مخلوط آسفالتی آزمایش شده بصورت تقریباً خطی بوده و در لحظه انتشار ترک، شکست شکننده خواهد بود. همچنین افزایش ضخامت نمونه‌ها، منجر به افزایش نیروی بحرانی (P_{CR}) خواهد شد (Fuan et al., 2021).



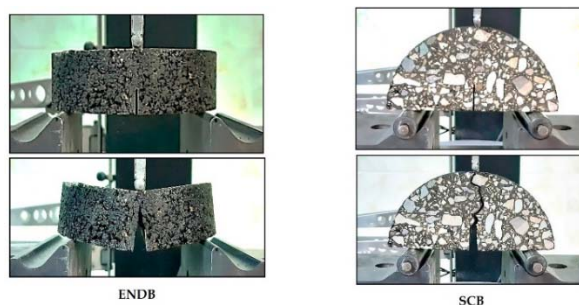
شکل ۵. شبیه‌سازی حالت بازشدگی ترک از بالا به پایین در سطح روسازی آسفالتی و در معرض خمش ناشی از وسایل نقلیه عبوری (Fuan et al., 2021)



شکل ۸. نمودار نیرو-جابجایی و مقایسه بین نمونه‌های آسفالتی ENDB و SCB در دمای پایین با افزایش ضخامت نمونه‌ها (Fuan et al., 2021)

همچنین شکل ۹، تأثیر دمای آزمایش بر روی مقدار K_{IC} نمونه‌های ENDB و SCB ساخته شده از مخلوط آسفالتی را نشان داده است. با کاهش دمای آزمایش از ۱۵- درجه سانتی‌گراد به ۲۵- درجه سانتی‌گراد، هر دو مقدار $K_{IC}(ENDB)$ و $K_{IC}(SCB)$ تقریباً ۲۰ درصد برای نرخ‌های بارگذاری مختلف افزایش می‌یابد. یک دلیل احتمالی از رخداد این موضوع را می‌توان به تغییر ویسکوزیته و افزایش سفتی قیر در دماهای زیر صفر نسبت داد که در نهایت می‌تواند منجر به افزایش سختی مخلوط آسفالتی

شکل ۶، رفتار نمونه‌های آسفالتی SCB و ENDB در زمان شکست در آزمایشگاه را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۷، وضعیت این نمونه‌ها بعد از شکست را نمایش می‌دهد.



شکل ۶. رفتار نمونه‌های آسفالتی SCB و ENDB هنگام انجام آزمایش مکانیک شکست (Yang, Karimi & Aliha, 2021)

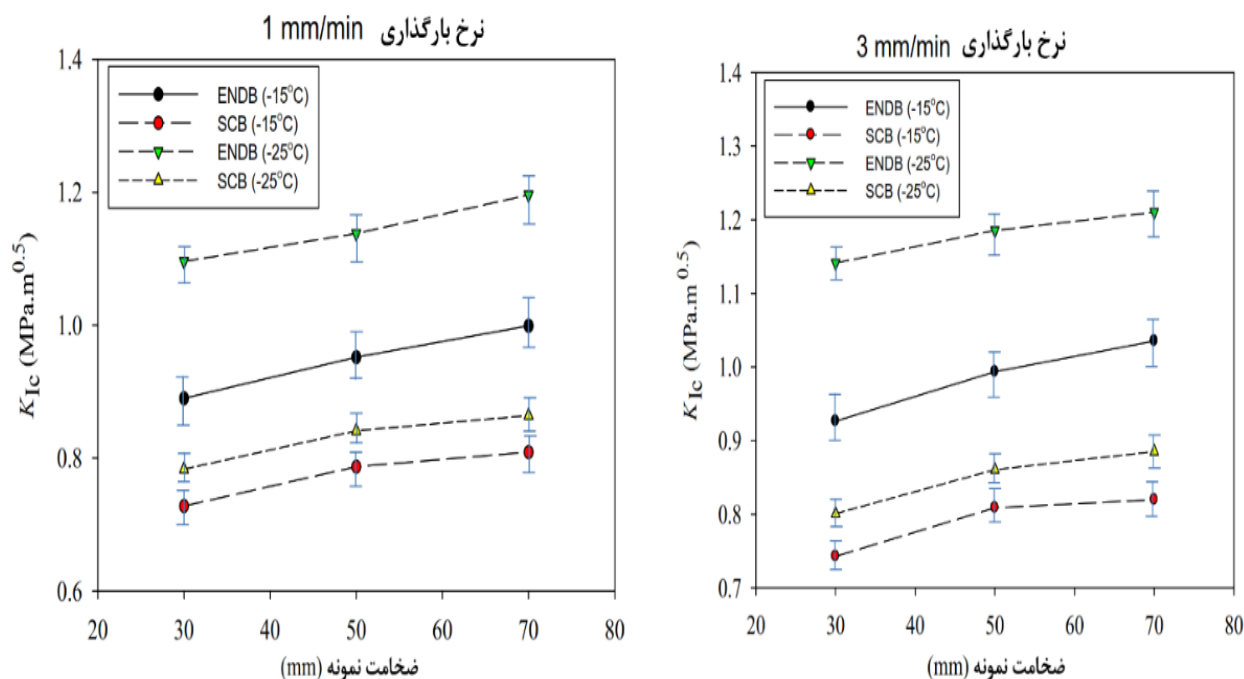


شکل ۷. وضعیت نمونه‌های آسفالتی SCB و ENDB پس از انجام آزمایش مکانیک شکست (Yang, Karimi & Aliha, 2021)

مطالعاتی در خصوص تأثیر هندسه نمونه بر چقرمگی شکست بتن آسفالتی در حالت I بارگذاری صورت گرفته است. برخی از

و حالت خالص III و موارد بارگذاری با حالت مختلط (یعنی I/II و I/III) مورد ارزیابی قرار گرفتند. نمونه‌های آزمایش ENDB و SCB بودند. در طول برنامه آزمایشی، نمونه‌های ساخته شده از بتن آسفالتی در دو دمای ۵- و ۲۵- درجه سانتی‌گراد آزمایش شدند و با استفاده از اصول مکانیک شکست الاستیک خطی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. همچنین، چندین چارچوب نظری برای ارزیابی کاربرد و دقت آن‌ها برای پیش‌بینی روند داده‌های آزمون تجربی مقایسه و مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که هندسه و پیکربندی بارگذاری می‌تواند به طور قابل توجهی بر مقادیر چقرمگی شکست اندازه‌گیری شده در حالت خالص II و حالت خالص III تأثیر بگذارد (Karimi et al., 2023). بطور کلی مطالعات فراوانی در بحث مکانیک شکست روسازی‌های آسفالتی انجام شده که پاره‌ای از این مطالعات با استفاده از نمونه‌های ENDB و SCB در جدول ۲ عنوان شده است.

شود (Fuan et al., 2021). مخلوط‌های آسفالتی در مطالعات آزمایشگاهی، اغلب با استفاده از دو روش معروف یعنی روش‌های ژیراتوری و مارشال ساخته می‌شوند. به دلیل تفاوت در روش تراکم، استفاده از هر یک از این روش‌ها می‌تواند بر استحکام کلی و خواص مکانیکی (مانند چقرمگی شکست و مقاومت در برابر ترک) مخلوط آسفالتی تأثیرگذار باشد. محققان این موضوع را با تمرکز بر بحث مکانیک شکست و چقرمگی شکست با استفاده از نمونه‌های ENDB مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که روش تراکم، اثرات متفاوتی بر مقادیر چقرمگی شکست دارد. در حالی که مقدار K_{Ic} بدست آمده از روش ژیراتوری بالاتر از نمونه ساخته شده از روش مارشال است، روندهای مختلفی برای حالت‌های شکست نوع برشی در مدهای دوم و سوم (یعنی K_{IIc} و K_{IIIc}) مشاهده شد (Haghighatpour, & Aliha, 2022). در یک مطالعه دیگر، بررسی تأثیر هندسه نمونه و پیکربندی بارگذاری بر چقرمگی شکست مصالح آسفالتی صورت گرفت. هر سه حالت شکست (یعنی حالت خالص I، حالت خالص II،



شکل ۹. میانگین مقادیر چقرمگی شکست حالت I برای مخلوط آسفالتی با آزمایش نمونه‌های SCB و ENDB با ضخامت‌های مختلف و تحت نرخ‌ها و دماهای بارگذاری متفاوت (Fuan et al., 2021)

جدول ۲. بخشی از مطالعات صورت گرفته در زمینه مکانیک شکست مخلوط‌های آسفالتی در حالات مختلف بارگذاری با نمونه‌های ENDB و SCB

ردیف	زمینه تحقیق	نوع نمونه	حالت بارگذاری	دستاورد	منبع
۱	ارزیابی مقاومت به شکست در مخلوط‌های آسفالتی با شرایط هندسی و محیطی مختلف	ENDB	حالت خالص I	۱- مقادیر متناظر K_{IC} در نمونه‌ها با افزایش ضخامت دیسک و کاهش دمای آزمایش، به طور قابل توجهی افزایش یافت. ۲- در مورد مخلوط‌های آسفالتی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت، ارتفاع نمونه حداقل ۵۰ میلیمتر توصیه شد.	Pour, Aliha & Keymanesh, 2018
۲	تأثیر هندسه بر چقرمگی شکست و انرژی شکست مخلوط‌های آسفالتی HMA و SMA در دماهای پایین	ENDB	حالت خالص I	۱- برای تمام شرایط آزمون در نظر گرفته شده در این مطالعه، ضخامت نمونه ENDB مطلوب و حداقل به ترتیب ۷۰ و ۵۰ میلیمتر است. ۲- در شرایط مشابه، مخلوط‌های SMA چقرمگی شکست کمتری نسبت به مخلوط‌های HMA دارند.	Eghbali et al., 2019
۳	ارزیابی اثر دما و نرخ بارگذاری بر چقرمگی شکست مخلوط آسفالتی تقویت شده با الیاف	ENDB	حالت خالص I و III	۱- مقاومت در برابر شکست هر دو حالت با افزایش محتوای فیبر افزایش یافت. ۲- مقدار چقرمگی شکست حالت I و حالت III با کاهش دمای آزمایش و افزایش نرخ بارگذاری به دلیل رفتار الاستیک غالب مخلوط‌های آسفالتی بیشتر شد.	Motamedi et al., 2020
۴	بررسی تأثیر ضخامت بر چقرمگی شکست تحت بارگذاری نامتقارن	ENDB	حالت خالص III	۱- با افزایش ضخامت، چقرمگی شکست افزایش می‌یابد.	Aliha & Pour, 2020
۵	اثرات ناهمگونی مواد بر عوامل شدت تنش و مسیر شکست مخلوط آسفالتی	SCB	حالت ترکیبی I و II	۱- مدول الاستیک سنگدانه‌های درشت و ماسستیک، از نسبت پواسون بر عوامل شدت تنش تأثیرگذارتر است. ۲- بسته به موقعیت اولیه نوک ترک، تغییرات قابل توجهی در مقادیر K_{I} و K_{II} برای مخلوط‌های آسفالتی آنالیز شده مشاهده شد.	Aliha et al., 2020
۶	اثرات اندازه نمونه و شرایط بارگذاری بر رفتار شکست بتن آسفالتی	SCB	حالت خالص I	۱- چقرمگی شکست نمونه‌های با قطر ۱۰۰ و ۱۵۰ میلیمتری مشابه بود، در حالی که انرژی شکست به دست آمده از نمونه‌های با قطر ۱۵۰ میلیمتری ۲۱ درصد بیشتر از نمونه‌های با قطر ۱۰۰ میلیمتری بود.	Bui & Saleh, 2021
۷	پیش‌بینی چقرمگی شکست حالت مخلوط آسفالتی گرم با استفاده از معیار چگالی انرژی کرنشی	SCB	حالت خالص I و II	۱- افزودن برخی مواد اصلاح‌کننده مثل خرده لاستیک مقادیر K_{IC} و K_{IIc} را نسبت به بتن آسفالتی اصلاح نشده افزایش داد. ۲- مقادیر K_{IIc} مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده (به جز مخلوط اصلاح شده با خرده لاستیک) کمی کمتر از مقدار مربوطه K_{IC} است که نشان دهنده خطر بالاتر ترک خوردگی در برابر بارهای برشی نسبت به بارهای کششی در دمای پایین است.	Aliha, 2019

۴- رفتار مکانیک شکست روسازی‌های صلب

در حال حاضر اگرچه روسازی‌های بتنی به علت عدم راحتی رانندگان و سروصدای بالا هنگام عبور و مرور در مقابل روسازی‌های آسفالتی به اندازه کافی محبوب نیستند، اما به علت کاربری‌ها و ویژگی‌های خاص خود همانند قابلیت بالای تحمل ترافیک سنگین و چرخه عمر نسبتاً بالا، در برخی از نقاط جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد (Pranav et al., 2020; Vaitkus et al., 2019; Mohod & Kadam, 2016). از این رو لازم است رفتار رشد ترک این روسازی‌ها را همچون روسازی‌های انعطاف‌پذیر مورد بحث و بررسی قرار داد. بطور کلی روسازی‌های بتنی انواع مختلفی دارند. روسازی بتنی ساده درزدار (JPCP)^{۱۲}، روسازی بتنی مسلح درزدار (JRCP)^{۱۴}، روسازی بتنی پیوسته (CRCP)^{۱۶}، روسازی بتنی پیش‌تنیده (PCP)^{۱۶} و روسازی بتن غلتکی (RCCP)^{۱۷} انواع متداول روسازی‌های بتنی هستند (Barati & Karimi & Sahaf, 2022; Kim et al., 2018). اگرچه در مورد هر یک از روسازی‌های بتنی تحقیقاتی صورت گرفته است، اما در مورد روسازی‌های بتن غلتکی تحقیقات وسیع‌تر و عمیق‌تری در خصوص رفتار رشد ترک به علت کاربرد خاص آن صورت گرفته است (Ameri, Kamboozia & Khakbaz, 2023).

تقسیم‌بندی ترک‌ها در روسازی‌های صلب

ترک‌های بتن در اثر تنش‌های کششی ناشی از انقباض یا تنش، در طول گیرش یا عمر مفید آن اتفاق می‌افتند. ترک‌ها زمانی ایجاد می‌شوند که تنش‌های اعمال شده از مقاومت کششی بتن بیشتر شود. روسازی‌های بتنی به دلیل شرایط بارگذاری، پتانسیل ترک‌خوردگی بالاتری نسبت به سایر سازه‌های بتنی دارند. زمانی که بارگذاری ترافیکی سطح بالایی روسازی را فشرده می‌کند، به دلیل خمش، تنش کششی در سطح پایین روسازی ایجاد می‌شود و ترک از پایین به بالا ایجاد می‌گردد. علاوه بر این، بدنه روسازی ممکن است به عللی همچون گرم و سردشدن مکرر، ترک برداشته و به سمت پایین رشد کند و منجر به آسیب گسترده به لایه‌های زیرین روسازی شود. همچنین نفوذ آب به لایه‌های روسازی بتنی، می‌تواند منجر به تضعیف و در موارد حاد تخریب ساختار روسازی

شود (Ayatollahi, Aliha, & Saghafi, 2011; Fakhri, 2017). جهت شبیه‌سازی این وضعیت در آزمایشگاه، بعد از انجام چرخه‌های ذوب و یخبندان، آزمایش‌های مکانیک شکست جهت واکاوی چقرمگی شکست انجام می‌گردد (Najjar et al., 2022; Najjar et al., 2023). ترافیک باعث ایجاد بارهای چرخه‌ای روی روسازی بتنی می‌شود که ممکن است باعث ایجاد ترک ناشی از خستگی، انتشار ترک و کاهش عملکرد بتن شود (Graeff et al., 2012).

معمولاً روسازی‌ها، مجموعه‌های پیچیده‌ای از شرایط بارگذاری را تجربه می‌کنند. درک مناسب از رفتار مکانیکی مصالح سنگی و بتن برای بسیاری از کاربردهای عملی روسازی‌های بتنی از جمله روسازی‌های بتن غلتکی امری حیاتی است. در دو دهه اخیر، توجه زیادی به تعیین چقرمگی شکست مصالحی مانند سنگ و بتن شده است. همانطور که اشاره شد، چقرمگی شکست معیاری را برای تمام مواد مهندسی فراهم می‌کند و مقاومت ترک آن‌ها را تحت بارهای مختلف تفسیر می‌کند. در این راستا، مطالعات متعددی وجود دارد که آزمایش شکست را به عنوان یک رویکرد نوین در بررسی وضعیت روسازی‌ها و شناخت رفتار رشد ترک آن‌ها مورد بررسی قرار داده است (Fakhri, Amoosoltani and Aliha, 2017; Roesler et al., 2007).

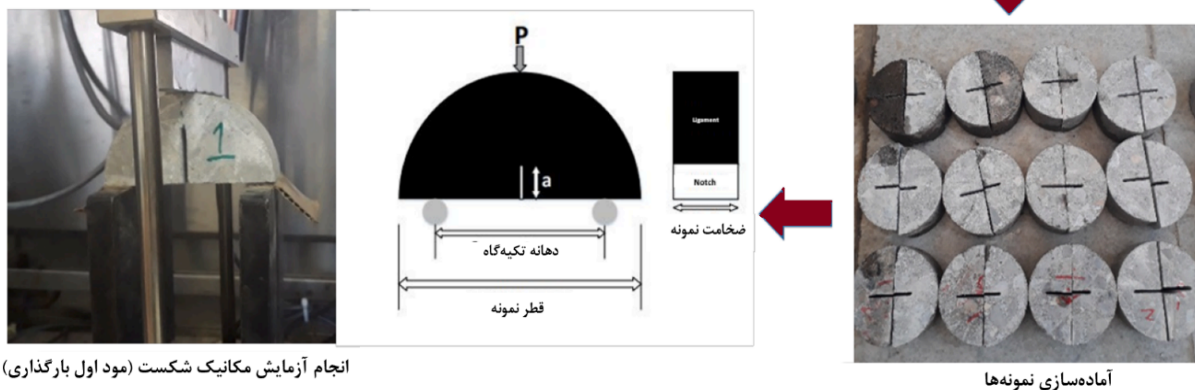
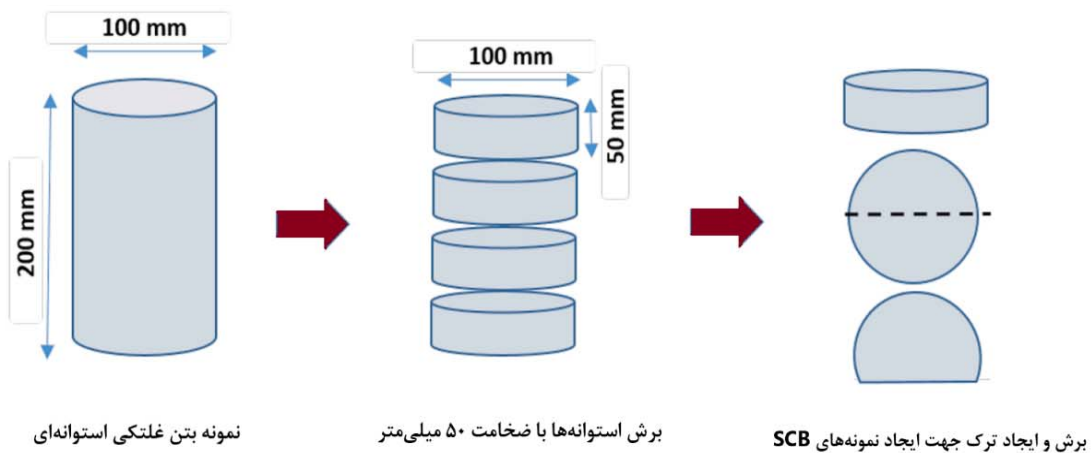
تحقیقات آزمایشگاهی صورت گرفته در زمینه رفتار رشد ترک در روسازی‌های صلب

در سال‌های اخیر آزمایش‌های مختلفی بر روی رفتار رشد ترک و مکانیک شکست روسازی‌های بتنی صورت گرفته است. بطور کلی تعداد تحقیقات صورت گرفته در زمینه مکانیک شکست روسازی‌های صلب از روسازی‌های انعطاف‌پذیر بسیار محدودتر است و این موضوع به کاربرد کمتر روسازی بتنی در راه‌ها اشاره دارد (Anastasiou, Liapis & Payayianni, 2015).

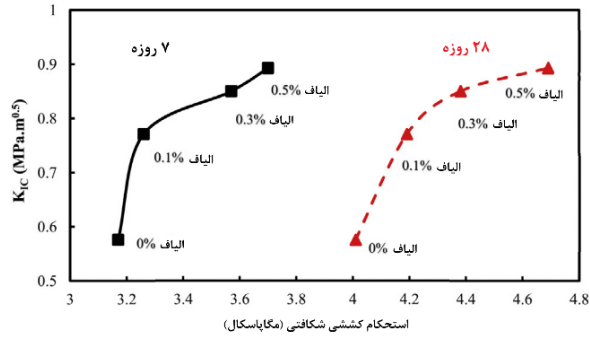
استفاده از مواد بازیافتی در کاربردهای صنعتی یکی از موضوعات اصلی در سراسر جهان است. روسازی آسفالتی بازیافتی^{۱۸} (تراشه آسفالتی)، یکی از مواد قابل بازیافتی است که به دلیل مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی و مسائل مربوط به توسعه پایدار، معمولاً در راهسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Kamboozia & Khakbaz, 2023; Liu, Shukla & Nandra, 2017);

از قیر امولسیون کاتیونی تندشکن بر رفتار مکانیک شکست روسازی بتن غلتکی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. نمونه‌های بتن غلتکی حاوی درصد‌های مختلف قیر امولسیونی (۰، ۴، ۶ و ۸ درصد جرم سیمان) بکار گرفته شد. نمونه‌های SCB جهت انجام آزمایش‌های مکانیک شکست در مود I بارگذاری انتخاب شدند. نتایج نشان دادند که افزودن قیر امولسیونی به مخلوط‌های بتن غلتکی باعث افزایش انرژی شکست آن‌ها می‌گردد. بالاترین مقدار انرژی شکست مربوط به مخلوط با ۸ درصد قیر امولسیونی بوده که نسبت به مخلوط بتن غلتکی بدون قیر، بیش از ۵۰ درصد افزایش یافته است (Pourjafar et al., 2021).

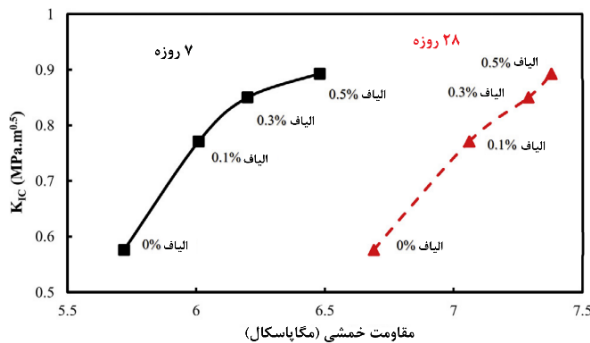
(Jahanbakhsh et al., 2020). یک مطالعه تحقیقاتی، به بررسی چقرمگی شکست روسازی‌های بتنی حاوی درصد‌های مختلف تراشه آسفالتی (با درصد‌های ۰، ۱۵، ۳۰ و ۴۵) می‌پردازد. برای این کار، تعداد زیادی از نمونه‌های ENDB حاوی درصد‌های مختلف روسازی آسفالتی بازیافتی در حالت‌های خالص I و III و حالت ترکیبی I/III در دماهای ۰، ۲۵+ و ۲۵- درجه سانتیگراد بارگذاری شدند. نتایج این تحقیق حاکی از آن است که تراشه آسفالتی باعث کاهش چقرمگی شکست مخلوط بتنی در حالت بارگذاری اول و سوم خالص و ترکیبی می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با کاهش دما، چقرمگی شکست مخلوط‌های بتنی حاوی روسازی آسفالتی بازیافتی افزایش می‌یابد (Mahsourian, Hashemi & Aliha, 2018). در یک تحقیق آزمایشگاهی، ارزیابی تاثیر استفاده



شکل ۱۰. مراحل آماده‌سازی نمونه‌های بتنی با درصد‌های مختلف افزودنی قیر جهت انجام آزمایش مکانیک شکست (Pourjafar et al., 2021)



شکل ۱۱. تغییرات چقرمگی شکست در حالت I نسبت به مقاومت کششی شکافتی بتن در محتویات مختلف الیاف طبیعی در سنین ۷ و ۲۸ روزه (Razmi & Mirsayar, 2017)



شکل ۱۲. تغییرات چقرمگی شکست در حالت I نسبت به مقاومت خمشی بتن، در محتویات مختلف الیاف طبیعی در سنین ۷ و ۲۸ روزه (Razmi & Mirsayar, 2017)

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، بررسی مفصلی در مورد مبانی مکانیک شکست و کاربرد آن در تحقیقات روسازی‌های صلب و انعطاف‌پذیر پرداخته شد. بر اساس مبانی مکانیک شکست در سازه‌های مهندسی از جمله روسازی‌ها، شکست زمانی رخ می‌دهد که مقدار ضریب شدت تنش ایجاد شده در نوک ترک به واسطه اعمال بارهای خارجی، از مقدار چقرمگی شکست ماده که میزان مقاومت در برابر رشد ترک سازه ترک‌دار را نشان می‌دهد، تجاوز کند. بنابراین روسازی‌های آسفالتی و بتنی، باید دارای سطحی از چقرمگی شکست باشند که

همچنین محققان به بررسی چقرمگی شکست در حالت ترکیبی I/II بتن مسلح‌شده با الیاف طبیعی به صورت تجربی با بهره‌گیری از تعداد زیادی نمونه SCB پرداخته‌اند. بدین منظور الیاف طبیعی با درصد‌های ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ درصد و طول ۲۰ میلی‌متر برای اختلاط با بتن معمولی استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که اثرات الیاف بر چقرمگی شکست در حالت ترکیبی بسیار قابل توجه است و نمونه‌های ساخته شده از بتن تقویت شده با الیاف، مقاومت بالاتری در برابر رشد ترک نسبت به نمونه‌های ساخته شده از بتن ساده را دارد که این موضوع اهمیت استفاده از الیاف جهت افزایش مقاومت در برابر ترک در روسازی‌های بتنی را نشان می‌دهد. شکل ۱۱ و ۱۲ به ترتیب، تغییرات چقرمگی شکست در حالت I بارگذاری نسبت به مقاومت کششی و مقاومت خمشی با محتویات مختلف الیاف طبیعی در سنین ۷ و ۲۸ روز بتن را نشان می‌دهد (Razmi & Mirsayar, 2017).

همچنین محققان در مورد رفتار شکستی ملات با قیر امولسیون^{۱۹} با کاربرد در روسازی‌ها در حالت ترکیبی I/II تحت چرخه‌های ذوب و انجماد مورد بررسی قرار دادند. همانطور که اشاره شد، آزمایش‌های چرخه ذوب و یخبندان، یکی از الزامات مهم در بررسی‌های آزمایشگاهی در مباحث مربوط به روسازی است. در این تحقیق، آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های SCB طراحی شده با ۱۶ طرح اختلاط تصادفی با محتوای سیمان مختلف، نسبت قیر امولسیون به سیمان و نسبت آب به سیمان مشخص انجام شد. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از چرخه‌های ذوب و انجماد، انرژی شکست مخلوط موردنظر را در حالت خالص I، II و حالت ترکیبی I/II کاهش می‌دهد. همچنین افزایش سن نمونه‌ها، تأثیر بیشتری بر انرژی شکست حالت I نسبت به انرژی شکست حالت II و حالت ترکیبی I/II داشت (Najjar et al., 2022). مشابه همین تحقیق نیز با حالت ترکیبی I/III انجام گرفته است. تنها تفاوت آن استفاده از نمونه‌های ENDB به جای SCB به علت سهولت کار در مود III است. نتایج این تحقیق نشان داد که اعمال چرخه‌های ذوب و یخبندان، انرژی شکست مخلوط را در هر یک از سه حالت خالص I، III و حالت ترکیبی I/III کاهش می‌دهد (Najjar et al., 2023).

تحقیقات صورت گرفته در حوزه مکانیک شکست روسازی‌های بتنی، بسیار کمتر از روسازی‌های آسفالتی است که با توجه به کاربرد بیشتر روسازی‌های آسفالتی در راه‌ها، امری بدیهی است. اما با توجه به رشد روزافزون روسازی‌های بتنی، بویژه روسازی‌های بتن غلتکی، انجام مطالعات تکمیلی در حوزه رفتار رشد ترک در آن‌ها توصیه می‌گردد. همچنین سادگی شکل و هندسه نمونه آزمایش، موضوع مهمی برای انجام آزمایش‌های شکست بر روی مواد آسفالتی و بتنی است. ضمن اینکه نمونه و نوع بارگذاری آن باید گزینه خوبی برای شرایط بارگذاری در شرایط واقعی باشد. بنابراین با توجه به سهولت کار با نمونه‌های ENDB در مودهای اول تا سوم بارگذاری و مودهای ترکیبی و همچنین شبیه‌سازی مناسب بارگذاری در شرایط واقعی، استفاده از این نمونه در تحقیقات آتی اکیدا توصیه می‌گردد.

در مقابل تنش‌های وارده ناشی از بارگذاری ترافیکی و در دامنه دماهای مختلف که روسازی‌ها در معرض آن قرار می‌گیرند، مقاوم باشند. از این رو، در سال‌های اخیر تلاش‌های فراوانی جهت بررسی رفتار رشد ترک و محاسبه چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی و بتنی در حالات مختلف بارگذاری صورت گرفته و محققان مختلف سعی کرده‌اند که مقاومت نمونه‌های آسفالتی و بتنی را در برابر ترک‌خوردگی بالا ببرند. به عنوان یک ویژگی ذاتی مصالح، چقرمگی شکست یک پارامتر مهم برای مطالعه رفتار ترک‌خوردگی روسازی‌ها است. اگرچه مصالح تشکیل‌دهنده روسازی‌ها و شرایط محیطی، تأثیر قابل‌توجهی بر چقرمگی شکست دارد، اما برای یک ماده و محیط آزمایش ثابت، شکل نمونه و نوع بارگذاری نیز می‌تواند بر چقرمگی شکست به‌دست‌آمده تأثیرگذار باشد که در این مقاله به آن پرداخته شد. بطور کلی

۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Single Edge Notch Beam (Senb)
- 2- Disk-Shaped Compact Tension (Dct)
- 3- Semi-Circular Bend (Scb)
- 4- Brazilian Disc (Bd)
- 5- Edge-Notched Diametrically Compressed Disc (Endc)
- 6- Edge-Notched Disc Bend (Endb)
- 7- Double Notch Diametral Compression (Dndc)
- 8- U-Notch Diametral Compression (Undc)
- 9- Stress Intensity Factors (Sifs)
- 10- Hot Mix Asphalt (Hma)
- 11- Warm Mix Asphalt (Wma)
- 12- Gyrotory Compactor Machine (Gcm)
- 13- Jointed Plain Concrete Pavement (Jpcp)
- 14- Jointed Reinforced Concrete Pavement (Jrcp)
- 15- Continuously Reinforced Concrete Pavement (Crcp)
- 16- Prestressed Concrete Pavement (Pcp)
- 17- Roller Compacted Concrete Pavement (Rccp)
- 18- Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)
- 19- Cement Emulsified Asphalt Mortar (CEAM)

۷- مراجع

- براتی، روح‌الله، کریمی گوغری، محمد، صحاف، سیدعلی، روسازی بتن غلتکی. (۱۴۰۱). نشر نوآور، چاپ اول.
- آقبالی، محمدرضا، فلاح نقتی، مهدی، محمدعلیها، محمدرضا، معتمدی، حامد، (۱۳۹۸). بررسی اثر ضخامت نمونه‌های ENDB بر چقرمگی شکست مخلوط‌های HMA و SMA. یازدهمین همایش قیر و آسفالت ایران، تهران.
- آیت‌اللهی، مجیدرضا، منصوریان، احمد، عامری، محمود، طولابی، سعید، رودکی، علی (۱۳۹۱). رفتار رشد ترک در آسفالت تحت بارهای ترکیبی کششی-برشی (در دمای پایین). نشر پژوهشگاه حمل و نقل، چاپ اول.
- Aliha, M. R. M., Ziari, H., Sobhani Fard, E., & Jebalbarez Sarbijan, M. (2021). Heterogeneity effect on fracture parameters of a multilayer asphalt pavement structure containing a top-down crack and subjected to moving traffic loading. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 44(5), 1349-1371.
- Fuan, S., Ke, M., Kanghe, L., Kun, L., & Aliha, M. R. M. (2021). Influence of specimen geometry on mode I fracture toughness of asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 276, 122181.
- Haghighatpour, P. J., & 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. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 118, 103261.
- Li, X., Braham, A. F., Marasteanu, M. O., Buttlar, W. G., & Williams, R. C. (2008). Effect of factors affecting fracture energy of asphalt concrete at low temperature. *Road Materials and Pavement Design*, 9(sup1), 397-416.
- Marasteanu, M. O., Dai, S., Labuz, J. F., & Li, X. (2002). Determining the low-temperature fracture toughness of asphalt mixtures. *Transportation Research Record*, 1789(1), 191-199.
- Pranav, S., Aggarwal, S., Yang, E. H., Sarkar, A. K., Singh, A. P., & Lahoti, M. (2020). Alternative materials for wearing course of concrete pavements: A critical review. *Construction and Building Materials*, 236, 117609.
- Sudarsanan, N., & Kim, Y. R. (2022). A critical review of the fatigue life prediction of asphalt mixtures and pavements. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*.
- Yang, D., Karimi, H. R., & Aliha, M. R. M. (2021). Comparison of testing method effects on cracking resistance of asphalt concrete mixtures. *Applied Sciences*, 11(11), 5094.
- Aliha, M. R. M., Behbahani, H., Fazaeli, H., & Rezaifar, M. H. (2014). Study of characteristic specification on mixed mode fracture toughness of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 54, 623-635.
- Aliha, M. R. M. (2019). On predicting mode II fracture toughness (KIIc) of hot mix asphalt mixtures using the strain energy density criterion. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 99, 36-43.
- Aliha, M. R. M., & Ayatollahi, M. R. (2010). Geometry effects on fracture behaviour of polymethyl me g: thacrylate. *Materials Science and Engineering A*, 527(3), 526-530.
- Aliha, M. R. M., & Pour, P. J. H. (2020). Fracture resistance study for hot mix asphalt mixture under out of plane sliding mode. *Engineering Fracture Mechanics*, 238, 107230.
- Aliha, M. R. M., Bahmani, A., & Akhondi, S. (2015). Numerical analysis of a new mixed mode I/III fracture test specimen. *Engineering Fracture Mechanics*, 134, 95-110.
- Aliha, M. R. M., Behbahani, H., Fazaeli, H., & Rezaifar, M. H. (2015). Experimental study on mode I fracture toughness of different asphalt mixtures. *Scientia Iranica*, 22(1), 120-130.
- Aliha, M. R. M., Fazaeli, H., Aghajani, S., & Nejad, F. M. (2015). Effect of temperature and air void on mixed mode fracture toughness of modified asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 95, 545-555.
- Aliha, M. R. M., Mahdavi, E., & Ayatollahi, M. R. (2017). The influence of specimen type on tensile fracture toughness of rock materials. *Pure and Applied Geophysics*, 174, 1237-1253.
- Aliha, M. R. M., Razmi, A., & Mansourian, A. (2017). The influence of natural and synthetic fibers on low temperature mixed mode I+ II fracture behavior of warm mix asphalt (WMA) materials. *Engineering Fracture Mechanics*, 182, 322-336.
- Aliha, M. R. M., Sistaninia, M., Smith, D. J., Pavier, M. J., & Ayatollahi, M. R. (2012). Geometry effects and statistical analysis of mode I fracture in guiting limestone. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 51, 128-135.
- Aliha, M. R. M., Sistaninia, M., Smith, D. J., Pavier, M. J., & Ayatollahi, M. R. (2012). Geometry effects and statistical analysis of mode I fracture in guiting limestone. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 51, 128-135.
- Aliha, M. R. M., Ziari, H., Mojaradi, B., & Sarbijan, M. J. (2020). Modes I and II stress intensity factors of semi-circular bend specimen computed for two-phase aggregate/mastic asphalt mixtures. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 106, 102437.
- Aliha, M. R. M., Ziari, H., Mojaradi, B., & Sarbijan, M. J. (2020). Heterogeneity effects on mixed mode I/II stress intensity factors and fracture path of laboratory asphalt mixtures in the

- Graeff, A. G., Pilakoutas, K., Neocleous, K., & Peres, M. V. N. (2012). Fatigue resistance and cracking mechanism of concrete pavements reinforced with recycled steel fibres recovered from post-consumer tyres. *Engineering Structures*, 45, 385-395.
- Guo, Q., Chen, Z., Liu, P., Li, Y., Hu, J., Gao, Y., & Li, X. (2021). Influence of basalt fiber on mode I and II fracture properties of asphalt mixture at medium and low temperatures. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 112, 102884.
- Haghighatpour, P. J., & Aliha, M. R. M. (2022). Effect of marshal and gyratory compaction methods on cracking characteristics of hot mix asphalt concrete materials under all three basic modes of fracture. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 117, 103207.
- He, J., Liu, L., Yang, H., & Aliha, M. R. M. (2022b). Using two and three-parameter Weibull statistical model for predicting the loading rate effect on low-temperature fracture toughness of asphalt concrete with the ENDB specimen. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 121, 103471.
- He, J., Liu, L., Yang, H., Aliha, M. R. M., & Karimi, H. R. (2021). Contribution of interface fracture mechanism on fracture propagation trajectory of heterogeneous asphalt composites. *Applied Sciences*, 11(7), 3013.
- He, J., Liu, L., Yang, W., & Aliha, M. R. M. (2022a). Influence of testing method on mode II fracture toughness (KIIc) of hot mix asphalt mixtures. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 45(10), 2940-2957.
- Hoseini, S. O., Mousavi, S. R., Sohrabi, M. R., & Ghasemi, M. (2023). Using beam and ENDB specimens to evaluate fracture characteristics of wavy steel fiber reinforced self-compacting concrete containing different coarse aggregate volumes. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 46(5), 1669-1686.
- Jahanbakhsh, H., Karimi, M. M., Naseri, H., & Nejad, F. M. (2020). Sustainable asphalt concrete containing high reclaimed asphalt pavements and recycling agents: Performance assessment, cost analysis, and environmental impact. *Journal of Cleaner Production*, 244, 118837.
- Kamboozia, N., & Khakbaz, M. (2023). Application of asphalt concrete as sub-ballast in railway lines with a sustainable development approach. *Road*, 31(116), 1-12.
- Kamboozia, N., Mousavi Rad, S., & 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. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(5), 04022052.
- Kim, H., Wagoner, M. P., & Buttlar, W. G. (2009). Micromechanical fracture modeling of asphalt concrete using a single-edge notched beam test. *Materials and Structures*, 42, 677-689.
- shape of SCB specimen. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 43(3), 586-604.
- Ameri, M., Kamboozia, N., & Khakbaz, M. (2023). A review of Mechanical properties and durability of roller compacted concrete pavement (RCCP). *Road*.
- Ameri, M., Mansourian, A., Khavas, M. H., Aliha, M., & Ayatollahi, M. R. (2011). Cracked asphalt pavement under traffic loading—A 3D finite element analysis. *Engineering Fracture Mechanics*, 78(8), 1817-1826.
- Anastasiou, E. K., Liapis, A., & Papayianni, I. (2015). Comparative life cycle assessment of concrete road pavements using industrial by-products as alternative materials. *Resources, Conservation and Recycling*, 101, 1-8.
- Anderson, T. L. (2017). *Fracture mechanics: fundamentals and applications*. CRC press.
- Ayatollahi, M. R., Aliha, M. R. M., & Saghafi, H. (2011). An improved semi-circular bend specimen for investigating mixed mode brittle fracture. *Engineering Fracture Mechanics*, 78(1), 110-123.
- Bahmani, A., Farahmand, F., Janbaz, M. R., Darbandi, A. H., Ghesmati-Kucheki, H., & Aliha, M. R. M. (2021). On the comparison of two mixed-mode I+ III fracture test specimens. *Engineering Fracture Mechanics*, 241, 107434.
- Bazoobandi, P., Karimi, H. R., Mousavi, S. R., Karimi, F., & Aliha, M. R. M. (2023). Full range of mode I and II cracking performance of asphalt mixtures containing low to high reclaimed asphalt pavement (RAP) contents; modified by recycling agent and substituting of a softer binder. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02487.
- Braham, A., Buttlar, W., & Ni, F. (2010). Laboratory mixed-mode cracking of asphalt concrete using the single-edge notch beam. *Road Materials and Pavement Design*, 11(4), 947-968.
- Braham, A., Buttlar, W., & Ni, F. (2010). Laboratory mixed-mode cracking of asphalt concrete using the single-edge notch beam. *Road Materials and Pavement Design*, 11(4), 947-968.
- Bui, H. H., & Saleh, M. (2021). Effects of specimen size and loading conditions on the fracture behaviour of asphalt concretes in the SCB test. *Engineering Fracture Mechanics*, 242, 107452.
- Eghbali, M. R., Tafti, M. F., Aliha, M. R. M., & Motamedi, H. (2019). The effect of ENDB specimen geometry on mode I fracture toughness and fracture energy of HMA and SMA mixtures at low temperatures. *Engineering Fracture Mechanics*, 216, 106496.
- Fakhri, M., Amoosoltani, E., & Aliha, M. R. M. (2017). Crack behavior analysis of roller compacted concrete mixtures containing reclaimed asphalt pavement and crumb rubber. *Engineering Fracture Mechanics*, 180, 43-59.

- mortar under freeze-thaw cycles and aging condition. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 122, 103643.
- Najjar, S., Moghaddam, A. M., Sahaf, A., & Aliha, M. R. M. (2023). Mixed mode (I&III) fracture behavior of cement emulsified asphalt mortar under freeze and thaw cycles. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 103952.
- Pirmohammad, S., & Ayatollahi, M. R. (2014). Fracture resistance of asphalt concrete under different loading modes and temperature conditions. *Construction and Building Materials*, 53, 235-242.
- Pirmohammad, S., & Ayatollahi, M. R. (2020). Fracture behavior of asphalt materials. *Springer International Publishing*.
- Pour, P. H., Aliha, M. R. M., & Keymanesh, M. R. (2018). Evaluating mode I fracture resistance in asphalt mixtures using edge notched disc bend ENDB specimen with different geometrical and environmental conditions. *Engineering Fracture Mechanics*, 190, 245-258.
- Pourjafar, S. V., Moghaddam, A. M., Pourjafar, S. S., & Afsharirad, M. (2021). Investigating the effect of cationic emulsified bitumen as an admixture of roller-compacted concrete pavement on the progress of alkali-silica reaction. *Engineering Fracture Mechanics*, 250, 107759.
- Razmi, A., & Mirsayar, M. M. (2017). On the mixed mode I/II fracture properties of jute fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 148, 512-520.
- Reza Karimi, H., Bidadi, J., Aliha, M. R. M., Mousavi, A., Mohammadi, M. H., & Haghightatpour, 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. *Journal of Building Engineering*, 75, 106759.
- Roesler, J., Paulino, G., Gaedicke, C., Bordelon, A., & Park, K. (2007). Fracture behavior of functionally graded concrete materials for rigid pavements. *Transportation Research Record*, 2037(1), 40-49.
- Saed, S. A., Kamboozia, N., Ziari, H., & 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. *Materials and Structures*, 54, 1-19.
- Saouma, V. E. (2000). Lecture notes in fracture mechanics (Chapter 7). *Department of Civil Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado*.
- Shahryari, N., Keymanesh, M. R., & Aliha, M. R. M. (2021). Specimen type effect on measured low temperature fracture toughness of asphalt concrete. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 44(2), 551-567.
- Kim, K., Chun, S., Han, S., & Tia, M. (2018). Effect of dowel bar arrangements on performance of jointed plain concrete pavement (JPCP). *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 12(1), 1-11.
- Liu, S., Shukla, A., & Nandra, T. (2017). Technological, environmental and economic aspects of Asphalt recycling for road construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 879-893.
- Liu, Z., & Ma, C. (2023). Study on fracture behavior of layered limestone under mixed mode I/III loading. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 128, 104102.
- Mansourian, A., Hashemi, S., & Aliha, M. R. M. (2018). Evaluation of pure and mixed modes (I/III) fracture toughness of Portland cement concrete mixtures containing reclaimed asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 178, 10-18.
- Mirsayar, M., Shi, X., & Zollinger, D. (2017). Evaluation of interfacial bond strength between Portland cement concrete and asphalt concrete layers using bi-material SCB test specimen. *Engineering Solid Mechanics*, 5(4), 293-306.
- Mohammad Aliha, M. R., Ghesmati Kucheki, H., & Asadi, M. M. (2021). On the use of different diametral compression cracked disc shape specimens for introducing mode III deformation. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 44(11), 3135-3151.
- Mohod, M. V., & Kadam, K. N. (2016). A comparative study on rigid and flexible pavement: A review. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 13(3), 84-88.
- Motamedi, H., Fazaeli, H., Aliha, M. R. M., & Amiri, H. R. (2020). Evaluation of temperature and loading rate effect on fracture toughness of fiber reinforced asphalt mixture using edge notched disc bend (ENDB) specimen. *Construction and Building Materials*, 234, 117365.
- Mubaraki, M., & Sallam, H. E. M. (2020). Reliability study on fracture and fatigue behavior of pavement materials using SCB specimen. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(13), 1563-1575.
- Mubaraki, M., Abd-Elhady, A. A., & Sallam, H. E. M. (2013). Mixed mode fracture toughness of recycled tire rubber-filled concrete for airfield rigid pavements. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 6(1), 8-14.
- Najjar, S., Moghaddam, A. M., & Sahaf, A. (2021). Mixed mode (I/II) fracture energy of cement emulsified asphalt mortar under intermediate temperature. *Engineering Fracture Mechanics*, 241, 107374.
- Najjar, S., Moghaddam, A. M., Sahaf, A., & Aliha, M. R. M. (2022). Experimental and statistical exploring for mixed-mode (I&II) fracture behavior of cement emulsified asphalt

- Wang, J., Zeng, W., Qin, Y., Huang, S., & Xu, J. (2017). Laboratory evaluation of rejuvenating agent on reclaimed SBS modified asphalt pavement. *Applied Sciences*, 7(7), 743.
- Wei, M. D., Dai, F., Xu, N. W., Liu, Y., & Zhao, T. (2018). A novel chevron notched short rod bend method for measuring the mode I fracture toughness of rocks. *Engineering Fracture Mechanics*, 190, 1-15.
- Xiongzhou, Y., Yuze, T., Qinglin, L., Song, L., Qianwen, D., & Aliha, M. R. M. (2021). K_{Ic} and K_{IIc} measurement for hot mix asphalt mixtures at low temperature: Experimental and theoretical study using the semicircular bend specimen with different thicknesses. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 44(3), 832-846.
- Xu, W., Wei, X., Wei, J., & Chen, Z. (2020). Experimental evaluation of the influence of aggregate strength on the flexural cracking behavior of epoxy asphalt mixtures. *Materials*, 13(8), 1876.
- Zarei, M., Abdi Kordani, A., & 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 Materials and Pavement Design*, 23(8), 1917-1941.
- Zarei, M., Kordani, A. A., Zahedi, M., Akbarinia, F., & Khanjari, M. (2021). Evaluation of low and intermediate temperatures fracture indices for modified Warm mix asphalt (WMA) using edge notched disc bend (ENDB) specimen. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 116, 103137.
- Ziari, M. A., Moghadas Nejad, F., Mohammad Aliha, M. R., & Hajikarimi, P. (2023). Low-Temperature Fracture Characteristics of Reclaimed Asphalt Pavement Modified with crumb rubber and rejuvenator. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 8(4), 1-22.
- Somé, S. C., Feeser, A., & Pavoine, A. (2018). Numerical and experimental investigation of mode I cracking of asphalt concrete using semi-circular bending test. *Construction and Building Materials*, 169, 34-46.
- Song, W., Huang, B., & Shu, X. (2018). Influence of warm-mix asphalt technology and rejuvenator on performance of asphalt mixtures containing 50% reclaimed asphalt pavement. *Journal of Cleaner Production*, 192, 191-198.
- Stewart, C. M., Oputa, C. W., & Garcia, E. (2018). Effect of specimen thickness on the fracture resistance of hot mix asphalt in the disk-shaped compact tension (DCT) configuration. *Construction and Building Materials*, 160, 487-496.
- Vaitkus, A., Gražulytė, J., Kleizienė, R., Vorobjovas, V., & Šernas, O. (2019). Concrete modular pavements—types, issues and challenges. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 14(1), 80-103.
- Wagoner, M. P., Buttlar, W., & Paulino, G. H. (2005). Disk-shaped compact tension test for asphalt concrete fracture. *Experimental Mechanics*, 45, 270-277.
- Wagoner, M. P., Buttlar, W. G., Paulino, G. H., & Blankenship, P. (2005). Investigation of the fracture resistance of hot-mix asphalt concrete using a disk-shaped compact tension test. *Transportation Research Record*, 1929(1), 183-192.
- Wang, C., Zhu, Z. M., & Liu, H. J. (2016). On the I-II mixed mode fracture of granite using four-point bend specimen. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 39(10), 1193-1203.

A Review of the Application of Fracture Mechanics in Investigating the Behavior of Flexible and Rigid Pavements

*Mohammad Reza Khakbaz, Ph.D., Student, Department of Civil Engineering,
Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.*

*Neda Kamboozia, Assistant Professor, Department of Civil Engineering,
Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.*

*Mohammad Reza Mohammad Aliha, Associate Professor, Department of Industrial Engineering,
Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

*Alireza Taheriyani, M.Sc., Student, School of Civil Engineering,
Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.*

E-mail: nkamboozia@iust.ac.ir

Received: August 2024- Accepted: December 2024

ABSTRACT

Pavements that are directly exposed to environmental and traffic conditions are thus exposed to many factors that cause erosion and deterioration. As the road passes through different areas along the route, these destructive factors also change. Factors such as soil, traffic conditions, rain, frost and etc. damage the coating and thus shorten its service life. One of the appropriate ways to study the influence of the aforementioned factors on the crack propagation process in rigid and flexible pavements is the science of fracture mechanics. Fracture mechanics is the science that studies cracked components, including laboratory samples of pavements, and uses its parameters, including toughness and fracture energy, to study the behavior of asphalt and concrete pavements against crack growth and propagation. The aim of this paper is to review studies in different crack growth environments, focusing on new samples, including SCB and ENDB specimens. A review of these studies will help improve future research on pavement damage mechanics. Considering the increasing growth of concrete pavements, especially roller compacted concrete pavements (RCCP), it is recommended that further research be conducted on the crack growth behavior of these pavements. The use of ENDB specimens in dealing with the failure mechanics of different load status has also been recommended in various studies related to pavements due to the ease of performing the tests.

Keywords: Fracture Mechanics, Concrete Pavement, Asphalt Pavement, Crack Growth Mechanism, Fracture Toughness