

مطالعه آزمایشگاهی تأثیر مصالح سنگی لیکا و تراورتن بر مکانیک شکست مخلوط‌های آسفالتی

مقاله علمی - پژوهشی

میکائیل ناصری یالقوزآغاچ*، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد سلماس، دانشگاه آزاد اسلامی، سلماس، ایران
ناصر زورمند، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران
بابک گلچین، دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
رامین مشک‌آبادی، دانشیار، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Mi.nyl356@iaau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱

صفحه ۳۶۳-۳۷۶

چکیده

لیکا مصالحی است که از خاک رس منبسط شده بدست می‌آید. ویژگی اصلی آن سبک بودن در مقایسه با سایر مصالح است. از طرفی تراورتن یکی از سبک‌ترین مصالح سنگی در مقایسه با سایر مصالح طبیعی است. این ادعا وجود دارد که مصالح سنگی سبک هزینه حمل را کاهش داده، کارایی مخلوط آسفالتی را در هنگام تولید و تراکم بهبود می‌دهند و انرژی حرارتی کمتری در هوای گرم تابستان دریافت می‌نمایند. کاهش وزن مصالح، تنش‌های فشاری کمتری را به بستر روسازی انتقال می‌دهد. از طرفی در کشور ما سنگ دانه‌های سیلیسی به وفور در تولید مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شود. در این تحقیق رفتار مکانیک شکست مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با لیکا و تراورتن به ترتیب به عنوان مصالح سبک و نسبتاً سبک در سه دانه‌بندی مختلف در مقایسه با سنگدانه‌های سیلیسی بررسی می‌شود. بدین منظور، نمونه‌های آسفالتی به شکل نیم استوانه با این مصالح ساخته شدند. این نمونه‌ها در شرایط بارگذاری سه نقطه‌ای و در مود شکست I قرار گرفتند. مقدار بار بحرانی شکست آنها به دست آمد. سپس ضریب شدت تنش بحرانی تعیین و انرژی شکست آنها مشخص شد. نتایج نشان داد که بار شکست، ضریب شدت تنش بحرانی و انرژی شکست نمونه‌های ساخته شده با این مصالح از مصالح سیلیسی کمتر است. تغییر دانه‌بندی و استفاده از اندازه ذرات درشت‌دانه‌تر توانست، بار شکست و ضریب شدت تنش بحرانی بیشتری برای لیکا و تراورتن در مقایسه با دانه‌بندی ریزتر ایجاد کند. در دماهای آزمایش پایین‌تر، مقدار بار شکست و ضریب شدت تنش بحرانی بیشتر و مقدار انرژی شکست کمتری مشاهده گردید.

واژه‌های کلیدی: آسفالت، انرژی شکست، بار شکست، تراورتن، لیکا

۱- مقدمه

مصالح سنگی در مخلوط‌های آسفالتی، می‌توان مقاومت اصطکاکی قابل قبولی را به دست آورد (Tataranni & Sangiorgi, 2019). آساگوستیناچیو و همکاران درصدهای مختلفی از لیکا را در مصالح سنگی لازم برای تهیه نمونه‌های مخلوط آسفالتی استفاده کردند (Agostinacchio, Ciampa, & Olita, 2019). بیشترین تمرکز آنها بر روی

لیکا خاک رس منبسط‌شده‌ای است که به دلیل چگالی پایین، یک مصالح ساختمانی سبک در پروژه‌های عمرانی است. در سال‌های اخیر از لیکا در مطالعات آزمایشگاهی برای بررسی رفتار مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده است. تاتارانلی و سنگیورگی از لیکا در ساخت مخلوط آسفالتی استفاده کردند. ایشان مشاهده نمودند که در صورت استفاده از ۱۲ درصد لیکا در ترکیب

به‌عنوان مصالح سنگی برای تهیه نمونه‌های بتن متخلخل آزمایشگاهی و برای بررسی مشخصات فنی آن‌ها استفاده کردند. نتایج نشان داد که نفوذپذیری این نوع بتن با تراورتن بهبود می‌یابد (Li, T. et al., 2024).

یکی از خرابی‌های متداول در روسازی‌های آسفالتی، ترک‌هایی است که در دمای پایین رخ می‌دهد. این خرابی، عملکرد روسازی راه را به‌مرورزمان، تحت تأثیر قرار می‌دهد. در دماهای پایین، علی‌الخصوص در دماهای زیر صفر درجه سانتی‌گراد، مخلوط آسفالتی به‌صورت یک ماده شکننده عمل نموده و خطر گسیختگی‌های ناگهانی ناشی از ترک‌ها در روسازی آسفالتی افزایش می‌یابد. در این تحقیق رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی ساخته‌شده با سنگ‌دانه‌های لیکا، تراورتن و مصالح سیلیسی بررسی می‌شود. در پژوهش‌های اخیر، اثر مواد افزودنی مختلف، اندازه و شکل نمونه‌های آزمایشگاهی، روش‌های مختلف بارگذاری و ... بر رفتار شکست مخلوط آسفالتی بررسی شده است (Pirmohammad & Ayatollahi, 2020). در این تحقیق علاوه بر جنس مصالح سنگی، نوع دانه نیز در رفتار شکست مخلوط آسفالتی بررسی شده است. مکانیک شکست یک روش توانمند در ارزیابی رفتار ترک‌خوردگی مواد است. استفاده از این علم می‌تواند به پیش‌بینی رشد و گسترش ترک‌ها کمک کند (Gdoutos, 2020). در پژوهش‌های اخیر، از این روش در ارزیابی رفتار مخلوط‌های آسفالتی در برابر ترک‌های حرارتی استفاده شده است. این روش می‌تواند در بررسی رفتار شکست ترد در حالت برش خالص، کشش خالص و ترکیب آن‌ها برای مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای مورد استفاده قرار گیرد. بو و صالح، اثر شرایط بارگذاری و ضخامت نمونه‌های خمش نیم‌دایره‌ای را بر چقرمگی شکست نمونه‌های آسفالتی ارزیابی نمودند. نتایج نشان داد که قطر مختلف نمونه‌ها، چقرمگی شکست را تغییر نمی‌دهد (Bui & Saleh, 2021). گلچین و همکاران از آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای برای بررسی رفتار مخلوط‌های آسفالت گرم در حضور افزودنی ساسوبیت در مد کشش و برش خالص استفاده کردند. ایشان نشان دادند که مقاومت شکست نمونه‌ها با کاهش دمای آزمایش از صفر به منفی بیست درجه افزایش پیدا می‌کند (Golchin, 2022). لی و ماراستانو با استفاده از نمونه‌های آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای نشان دادند که مقاومت شکست مخلوط آسفالتی تابعی از جنس مصالح سنگی، درصد فضای خالی، نوع قیر مصرفی و دمای آزمایش می‌باشد (Li, X.-J. & Marasteanu, 2010). براهام و همکاران نشان دادند که درجه عملکردی قیر و جنس مصالح سنگی عاملی مهم در تعیین انرژی شکست مخلوط آسفالتی است (Braham, Buttlar, & Marasteanu, 2010).

طرح اختلاط این مخلوط‌ها بود. باناتی و همکاران، مشخصات حرارتی مخلوط آسفالتی دارای سنگ‌دانه لیکا به همراه چندین سنگ‌دانه را در شرایط وقوع آتش‌سوزی در داخل تونل‌ها به‌وسیله کالری متر مخروطی بررسی نمودند (Bonati, Rainieri, Bochicchio, Tessadri, & Giuliani, 2015). حامدی و همکاران از لیکا در بخشی از ریزدانه آسفالت متخلخل استفاده کردند. نتایج پژوهش ایشان نشان داد که افزودن لیکا به مخلوط آسفالتی، موجب بهبود حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی می‌شود (Arbani, Jafari, & Hamed, 2015). برخلاف مخلوط‌های آسفالتی، مطالعات آزمایشگاهی گسترده‌ای در خصوص استفاده از لیکا در مخلوط‌های بتنی وجود دارد. مورگان و همکاران مشخصات آزمایشگاهی بتن حاوی لیکا را بررسی نمود (Murugan, Palaniappan, & kumar, 2023). ایشان مشاهده نمودند جایگزینی ۱۰ درصد از مصالح سنگی با لیکا نتایج قابل قبولی را در زمینه مقاومت فشاری و خمشی نشان می‌دهد. مسلم و همکاران از نانولوله کربنی در تولید نمونه‌های بتن سبک با لیکا استفاده کرد (Mosallam, Behbahani, Shahpari, & Abaeian, 2022). نتایج آزمایشگاهی نشان داد که مقاومت ۲۸ روزه بتن حاوی لیکا در حضور این افزودنی افزایش می‌یابد. ادمان و همکاران با بررسی مشخصات فنی بتن حاوی لیکا نشان دادند که استفاده از لیکا به عنوان بخشی از بتن، مشخصات فنی مورد نظر را تأمین می‌کند (Othman et al., 2020).

تراورتن یک سنگ تزئینی با چگالی نسبتاً کمتر در مقایسه با سنگ‌های ساختمانی دیگر است. تراورتن در مطالعات آزمایشگاهی در صنعت آسفالت عمدتاً به شکل پودر و فیلر و به صورت یک محصول بازیافتی موردتوجه قرار گرفته است. از پودر تراورتن به‌عنوان فیلر در تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی برای آسفالت حفاظتی استفاده شده است (Nejati, Mansourian, Ravanshadnia, & Sadeh, 2024). محصول تولیدشده دارای مقاومت کافی در برابر بار ترافیکی و عریان شدگی بود. زارعی و ملکی از پودر تراورتن به‌عنوان فیلر برای بررسی رفتار شیارافتادگی در مخلوط‌های آسفالتی استفاده کردند (Zarei & Maleki, 2023). نتایج نشان داد که رفتار مخلوط آسفالتی حاوی پودر تراورتن بهتر از مخلوط‌های آسفالتی تولیدشده‌ی کارخانه‌ای است. استفاده از تراورتن در مطالعات آزمایشگاهی مربوط به بتن بیشتر استفاده شده است. دوست محمدی و همکاران نفوذپذیری روسازی بتنی را با مصالح تراورتن بررسی کردند (Doostmohamadi, Karami, Mousavi, & Rezayfar, 2019). نتایج تحقیق نشان داد که با جایگزینی بیشتر مصالح سنگی تراورتن در بتن، میزان تخلخل و نفوذپذیری بتن افزایش می‌یابد. لی و همکاران از ضایعات سنگ تراورتن

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مصالح به‌کاررفته

در این پژوهش از ۳ نوع مصالح سنگی استفاده شد. مصالح نوع اول، سنگ سیلیسی رودخانه‌ای بودند که از معدن جاجرود به دست آمدند. مصالح نوع دوم لیکا و نوع سوم مصالح سنگی تراورتن بود. جدول ۱ مشخصات فنی مصالح را نمایش می‌دهد. با توجه به اینکه بررسی اثر نوع دانه‌بندی مصالح و اندازه مصالح سنگی بر مقاومت شکست مخلوط آسفالتی به عنوان یکی از اهداف پژوهش است، از حد وسط دانه‌بندی‌های شماره ۴، ۵ و ۶ آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴) با بزرگ‌ترین اندازه اسمی ۱۹، ۱۲/۵، ۹/۷۵ میلی‌متر به عنوان دانه‌بندی‌های مورد استفاده در ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی استفاده شد. جدول ۲ جزئیات دانه‌بندی‌ها را نشان می‌دهد.

برای تعیین ضریب تطویل و تورق سنگ‌دانه‌ها از استاندارد ASTM D ۳۳۹۸ استفاده شد و مقادیر محاسبه شده نشان داد که این ضرایب برای تمامی سنگ‌دانه‌ها در مقدار استاندارد قرار دارند. بافت سطحی سنگ‌دانه‌ها مورد بررسی قرار گرفت و نتایج در جدول ۳ ارائه شدند. در این پژوهش از قیر خالص با درجه نفوذ ۶۰-۷۰ با درجه عملکردی PG 22-64، تهیه‌شده از پالایشگاه تهران به‌منظور ساخت نمونه‌ها استفاده شد. مشخصات مربوط به قیرهای مورد استفاده در ساخت نمونه‌های آسفالتی در جدول ۴ ذکر شده است.

2007). نجد و ژنگ با اضافه کردن دو افزودنی به مخلوط آسفالتی، مقاومت شکست آن‌ها را بهبود دادند. در مورد اول، اصلاح خواص مخلوط آسفالتی با اضافه کردن فایبرگلاس ریز شده و در دومی تقویت مخلوط آسفالتی با استفاده از شبکه‌های شیشه‌ای صورت گرفت. آن‌ها با اصول مکانیک شکست نشان دادند که این دو ماده، مقاومت در مقابل ترک‌خوردگی در مخلوط آسفالتی را بهبود می‌دهند (Najd, Chao, & Ying, 2005). از اصول مکانیک شکست در بررسی رفتار شکست مخلوط‌های بتنی با آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای نیز استفاده شده است. قاسمی و همکاران، اثر نانو رس را بر چقرمگی شکست بتن در نمونه‌هایی با مختلف و زاویه‌های متفاوت ترک ارزیابی نمودند. نتایج نشان داد که نانو رس اثر بهبوددهنده بر مقاومت شکست بتن دارد (Ghasemi-Ghalebahman, Afshar, & Niaki, 2022). همکاران، اثر ابعاد مصالح سنگی را بر چقرمگی شکست بتن بررسی نمودند. ایشان در آزمایش‌های نمونه خمش نیم‌دایره‌ای مشاهده نمودند که با افزایش ابعاد مصالح سنگی در بتن، چقرمگی شکست افزایش می‌یابد (Afshar, Faramarzi, Mirsayar, & Ebrahimi, 2023). سلامت طلب و همکاران اثر ضایعات معدنی و الیاف شیشه‌ای را در رفتار مکانیک شکست بتن‌های پلیمری در آزمایش نمونه نیم‌دایره‌ای خمشی بررسی نمودند. نتایج نشان داد که این الیاف چقرمگی شکست بتن را در مد یک تا لحظه گسیختگی افزایش می‌دهند (Salamat-Talab, Safaei, Soltani, Akhavan-Safar, & da Silva, 2022).

جدول ۱. مشخصات مصالح سنگی مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها

شرح آزمایش	شماره استاندارد	مصالح سیلیسی	لیکا	تراورتن
وزن مخصوص	ASTM C-127	۲/۷۴	۱/۸۱	۲/۶۵
درصد سایش لس‌آنجلس	AASHTO T-96	۱۵/۹	۳۷/۸	۳۳/۶
درصد جذب آب درشت‌دانه	AASHTO T-85	۰/۸	۳/۷۳	۱/۹۲
درصد جذب آب ریزدانه	AASHTO T-84	۰/۷۴	۵/۵۲	۲/۴۵
تخلخل سنگ‌دانه‌ها	ASTM C97	۴/۵	۶/۷	۴/۴
درصد شکستگی (یک جهت)	ASTM D5821	۹۹	۹۸	۹۹
درصد شکستگی (دو جهت)	ASTM D5821	۹۶	۹۷	۹۷

جدول ۲. حد بالا و پایین دانه‌بندی‌های مورد استفاده در ساخت نمونه‌های آسفالتی

شماره دانه‌بندی			اندازه الک
۶ (رویه)	۵ (رویه)	۴ (آستر و رویه)	
درصد وزنی رد شده از هر الک			
-	-	۱۰۰	۱۹ میلی‌متر (۰/۷۵ اینچ)
-	۱۰۰	۹۰-۱۰۰	۱۲/۵ میلی‌متر (۰/۲۵ اینچ)
۱۰۰	۹۰-۱۰۰	-	۹/۵ میلی‌متر (۰/۳۷۵ اینچ)
۸۰-۱۰۰	۵۵-۸۵	۴۴-۷۴	۴/۷۵ میلی‌متر (شماره ۴)
۶۵-۱۰۰	۳۲-۶۷	۲۸-۵۸	۲/۳۶ میلی‌متر (شماره ۸)
۴۰-۸۰	-	-	۱/۱۸ میلی‌متر (شماره ۱۶)
۲۵-۶۵	-	-	۰/۶ میلی‌متر (شماره ۳۰)
۷-۴۰	۷-۲۳	۵-۲۱	۰/۳ میلی‌متر (شماره ۵۰)
۳-۲۰	-	-	۰/۱۵ میلی‌متر (شماره ۱۰۰)
۲-۱۰	۲-۱۰	۲-۱۰	۰/۰۷۵ میلی‌متر (شماره ۲۰۰)

جدول ۳. بررسی شکل و بافت سطحی سنگدانه‌ها

بافت سطحی	شکل	نوع سنگدانه‌ها
صاف	نیمه‌زاویه‌دار	مصالح سیلیسی
صاف	گرد شده	لیکا
زبر	زاویه‌دار	تراورتن

جدول ۴. مشخصات فیزیکی قیر مورد استفاده در ساخت مخلوط‌های آسفالتی

قیر ۶۰-۷۰	استاندارد	شرح آزمایش
۱/۰۳	ASTM D70	وزن مخصوص (گرم بر سانتی متر مکعب)
۳۰۸	ASTM D92	درجه اشتغال (درجه سانتی گراد)
۶۲	ASTM D5	درجه نفوذ (درجه سانتی گراد)
بیش از ۱۰۰	ASTM D113	انگمی (درجه سانتی گراد)
۴۹	ASTM D36	نقطه نرمی (درجه سانتی گراد)
۸۱۰	ASTM D 2170	ویسکوزیته در ۱۲۰ درجه (Mm ² /s)
۴۲۰	ASTM D 2170	ویسکوزیته در ۱۳۵ درجه (Mm ² /s)
۲۳۲	ASTM D 2170	ویسکوزیته در ۱۵۰ درجه (Mm ² /s)
-۱/۱۲	-	نشانه درجه نفوذ (PI)

۲-۲- تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی

۵/۱	مخلوط مصالح سیلیسی با دانه‌بندی شماره ۶
۵/۰	مخلوط مصالح لیکا با دانه‌بندی شماره ۶
۵/۶	مخلوط مصالح تراورتن با دانه‌بندی شماره ۶



شکل ۱. برش نمونه استوانه‌ای به دیسک‌های با ضخامت ۳ سانتی‌متر و برش نمونه‌های دایره‌ای به نیم‌دایره‌ای

نام‌گذاری مخلوط‌های آسفالتی در این پژوهش با در نظر گرفتن جنس مصالح سنگی و شماره دانه‌بندی با عبارت XY صورت گرفت. بر این اساس X نشانگر جنس مصالح سنگی (حرف S برای مصالح سیلیسی، حرف L برای مصالح لیکا و حرف T برای مصالح تراورتن) و Y نشانگر شماره دانه‌بندی مصالح سنگی (به ترتیب شماره‌های ۴، ۵ و ۶ برای دانه‌بندی با بزرگ‌ترین سایز مصالح ۱۹، ۱۲/۵ و ۹ میلی‌متر) می‌باشد. به عنوان مثال نمونه S4 به منظور بیان مخلوط آسفالت ساخته شده با مصالح سیلیسی و با بزرگ‌ترین سایز مصالح سنگی ۱۹ میلی‌متر می‌باشد که مورد آزمایش قرار گرفته است.

۲-۳- آزمایش شکست

انجام آزمایش شکست با استفاده از دستگاه یونیورسال SANTAM-150 تحت بارگذاری با نرخ ثابت صورت پذیرفت. از هر نوع ترکیب مخلوط آسفالتی برای مد بارگذاری، ۳ نمونه یکسان به منظور کاهش میزان خطای آزمایش تحت آزمایش شکست استفاده شد. بسته به مد بارگذاری مورد نظر، فواصل تکیه‌گاهی در شرایط مناسب هر مد تنظیم و نمونه

در این تحقیق، پارامترهای تأثیرگذار بر طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی نظیر مصالح سنگی، قیر، شرایط بارگذاری و تراکم بر مبنای آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران در نظر گرفته شد. به منظور تعیین قیر بهینه برای هر یک از مخلوط‌های آسفالتی از روش طرح اختلاط مارشال استفاده شد. جدول ۵، مقدار درصد قیر بهینه را برای مخلوط‌های مختلف آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

مهم‌ترین مزیت آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای را می‌توان به شکل ساده هندسی و ساخت راحتتر نمونه‌ها با متراکم‌کننده چرخشی ژیراتوری، عملیات آزمایشگاهی راحت و قابلیت بارگذاری در مدهای خالص و ترکیبی نسبت داد. از این رو در این پژوهش از نمونه‌های خمش نیم‌دایره‌ای در بارگذاری سه‌نقطه‌ای برای آزمایش شکست با هدف تعیین چقرمگی شکست نمونه‌های آسفالتی استفاده گردید. درصد فضای خالی آسفالت به عنوان یکی از پارامترهای اثرگذار در رشد ترک همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. در این پژوهش فضای خالی ۵ درصد برای ساخت نمونه‌های خمش نیم‌دایره‌ای مورد استفاده قرار گرفت. در تهیه این نمونه‌ها از دستگاه متراکم‌کننده ژیراتوری استفاده شد. نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۵ سانتیمتر و ارتفاع ۱۲ الی ۱۳ سانتیمتر با وزن تقریبی ۴۷۰۰ گرم ساخته شدند. از هر نمونه استوانه‌ای، سه قطعه دیسک با ضخامت‌های حدود ۳ سانتیمتر تهیه شد. نمونه‌های استوانه‌ای به دیسک‌های نازک برش داده شدند. بر روی قطعه‌های نیم‌دایره‌ای، ترک‌هایی به طول ۲ سانتیمتر با قطر کمتر از ۰/۵ میلی‌متر ایجاد شدند. بدین روش نمونه‌های نیم‌دایره‌ای ترک‌دار برای انجام آزمایش شکست تهیه گردید. شکل ۱ مراحل برش نمونه‌ها را نشان می‌دهد. در استفاده از نمونه خمش نیم‌دایره‌ای نحوه قرارگیری موقعیت تکیه‌گاه نسبت به ترک موجود، جهت شبیه‌سازی مدهای مختلف بارگذاری مهم می‌باشد.

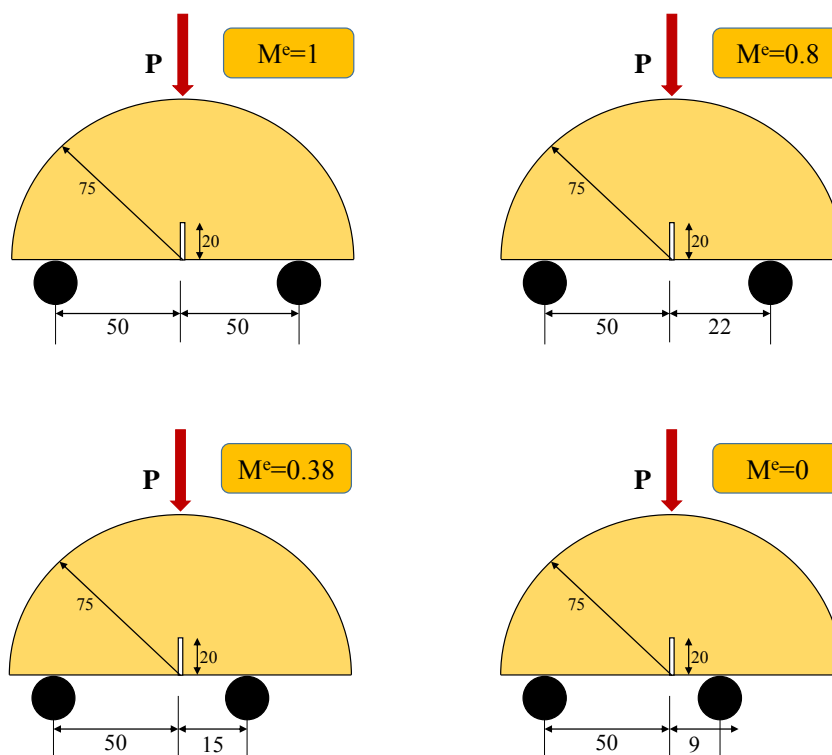
جدول ۵. درصد‌های قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی

نام مخلوط	قیر بهینه
مخلوط مصالح سیلیسی با دانه‌بندی شماره ۴	۴/۸
مخلوط مصالح لیکا با دانه‌بندی شماره ۴	۴/۶
مخلوط مصالح تراورتن با دانه‌بندی شماره ۴	۵/۱
مخلوط مصالح سیلیسی با دانه‌بندی شماره ۵	۴/۹
مخلوط مصالح لیکا با دانه‌بندی شماره ۵	۴/۸
مخلوط مصالح تراورتن با دانه‌بندی شماره ۵	۵/۴

در این تحقیق، بارگذاری مود I که در آن نمونه آسفالتی در معرض کشش خالص است، با استفاده از تکیه‌گاه‌های متقارن و با لحاظ نمودن نسبت فاصله تکیه‌گاه‌ها به قطر نمونه معادل با ۰/۶۶ مورد استفاده قرار گرفت. بدین منظور، نمونه‌های خمشی نیم‌دایره‌ای در معرض بارگذاری قرار گرفتند. مقدار ضریب شدت تنش بحرانی مود I (K_{IC}) برای این حالت بارگذاری با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$K_{IC} = \frac{6P_{cr}S\sqrt{\pi a}}{Rt^2} Y_I \left(\frac{a}{t}, \frac{S}{R}, \beta \right) \quad (1)$$

در محل مورد نظر تحت بارگذاری با نرخ ثابت ۰/۵ میلی‌متر در دقیقه قرار داده شد. شکل ۲ تصویری شماتیک را از نحوه‌ی تنظیم تکیه‌گاه‌های دستگاه برای مدهای مختلف بارگذاری نشان می‌دهد. در نمودارهای خروجی دستگاه یونیورسال، جابجایی در برابر نیرو ترسیم می‌شود. با افزایش میزان جابجایی، نیروی مورد نیاز افزایش و پس از آن به سرعت کاهش می‌یابد. نیروی ماکزیمم به عنوان بار بحرانی شکست قرائت و یادداشت می‌گردد. در این تحقیق از مود خالص کشش استفاده شده است.



شکل ۲. موقعیت تکیه‌گاه نسبت به ترک در مدهای مختلف بارگذاری و نحوه قرارگیری نمونه

می‌توان مقادیر K_{IC} را محاسبه کرد. بدین منظور، بار شکست بحرانی (حداکثر بار شکست) نمونه‌های مخلوط آسفالتی ثبت شد و در نهایت ضریب شدت تنش بحرانی آن‌ها با استفاده از رابطه (۱) محاسبه گردید. تحقیقات نشان داده است که دمای آزمایش یکی از مهم‌ترین پارامترهای اثرگذار بر مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی است. علت این امر ناشی از وابستگی رفتار ویسکوالاستیک قیر به تغییرات دمایی است. در دمای پایین رفتار قیر به سمت الاستیک میل می‌کند که این امر موجب افزایش سختی آسفالت می‌شود. در مقابل در دمای بالا، مخلوط آسفالتی رفتاری ویسکوالاستیک نشان می‌دهد. با توجه به فرضیات این

که در آن، P_{cr} بار شکست بحرانی، S فاصله مرکز تکیه‌گاه تا محور بارگذاری، a طول ترک، R شعاع نمونه، t ضخامت نمونه و β زاویه ترک نمونه نسبت به محور بارگذاری می‌باشد. در این پژوهش، شعاع نمونه ۷۵ میلی‌متر، ضخامت نمونه ۳۰ میلی‌متر، زاویه ترک نمونه نسبت به محور بارگذاری برابر با ۰ (صفر) و طول ترک برابر با ۲۰ میلی‌متر می‌باشد. بار شکست بحرانی از نتایج آزمایش‌ها مشخص می‌گردد. مقدار Y_I برای نمونه‌های آزمایش شده در این تحقیق طبق تحقیق علیها و همکاران ۰/۳۰۵ به دست آمده است (Aliha, Bahmani, & Akhondi, 2015). بنابراین با داشتن اطلاعات گفته شده،

نمونه‌های حاوی مصالح سیلیسی تأثیر بیشتری داشت که نشان از حساسیت بالاتر این مخلوط در برابر ترک خوردگی در شماره دانه‌بندی بالاتر دارد.

جدول ۶. نتایج بار شکست بحرانی نمونه‌های آسفالتی

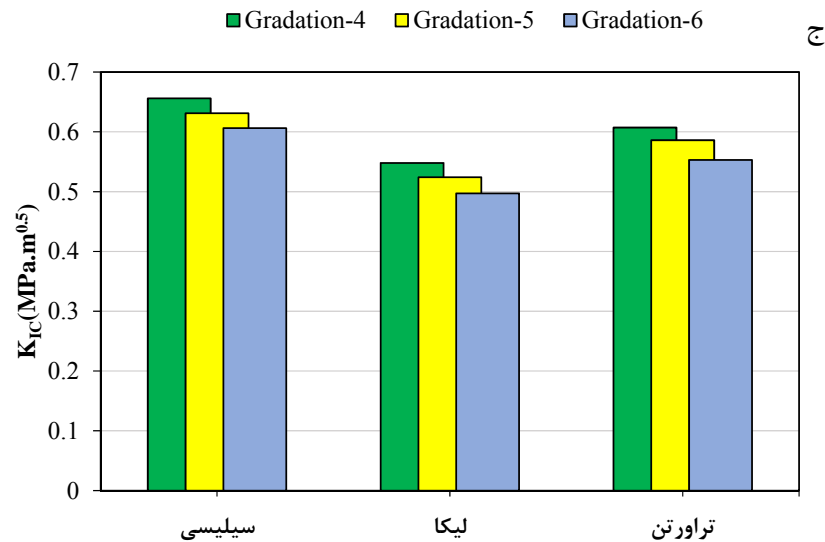
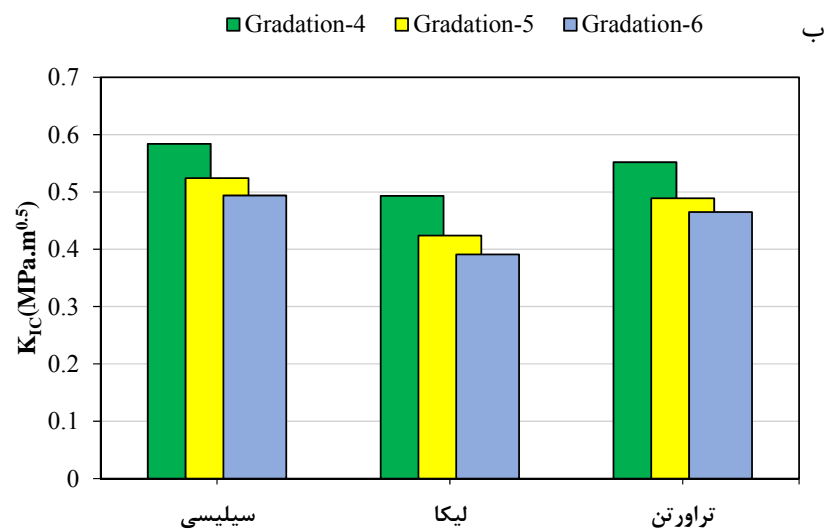
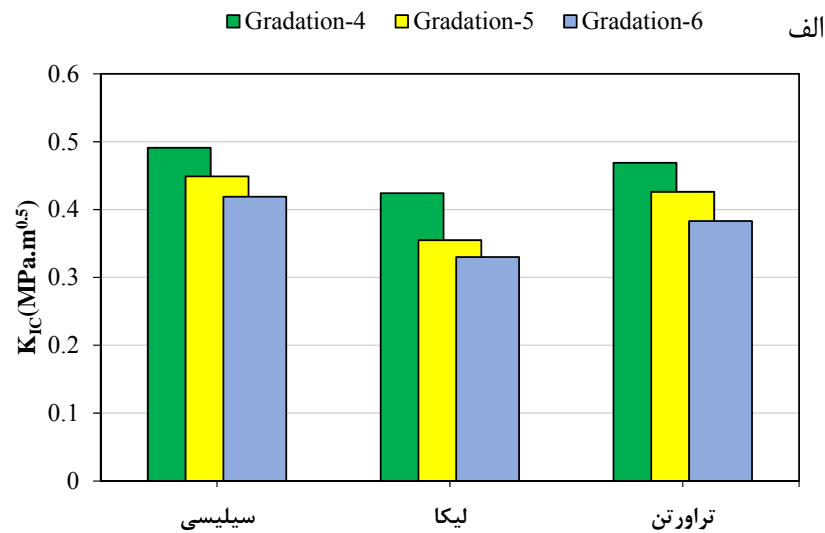
دما (درجه سانتی‌گراد)	نوع دانه‌بندی	جنس مصالح سنگی	بار شکست بحرانی (نیوتن)
۰	۴	سیلیسی	۱۰۱۷
		لیکا	۸۷۹
	تراورتن	۹۷۳	
	سیلیسی	۹۳۱	
	لیکا	۷۳۶	
	تراورتن	۸۸۴	
۵	۴	سیلیسی	۸۶۹
		لیکا	۶۸۴
	تراورتن	۷۹۵	
	سیلیسی	۱۲۱۱	
	لیکا	۱۰۲۱	
	تراورتن	۱۱۴۵	
-۱۰	۴	سیلیسی	۱۰۸۷
		لیکا	۸۷۹
	تراورتن	۱۰۱۴	
	سیلیسی	۱۰۲۵	
	لیکا	۸۱۱	
	تراورتن	۹۶۴	
-۲۰	۴	سیلیسی	۱۳۵۹
		لیکا	۱۱۳۷
	تراورتن	۱۲۵۸	
	سیلیسی	۱۳۰۸	
	لیکا	۱۰۸۷	
	تراورتن	۱۲۱۴	
۶	سیلیسی	۱۲۵۶	
	لیکا	۱۰۳۱	
تراورتن	۱۱۴۶		

پژوهش که بر مبنای مکانیک شکست الاستیک خطی قرار دارد، دماهای آزمایش شکست ۰، ۱۰- و ۲۰- درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد.

۳- نتایج و بحث

جدول ۶ بار شکست بحرانی نمونه‌های آسفالتی ساخته شده با مصالح سنگی مختلف را نشان می‌دهد. در شکل ۳ نمودار میله‌ای مقادیر ضریب شدت تنش بحرانی برای این مخلوط‌ها در دانه‌بندی شماره ۴، ۵، ۶ و در دماهای ۰، ۱۰- و ۲۰- درجه سانتی‌گراد نمایش داده شده است. مشاهده می‌گردد که مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با مصالح سیلیسی از مقاومت شکست و ضریب شدت تنش بحرانی بیشتری نسبت به نمونه‌های ساخته شده با مصالح لیکا و تراورتن برخوردارند. علیها و همکاران در یک پژوهش آزمایشگاهی که بر روی مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با انواع مصالح سنگی انجام دادند، مشاهده کردند که جنس مصالح اثر قابل توجهی بر مقاومت شکست مخلوط آسفالتی دارد. ایشان بیان کردند که مصالح آهکی به دلیل چسبندگی بهتر با قیر و همچنین درصد شکستگی بیشتر موجب افزایش ضریب شدت تنش بحرانی (چقرمگی شکست) آسفالت نسبت به نمونه‌های ساخته شده با مصالح سیلیسی می‌شوند (mohammadaliha, Rezaiefar, & Fazaeli, 2015).

در تحقیق حاضر، ضریب شدت تنش بحرانی و مقاومت شکست مخلوط آسفالتی ساخته شده با مصالح سیلیسی بیشتر از ضریب شدت تنش بحرانی مخلوط آسفالتی ساخته شده با مصالح تراورتن و آن هم بیشتر از مخلوط آسفالتی ساخته شده با مصالح لیکا است. با مقایسه نتایج نشان داده شده در جدول و نمودارها، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش شماره دانه‌بندی یا به اصطلاح کاهش حداکثر اندازه سنگ‌دانه‌ها، باعث کاهش ضریب شدت تنش بحرانی و بار شکست بحرانی در هر سه نوع مخلوط می‌شود. بر این اساس با کوچک‌تر شدن سایز مصالح سنگی از ضریب شدت تنش بحرانی مخلوط‌های آسفالتی کاسته می‌شود به طوری که نمونه‌های ساخته شده با مصالح سنگی با بزرگ‌ترین سایز مصالح سنگی ۱۹ میلی‌متر از بیشترین ضریب شدت تنش بحرانی برخوردار هستند. این روند به خصوص بر روی

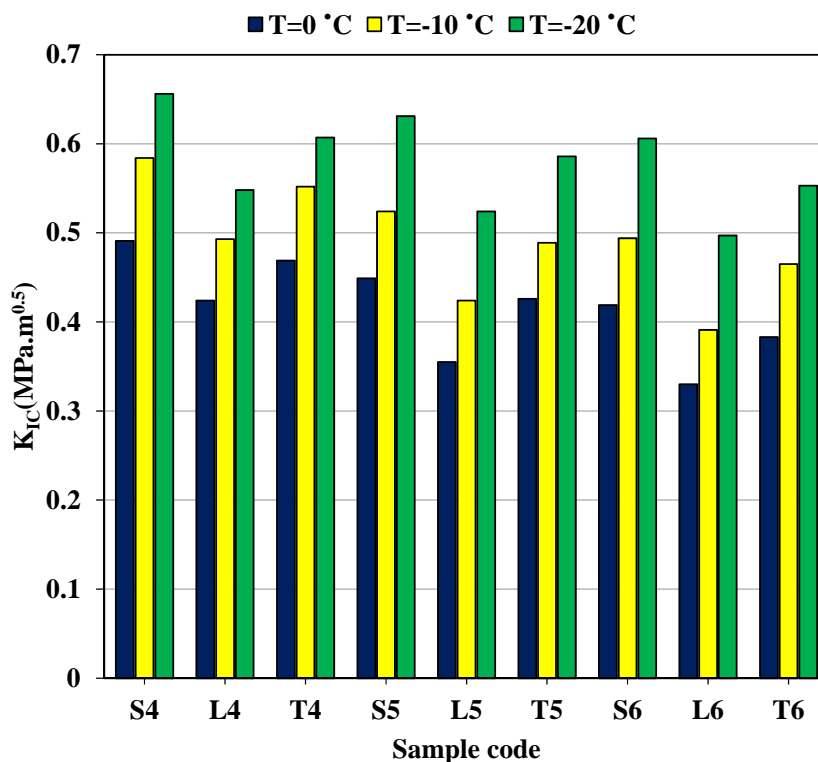


شکل ۳. ضریب شدت تنش بحرانی در بارگذاری مد کشش خالص در دمای الف- صفر، ب- ۱۰- و ج- ۲۰- درجه سانتی گراد

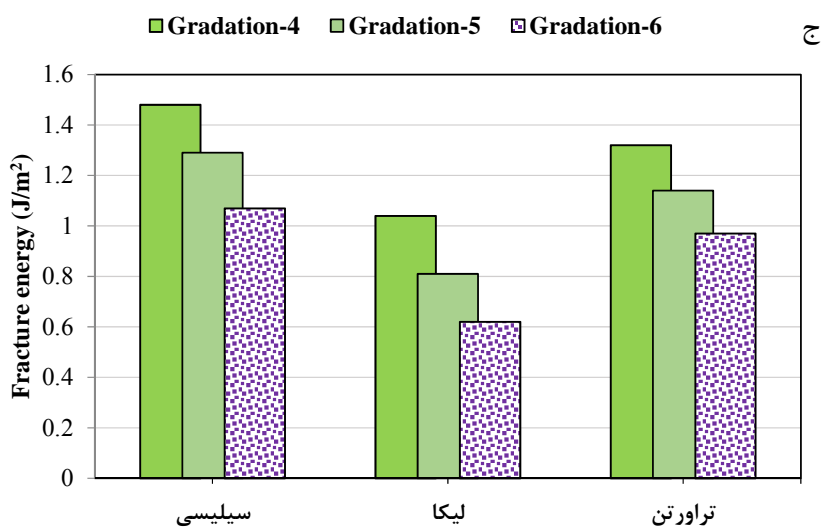
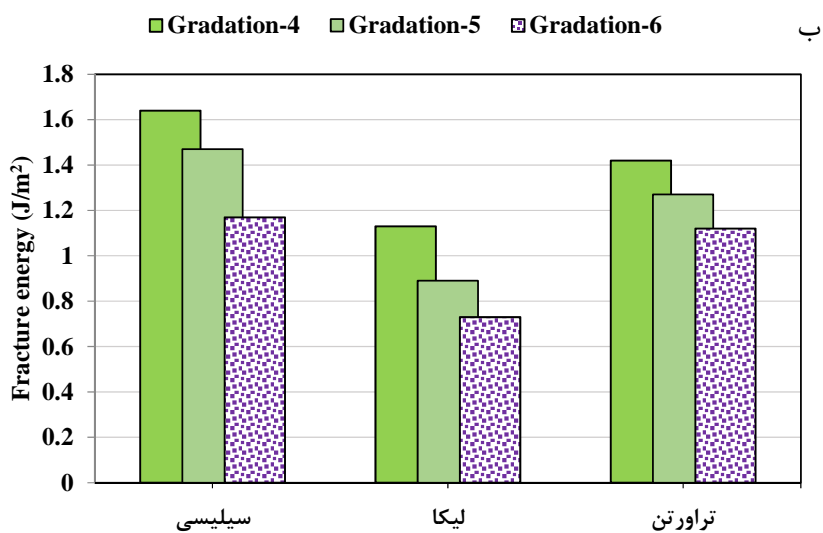
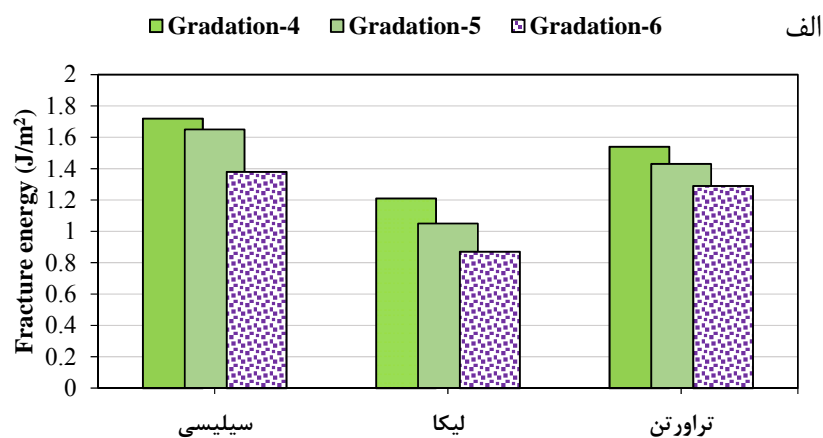
بارگذاری مود I است. انرژی شکست نمونه‌ها در شکل ۵ به ازای نوع مصالح، دانه‌بندی مصالح و دمای آزمایش نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود که مشاهده می‌شود، همانند ضریب شدت تنش، میزان انرژی شکست مخلوط آسفالتی حاوی مصالح سنگی سیلیسی بیشترین انرژی شکست را دارا می‌باشد و بیشترین مقاومت را در برابر ترک‌خوردگی از خود نشان می‌دهد. در تحقیق حاضر، با تحلیل نمودارها این نتیجه حاصل شد که افزایش حداکثر اندازه سنگ‌دانه‌ها باعث افزایش انرژی شکست مخلوط آسفالتی می‌گردد. نتیجه بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهند که برخلاف ضریب شدت تنش، صرف‌نظر از نوع مخلوط، افت دما منجر به کاهش انرژی شکست می‌شود. مرور ادبیات صورت پذیرفته نشان می‌دهد که در تحقیقات پیشین نیز نتایج مشابه با این مشاهده گزارش شده بود.

به منظور بررسی تأثیر دمای آزمایش، ضریب شدت تنش بحرانی تمام مخلوط‌های آزمایش شده با دماهای سه‌گانه در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج شکل ۴ نشان می‌دهد که با کاهش دمای آزمایش، ضریب شدت تنش افزایش می‌یابد. به عبارتی، می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت نمونه‌های آسفالتی در برابر ترک‌خوردگی تحت تأثیر افت دما افزایش می‌یابد. همچنین نتایج آزمایش نشان داد تأثیر کاهش دما از ۰ به ۱۰- درجه سانتی‌گراد بر افزایش شدت تنش بیشتر از تأثیر کاهش دما از ۱۰- به ۲۰- درجه سانتی‌گراد است. همچنین تأثیر دمای مخلوط آسفالتی بر نمونه‌های ساخته شده با سایز کوچک‌تر مصالح سنگی بیشتر دیده شد. بر این اساس می‌توان گفت نمونه‌های با دانه‌بندی ریزتر با تغییر در دمای مخلوط آسفالتی از حساسیت بالاتری در برابر ترک‌خوردگی در شرایط بارگذاری مد کشش خالص برخوردارند.

یکی دیگر از پارامترهایی که از نتایج آزمایش شکست استخراج می‌شود، انرژی شکست نمونه مخلوط آسفالتی تحت



شکل ۴. تأثیر دما بر ضریب شدت تنش بحرانی در بارگذاری مد کشش خالص



شکل ۵. انرژی شکست در بارگذاری مد کشش خالص در دمای الف- صفر، ب-۱۰- و ج- ۲۰- درجه سانتی گراد

۴- نتیجه گیری

مد بارگذاری I از مقادیر بالاتر بار شکست بحرانی و شدت تنش بحرانی شکست برخوردار بودند که نشان از تاثیر جنس مصالح سنگی در مقاومت ترک خوردگی مخلوط آسفالتی دارد. مخلوط آسفالتی دارای مصالح لیکا هم کمترین بار شکست بحرانی و ضریب شدت تنش بحرانی را دارا می باشد.

۴- نتایج انرژی شکست برای نمونه ها نشان داد که با افزایش حداکثر اندازه سنگ دانه ها، انرژی شکست مخلوط های آسفالتی افزایش می یابد.

۵- همانند نتایج بار شکست بحرانی، استفاده از مصالح سنگی سیلیسی بیشترین انرژی شکست را به دست می دهد. مصالح لیکا نیز کمترین مقدار انرژی شکست را دارا می باشند. همچنین میزان انرژی شکست با کاهش دما کمتر می شود.

در پژوهش حاضر اثر مشخصات مخلوط های آسفالتی بر مقاومت مخلوط های آسفالتی در شرایط بارگذاری با مد I بارگذاری کشش خالص مورد بررسی قرار گرفت. متغیرهای این تحقیق نوع دانه بندی، جنس مصالح سنگی و دمای آزمایش بود. مهم ترین نتایج حاصل از آزمایش ها عبارتند از:

۱- اندازه و دانه بندی مصالح سنگی تاثیر قابل توجهی بر رفتار شکست مخلوط های آسفالتی تحت مد اول بارگذاری شکست دارد. بر این اساس نمونه های با دانه بندی درشت تر از مقاومت بالاتر در برابر ترک خوردگی برخوردارند. این موضوع به خصوص در دماهای بالا بیشتر احساس می شود.

۲- با افزایش دمای آزمایش از شدت تنش بحرانی نمونه های مورد آزمایش کاسته می شود. این روند تقریباً در تمامی مخلوط های آسفالتی مورد آزمایش مشاهده شد.

۳- مخلوط های آسفالتی ساخته شده با مصالح سنگی سیلیسی در مقایسه با نمونه های حاوی مصالح سنگی لیکا و تراورتن در

۵- مراجع

Transportation Research Record, 2001, 1, 102-109.

-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.

-Tataranni, P., & Sangiorgi, C. (2019). experimental application of synthetic lightweight aggregates for the production of special asphalt concretes. *Paper presented at the International Conference on Sustainable Materials, Systems and Structures (SMSS2019)*.

-Murugan, K., Palaniappan, M., & kumar Kalappan, K. (2023). Experimental studies on light weight concrete using LECA material. *Materials Today: Proceedings*, 74, 1035-1041.

-Mosallam, S. J., Behbahani, H. P., Shahpari, M., & Abaeian, R. (2022). The effect of carbon nanotubes on mechanical properties of structural lightweight concrete using LECA aggregates. *Paper presented at the Structures*.

-Agostinacchio, M., Ciampa, D., & Olita, S. (2019). Asphalt concrete mixtures lightened with expanded clay for high-grip wearing course layers. In *Pavement and Asset Management*, CRC Press. 11-18.

-Arbani, M., Jafari, H., & Hamed, G. (2015). Investigating the effect of using fine-grained lica on the mechanical properties of porous asphalt mixture. *7th Iranian Bitumen and Asphalt Conference December 15*. (in Persian)

-Bonati, A., Rainieri, S., Bochicchio, G., Tessadri, B., & Giuliani, F. (2015). Characterization of thermal properties and combustion behaviour of asphalt mixtures in the cone calorimeter. *Fire Safety Journal*, 74, 25-31.

-Afshar, R., Faramarzi, L., Mirsayar, M., & Ebrahimi, B. J. (2023). Aggregate size effects on fracture behavior of concrete SCB specimens. *Construction and Building Materials*, 389, 131628.

-Braham, A. F., Buttlar, W. G., & Marasteanu, M. O. (2007). Effect of binder type, aggregate, and mixture composition on fracture energy of hot-mix asphalt in cold climates.

- Transportation Engineering*, 13, 4, 1967-1981. (in Persian)
- Li, X.-J., & Marasteanu, M. (2010). Using semi circular bending test to evaluate low temperature fracture resistance for asphalt concrete. *Experimental Mechanics*, 50, 867-876.
- Najd, A., Chao, Z., & Ying, G. (2005). Experiments of fracture behavior of glass fiber reinforced asphalt concrete. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 25, 3, 28-32.
- Ghasemi-Ghalebahman, A., Aghdam, A. A., Pirmohammad, S., & Niaki, M. H. (2022). Experimental investigation of fracture toughness of nanoclay reinforced polymer concrete composite: Effect of specimen size and crack angle. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 117, 103210.
- Salamat-Talab, M., Safaei, S., Soltani, F., Akhavan-Safar, A., & da Silva, L. F. (2022). Fracture Toughness Analysis of Polymer Concretes Made by Waste Mineral Aggregates and Enhanced with Glass Fibers and Metal Chips. *Paper presented at the International Conference on Mechanics of Solids*.
- Aliha, M., Bahmani, A., & Akhondi, S. (2015). Determination of mode III fracture toughness for different materials using a new designed test configuration. *Materials & Design*, 86, 863-871.
- mohammadaliha, m., Rezaiefar, M., & Fazaeli, H. (2015). Evaluation of mixed mode fracture resistance of different asphalt concretes-An Experimental study. *Modares Civil Engineering Journal*, 15, 1, 73-85.
- Nejati, A., Mansourian, A., Ravanshadnia, M., & Sadeh, E. (2024). Feasibility of using recycled waste travertine stone powder (RWTSP) as a substitute for mineral filler in microsurfacing surface treatment. *Construction and Building Materials*, 418-128.
- Othman, M., Sarayreh, A., Abdullah, R., Sarbini, N., Yassin, M., & Ahmad, H. (2020). Experimental study on lightweight concrete using lightweight expanded clay aggregate (LECA) and expanded perlite aggregate (EPA). *J. Eng. Sci. Technol*, 15, 2, 1186-20.
- Zarei, P., & Maleki, M. (2023). Experimental study of the effect of filler type on plastic deformations of hot asphalt mixture at different temperatures. *13th International Congress on Civil Engineering*. October 17. (in Persian)
- Doostmohamadi, M., Karami, H., Mousavi, S. F., & Rezayfar, O. (2019). Improving the Performance of Permeable Concrete Pavement by Replacing Sedimentary Travertine Aggregate. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 6, 3, 5-16.
- Li, T., Tang, X., Xia, J., Gong, G., Xu, Y., & Li, M. (2024). Investigation of mechanical strength, permeability, durability and environmental effects of pervious concrete from travertine waste material. *Construction and Building Materials*, 426, 136175.
- Pirmohammad, S., & Ayatollahi, M. R. (2020). Fracture behavior of asphalt materials, *Springer*.
- Gdoutos, E. E. (2020). Fracture mechanics: an introduction, *Springer Nature*. Vol. 263.
- Golchin, B., Kouzehgar Kaleji, Z., & Meshkabadi, R. (2022). Evaluation of the Performance of Warm and Hot Mix Asphalt in Cold Regions Using the Principles of Fracture Mechanics. *Quarterly Journal of*

Experimental Investigating of the Effect of Leca and Travertine Aggregates on the Fracture Mechanics of Asphalt Mixtures

Mikaeil Yalghouzaghaj Naseri, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Selmas Branch, Iran.

Naser Zoormand, Yalghouzaghaj, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran.

Babak Golchin, Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

Ramin Meshkabadi, Associate Professor, Faculty of Advanced Technologies, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

E-mail: mikaeilnaseri@yahoo.com

Received: January 2025- Accepted: April 2025

ABSTRACT

Leca and travertine are both lightweight materials, with Leca being obtained from expanded clay and travertine being a type of stone. Aggregates containing silica are commonly used in asphalt production to reduce transportation costs, improve asphalt performance, and absorb less thermal energy in hot weathers, ultimately reducing compressive stress on pavement subgrades. In this study, we investigated the mechanical fracture behavior of asphalt mixtures containing leca and travertine as relatively light materials, respectively, in comparison to silica aggregates. We used three different grades of these materials to fabricate semi-cylindrical asphalt samples, which were then tested under three-point loading and failure mode I to determine their critical failure load values. Subsequently, we calculated the critical stress intensity factor and failure energy of the samples. The results indicated that the fracture load, critical stress intensity factor, and fracture energy of the samples fabricated with leca and travertine were lower than those of the silica aggregate. Additionally, we found that changing the aggregate size and using a larger particle size could lead to a higher fracture load and critical stress intensity factor for leca and travertine compared to a smaller aggregate size. Furthermore, we observed that at lower test temperatures, the fracture load and critical stress intensity factor were higher, while the fracture energy was lower.

Keywords: Asphalt Mixture, Fracture Energy, Fracture Load, Travertine, Leca