

علمی - تخصصی

بررسی ویژگی‌های ترک خوردگی در دمای کم مخلوط‌های آسفالتی حاوی خرده آسفالت بازیافتی و افزودنی ساسوبیت با استفاده از آزمایش خمش نیم‌دایره

امین تناکی‌زاده^{۱*}، مهدی خرقانی^۲

۱- دکترای تخصصی (دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان)

۲- دکترای تخصصی (عضو هیئت علمی وابسته پژوهشکده سازندگی خاتم‌الانبیاء (ص))

(دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۷، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۰۳)

چکیده

ترک خوردگی دمای کم یکی از خرابی‌های اصلی رویه‌های آسفالتی است که به‌عنوان یک شاخص عملکردی مهم در روش طراحی مکانستیک - تجربی در نظر گرفته می‌شود. سختی شکست و انرژی شکست پارامترهای مهمی برای بررسی ترک خوردگی دمای کم مخلوط آسفالتی هستند. هدف از این مطالعه بررسی پارامترهای شکست دمای کم مخلوط‌های آسفالتی حاوی روسازی آسفالتی بازیافتی و افزودنی آسفالت گرم ساسوبیت با استفاده از آزمایش خمش نیم‌دایره است. برای این منظور آزمایش خمش نیم‌دایره در دمای صفر درجه سانتی‌گراد، تحت حالت تغییر مکان خطی کنترل شده صورت گرفت. هشت مخلوط بتن آسفالتی روسازی ممتاز شامل مخلوط آسفالتی داغ، بتن آسفالتی اصلاح شده با ساسوبیت، مخلوط آسفالتی داغ حاوی خرده آسفالت بازیافتی و مخلوط آسفالتی گرم حاوی خرده آسفالت بازیافتی با دو اندازه سنگ‌دانه بیشینه اسمی ۹/۵ و ۱۹ میلی‌متر تهیه شدند. مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی گسیختگی شکننده و ناگهانی نشان دادند درحالی‌که برای مخلوط‌های آسفالتی گرم و داغ گسیختگی شکل پذیرتر بود. سختی شکست مخلوط‌های بازیافتی بزرگ‌تر از دیگر مخلوط‌ها بود (حدود ۱۰۰ درصد مخلوط‌های بدون مصالح بازیافتی). بر اساس پارامتر انرژی شکست، مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی، افزون بر مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی، عملکرد ترک خوردگی دمای کم بهتری داشتند. مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی خرده آسفالت درشت‌دانه، افزایش حدود ۲۲ درصدی در انرژی شکست نشان دادند که پس از آن مخلوط آسفالتی گرم حاوی خرده آسفالت ریزدانه با حدود ۱۵ درصد و مخلوط آسفالتی داغ حاوی خرده آسفالت درشت‌دانه با حدود ۱۲ درصد قرار داشتند. شدت ترک خوردگی مخلوط‌های بازیافتی کمتر (بین ۲۵ تا ۸۴ درصد مخلوط‌های بدون خرده آسفالت متناظر) از مخلوط‌های بدون خرده آسفالت بود.

کلیدواژه‌ها: خرده آسفالت بازیافتی، خمش نیم‌دایره، ساسوبیت، انرژی شکست، سختی شکست

آزمایش‌های جهت بررسی ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی طی مرحله طرح اختلاط به کار نمی‌روند. بنابراین برای بررسی این پدیده و مطالعه چگونگی انتشار ترک در مصالح آسفالتی پیش از اجرای پروژه‌ها، نیاز به مطالعه عملکرد مقاومت در برابر ترک توسط جامعه علمی مورد بررسی است.

در این میان، دو رویکرد تعیین دمای حدی یا معیار مقاومت و استفاده از نظریه مکانیک شکست جهت پایش شکل‌گیری و رشد ترک‌ها طی اعمال بار تحت بررسی هستند. رویکرد اول به دلیل وجود تنها یک مقدار معین مقاومت مصالح یا تعیین یک دما

۱. مقدمه

سالانه مقادیر هنگفتی صرف شناسایی و تعمیر خرابی‌های به وجود آمده در شبکه راه‌های کشور می‌شود. یکی از متداول‌ترین گسیختگی‌ها در جاده‌های با روسازی آسفالتی، ترک خوردگی است که یا توسط بارهای ترافیک تکراری و یا با نوسانات دمایی در مصالح ایجاد می‌شود. به‌طور معمول آزمایش‌های مکانیکی با دستگاه‌های آزمایش عملکردی جهت ارزیابی و تعیین مقاومت ترک خوردگی مصالح آسفالتی در آزمایشگاه استفاده می‌شود. با این وجود این

که شامل قیر، سنگدانه، افزودنی ساسوبیت و مصالح بازیافتی است، بیان شده و روش آزمایش مبتنی بر مکانیک شکست خمشی نیم‌دایره جهت ارزیابی عملکرد ترک‌خوردگی بتن آسفالتی بررسی می‌شود.

در بخش چهارم، نتایج آزمایش‌های به‌دست‌آمده از بررسی نمونه‌های نیم‌دایره مخلوط آسفالتی تحت بار خمشی به شکل منحنی‌های بار - تغییر مکان خطی ارائه می‌شوند. با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، پارامترهای مبتنی بر مکانیک شکست شامل انرژی شکست و سختی شکست محاسبه شده و پس از تفسیر نتایج، انتشار ترک و مقاومت در برابر ترک در دمای کم برای مخلوط‌های مورد مطالعه توضیح داده شده و رتبه‌بندی عملکردی آن‌ها مشخص می‌شود. بخش نهایی مطالعه حاضر نتیجه‌گیری از مباحث را ارائه می‌نماید.

تعیین مشخصات آزمایشگاهی و کارهای مدل‌سازی تلاش داشته‌اند تا اثرات سختی را از سه روش اساسی جهت تعیین مقاومت در برابر ترک‌خوردگی حرارتی بررسی کنند: نخست، استفاده از یک آستانه سختی در یک فرکانس یا زمان معین و یک دمای مشخص، دوم، ایجاد تنش حرارتی و مقایسه آن با مقاومت کششی، و سوم، استفاده از یک رویکرد مبتنی بر مکانیک شکست [۴].

علم مکانیک شکست روی رفتار مکانیکی مصالح دارای نقص‌ها یا ترک‌ها تحت بارگذاری متمرکز است. مکانیک شکست الاستیک خطی به‌طور مشخص فرض می‌کند که جسم از مصالح همسانگرد خطی دارای رفتار الاستیک ساخته شده است. بتن آسفالتی ترک‌های کششی یا باز شونده (حالت ۱) را تحت بارهای حرارتی و ترک‌های لغزشی یا برشی در صفحه (حالت ۲) را تحت بارگذاری وسیله نقلیه نشان می‌دهد [۴].

قیر موجود در مصالح بازیافتی، ترکیب شیمیایی و ویژگی‌های متفاوت از قیر تازه دارد. این دو نوع قیر تا حدی با یکدیگر مخلوط شده و باعث تغییر مشخصات مخلوط‌های حاوی خرده آسفالت در مقایسه با مخلوط‌های جدید می‌شوند [۵].

در یک مطالعه انواع مختلف مصالح البافی را به‌عنوان افزودنی قیر و مخلوط آسفالتی با میزان خرده آسفالت متفاوت صفر، ۲۰ و ۴۰ درصد بررسی کردند. ارزیابی با استفاده از مجموعه آزمایش‌های رئومتر برشی دینامیک و رئومتر تیرچه خمشی جهت مطالعه مشخصات رئولوژیکی قیر اصلاح شده با الیاف و آزمایش‌های بارگذاری چرخ، خزش خمشی، حساسیت رطوبتی، خستگی و خود ترمیمی جهت تعیین ویژگی‌های آزمایشگاهی مخلوط‌های بازیافتی اجرا شد. مشخص شد که برای درصد‌های خرده آسفالت بالای استفاده شده در پروژه‌های روسازی، اضافه کردن چندین افزودنی

به‌عنوان دمای بحرانی قابل‌اعمال به بازه وسیعی از مصالح آسفالتی نیست. بنابراین نیاز به استفاده از یک روش آزمایشگاهی مناسب بر اساس اصول نظری متقن مانند نظریه مکانیک شکست احساس می‌شود [۱].

یکی از ارزان‌ترین، در دسترس‌ترین و متداول‌ترین آزمایش‌ها جهت تعیین مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی، آزمایش خمشی نیم‌دایره است. این آزمایش می‌تواند به‌سادگی با استفاده از یک قاب بارگذاری فشاری که در آزمایشگاه‌های مقاومت مصالح در دسترس است، انجام شود. علاوه بر این، به دلیل استفاده از نمونه‌های نیم‌دایره که به‌آسانی از مغزه‌های میدانی به دست می‌آیند، امکان ارزیابی روسازی‌های آسفالتی اجرا شده برای کنترل کیفیت وجود دارد [۲].

از طرف دیگر با افزایش استفاده از روش‌های بازیافت آسفالت، تولید احجام زیادی از مصالح روسازی‌های آسفالتی بازیافتی طی عملیات ترمیم و نگهداری روسازی مورد انتظار است. اگر این مصالح در روسازی‌های جدید استفاده شوند، علاوه بر کاهش هزینه تولید آسفالت جدید، سهم فراوانی از انتشار گازهای گلخانه‌ای در کارخانه‌های آسفالت کاسته خواهد شد. کاهش در مصرف منابع شن و ماسه طبیعی نیز قابل حصول است [۳].

هدف از این مطالعه، بررسی مقاومت ترک‌خوردگی و پارامترهای شکست مخلوط‌های آسفالتی حاوی خرده آسفالت بازیافتی و افزودنی ساسوبیت به‌عنوان مصالح ارزان و دوستدار محیط‌زیست است. این مطالعه با تعیین پارامترهای مبتنی بر مکانیک شکست در دمای کم، پس از ترک‌خوردگی و انتشار ترک طی اعمال بار خمشی روی نمونه‌های نیم‌دایره از مخلوط آسفالتی انجام می‌شود. آنچه این مطالعه را از دیگر تحقیقات متمایز می‌کند، استفاده از مصالح خرده آسفالت بازیافتی با دو دانه‌بندی متفاوت همراه با استفاده از افزودنی ساسوبیت است.

استفاده از آزمایش خمشی نیم‌دایره همراه با آزمایش‌های تعیین مقاومتی که به‌طور متداول به‌عنوان معیارهای طراحی در طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شوند، راهی برای تولید مخلوط‌های آسفالتی عاری از ترک‌خوردگی زود هنگام فراهم می‌کند و از هزینه‌های اضافی اعمالی پس از اجرای روسازی آسفالتی با مخلوط‌های نامناسب جلوگیری می‌نماید. در بخش بعد، مطالعات انجام شده در زمینه‌ی این تحقیق شامل مطالعات مرتبط با ترک‌خوردگی مخلوط آسفالتی، تحقیقات باهدف استفاده از مصالح خرده آسفالت بازیافتی در روسازی‌های آسفالتی و مطالعات مرتبط با کاربرد مکانیک شکست در تعیین عملکرد مخلوط آسفالتی مرور شده‌اند.

در بخش سوم، مشخصات مصالح استفاده شده در این مطالعه

می‌تواند بهتر آن را بهبود داده و مقاوم نماید [۶].

کمی روی عملکرد داشت، درحالی‌که قیر اثر بیشتری روی عملکرد دمای پایین داشت [۱۰].

در یک مطالعه دوازده مخلوط آسفالتی آزمایشگاهی با درجات قیر متفاوت و سطوح خرده آسفالت متفاوت را به‌وسیله چندین پروتکل آزمایشی بررسی کردند. مطالعه آن‌ها تعیین کرد که چه متغیرهایی مهم‌ترین عوامل از لحاظ شیار شدگی و ترک‌خوردگی-های مکانیکی و حرارتی است. تحلیل‌های آماری نشان داد که عملکرد مخلوط‌های بازیافتی داغ نتیجه اثر ترکیبی میزان خرده آسفالت و درجه قیر است. مشاهده شد که میزان خرده آسفالت می‌تواند به‌شدت وابسته به نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم، عدد روانی و انرژی شکست باشد و هر یک از آن‌ها می‌توانند جهت ارزیابی وجود مصالح بازیافتی در مخلوط‌های سوپرپیو استفاده شوند [۱۱].

در تحقیقی دیگر مقاومت ترک‌خوردگی بتن آسفالتی حاوی خرده آسفالت را از طریق روش انرژی شکست ارزیابی کردند. آزمایش‌های خمش نیم‌دایره دوره‌ای و یکنواخت همراه با سیستم همبستگی تصاویر دیجیتال (DIC) جهت ارتباط طول ترک و انرژی شکست انجام شدند. پنج مخلوط آسفالتی حاوی میزان خرده آسفالت‌های متفاوت (۰، ۱۵، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد وزنی مخلوط) در دو دمای ۱۵ و ۲۵ درجه سانتی‌گراد آزمایش شدند. بر اساس ارتباط بین انرژی شکست و طول انتشار ترک، چندین مشخصه عملکردی برای ترک‌خوردگی ارائه شد. نتیجه‌گیری شود که خرده آسفالت، انرژی شکست و انرژی اولیه برای ایجاد ترک را در آزمایش‌های خمش نیم‌دایره دوره‌ای و یکنواخت کاهش می‌دهد. خرده آسفالت منجر به نرخ‌های انرژی تجمعی پایین‌تر نسبت به مخلوط‌های بدون خرده آسفالت در آزمایش‌های خمش نیم‌دایره‌ای یکنواخت شد. نتایج تأکید کردند که افزودن خرده آسفالت مقاومت ترک‌خوردگی در دماهای متوسط را کاهش می‌دهد [۱۲].

همچنین مقاومت شکست و عملکرد حساسیت رطوبتی مخلوط‌های ولرم و داغ حاوی درصد‌های مختلف خرده آسفالت را ارزیابی شد. مقاومت شکست با افزایش میزان خرده آسفالت افزایش داشت. با این‌وجود لازم به ذکر است که بهبود مشخصات شکست با افزایش میزان خرده آسفالت به دلیل سختی بالاتر نمی‌تواند به‌صورت نظری درست باشد. چنین روندی می‌تواند احتمالاً ناشی از کمبود زمان استراحت در پروتکل آزمایش خمش نیم‌دایره باشد که رفتار اوج و تغییرات یا تغییرپذیری در ویژگی‌های مصالح را در نظر نمی‌گیرد. بنابراین بررسی بیشتر در این زمینه مورد نیاز است. مقاومت شکست مخلوط‌های داغ حاوی خرده آسفالت بهتر از مخلوط‌های ولرم حاوی خرده آسفالت بود. بنابراین با توجه به نتایج این مطالعه و مطالعات پیشین، ورود خرده آسفالت در مخلوط‌های

در یک مطالعه با استفاده از راه‌حل‌های تحلیلی متفاوت، اثر خرده آسفالت روی پاسخ مصالح در دماهای پایین را از طریق آزمایش خزش مخلوط با استفاده از دستگاه رثومتر تیرچه خمشی بررسی کردند. هیچ تفاوتی بین مخلوط اصلی و مخلوط طراحی شده با ۱۵ درصد خرده آسفالت مشاهده نشد. عملکرد ضعیفی با ورود بیش از ۲۵ درصد مصالح بازیافتی در مخلوط مشاهده شد که تغییر قابل‌ملاحظه‌ای تا افزایش حدود ۴۰ درصد نداشت و این موضوع نشان می‌دهد که درصد‌های خرده آسفالت بالاتر می‌تواند بسته به میزان ترافیک و شرایط محیطی استفاده شود [۷].

اشیا و همکاران، مخلوط‌های بازیافتی سرد تولیدی با منابع خرده آسفالت متفاوت را به‌صورت میدانی بررسی کردند. کار آن‌ها روی تعیین مشخصات در سطح کرنش کوچک و آزمون مدول سختی در سه دمای آزمایش متمرکز بود. سختی به کمک آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم اندازه‌گیری شد و رفتار شکست به کمک یک سیستم آزمایش خمش نیم‌دایره مطالعه گردید. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، اثر مصالح بازیافتی متفاوت و نیز اندازه سنگ‌دانه بیشینه اسمی قابل‌تأیید بود. به‌عنوان یک نتیجه، طبقه‌بندی و تفکیک منطقی خرده آسفالت، اجازه پیش‌بینی بهتر مشخصات مکانیکی مخلوط بازیافتی سرد را می‌دهد [۸].

در یک تحقیق مشخصات مکانیکی چند مقیاسی مخلوط‌های آسفالتی دارای درصد خرده آسفالت بالا را بررسی کردند. آن‌ها ارتباط بین مشخصات قیر، ملات و مخلوط را بررسی کردند. در آزمایش‌های آن‌ها ۳۰، ۵۰ و ۸۵ درصد خرده آسفالت به کار رفتند و قیر خالص (بدون خرده آسفالت) و قیر بازیافتی (دارای ۱۰۰٪ خرده آسفالت) برای مقایسه تهیه شدند. مشخص شد که با افزایش خرده آسفالت، قیر، ملات و مخلوط آسفالتی تغییرات مشابهی در مشخصات عملکردی داشتند. مدول مختلط با کاهش ویسکوالاستیسیته افزایش و مقاومت شیار شدگی بهبود یافت. درحالی‌که مقاومت در برابر ترک‌های حرارتی کاهش داشت. ویژگی‌های مکانیکی قیر، ملات و مخلوط آسفالتی به‌خوبی وابسته به دماهای پایین و بالا بودند. سنگ‌دانه‌های ریز اثر مهمی روی مشخصات دمای بالای ملاط‌ها داشتند و مدول مخلوط آسفالتی به‌شدت تحت تأثیر سنگ‌دانه‌های درشت بود [۹].

محققان دیگر عملکرد روسازی با مصالح خرده آسفالت در لایه‌های بالایی و میانی را در مقایسه با مخلوط‌های آسفالتی جدید متناظر با یا بدون دانه‌بندی اولیه یکسان را بررسی کردند. نتایج آزمایش خمش نیم‌دایره نشان داد که مخلوط‌های حاوی خرده آسفالت در دماهای پایین عملکرد ضعیفی داشتند و دانه‌بندی اثر

شد. در مقایسه با FI، شاخص CRI پارامتر تشخیص‌دهنده بهتر و با تغییرپذیری کمتر بود. ژو و همکاران، ارزیابی جامعی روی پارامترهای شکست شامل انرژی شکست، شاخص انعطاف‌پذیری ایلی‌نویز (IFI)، ضریب تشدید تنش و شاخص مقاومت انجام دادند. تمرکز این مطالعه بر ترک‌خوردگی دمای کم بود و تمام پارامترها با استفاده از نتایج آزمایش شکست دیسک فشرده (DCT) در دماهای پایین ارزیابی شدند. هدف از مطالعه تعیین ارتباط بین شاخص‌های شکست و نیز تعیین تغییرپذیری اندازه‌گیری‌های معمول مرتبط با هر پارامتر بود. نتایج نشان دادند که انرژی شکست قادر به رتبه‌بندی مناسب مخلوط‌ها و به‌شدت وابسته به دیگر پارامترها بود. به‌منظور مطالعه بهتر رفتار نرم شوندگی پس از اوج مصالح آسفالتی، پارامترهای مقاومت و انعطاف‌پذیری استفاده شدند، اما مشخص شد که آن‌ها تغییرپذیری زیادی دارند. شاخص جدیدی به نام تلورانس کرنش شکست معرفی شد که سطح یکسانی از تمایز بین مخلوط‌ها را همانند شاخص‌های مقاومت و انعطاف‌پذیری ارائه می‌کند درحالی‌که تغییرپذیری کمتری داشت.

۲. روش تحقیق

به‌منظور بررسی ترک‌خوردگی حرارتی دمای کم مخلوط آسفالتی مصالح متنوعی بررسی شدند. به‌این‌ترتیب سنگدانه‌های سیلیسی رودخانه‌ای و نیز سنگدانه‌های به‌دست‌آمده از بازیافت روسازی آسفالتی که در دو اندازه سنگ‌دانه با اندازه سنگ‌دانه بیشینه اسمی ۹/۵ و ۱۹ میلی‌متر بودند، استفاده شدند. همچنین سه نوع قیر شامل قیر خالص به‌عنوان نمونه شاهد، قیر اصلاح‌شده با افزودنی ساسوبیت برای تهیه مخلوط‌های ولرم و قیر بازیافت شده از مصالح خرده آسفالت مطالعه شدند. سنگدانه‌های جدید بر اساس بچ‌های کارخانه آسفالت در ۵ گروه شن درشت (۱۹ تا ۲۵ میلی‌متر)، شن متوسط (۱۲ تا ۱۹ میلی‌متر)، شن ریز (۶ تا ۱۲ میلی‌متر)، ماسه (صفر تا ۶ میلی‌متر) و فیلر (عبوری از الک شماره ۲۰۰) در طرح اختلاط استفاده شدند. سنگدانه‌های بازیافتی نیز به سه گروه درشت‌دانه (مانده روی الک شماره ۴)، ریزدانه (عبوری از الک شماره ۴ و مانده روی الک شماره ۲۰۰) و فیلر (عبوری از الک شماره ۲۰۰) طبقه‌بندی شدند. نمونه‌ای از سنگدانه‌های بازیافتی در شکل (۱) دیده می‌شود. مشخصات سنگ‌دانه‌ها همراه با روش آزمایش استاندارد جهت تعیین آن‌ها و نیز حدود رواداری مربوطه در جدول (۱) داده شده‌اند. قیر مورد استفاده درجه عملکردی PG64-16 دارد. مشخصات این قیر مطابق با استاندارد آشتو ام ۳۲۰ [۲۹] در جدول (۲) ارائه شده است. ساسوبیت یک هیدروکربن زنجیره بلند آلیفاتیک است که با فرآیندی به نام فیشر-تروپس تولید می‌شود. طول زنجیره مولکولی آن در بازه ۴۰ تا بیش از ۱۱۵

ولرم باید به‌دقت ارزیابی شود [۱۳]. کنترل‌های منظم و نمونه‌برداری در محل روسازی‌های آسفالتی معمولاً با به دست آوردن مغزه ساختار روسازی و نیز تعیین مشخصات از مغزه‌های استوانه‌ای انجام می‌شود. بنابراین نیاز است تا نمونه آزمایش شکست از نمونه‌های متراکم ژیراتوری ساخته شود. با ترکیب هندسه تیر خمشی و شکل استوانه‌ای مغزه‌های مخلوط آسفالتی، هندسه آزمایش خمش نیم‌دایره توسعه یافت و در آزمایش‌های شکست روسازی آسفالتی استفاده شد [۱۴]. این آزمایش تحت بارگذاری استاتیکی معمولاً برای اندازه‌گیری ضریب تشدید تنش (K)، مقاومت شکست، انرژی شکست یا نرخ انرژی مستهلک‌شده (J) مخلوط آسفالتی به کار می‌رود [۱۵]. ضرایب قانون پاریس بر اساس تحلیل داده‌های خمش نیم‌دایره تحت بارگذاری دینامیک به دست می‌آیند که خود تخمینی از رشد ترک به‌عنوان تابعی از تعداد چرخه بارگذاری است. مطالعات بر اساس مکانیک شکست جهت بررسی رفتار ترک‌خوردگی مصالح آسفالتی شامل جنبه‌های متنوعی می‌باشد. برخی از محققین روی اثرات افزودنی‌ها و مصالح بازیافتی بر عملکرد شکست مخلوط‌های آسفالتی متمرکز شدند [۱۶-۱۸]. برخی از مطالعات روی روش‌های انجام آزمایش و مقایسه روش‌های متفاوت انجام شده است [۱۹-۲۳]. همچنین محققین پارامترهای مبتنی بر مکانیک شکست متفاوتی را بر اساس نتایج آزمایش‌های پیشنهاد دادند [۲۴-۲۶]. ارزیابی عددی و مدل‌سازی عملکرد ترک نیز موضوع برخی از مطالعات بوده است [۲۷-۲۸].

در یک تحقیق مشخصات شکست نمونه‌های خمش نیم‌دایره را با استفاده از روش‌های متفاوت تحلیل کردند. نمونه‌ها به‌وسیله سیستم خمش نیم‌دایره آزمایش شدند. نتایج نشان دادند که نمونه‌های تولیدشده با قیر سخت‌تر، مقاومت شکست بالاتری نشان دادند، درحالی‌که برای رسیدن به گسیختگی انرژی کمتری در مقایسه با نمونه‌های تولیدشده با قیر نرم‌تر صرف کردند. علاوه بر این، این مطالعه سه مشخصه شامل نرخ شروع شکست (V_{FI})، نرخ رشد ترک (V_{CG}) و شاخص انعطاف‌پذیری (FI) را برای درک بهتری از رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی از نظر مقاومت در برابر ترک و انتشار ترک ارائه داد. نتایج V_{CG} و V_{FI} به‌شدت وابسته به شکنندگی مخلوط‌ها بودند درحالی‌که FI توانایی قابل قبولی در تشخیص امکان ترک‌خوردگی مخلوط‌ها فارغ از خصوصیات ذاتی آن‌ها نشان داد (24). کاسیر و همکاران پارامتر ترکی به نام شاخص مقاومت ترک (CRI) را بر اساس نتایج آزمایش خمش نیم‌دایره ارائه داده و آن را با شاخص انعطاف‌پذیری (FI) مقایسه کردند. نتایج نشان دادند که هر دو مشخصه حساس به درجه عملکردی قیر، میزان مصالح بازیافتی و عامل جوان‌کننده بودند. نتایج همچنین وابستگی هر دو مشخصه به ضخامت نمونه و میزان درصد فضای خالی را نشان داد. ارتباط منطقی بین هر دو مشخص تأیید

جدول (۱). مشخصات مصالح سنگی

مشخصه	روش	معیار	شن	ماسه	بازیافتی درشت‌دانه	بازیافتی ریزدانه
وزن مخصوص ظاهری	AS TM C12 7,C 128	-	۲/۶۷	۲/۶۸	۲/۶۲۰	۲/۶۸۲
وزن مخصوص حقیقی	AS TM C12 7,C 128	-	۲/۵۴	۲/۴۸	۲/۵۰۹	۲/۴۸۹
درصد جذب آب (%)	AS TM C12 7,C 128	-	۱/۹۳	۳/۰	۱/۶۸۴	۲/۸۸۷
سنگدانه‌های پهن و دراز نسبت ۱ به ۵ (%)	AS TM D47 91	<۱۰	۱/۰۷	-	۰/۵	-
شکستگی مصالح سنگی روی الک شماره ۴ در یک جبهه (%)	AS TM D58 21	>۹۵	۹۸	-	۹۹	-
شکستگی مصالح سنگی روی الک شماره ۴ در دو جبهه (%)	AS TM D58 21	>۹۰	۹۴	-	۹۵	-
گوشه‌داری مصالح سنگی ریزدانه (%)	AS TM C12 52	>۴۵	-	۴۵/۵	-	۴۵

اتم کربن است. برخلاف آن زنجیره‌های مولکولی پارافین‌ها در قیر به‌طور معمول بین ۲۲ تا ۴۵ اتم کربن دارد. این علت خواص فیزیکی متفاوت ساسوبیت در مقایسه با پارافین‌های موجود در قیر است. نقطه ذوب ساسوبیت در بازه ۷۰ تا ۱۱۵ درجه سانتی‌گراد است. مثالی از افزودنی ساسوبیت استفاده‌شده در این مطالعه در شکل (۲) نشان داده‌شده است [۳۰]. ساسوبیت به‌طور کامل در قیر در دماهای بالای ۱۱۵ درجه سانتی‌گراد قابل حل است. پس از اختلاط با قیر، این مصالح محلول همگنی را تشکیل می‌دهد و باعث کاهش فراوان در ویسکوزیته قیر می‌شود. این موضوع دمای اختلاط و حمل آسفالت را از ۱۰ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌دهد. همچنین منجر به کاهش فراوان در انتشار بخارهای قیر و دی‌اکسید کربن طی فرآیندهای ساخت و توزیع آسفالت و نیز صرفه‌جویی در انرژی می‌شود. طی فرآیند سرد شدن، ساسوبیت مجدداً کریستال شده و تشکیل یک ساختار شبکه‌ای در قیر می‌دهد که منجر به افزایش پایداری یا استقامت آسفالت می‌شود [۳۱]. در این مطالعه ساسوبیت با قیر به میزان ۱/۵ درصد وزنی قیر و در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد به کمک یک مخلوط‌کن برشی سرعت‌بالا مخلوط شده است تا قیر اصلاح‌شده همگنی به دست آید. قیر به‌دست‌آمده توانایی ذخیره شدن به‌صورت گرم بدون تمایل به جدا شدن فاز را دارد. قیر اصلاح‌شده با ساسوبیت درجه عملکردی PG 64-10 داشت و مشخصات آن در جدول (۳) داده‌شده است. قیر ذرات خرده آسفالت بازیافتی با اجرای فرآیند استخراج و جداسازی فیلر از محلول استخراج‌شده طبق استاندارد ASTM D2172 [31] بازیابی شده و تقطیر محلول به‌دست‌آمده مطابق روش استاندارد ASTM D1856 [۳۲] صورت گرفته است.



شکل (۱). خرده آسفالت بازیافتی تقسیم شده به دو بخش ریزدانه و درشت دانه



شکل (۲). نمونه افزودنی ساسوبیت مورد استفاده در ساخت WMA

۲-۱. روش طرح اختلاط آسفالت

در این مطالعه چهار مخلوط سوپریپو با روش AASHTO R35 [۳۳] و مطابق با مشخصات AASHTO M323 [34] آماده شده است. حجم ترافیک سالیانه ۳ تا ۱۰ میلیون محور معادل بود و سنگ دانه‌ها اندازه بیشینه اسمی ۱۹ و ۹/۵ میلی‌متر داشتند. مخلوط‌ها به صورت حاوی خرده آسفالت بازیافتی و بدون آن تولید شدند. منحنی دانه‌بندی مخلوط‌ها همراه با حدود رواداری بالا و پایین سوپریپو در شکل‌های (۴) و (۵) دیده می‌شود [۳۴].

جدول (۲). مشخصات قیر پایه

وضعیت قیر	مشخصه	استاندارد آزمایش	معیار استاندارد	نتیجه آزمایش
قیر پیر نشده	ویسکوزیته در $^{\circ}\text{C}$ ۱۳۵ (Pa.s)	AASHTO T316	< 3	۰/۴۱۲
	$G^*/\sin\delta$ با برش دینامیکی در دمای $^{\circ}\text{C}$ ۶۴ و در 10 rad/s (kPa)	AASHTO T315	> 1	۲/۴۰
قیر پیر شده در RTFO	تغییر جرم پس از RTFO (%)	AASHTO T240	< 1	۰/۰۶
	$G^*/\sin\delta$ با برش دینامیکی در دمای $^{\circ}\text{C}$ ۶۴ و در 10 rad/s (kPa)	AASHTO T315	$> 2/2$	۲/۶۵
قیر پیر شده در PAV	$G^* \cdot \sin\delta$ با برش دینامیکی در دمای $^{\circ}\text{C}$ ۲۱ و در 10 rad/s (kPa)	AASHTO T315	< 5000	۳۳۸۵
	سختی خزشی در دمای $^{\circ}\text{C}$ -۶ و در زمان ۶۰ ثانیه (MPa)	AASHTO T313	< 300	۱۱۱
	مقدار m در دمای $^{\circ}\text{C}$ -۶ و در زمان ۶۰ ثانیه	AASHTO T313	> 0.3	۰/۳

بر اساس رتبه‌بندی عملکردی، این قیر درجه PG94-4 داشت که مشخصات آن در جدول (۴) داده شده و نمونه‌ای از قیر بازیافتی در شکل (۳) ملاحظه می‌شود.

جدول (۳). مشخصات قیر اصلاح‌شده با ساسوبیت

وضعیت قیر	مشخصه	استاندارد آزمایش	معیار استاندارد	نتیجه آزمایش
قیر پیر نشده	ویسکوزیته در °C ۱۳۵ (Pa.s)	AASHTO T316	<۳	۰/۳۱۴
	G*/sinδ با برش دینامیکی در دمای ۶۴°C و در ۱۰ rad/s (kPa)	AASHTO T315	>۱	۳/۴۷
قیر پیر شده در RTFO	تغییر جرم پس از RTFO (%)	AASHTO T240	<۱	۰/۰۸
	G*/sinδ با برش دینامیکی در دمای ۶۴°C و در ۱۰ rad/s (kPa)	AASHTO T315	>۲/۲	۳/۹۹
قیر پیر شده در PAV	برش دینامیکی در دمای ۲۱°C و در ۱۰ rad/s (kPa)	AASHTO T315	<۵۰۰۰	۳۶۶۳
	سختی خزشی در دمای ۶°C و در ۶۰ ثانیه (MPa)	AASHTO T313	<۳۰۰	۱۵۶
	مقدار m در دمای ۶°C و در زمان ۶۰ ثانیه	AASHTO T313	>۰/۳	۰/۲۵۴

جدول (۴). مشخصات قیر بازیافتی

وضعیت قیر	مشخصه	استاندارد آزمایش	معیار استاندارد	نتیجه آزمایش
قیر پیر نشده	ویسکوزیته در °C ۱۳۵ (Pa.s)	AASHTO T316	<۳	۱/۶۰۳
	G*/sinδ با برش دینامیکی در دمای ۶۴°C و در ۱۰ rad/s (kPa)	AASHTO T315	>۱	۲۷/۰۲
قیر پیر شده در RTFO	تغییر جرم پس از RTFO (%)	AASHTO T240	<۱	۰/۱۱
	G*/sinδ با برش دینامیکی در دمای ۶۴°C و در ۱۰ rad/s (kPa)	AASHTO T315	>۲/۲	۲۹/۱۹
قیر پیر شده در PAV	برش دینامیکی در دمای ۲۱°C و در ۱۰ rad/s (kPa)	AASHTO T315	<۵۰۰۰	۶۹۰۵
	سختی خزشی در دمای ۶°C و در ۶۰ ثانیه (MPa)	AASHTO T313	<۳۰۰	۱۱۹
	مقدار m در دمای ۶°C و در زمان ۶۰ ثانیه	AASHTO T313	>۰/۳	۰/۲۶۱

مخلوط‌های WMA با طرح اختلاط مشابه مخلوط‌های HMA تولید شدند و تنها دمای اختلاط و تراکمشان حدود ۲۰ درجه سانتی‌گراد پایین‌تر از مخلوط‌های HMA بود. نمونه‌های حاوی خرده آسفالت بازیافتی شامل افزودنی ساسوبیت نیز بودند.

جدول (۵). مشخصات مخلوط‌های آسفالتی مورد مطالعه

شماره نمونه‌ها	میزان خرده آسفالت (%)	وزن مخصوص واقعی مخلوط آسفالتی	درصد فضای خالی (%)	VMA (%)	درصد قیر بهینه	نوع مخلوط
1H19	-	۲/۳۰۱	۳/۰۸	۱۳/۳۱	۴/۹۵	HMA19
1H9	-	۲/۲۵۴	۳/۶۷	۱۵/۵۸	۵/۵	HMA9.5
1H19sa	-	۲/۳۰۱	۳/۰۸	۱۳/۳۱	۴/۹۵	WMA19
1H9sa	-	۲/۲۵۴	۳/۶۷	۱۵/۵۸	۵/۵	WMA9.5
1R19	۳۰	۲/۲۸۱	۴/۰۴	۱۴/۳۰	۵/۱	HRAP19
1R9	۶۰	۲/۲۴۴	۴/۲۵	۱۵/۸۷	۵/۹	HRAP9.5
1R19sa	۳۰	۲/۲۸۱	۴/۰۴	۱۴/۳۰	۵/۱	WRAP19
1R9sa	۶۰	۲/۲۴۴	۴/۲۵	۱۵/۸۷	۵/۹	WRAP9.5

تراکم مخلوط‌ها به روش ژیراتوری با تعداد چرخش ۱۰۰ دور در دقیقه و زاویه چرخش ۱۶/۱ درجه صورت گرفت. مخلوط‌ها برای میزان فضای خالی 4 ± 0.5 درصد طرح شدند. پارامترهای حجمی مخلوط‌ها در جدول (۵) نشان داده شده‌اند.



شکل (۳). نمونه قیر بازیافتی پس از استخراج از مخلوط و جداسازی فیلر

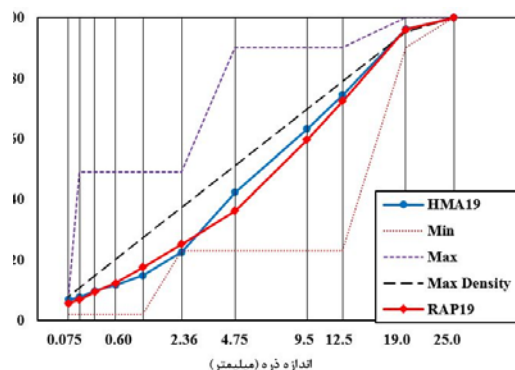
۲-۲- آزمایش خمش نیم‌دایره

در این مطالعه به منظور بررسی مقاومت شکست و ترک خوردگی حرارتی مخلوط‌های آسفالتی در دماهای پایین از روش آزمایش خمش نیم‌دایره بر اساس اصول مکانیک شکست استفاده شده است. آماده‌سازی نمونه، سیستم بارگذاری، داده‌های ثبت شده و محاسبات در تطابق با روش استاندارد AASHTO TP105-13 [۳۵] با عنوان تعیین انرژی شکست مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از هندسه خمش نیم‌دایره بودند.

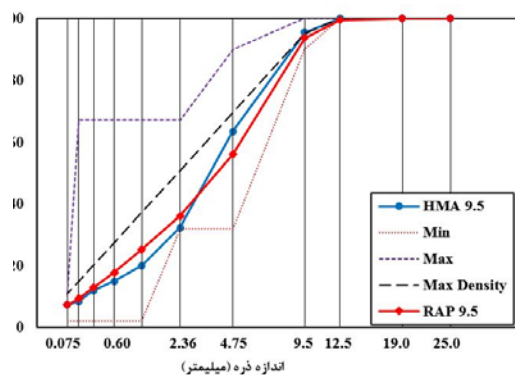
حداقل سه نمونه آزمایشگاهی مشابه برای هر مخلوط باید تولید شود. نمونه‌های متراکم ژیراتوری مطابق با روش استاندارد AASHTO T312 [۳۶] تولید شدند (شکل ۴).

از مرکز هر نمونه با قطر ۱۱۵/۵ میلی‌متر، یک مقطع استوانه‌ای به ضخامت ۲۴/۷ میلی‌متر به دست آمد. سپس نمونه استوانه‌ای به دو نیمه مساوی تقسیم شد و شیاری در جهت محور تقارن هر نیمه به عمق 1.5 ± 0.5 و عرض کمتر از ۱/۵ میلی‌متر ایجاد شد (شکل ۷). نمونه‌ها باید در محفظه کنترل دما در دمای مورد نظر برای 2 ± 0.5 ساعت واقع شوند. در این مطالعه، دمای آزمایش برابر صفر درجه سانتی‌گراد جهت بررسی ترک خوردگی دمای پایین مخلوط‌ها استفاده شد. نمونه مخلوط آسفالتی نیم‌دایره روی دو تکیه‌گاه غلتکی قرار می‌گیرد. بار در راستای قطر عمودی نمونه اعمال شده و مقادیر بار و تغییر مکان زیرخط بارگذاری (LLD) همراه با تغییر مکان بازشدگی دهانه ترک (CMOD) طی آزمایش اندازه‌گیری شدند.

بار به شکلی اعمال شد که نرخ LLD و CMOD جهت اطمینان از شرایط رشد ترک پایدار ثابت باشد. در این مطالعه آزمایش در



شکل (۴). منحنی دانه‌بندی مخلوط‌های با اندازه سنگ‌دانه بیشینه ۱۹ میلی‌متر



شکل (۵). منحنی دانه‌بندی مخلوط‌های با اندازه سنگ‌دانه بیشینه ۹/۵ میلی‌متر



شکل (۸). نمونه نیم‌دایره مخلوط آسفالت بازیافتی تحت بارگذاری خمشی با نرخ LLD ثابت

انرژی شکست طبق توصیه RILEM TC50-FMC به دست آمد و با تقسیم انرژی شکست (سطح زیر منحنی بار- LLD) بر مساحت پیوند (حاصل ضرب طول پیوند و ضخامت نمونه) نمونه SCB قبل از آزمایش محاسبه شد [۳۵].

$$G_f = \frac{W_f}{A_{lig}}, \quad W_f = \int Pdu, \quad A_{lig} = (r-a) \times t \quad (۱)$$

که در آن، G_f انرژی شکست برحسب ژول بر مترمربع (J/m^2)، W_f کار شکست برحسب ژول (J)، P بار اعمالی برحسب نیوتن (N)، u تغییر مکان زیرخط بارگذاری برحسب متر (m)، A_{lig} مساحت ناحیه پیوند برحسب مترمربع (m^2)، r شعاع نمونه برحسب متر (m)، a طول شیار برحسب متر (m) و t ضخامت نمونه برحسب متر (m) است [۳۵].

مقاومت شکست (K_{Ic}) به صورت ضریب تشدید تنش (K_{I1}) در میزان بار بحرانی (P_c) محاسبه شد. بار بحرانی، بار بیشینه ثبت شده طی آزمایش فرض می‌شود. معادله زیر برای محاسبه (K_{I1}) به کار می‌رود.

$$\frac{K}{\sigma_0 \sqrt{\pi a}} = Y_{I(0.8)}, \quad \sigma_0 = \frac{P}{2rt} \quad (۲)$$

که در آن، P بار اعمالی برحسب مگانیوتن (MN) و $Y_{I(0.8)}$ ضریب تشدید تنش نرمال شده (بی‌بعد) است. برای ابعاد نمونه

حالت کنترل LLD و با نرخ 0.6 میلی‌متر بر دقیقه انجام شد و آزمایش زمانی که بار به زیر 0.5 کیلو نیوتن رسید یا زمانی که گیب اندازه‌گیری CMOD به انتهای بازه عملکرد خود رسید، اتمام یافت.



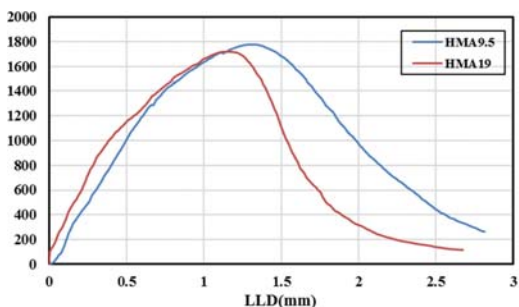
شکل (۶). تهیه نمونه مخلوط آسفالتی متراکم شده به روش ژیراتوری به قطر 150 میلی‌متر



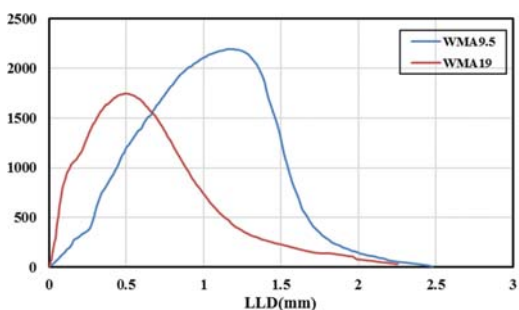
شکل (۷). نمونه نیم‌دایره از مخلوط HRAP9.5

پارامترهای انرژی شکست و مقاومت شکست از نتایج بار و LLD محاسبه شدند. این پارامترها جهت تعیین مخلوط‌های با مقاومت شکست بالاتر به کار رفتند. شکل (۸) نمایی از آزمایش خمشی نمونه‌های نیم‌دایره در مطالعه حاضر را نشان می‌دهد.

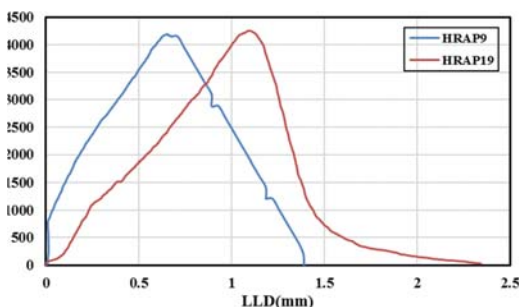
منحنی‌های بار-LLD برای مخلوط‌های مختلف در شکل‌های (۱۰) تا (۱۳) نشان داده شده است. طبق این شکل‌ها، مشخص است که مخلوط‌های HMA9.5، WMA9.5 و WRAP9.5 انرژی بیشتری جهت ایجاد تغییر شکل در حجم خود در مقایسه با مخلوط‌های ۱۹ میلی‌متری متناظر مصرف می‌کنند که بیانگر رفتار شکل‌پذیرتر آن‌ها است. طبق شکل (۱۲) مشخص است که مخلوط HRAP9.5 انرژی کمتری در حجم خود مستهلک می‌کند که بیانگر رفتار شکننده‌تر آن است.



شکل (۱۰). مقایسه منحنی بار-LLD مخلوط‌های HMA با دانه بندی‌های ۹/۵ و ۱۹ میلی‌متری



شکل (۱۱). مقایسه منحنی بار-LLD مخلوط‌های WMA با دانه بندی‌های ۹/۵ و ۱۹ میلی‌متری



شکل (۱۲). مقایسه منحنی بار-LLD مخلوط‌های HRAP با دانه بندی‌های ۹/۵ و ۱۹ میلی‌متری

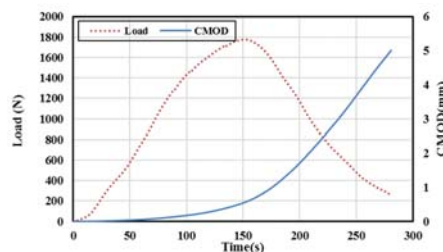
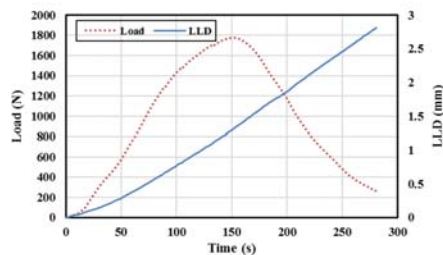
SCB به کاررفته در این روش استاندارد، مقدار $Y_{I(0.8)}$ به صورت زیر محاسبه می‌شود [۳۶].

$$Y_{I(0.8)} = 4.782 + 1.219 \left(\frac{a}{r} \right) + 0.063 \exp \left(7.045 \left(\frac{a}{r} \right) \right) \quad (3)$$

برای دمای آزمایش پایین استفاده شده در این مطالعه (صفر درجه سانتی‌گراد) فرض شرایط الاستیک خطی منطقی است، زیرا تغییرات مدول برای بازه زمان آزمایش کمتر از ۵ درصد است و ناحیه فرآیند شکست کوچک است. واحد اندازه‌گیری K_{IC} برحسب $MPa \times m^{0.5}$ است. بخش بعدی نتایج آزمایش برای مخلوط‌های مختلف مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد.

۳. نتایج و بحث

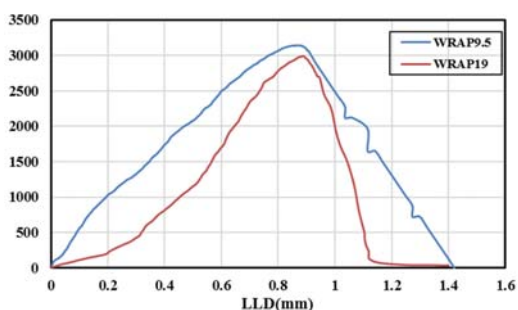
خروجی آزمایش، تغییرات در میزان بار اعمالی، LLD و CMOD نسبت به زمان است. نمودارهای بار-LLD و بار-CMOD قابل استخراج هستند. نمونه‌ای از نتایج آزمایش در شکل (۹) دیده می‌شود. علاوه بر این منحنی‌های بار-LLD مقایسه‌ای مخلوط‌های مورد مطالعه که سطح زیر آن‌ها معادل با انرژی یا کار مورد نیاز برای ایجاد ترک خوردگی دمای پایین است، نمایش داده شده‌اند. پارامترهای مقایسه شامل دانه‌بندی، فناوری WMA و کاربرد خرده آسفالت بازیافتی است.



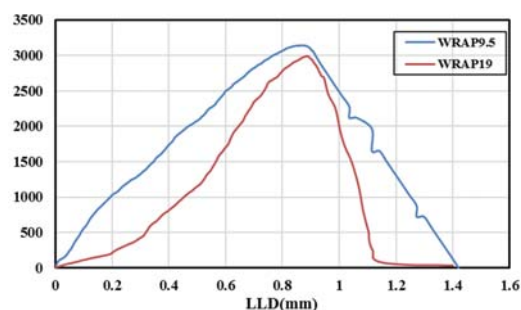
شکل (۹). تغییرات بار و LLD (بالا) و بار و CMOD (پایین) در زمان آزمایش برای نمونه 1H9_2

۳-۱. اثرات دانه‌بندی

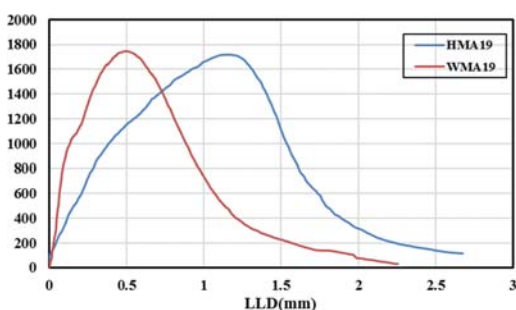
در این بخش اثر اندازه سنگ‌دانه بیشینه روی شکل منحنی‌های بار- تغییر مکان و انرژی مصرف‌شده بررسی می‌شود. مقایسه



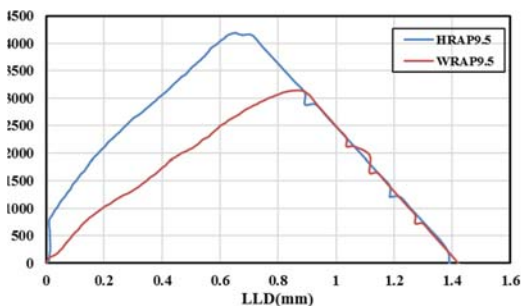
شکل (۱۴). مقایسه منحنی بار-LLD مخلوط‌های WMA9.5 و HMA9.5



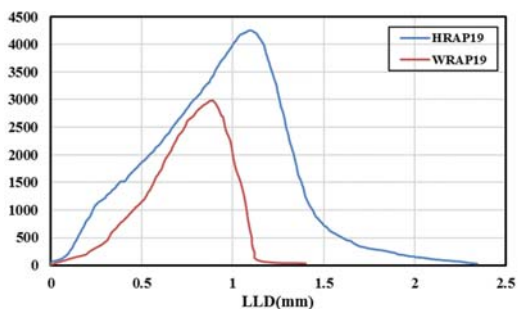
شکل (۱۳). مقایسه منحنی بار-LLD مخلوط‌های WRAP با دانه‌بندی‌های ۹/۵ و ۱۹ میلی‌متری



شکل (۱۵). مقایسه منحنی بار-LLD مخلوط‌های WMA19 و HMA19



شکل (۱۶). مقایسه منحنی بار-LLD مخلوط‌های WRAP9.5 و HRAP9.5



شکل (۱۷). مقایسه منحنی بار-LLD مخلوط‌های WRAP19 و HRAP19

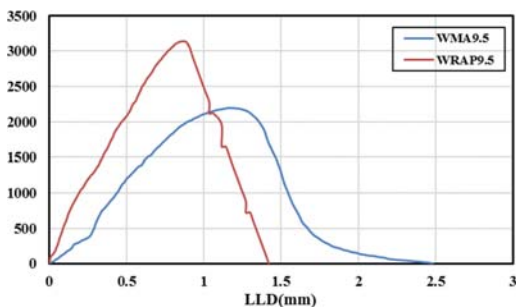
با در نظر گرفتن شیب منحنی بار-LLD در بخش پیش از اوج به‌عنوان سختی، این مشخصه مخلوط‌های HMA9.5 و HMA19 تقریباً یکسان است. سختی مخلوط WMA9.5 کمتر از مخلوط WMA19 است که ناشی از ضعف ساختار اسکلت سنگدانه‌ای و کمبود قفل و بست داخلی سنگ‌دانه‌ها در یک مخلوط ریزدانه است. سختی مخلوط‌های HRAP9.5 و WRAP9.5 بالاتر از مخلوط‌های ۱۹ میلی‌متری متناظر است که ناشی از وجود درصد بالاتر RAP (۶۰ درصد) و متعاقباً وجود قیر سخت بیشتر در مخلوط ریزدانه است. این یافته در تطابق با مطالعه صورت گرفته توسط یان و همکاران [۳۷] است.

با نگاه به شکل‌های (۱۰) تا (۱۳) مشاهده می‌شود که تمامی مخلوط‌های ۹/۵ میلی‌متری باید انرژی بیشتری جهت ایجاد ترک با طول مشخص مستهلک کنند و در نتیجه عملکرد ترک‌خوردگی بهتری دارند.

۳-۲. اثر افزودنی ساسوبیت

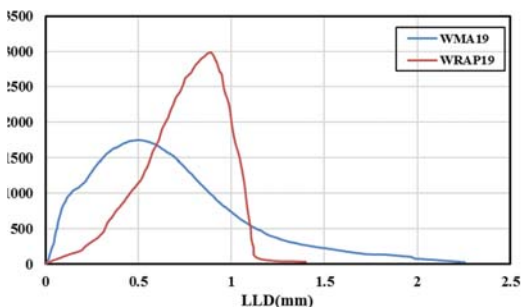
در این بخش اثر کاربرد فناوری WMA که شامل افزودن ساسوبیت و کاهش دمای اختلاط آسفالت می‌شود روی شکل منحنی‌های بار-LLD و انرژی مصرف‌شده در آن‌ها بررسی می‌شود. مقایسه منحنی‌های بار-LLD برای مخلوط‌های مختلف در شکل-های (۱۴) تا (۱۷) دیده می‌شود.

طبق این شکل‌ها مشخص می‌شود که مخلوط‌های HMA9.5، HMA19، HRAP9.5 و HRAP19 در مقایسه با مخلوط‌های متناظر WMA انرژی بیشتری برای ایجاد تغییر شکل در حجمشان مصرف می‌کنند که بیانگر رفتار شکل‌پذیرتر و الاستیک‌تر آن‌ها است. سختی مخلوط‌های HMA9.5 و HMA19 کمتر از مخلوط‌های متناظر WMA است. افزایش در سختی مخلوط‌های WMA9.5 و WMA19 می‌تواند ناشی از افزودن ساسوبیت باشد که مدول مصالح را بهبود می‌دهد. همچنین سختی مخلوط‌های HRAP9.5 و HRAP19 بالاتر از مخلوط‌های WRAP است.



شکل (۲۰). مقایسه منحنی بار-LLD مخلوط‌های WMA9.5 و WRAP9.5

طبق این شکل‌ها مشخص است که مخلوط‌های HRAP9.5 و HRAP19 در مقایسه با مخلوط‌های HMA انرژی کرنشی بیشتری در حجمشان مستهلک می‌کنند که بیانگر مقاومت و پایداری بیشتر آن‌ها تحت بارهای سنگین‌تر است. همچنین سختی مخلوط‌های HRAP9.5 و HRAP19 به‌وضوح بالاتر از مخلوط‌های HMA متناظر است. افزایش در سختی مخلوط‌های HRAP ناشی از اثر قیر سخت به‌دست‌آمده از ذرات خرد شده آسفالت بازیافتی در مصالح است. مخلوط HRAP9.5 درصد RAP بالاتری از مخلوط HRAP19 داشت و در نتیجه سختی آن بالاتر بود که مطابق با مطالعه انجام‌شده است.



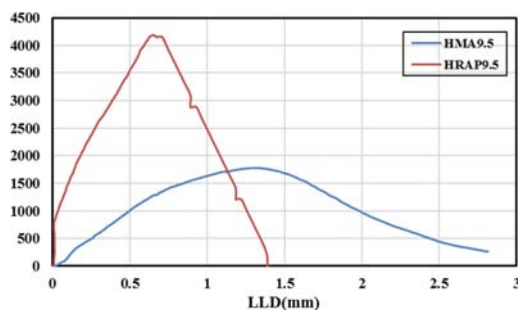
شکل (۲۱). مقایسه منحنی بار-LLD مخلوط‌های WMA19 و WRAP19

طبق شکل‌های (۲۰) و (۲۱) مشخص است که مخلوط‌های WMA و WRAP تقریباً انرژی یکسانی برای ایجاد تغییر شکل در حجم خود مستهلک می‌کنند که بیانگر مقاومت و پایداری یکسان آن‌ها تحت بارگذاری است. سختی مخلوط WRAP9.5 بالاتر از مخلوط WMA9.5 است. افزایش در سختی مخلوط WRAP9.5 ناشی از وجود اثر قیر سخت حاصل از ذرات RAP در مصالح است. سختی مخلوط‌های WRAP19 و WMA19 نیز تقریباً مشابه است. دلیل این سختی یکسان، کاهش اثر قیر سخت حاصل از ذرات RAP در مصالح ناشی از وجود افزودنی ساسوبیت و نیز نقش مهم اسکلت سنگدانه‌ای در این مخلوط‌های درشت‌دانه است.

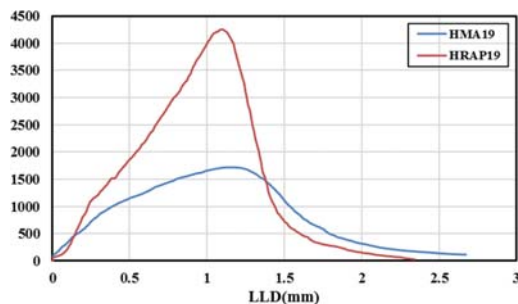
یافته‌های مشابهی در مطالعه انجام‌شده توسط سینک، چیتراگر و آشیش به چشم می‌خورد. کاهش در سختی مخلوط‌های WRAP9.5 و WRAP19 ناشی از افزودن ساسوبیت است که اثر قیر سخت ورودی از ذرات خرد شده آسفالت بازیافتی روی مصالح را کاهش می‌دهد. با بررسی شکل‌های (۱۴) تا (۱۷) مشاهده می‌شود که مخلوط‌های HMA9.5، HMA19، HRAP9.5 و HRAP19 باید انرژی بیشتری جهت ایجاد ترک‌های با طول معین مستهلک کنند و بنابراین عملکرد ترک‌خوردگی نسبتاً بهتری دارند.

۳-۳- اثر خرد شده آسفالت بازیافتی (RAP)

در این بخش، اثر کاربرد خرد شده آسفالت بازیافتی روی شکل منحنی‌های بار-LLD و انرژی مستهلک‌شده در آن‌ها بررسی می‌شود. مقایسه منحنی‌های بار-LLD برای مخلوط‌های مختلف در شکل‌های (۱۸) تا (۲۱) نشان داده شده است.

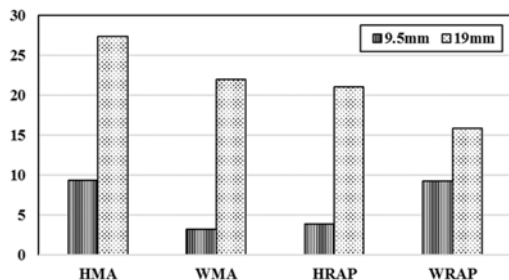


شکل (۱۸). مقایسه منحنی بار-LLD مخلوط‌های HMA9.5 و HRAP9.5



شکل (۱۹). مقایسه منحنی بار-LLD مخلوط‌های HMA19 و HRAP19

توزیعشان شود. مخلوط‌های ریزدانه توزیع سنگ‌دانه یکنواختی دارند که منجر به تغییرپذیری کمتر در مقادیر G_f می‌شود. علاوه بر این، مقادیر ضریب تغییرات مخلوط‌های ریزدانه کمتر از ۱۰ درصد بود که بازه قابل قبولی برای آزمایش‌های مخلوط آسفالتی است.



شکل (۲۲). ضریب تغییرات مقادیر انرژی شکست انواع مخلوط‌های آسفالتی

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از مقادیر G_f نمونه‌های مخلوط آسفالتی مورد مطالعه، رتبه‌بندی عملکردی آن‌ها از نقطه‌نظر ترک‌خوردگی حرارتی در دمای کم در جدول (۷) نشان داده شده است. طبق این جدول، مخلوط ریزدانه HMA9.5 بهترین عملکرد ترک‌خوردگی را دارد و پس از آن HRAP9.5 قرار دارد. سپس مخلوط‌های WRAP9.5 و WMA9.5 بهترین عملکرد را در بین مخلوط‌های ریزدانه داشتند. بهترین عملکرد در بین مخلوط‌های درشت‌دانه مربوط به HRAP19 است که به ترتیب با HMA19 و WRAP19 و WMA19 دنبال می‌شود. مخلوط HRAP19 درصد پایین‌تری نسبت به HRAP9.5 دارد و در نتیجه میزان قیر سخت کمتری در ساختار خود دارد.

جدول (۷). رتبه‌بندی عملکرد ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی با شاخص انرژی شکست

رتبه عملکردی	نوع مخلوط	مقدار انرژی شکست (J)
۱	HMA9.5	۱۹۸۶/۱۵۳
۲	HRAP9.5	۲۶۹۱/۸۴۷
۳	HRAP19	۲۲۰۵/۹۵۰
۴	WRAP9.5	۲۱۵۱/۳۴۳
۵	HMA19	۱۹۶۱/۴۹۳
۶	WMA9.5	۱۸۷۸/۰۲۵
۷	WRAP19	۱۲۸۱/۵۶۰
۸	WMA19	۱۰۴۷/۷۱۰

بنابراین مقدار انرژی شکست HRAP19 بالاتر از HMA19 است و مقدار انرژی شکست HRAP9.5 کمتر از HMA9.5 است. این نتیجه در تطابق با [۳۷] است.

بر اساس شکل‌های (۱۸) تا (۲۱) مشاهده می‌شود که مخلوط‌های HRAP9.5، HRAP19، WRAP9.5 و WRAP19 نیاز دارند تا انرژی کرنشی بیشتری برای ایجاد ترک‌های به طول مشخص صرف کنند و بنابراین عملکرد ترک‌خوردگی آن‌ها تقریباً بهتر است، اما نوع شکست آن‌ها نسبت به مخلوط‌های HMA و WMA متناظر شکننده‌تر است.

۴-۳- ارزیابی انرژی شکست و مقاومت شکست

در این بخش دو پارامتر مبتنی بر نظریه مکانیک شکست الاستیک خطی که عبارت‌اند از انرژی شکست (G_f) و مقاومت شکست (K_{Ic}) جهت بررسی عملکرد ترک‌خوردگی حرارتی مخلوط‌های آسفالتی مورد مطالعه در دمای صفر درجه سانتی‌گراد به کار رفتند. جدول (۶) مقادیر میانگین G_f را برای تمامی نمونه‌ها همراه با خطای استاندارد آن‌ها برای هر نوع مخلوط ارائه می‌کند.

جدول (۶). مقادیر انرژی شکست مخلوط‌های آسفالتی

نوع مخلوط	شماره نمونه	انرژی شکست (G_f) (J/m^2)	میانگین انرژی شکست (J/m^2)	خطای استاندارد انرژی شکست (J/m^2)
HMA9.5	1H9_1	۳۳۷۳/۶	۲۹۸۶/۱۵۳	۲۸۰/۳۲
	1H9_2	۲۸۶۴/۳۹		
	1H9_3	۲۷۲۰/۳۱		
HMA19	1H19_1	۲۵۸۷/۵۷	۱۹۶۱/۴۹۳	۵۳۷/۷۸۶۴
	1H19_2	۲۰۲۲/۴۱		
	1H19_3	۱۲۷۴/۵		
WMA9.5	1H9sa_1	-	۱۸۷۸/۰۲۵	۶۰/۶۲۵
	1H9sa_2	۱۹۳۸/۶۵		
	1H9sa_3	۱۸۱۷/۴		
WMA19	1H19sa_1	۱۰۸۲/۴۸	۱۰۴۷/۷۱	۲۳۰/۹۳۱۸
	1H19sa_2	۷۴۹/۱		
	1H19sa_3	۱۳۱۱/۵۵		
HRAP9.5	1R9_1	۲۶۲۶/۶	۲۶۹۱/۸۴۷	۱۰۳/۹۶۷۷
	1R9_2	۲۸۳۸/۵۸		
	1R9_3	۲۶۱۰/۳۶		
HRAP19	1R19_1	۲۰۰۱/۵۵	۲۲۰۵/۹۵۰	۴۶۴/۲۶۴۸
	1R19_2	۱۷۶۷/۸		
	1R19_3	۲۸۴۸/۵		
WRAP9.5	1R9sa_1	۲۴۳۲/۰۳	۲۱۵۱/۳۴۳	۱۹۹/۴۲۵۳
	1R9sa_2	۱۹۹۷/۸		
	1R9sa_3	۲۰۲۳/۲		
WRAP19	1R19sa_1	۱۰۸۳/۶۹	۱۲۸۱/۵۶	۲۰۳/۲۵۳۷
	1R19sa_2	۱۵۶۱/۰۶		
	1R19sa_3	۱۱۹۹/۹۳		

شکل (۲۲) ضریب تغییرات (COV) مقادیر G_f را برای هر دو نوع مخلوط درشت‌دانه و ریزدانه مقایسه می‌کند. نتایج مخلوط‌های ریزدانه قابل‌اعتمادتر از مخلوط‌های درشت‌دانه بود. مخلوط‌های آسفالتی با اندازه بیشینه سنگ‌دانه ۱۹ میلی‌متر شامل سنگدانه‌های بزرگی هستند که می‌تواند باعث ایجاد اثرات موضعی ناشی از

از نظر دانه‌بندی، مقادیر COV برای K_{IC} نیز روندی مشابه مقادیر COV برای G_f دارد. تقریباً تمامی مقادیر ضریب تغییرات زیر ۱۲ درصد بودند و بنابراین تغییرپذیری مطلوبی داشتند. بر اساس مقادیر ضریب تغییرات پارامترهای G_f و K_{IC}، پارامتر مقاومت شکست از نظر بررسی عملکرد شکست مخلوط‌های WMA و حاوی RAP قابل‌اعتمادتر بود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که پارامتر انرژی شکست به‌دست‌آمده از آزمایش SCB به دلیل تغییرپذیری زیاد یک ویژگی ذاتی مخلوط‌های آسفالتی نیست. نتیجه مشابهی در مطالعه انجام‌شده توسط لو و همکاران [38] به‌دست‌آمده است. طبق نتایج به‌دست‌آمده از مقادیر مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی، رتبه‌بندی عملکردی آن‌ها بر اساس پایداری و قابلیت حمل بار قبل از ترک‌خوردگی حرارتی در دمای کم، در جدول (۹) ارائه شده است.

جدول (۹). رتبه‌بندی مخلوط‌های آسفالتی از نظر پایداری در برابر

ترک با شاخص مقاومت شکست

رتبه عملکردی	نوع مخلوط	مقدار مقاومت شکست (MPa.m ^{0.5})
۱	HRAP9.5	۴۳/۶۲۵۳۳
۲	HRAP19	۳۸/۳۳۲۰۷
۳	WRAP9.5	۳۲/۴۲۹۷
۴	WRAP19	۲۹/۵۰۵۰
۵	WMA9.5	۲۱/۰۳۵۲
۶	HMA9.5	۱۸/۴۰۲۷۳
۷	HMA19	۱۸/۱۴۰۵۷
۸	WMA19	۱۶/۵۲۹۶

بر این اساس مخلوط HRAP9.5 بهترین عملکرد ترک‌خوردگی را داشت که با مخلوط HRAP19 دنبال می‌شود. پس‌ازاین دو، مخلوط‌های WRAP9.5 و WRAP19 قرار داشتند. مخلوط‌های HMA و WMA در رتبه‌های پایین‌تر از مخلوط‌های حاوی RAP قرار داشتند. بنابراین از نظر دانه‌بندی مخلوط‌های ریزدانه و از نظر کاربرد RAP مخلوط‌های حاوی آسفالت بازیافتی پایداری بیشتری در برابر ترک‌خوردگی فراهم کردند و قابلیت حمل بار را بهبود دادند.

۳-۵. تغییر مکان بازشدگی دهانه ترک (CMOD)

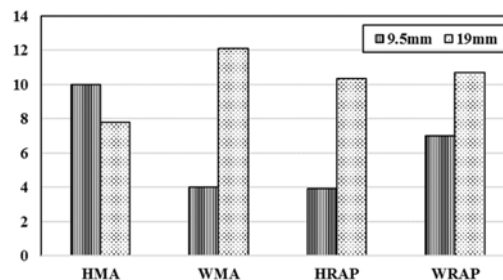
بیشینه

CMOD بیشینه مخلوط‌های آسفالتی مختلف پس از انتشار

مقادیر میانگین و خطای استاندارد K_{IC} همراه با میزان بار بحرانی نمونه‌ها در جدول (۸) گردآوری شده است. شکل (۲۳) مقادیر ضریب تغییرات K_{IC} را برای مخلوط‌های درشت‌دانه و ریزدانه مقایسه می‌کند.

جدول (۸). مقادیر مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی

نوع مخلوط	شماره نمونه	مقاومت شکست (K _{IC}) (MPa.m ^{0.5})	میانگین مقاومت شکست (MPa.m ^{0.5})	خطای استاندارد مقاومت شکست (MPa.m ^{0.5})
HMA9.5	1H9_1	۱۶/۵۸۰۸	۱۸/۴۰۲۷۳	۱/۸۳۹۶۰۳
	1H9_2	۱۷/۷۰۵۴		
	1H9_3	۲۲/۹۲۲		
HMA19	1H19_1	۲۰/۱۳۵۵	۱۸/۱۴۰۵۷	۱/۴۱۰۷۲۲
	1H19_2	۱۷/۱۲۳۵		
	1H19_3	۱۷/۱۶۲۷		
WMA9.5	1H9sa_1	-	۲۱/۰۳۵۲	۰/۸۴۵۹
	1H9sa_2	۲۱/۸۸۱۱		
	1H9sa_3	۲۰/۱۸۹۳		
WMA19	1H19sa_1	۱۳/۷۵۷۶	۱۶/۵۲۹۶	۲/۰۰۳۵۹
	1H19sa_2	۱۸/۴۲۴۱		
	1H19sa_3	۱۷/۴۰۷۱		
HRAP9.5	1R9_1	۴۵/۸۹۹	۴۳/۶۲۵۳۳	۱/۷۰۶۷۶۲
	1R9_2	۴۱/۷۸۶۸		
	1R9_3	۴۳/۱۹۰۲		
HRAP19	1R19_1	۳۹/۳۸۶	۳۸/۳۳۲۰۷	۳/۹۶۱۵۸۴
	1R19_2	۳۲/۹۰۷۲		
	1R19_3	۴۲/۴۰۳		
WRAP9.5	1R9sa_1	۳۵/۵۸۶۸	۳۲/۴۲۹۷	۲/۲۶۲۷۴
	1R9sa_2	۳۱/۳۰۳۴		
	1R9sa_3	۳۰/۳۹۸۹		
WRAP19	1R19sa_1	۲۹/۷۸۷۷	۲۹/۵۰۵	۳/۱۵۶۰۹۵
	1R19sa_2	۳۳/۲۲۱۳		
	1R19sa_3	۲۵/۵۰۶		



شکل (۲۳). ضریب تغییرات مقادیر مقاومت شکست انواع مخلوط‌های آسفالتی

متناظر غیر بازیافتی بودند.

۲- بر اساس مقادیر انرژی شکست مخلوط‌های آسفالتی، رتبه-بندی عملکردی آن‌ها از نظر ترک‌خوردگی حرارتی در دمای کم به صورتی بود که مخلوط‌های HMA9.5 بهترین مقاومت در برابر ترک را داشتند و سپس HRAP9.5 قرار داشت. پس از آن‌ها، WRAP9.5 و WMA9.5 بهترین عملکرد را در بین مخلوط‌های ریزدانه داشتند.

۳- بر اساس مقادیر انرژی شکست، بهترین عملکرد در بین مخلوط‌های درشت‌دانه مربوط به مخلوط HRAP19 بود و پس از آن HMA19، WRAP19 و WMA19 قرار داشتند. بنابراین به‌طور کلی و با استفاده از معیار انرژی شکست، مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی عملکرد بهتری علاوه بر مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی‌شان داشتند. بر اساس مقادیر مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی، رتبه‌بندی عملکردی آن‌ها از نظر پایداری و قابلیت حمل بار پیش از ترک‌خوردگی حرارتی در دمای کم به این صورت بود که مخلوط HRAP9.5 بهترین عملکرد را داشت و پس از آن مخلوط‌های HRAP19، WRAP9.5 و WRAP19 قرار داشتند. مخلوط‌های HMA و WMA پایین‌تر از مخلوط‌های حاوی RAP رتبه‌بندی شدند.

۴- از لحاظ دانه‌بندی، مخلوط‌های ریزدانه و از نظر کاربرد RAP مخلوط‌های حاوی RAP پایداری بیشتری در برابر ترک‌خوردگی فراهم کردند و قابلیت حمل بار را ارتقا دادند. بنابراین استفاده از مخلوط‌های دارای خرده آسفالت بازیافتی برای روسازی‌های آسفالتی در معرض بارهای چرخش وسایل نقلیه سنگین از نظر ترک‌خوردگی کمتر در دماهای پایین بسیار فراوان بود. این مخلوط‌ها مقاومت بیش از دو برابری در مقایسه با مخلوط‌های متناظر بدون RAP نشان دادند.

۵. مراجع

- [1] P. Teymourpour, "Using Mastic Characterization to Predict Asphalt Mixture Low-temperature Cracking Behavior," Ph.D. Thesis, University of Wisconsin, Madison, 2015.
- [2] R.L. Krens, F. Tolman and M.F.C. Van de Ven, "Semi-circular bending test: a practical crack growth test using asphalt concrete cores," RILEM proceedings (pp. 123-132), 1996.
- [3] F. Hong and J.A. Prozzi, "Evaluation of recycled asphalt pavement using economic, environmental, and energy metrics based on long-term pavement performance sections," Road Materials and Pavement Design, vol. 19(8) pp. 1816-1831, 2018.
- [4] D.J. Mensching, "Developing index parameters for cracking in asphalt pavements through black space and viscoelastic continuum damage principles," 2015.
- [5] R. Shrestha, "The Effects of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) on the Laboratory Performances of Hot Mix Asphalts," Ph.D. Thesis, 2009.
- [6] Y. Zhu, Y. Li, C. Si, X. Shi, Y. Qiao, and H. Li, "Laboratory Evaluation on Performance of Fiber-Modified Asphalt Mixtures

ترک و در شروع مرحله ترک‌خوردگی درشت (ماکرو) معیاری از شدت ترک‌خوردگی است. بر اساس نتایج آزمایش، رتبه‌بندی بیشینه CMOD در جدول (۱۰) نشان داده شده است. مخلوط با میزان CMOD کمتر، شدت ترک کمتر و عرض ترک کوچک‌تری داشت.

جدول (۱۰). رتبه‌بندی شدت ترک‌خوردگی مخلوط‌های

آسفالتی بر اساس پارامتر بیشینه CMOD

رتبه‌بندی شدت ترک‌خوردگی	نوع مخلوط	مقدار مقاومت شکست (MPa.m ^{0.5})
۱	HRAP9.5	۰/۱۴۶
۲	WRAP9.5	۰/۱۷۸
۳	HRAP19	۰/۱۹۶
۴	WRAP19	۰/۲۰۹
۵	WMA19	۰/۲۵۰
۶	WMA9.5	۰/۲۸۳
۷	HMA19	۰/۴۳۸
۸	HMA9.5	۰/۵۷۳

آن‌چنان‌که در جدول (۱۰) دیده می‌شود، مخلوط‌های دارای خرده آسفالت بازیافتی (HRAP و WRAP) شدت ترک‌خوردگی کمتری (بین ۲۵ تا ۸۴ درصد مخلوط‌های بدون RAP متناظر) داشتند. مخلوط‌های حاوی خرده آسفالت بازیافتی ریزدانه عرض ترک کوچک‌تری داشتند که به دلیل دانه‌بندی ریز آن‌ها است. ترک‌خوردگی شکننده آن‌ها از بین ریزدانه‌ها رخ داده و عرض ترک را کاهش می‌دهد. مخلوط‌های HMA و WMA در رتبه پایین‌تری از مخلوط‌های حاوی RAP بودند. با این وجود، مخلوط‌های WMA رتبه بهتری نسبت به مخلوط‌های HMA داشتند.

۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه عملکرد ترک‌خوردگی دمای پایین مخلوط‌های آسفالتی حاوی RAP با اندازه بیشینه سنگ‌دانه ۹/۵ و ۱۹ میلی‌متر ارزیابی شدند. پس از رسم منحنی‌های بار-LLD بر اساس نتایج آزمایش خمش نمونه نیم‌دایره در دمای صفر درجه سانتی‌گراد و تعیین پارامترهای انرژی شکست و مقاومت شکست، نتایج زیر حاصل شدند:

۱- با نگاه به شکل منحنی بار - تغییر مکان مشخص می‌شود که نمونه مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی شده (HRAP و WRAP) گسیختگی شکننده و ناگهانی نشان دادند، درحالی‌که مخلوط‌های HMA و WMA رفتار شکل‌پذیرتری در ناحیه گسیختگی داشتند. از نظر ظرفیت باربری در دمای پایین نیز مخلوط‌های HRAP و WRAP قادر به حمل بار بیشتر نسبت به مخلوط‌های آسفالتی

- environmental conditions,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 190 pp. 245-258, 2018.
- [23] E.Z. Teshale, D. Rettner, A. Hartleib, and D. Kriesel, “Application of laboratory asphalt cracking tests to cold in-place recycled mixtures,” *Road Materials and Pavement Design*, vol. 18(sup4) pp. 79-97, 2017.
- [24] S.R. Omranian, M.O. Hamzah, and M.R.M. Hasan, “Introducing New Indicators to Evaluate Fracture Properties of Asphalt Mixtures Using Semicircular Bending Test,” *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, vol. 43(3) pp. 541-549, 2019.
- [25] F. Kaseer, F. Yin, E. Arámbula-Mercado, A.E. Martin, J.S. Daniel, and S. Salari, “Development of an index to evaluate the cracking potential of asphalt mixtures using the semi-circular bending test,” *Construction and Building Materials*, vol. 167 pp. 286-298, 2018.
- [26] Y. Zhu, E.V. Dave, R. Rahbar-Rastegar, J.S. Daniel, and A. Zofka, “Comprehensive evaluation of low-temperature fracture indices for asphalt mixtures,” *Road Materials and Pavement Design*, vol. 18(sup4) pp. 467-490, 2017.
- [27] M.R.M. Aliha, H. Ziari, B. Mojaradi, and M.J. Sarbijan, “Heterogeneity effects on mixed-mode I/II stress intensity factors and fracture path of laboratory asphalt mixtures in the shape of SCB specimen,” *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 43(3) pp. 586-604, 2020.
- [28] S.C. Somé, A. Feeser, and A. Pavoine, “Numerical and experimental investigation of mode I cracking of asphalt concrete using semi-circular bending test,” *Construction and Building Materials*, vol. 169 pp. 34-46, 2018.
- [29] AASHTO M320, “Standard Method of Test for Performance Graded Asphalt Binder,” American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC, 2016.
- [30] Sasolwax, “Asphalt Additives,” <http://www.sasolwax.com/products-applications/fischer-tropsch-wax0/asphalt-additives/>, 2020.
- [31] ASTM D2172/D2172M-17, “Standard test methods for quantitative extraction of asphalt binder from asphalt mixtures,” ASTM, 2017.
- [32] ASTM D1856, “Standard Test Method for Recovery of Asphalt from Solution by Abson Method,” ASTM, 2015.
- [33] AASHTO R35, “Standard practice for Superpave volumetric design for asphalt mixtures,” American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC, 2015.
- [34] AASHTO M323, “Standard specification for superpave volumetric mix design,” American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2013.
- [35] AASHTO TP105-13, “Standard Method of Test for Determining the Fracture Energy of Asphalt Mixtures Using the Semicircular Bend Geometry (SCB),” American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC, 2015.
- [36] AASHTO T312, “Standard Method of Test for Preparing and Determining the Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor,” American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC, 2015.
- [37] Y. Yan, R. Roque, D. Hernando, and G. Lopp, “Development of a new methodology to effectively predict the fracture properties of RAP mixtures,” *Road Materials and Pavement Design*, vol. 18(sup4) pp. 372-387, 2017.
- [38] D.X. Lu, H.H. Bui, and M. Saleh, “Effects of specimen size and loading conditions on the fracture behavior of asphalt concretes in the SCB test,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 242, 2021.
- Containing High Percentage of RAP,” *Advances in Civil Engineering*, 2020.
- [7] A.C. Falchetto, K.H. Moon, and D.H. Kim, “Evaluation of recycled asphalt mixture at low temperature using different analytical solutions,” *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 47(7) pp. 801-811, 2020.
- [8] S. Raschia, A. Graziani, A. Carter, and D. Perraton, “Laboratory mechanical characterisation of cold recycled mixtures produced with different RAP sources,” *Road Materials and Pavement Design*, vol. 20(sup1) pp. S233-S246, 2019.
- [9] J. Li, F. Ni, and Q. Lu, “Experimental investigation into the multiscale performance of asphalt mixtures with high contents of reclaimed asphalt pavement,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 30(6) p. 04018105, 2018.
- [10] L. Gao, H. Li, J. Xie, Z. Yu, and S. Charmot, “Evaluation of pavement performance for reclaimed asphalt materials in different layers,” *Construction and Building Materials*, vol. 159 pp. 561-566, 2018.
- [11] X. Sanchez and S.L. Tighe, “Steps towards the detection of reclaimed asphalt pavement in superpave mixtures,” *Road Materials and Pavement Design*, vol. 20(5) pp. 1201-1214, 2019.
- [12] Z. Zhou, X. Gu, F. Ni, Q. Li, and X. Ma, “Cracking resistance characterization of asphalt concrete containing reclaimed asphalt pavement at intermediate temperatures,” *Transportation Research Record*, vol. 2633(1) pp. 46-57, 2017.
- [13] D. Singh, S.F. Chitragar, and P.K. Ashish, “Comparison of moisture and fracture damage resistance of hot and warm asphalt mixes containing reclaimed pavement materials,” *Construction and Building Materials*, vol. 157 pp. 1145-1153, 2017.
- [14] A.Z. Siavashani, “Development of indirect ring tension test for fracture characterization of asphalt mixtures,” University of Kentucky, 2014.
- [15] X. Li and M. Marasteanu, “Evaluation of the low temperature fracture resistance of asphalt mixtures using the semi circular bend test,” *Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technology Sessions, AAPT 2004* (pp. 401-426), 2004.
- [16] S. Pirmohammad, B. Amani, and Y.M. Shokorlou, “The effect of basalt fibres on fracture toughness of asphalt mixture,” *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2020.
- [17] S. Pirmohammad, Y.M. Shokorlou, and B. Amani, “Laboratory investigations on fracture toughness of asphalt concretes reinforced with carbon and kenaf fibers,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 226 p.106875, 2020.
- [18] M.R.M. Aliha, A. Razmi, and A. Mansourian, “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*, vol. 182 pp. 322-336, 2017.
- [19] M.R. Eghbali, M.F. Tafti, M.R.M. Aliha, and H. Motamedi, “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*, vol. 216 p.106496, 2019.
- [20] S. Saadeh and O. Eljairi, “Comparison of Fracture Properties of Asphalt Concrete in Semicircular Bend Test Using Noncontact Camera and Crosshead Movement,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 30(6) p.04018078, 2018.
- [21] A.C. Falchetto, K.H. Moon, D. Wang, C. Riccardi, and M.P. Wistuba, “Comparison of low-temperature fracture and strength properties of asphalt mixture obtained from IDT and SCB under different testing configurations,” *Road Materials and Pavement Design*, vol. 19(3) pp. 591-604, 2018.
- [22] P.H. Pour, M.R.M. Aliha, and M.R. Keymanesh, “Evaluating mode I fracture resistance in asphalt mixtures using edge notched disc bend ENDB specimen with different geometrical and