

خصوصیات شکست دمای کم مخلوط حاوی تراشه آسفالتی اصلاح شده با پودر لاستیک و جوان‌ساز

محمدعلی زیاری، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
فریدون مقدس نژاد*، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
محمدرضا محمدعلیها، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
پوریا حاجی کریمی، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

Email: moghadas@aut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۷ - پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۸

چکیده

بازیافت و استفاده مجدد از مصالح در دهه‌های اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته است. امروزه، مسائل زیست‌محیطی به دلیل محدودیت منابع و همچنین افزایش هزینه مواد جدید بسیار حائز اهمیت شده است. از آنجا که بیشتر راه‌های موجود در ایران از نوع آسفالتی می‌باشند، استفاده از تراشه آسفالتی و مصرف کمتر مصالح جدید می‌تواند به عنوان یک راه‌حل سازگار با محیط‌زیست مطرح گردد. در بازیافت تراشه‌های آسفالتی، نگرانی‌هایی در ارتباط با ترک‌های دمای کم وجود دارد. هدف از این پژوهش، بررسی خواص ترک دمای کم مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالتی، به همراه مواد افزودنی دیگر، جهت معرفی مخلوطی با خصوصیات عملکردی معادل مخلوط آسفالتی پایه می‌باشد. به این منظور، دو درصد مختلف برای نمونه‌های آسفالتی (۲۵٪ و ۵۰٪ تراشه آسفالتی) در نظر گرفته شد. به منظور بهبود خواص چسبندگی آن‌ها، افزودن جوان‌ساز سایکلوزن (۱۰٪ وزنی قیر تراشه به عنوان درصد بهینه) و برای بهبود مقاومت مخلوط در برابر ترک خوردگی، پودر لاستیک (۱۰٪ وزنی قیر جدید) در نظر گرفته شد. خواص مخلوط‌ها با آزمایش استقامت کششی غیرمستقیم و آزمایش خمش نیم‌استوانه بررسی شد. بازشدگی دهانه ترک در حین آزمایش خمش نیم‌استوانه به کمک تصویربرداری مشخص شد. مطابق این آزمایش، افزودن تراشه آسفالتی به نمونه پایه باعث کاهش انرژی شکست می‌شود. اما افزودن جوان‌ساز و پودر لاستیک به نمونه‌های بازیافتی، خواص مخلوط در برابر رشد ترک را بهبود می‌دهد. طبق نتایج، مخلوط‌های آسفالتی حاوی تراشه آسفالت به همراه افزودنی‌ها، عملکردی برابر و یا حتی بهتر از مخلوط آسفالتی پایه داشتند. همچنین، شاخص ترکیبی انرژی شکست - بازشدگی دهانه ترک می‌تواند به عنوان معیار مناسبی جهت بررسی تأثیر تراشه آسفالتی و افزودنی‌های جوان‌ساز و پودر لاستیک در نمونه‌های مخلوط آسفالتی استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: تراشه آسفالتی، آزمایش خمش دیسک نیم‌استوانه، پودر لاستیک، جوان‌ساز.

۱. مقدمه

رایج ترین انواع بازیافت روسازی های انعطاف پذیر می- باشد (جهانبخش و همکاران، ۲۰۱۹). میزان پیرشدگی قیر تراشه آسفالتی به عواملی از قبیل عمر روسازی، نوع آب و هوا، مقدار فضای خالی مخلوط و نوع قیر استفاده شده در روسازی اولیه بستگی دارد. این پیرشدگی موجب افزایش قابل توجهی در سفتی قیر موجود در تراشه آسفالتی می شود که ممکن است عملکرد قیر و مخلوط مربوطه را در دماهای زیاد بهبود بخشد. همچنین، مقاومت در برابر ترک خوردگی در دماهای کم را کاهش و مقاومت در برابر شیارشدگی را افزایش دهد (اپس و همکاران، ۲۰۲۰). استفاده از عامل بازسازی کننده، راه- کاری شناخته شده به منظور افزایش درصد استفاده از تراشه آسفالتی در صنعت روسازی می باشد که از انواع مختلف افزودنی ها مانند قیرهای با ویسکوزیته کم یا روغن ها تشکیل شده است. عملکرد اصلی آن ها، کاهش سفتی مخلوط جدید و فعال سازی مجدد قیرهای پیر شده تراشه آسفالتی می باشد که به فرایند اختلاط با قیر خالص کمک می کند (مانجیافیکو و همکاران، ۲۰۱۷). جوان سازی قیر پیر شده در واقع شیوه ای رایج برای بازگرداندن خواص قیر پیر شده به شرایطی است که شبیه به قیر خالص می شود. هی و همکاران (۲۰۱۸) اثر قیر نرم تر را بر قیر روسازی آسفالتی مجدد بازیافت شده بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزودن این جوان ساز، شاخص کربونیل و مدول دینامیک قیرهای جوان شده را کاهش داده است. استفاده از عوامل بازیافتی یا جوان سازی هایی که هم سفتی و هم زاویه فاز را بازیابی کنند، مزیت های بیشتری از جمله نرم شدگی و بازگرداندن خواص فیزیکی و شیمیایی قیر پیر شده دارد (ترن و همکاران، ۲۰۱۲؛ زائومانیس و همکاران، ۲۰۱۵؛ علی و همکاران، ۲۰۱۶). در تولید آسفالت بازیافتی، نوع و مقدار جوان ساز باید به درستی تعیین شود تا خواص دمای کم

تراشه های آسفالتی^۱ (RAP) از تراشیدن^۲، آسیاب کردن^۳ و سنگ شکنی^۴ روسازی های آسفالتی قدیمی به دست می آیند. این تراشه های آسفالتی پیر شده می تواند اصلاح و در ساخت روسازی جدید استفاده شوند (بقائی مقدم و باج، ۲۰۱۶). برخی مطالعات نشان داده که استفاده بیش از ۵۰٪ تراشه های آسفالتی بدون هیچ گونه عارضه جانبی بر خواص مکانیکی مخلوط آسفالتی امکان پذیر است (والدس و همکاران، ۲۰۱۱). زائومانیس و همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند که استفاده ۱۰۰ درصدی تراشه های آسفالت، هزینه ساخت را به میزان ۵۰٪ تا ۷۰٪ کاهش می دهد. مهم ترین مزایای زیست محیطی مرتبط با استفاده از تراشه آسفالت، کاهش انتشار گازهای گلخانه ای، کاهش مصرف سوخت، کاهش تقاضای منابع غیر قابل تجدید و کاهش فضا به منظور دپوی تراشه های آسفالتی می باشد (بقائی مقدم و باج، ۲۰۱۶؛ بهنود، ۲۰۱۹). استفاده مجدد از تراشه آسفالت بسیار ارزشمند می باشد. اما قیر پیر شده موجود در آن، سختی و شکنندگی مخلوط را افزایش داده و تراکم پذیری آن را کاهش می دهد (آرتامندی و همکاران، ۲۰۰۹؛ زائومانیس و همکاران، ۲۰۱۳). افزایش درصد تراشه آسفالتی مورد استفاده در مخلوط های آسفالتی بازیافتی می تواند اثر منفی بر ترک خوردگی خستگی، عملکرد دمای کم و مقاومت در برابر رطوبت مخلوط های آسفالتی داشته باشد (هی و وونگ، ۲۰۰۸؛ الکادی و همکاران، ۲۰۱۲). بیشتر نگرانی ها در ارتباط با استفاده از تراشه در مخلوط آسفالتی، ضعف مقاومت در برابر ترک خوردگی دمای کم و ترک های خستگی مطرح شده است (تنگ، ۲۰۱۴).

تراشه آسفالتی شامل قیر پیر شده و سنگ دانه می باشد و بازیافت آن به روش تولید مخلوط های بازیافتی گرم از

۳- Milling

۴- Crushing

۱- Reclaimed Asphalt Pavement

۲- Removal

که جوان‌سازها در کاهش اثرات قیر پیرشده درون تراشه آسفالتی مؤثر هستند. میزان چقرمگی شکست در مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالتی کمتر از مخلوط آسفالتی معمولی مشاهده گردید؛ در صورتی که استفاده از جوان‌سازها این اختلاف را کاهش داد. با این حال، جوان‌سازها باعث کاهش مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی شده‌اند. همچنین، عملکرد قابل قبول جوان‌ساز سایکلوژن در برابر پیرشدگی و ترک‌خوردگی مشاهده گردید. یکی از دلایل اصلی ترک‌خوردگی دمای کم روسازی در مخلوط‌های بازیافتی، کمبود یا عدم آمیختگی بین قیرهای خالص و پیرشده است (کریز و همکاران، ۲۰۱۴). به‌طور کلی، روش‌های متفاوتی برای جوان‌سازی قیرهای پیرشده وجود دارد که متداول‌ترین نوع آن، روش اختلاط در دمای زیاد می‌باشد. مطابق با یافته‌ها، افزودن جوان‌ساز به تراشه آسفالتی مؤثرتر از افزودن آن به قیر داغ قبل از اختلاط است (زائومانیس و همکاران، ۲۰۱۹). یکی از بهترین و رایج‌ترین مواد برای افزودن به روسازی‌های آسفالتی در جهت بهبود مشخصات آن‌ها، پلیمرها می‌باشند. امروزه، استفاده از این مواد در قیرها بسیار گسترش یافته و تحقیقات زیادی برای اصلاح خواص قیرها انجام شده است (لیانگ و همکاران، ۲۰۱۷؛ زانی و همکاران، ۲۰۱۷). همچنین، جوان‌سازها می‌توانند به‌صورت ترکیب با قیرهای پلیمری یا پودر لاستیک جهت بهبود خواص مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار گیرند (بونچلی و همکاران، ۲۰۱۷). افزودن و ترکیب مواد سودمند، اجازه می‌دهد تا یک مخلوط با درصد زیاد تراشه آسفالتی تولید شود. یان و همکاران (۲۰۱۷) نشان دادند که افزایش درصد تراشه آسفالتی، افزایش سختی و کاهش استحکام کششی را نتیجه می‌دهد. نتایج آن‌ها استفاده تا ۴۰ درصد تراشه آسفالتی را به همراه پلیمر اصلاح‌شده نشان داد. لاستیک تایر

مخلوط بهبود یابد؛ در حالی که خواص دمای زیاد آن دچار ضعف عملکرد نشود (ریس اُرتیز و همکاران، ۲۰۱۲).

مطالعات گسترده‌ای در ارتباط با تأثیر جوان‌سازها بر قیرهای پیرشده، نحوه اختلاط آن‌ها و همچنین مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالتی انجام شده است (زیاری و همکاران، ۲۰۲۲؛ ما و همکاران، ۲۰۲۲). طباطبایی و کورت (۲۰۱۷) تأثیر عامل بازیافتی بر پایه زیستی را بر ثبات کلئیدی قیر پیرشده بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که جوان‌سازها فاز مالتن قیر را افزایش دادند و در نتیجه نسبت آسفالتن به مالتن کاهش یافت. آن‌ها همچنین نشان دادند که شاخص ناپایداری کلئیدی که نشان‌دهنده پایداری بیشتر و پراکندگی بهتر در قیر است با افزودن جوان‌ساز به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. مازونی و همکاران (۲۰۱۸) تأثیر جوان‌سازهای مختلف را بر پیرشدگی قیر در مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی داغ بررسی کردند. بررسی‌های آن‌ها نشان داد که پیرشدگی باعث افزایش مدول مختلط برشی و همچنین کاهش زاویه فاز می‌شود که نشان‌دهنده غلبه مؤلفه الاستیک بر مؤلفه ویسکوز است. جوان‌سازها همچنین ساختار شیمیایی قیر و در نتیجه رئولوژی آن را با افزایش پاسخ ویسکوز قیر اصلاح می‌کنند. کاوالی و همکاران (۲۰۱۸) اثر پیرشدگی بر رفتار رئولوژیک و ترک‌خوردگی قیر حاصل از تراشه آسفالتی را همراه با سه جوان‌ساز بر پایه زیستی بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که جوان‌سازها ترک‌خوردگی دمای کم و همچنین خواص رئولوژیک قیر پیرشده را بهبود می‌بخشند. زیاری و همکاران (۲۰۱۹a, ۲۰۱۹b) عملکرد مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالتی همراه با جوان‌سازها را با یکدیگر مقایسه کردند. آن‌ها از سه نوع جوان‌ساز رپیول^۱، سایکلوژن^۲ و روغن خوراکی بازیافتی^۳ استفاده کردند. نتایج نشان داد

³ - Waste cooking oil

¹ - Rapiol

² - Cyclogen

همراه پودر لاستیک پرداختند. آن‌ها خواص ترک‌خوردگی در دمای کم، حساسیت رطوبتی، ترک‌های خستگی و شیارشدگی را مورد مطالعه قرار دادند. به این منظور، از آزمون‌های مقاومت مارشال، مقاومت کششی غیرمستقیم و آزمون خمش نیم‌استوانه (SCB) استفاده کردند. نتایج نشان داد که ترکیب مخلوط‌های جدید معرفی شده، خواص عملکردی و زیست‌محیطی بهتری نسبت به مخلوط آسفالتی بکر (معمولی) دارند (جهانبخش و همکاران، ۲۰۱۹).

افزایش مطالعه در ارتباط با مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالتی و همچنین استفاده از جوان‌سازها و پودر لاستیک در آنها، نشان‌دهنده اهمیت موضوع می‌باشد. با این حال، هنوز مطالعات کمی در ارتباط با ترکیب این مصالح، بررسی خصوصیات شکست و ترک‌های دمای کم در آن‌ها انجام شده است. پژوهش حاضر، با توجه به نقش قابل‌توجه جوان‌سازها در مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالتی و همچنین بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از قیر اصلاح‌شده با پودر لاستیک صورت پذیرفته است. با توجه به ضعف مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالتی در برابر ترک‌خوردگی، ترکیب این مواد (درصد زیاد تراشه آسفالتی، همراه با جوان‌ساز و پودر لاستیک) استفاده شده است. پژوهش انجام شده، از نظر اینکه تراشه آسفالتی و همچنین پودر لاستیک ماده‌ای ضایعاتی می‌باشند، نگاه ویژه‌ای به مسائل زیست‌محیطی دارد. همچنین، جوان‌ساز مورد استفاده در این پژوهش، جوان‌ساز بومی می‌باشد که در کشور تولید می‌شود؛ بنابراین، پژوهش صورت پذیرفته، از منظر نوع مواد مورد استفاده و بررسی خصوصیات انجام شده، پژوهشی می‌باشد که کمتر به آن پرداخته شده است. آزمون حساسیت رطوبتی، به‌منظور کنترل این شاخص برای ترکیب ارائه شده، انجام شد. همچنین، با استفاده از آزمون‌های مقاومت کششی غیرمستقیم و آزمون خمش

بازیافتی یکی از موادی است که در بهبود خستگی و شیارشدگی مخلوط آسفالتی مفید می‌باشد و این ماده در مخلوط حاوی تراشه آسفالتی نیز مورد استفاده قرار گرفته است (کوجک، ۲۰۱۶). استفاده از پودر لاستیک در مخلوط حاوی تراشه آسفالتی، افزایش مقاومت در برابر ترک‌خوردگی را نشان داده است (چن و سلیمانان، ۲۰۱۹). شو و هوانگ (۲۰۱۴) استفاده از پودر لاستیک در مخلوط آسفالتی را باعث بهبود مقاومت در برابر شیارشدگی، بهبود خواص خستگی و افزایش مقاومت در برابر ترک‌های دمای کم عنوان کردند و به جهت کاهش مصرف انرژی و تأثیرات منفی زیست‌محیطی، مفید دانسته‌اند. عاملی و همکاران (۲۰۱۶) به‌منظور بررسی ترکیب مخلوط حاوی تراشه آسفالتی و پودر لاستیک، از چهار درصد متفاوت تراشه آسفالتی (صفر، ۲۰، ۴۰، ۶۰) و سه درصد وزنی قیر پودر لاستیک (صفر، ۱۰، ۱۵) استفاده کردند. نتایج آن‌ها، افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی را با افزودن پودر لاستیک نشان داد. بهروزی خواه و همکاران (۲۰۱۷) نشان دادند که استفاده از پودر لاستیک و ساسوبیت به‌صورت هم‌زمان در مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالتی باعث بهبود عملکرد در برابر پدیده‌ی خستگی می‌شود و نرخ آسیب‌های تجمعی در مخلوط‌های آسفالتی کاهش می‌یابد. همچنین، استفاده از پودر لاستیک باعث افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم و کاهش آستانه شروع ترک در مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالتی می‌شود. با توجه به اینکه افزودن قیر اصلاح‌شده با پودر لاستیک به تراشه آسفالتی باعث افزایش سختی مخلوط می‌شود، گیرماس و همکاران (۲۰۱۸) استفاده از درصد‌های کم تراشه آسفالتی را توصیه کرده و برای درصد‌های زیاد تراشه آسفالتی، ضعف در چسبندگی بین مواد را مشاهده کردند. جهانبخش و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی خواص عملکردی و زیست‌محیطی مخلوط‌های حاوی درصد زیاد تراشه آسفالتی (تا ۱۰۰ درصد) به

1- Semi-Circular Bending Test

جوان ساز معرفی شده‌اند. سپس، روش انجام آزمایش‌های مورد نظر در این پژوهش به صورت مختصر بیان شده است.

نیم‌استوانه در دماهای کم، به بررسی خواص شکست در دمای کم این ترکیب‌ها پرداخته شده است. بازشدگی دهانه ترک، در آزمایش خمش نیم‌استوانه اندازه‌گیری شد و شاخص انرژی شکست- بازشدگی دهانه ترک، مورد بررسی قرار گرفت.

۲-۱. مواد و مصالح

۲-۱-۱. قیر خالص

در این پژوهش، از قیر خالص با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ (PG 64-22) شرکت نفت قیران پخش استفاده شده است. جدول ۱، مشخصات متعارف این قیر را نشان می‌دهد.

۲. برنامه آزمایشگاهی

در این بخش، ابتدا مواد و مصالح مورد استفاده شامل قیر خالص، تراشه آسفالتی، پودر لاستیک، سنگ‌دانه و ماده

جدول ۱. مشخصات متعارف قیر خالص با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ (PG 64-22)

ویژگی	مقدار	استاندارد انجام آزمایش
چگالی (g/cm^3) در ۲۵ درجه سلسیوس	۱/۰۴	ASTM D7
درجه نفوذ (۰/۱ میلی‌متر) در ۲۵ درجه سلسیوس	۶۵	ASTM D5
نقطه نرمی ($^{\circ}\text{C}$)	۵۰	ASTM D36
خاصیت کشسانی در ۲۵ درجه سلسیوس (cm)	> ۱۰۰	ASTM D113
درجه اشتعال ($^{\circ}\text{C}$)	۲۹۰	ASTM D92

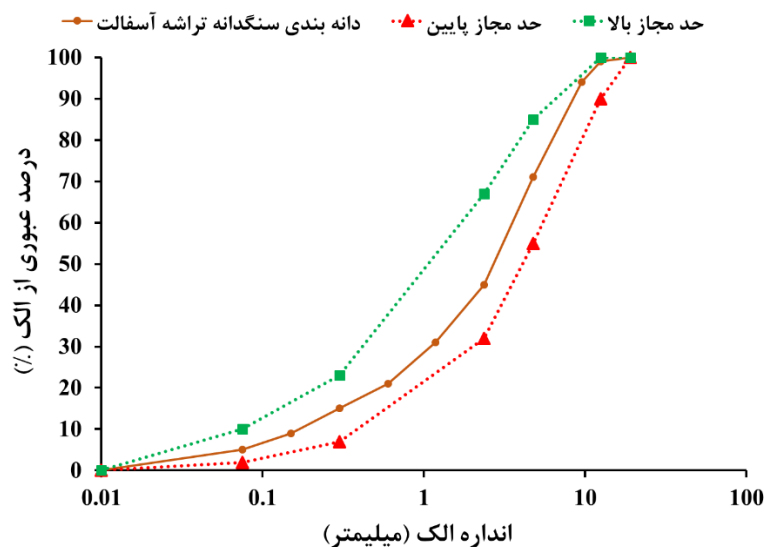
انجام شده است. آزمایش تجزیه^۱ (اکستراکشن) و احتراق به ترتیب مطابق استاندارد (ASTM D6307, 2016) جهت به دست آوردن سنگ‌دانه تراشه انجام شده است. حداکثر اندازه اسمی سنگ‌دانه^۲ برای تراشه آسفالتی، ۱۲/۵ میلی‌متر و درصد قیر تراشه آسفالت برابر ۶/۹ درصد به دست آمد. در شکل ۱، دانه‌بندی تراشه آسفالتی نشان داده شده است.

۲-۱-۲. تراشه آسفالتی

تراشه آسفالتی مورد استفاده در این پژوهش از دپوی موجود در استان تهران، واقع در پاکدشت، تهیه شده است. این تراشه مربوط به آسفالتی است که با استفاده از قیر با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ تولید شده است. برداشت از دپوی تراشه آسفالتی مطابق استاندارد (ASTM C702, 2016)

²- Nominal maximum aggregate size

¹- Extraction



شکل ۱. منحنی دانه بندی سنگدانه تراشه آسفالت

جدول ۲ نشان می دهد، مهم ترین ترکیب تشکیل دهنده سنگدانه های تراشه آسفالتی، دی اکسید سیلیسیوم (SiO_2) به میزان ۶۱/۸۵ درصد وزنی می باشد که نشان دهنده خاصیت سیلیسی این مواد است.

برای تعیین عناصر موجود در سنگدانه های تراشه آسفالتی، از آزمایش طیف سنجی فلورسانس پرتو ایکس^۱ (XRF) استفاده شد. این آزمایش روی سنگدانه های به دست آمده از تراشه آسفالتی در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه علم و صنعت انجام شد. همان گونه که نتایج در

جدول ۲. نتایج طیف سنجی فلورسانس پرتو ایکس (XRF) سنگدانه های تراشه آسفالتی

TiO ₂	CaO	K ₂ O	MnO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	ترکیبات
۰/۴۰۳	۲۰/۷۶۲	۲/۲۳۲	۰/۱۳۴	۰/۲۵۰	۰/۲۳۴	۰/۱۱۴	۶۱/۸۵۰	۷/۳۹۲	۱/۵۳۸	۳/۰۹۱	درصد وزنی

خالص تا دمای ۱۶۰ درجه سلسیوس گرم شده، سپس پودر لاستیک به صورت تدریجی به آن اضافه شده و در دستگاه اختلاط با سرعت زیاد^۲ با نرخ ۵۰۰۰ دور بر دقیقه در دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس به مدت ۶۰ دقیقه اختلاط انجام شده است (جهانبخش و همکاران، ۲۰۱۶).

۲-۱-۴. سنگدانه

سنگدانه های سیلیسی مورد استفاده در این پژوهش از معدن شرکت هادپی واقع در استان تهران تهیه شده است.

۲-۱-۳. پودر لاستیک

به منظور اصلاح قیر و بهبود خواص مخلوط آسفالتی در برابر ترک خوردگی، از پودر لاستیک استفاده شده است. مطابق با تحقیقات پیشین، میزان استفاده از پودر لاستیک، ۱۰ درصد وزنی قیر بهینه در نظر گرفته شده است. پودر لاستیک مورد استفاده در این پژوهش، با وزن مخصوص ۱/۰۳ گرم بر سانتی متر مکعب، از مش شماره ۱۰۰ (۰/۱۴۹ میلی متر) عبور کرده است. روش استفاده از پودر لاستیک به صورت تر می باشد. به این صورت که قیر

²- High shear laboratory mixer

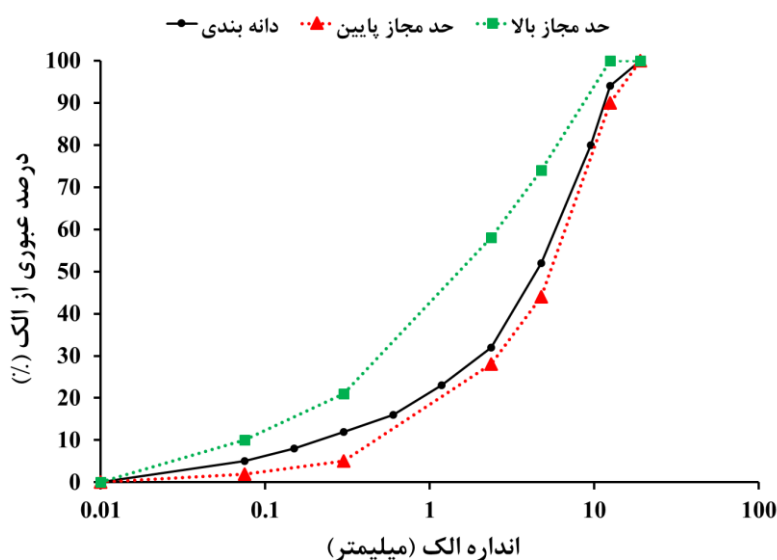
¹- X-ray Fluorescence Spectroscopy

کاهش ضعف در مقابل حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی، فیلر مورد استفاده در پژوهش از جنس آهکی بوده است. همچنین، خصوصیات سنگ‌دانه‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است.

دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها با اندازه ذرات بزرگ‌تر از ۷۵ میکرون مطابق شکل ۲ صورت گرفته است. محدوده‌های تعیین شده بر اساس نشریه فنی ۲۳۴ آیین‌نامه طرح روسازی راه‌های ایران انتخاب شده است. به جهت

جدول ۳. خصوصیات فیزیکی مصالح سنگی

ویژگی	مقدار	استاندارد انجام آزمایش
وزن مخصوص مصالح درشت‌دانه (g/cm^3)	۲/۵۱	ASTM C127
وزن مخصوص مصالح ریزدانه (g/cm^3)	۲/۶۷	ASTM C128
سایش به روش لس‌آنجلس (%)	۱۴	ASTM C131
ارزش ماسه‌ای (%)	۶۷	ASTM D2419
شکستگی در دو وجه (%)	۹۳	ASTM D5821



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه

آروماتیک قرار می‌گیرد (حق‌شناس و همکاران، ۲۰۱۶). همچنین، نتایج آزمایش طیف‌سنجی مادون قرمز^۱ (FTIR) صورت گرفته روی این ماده در شکل ۳ نشان داده شده است.

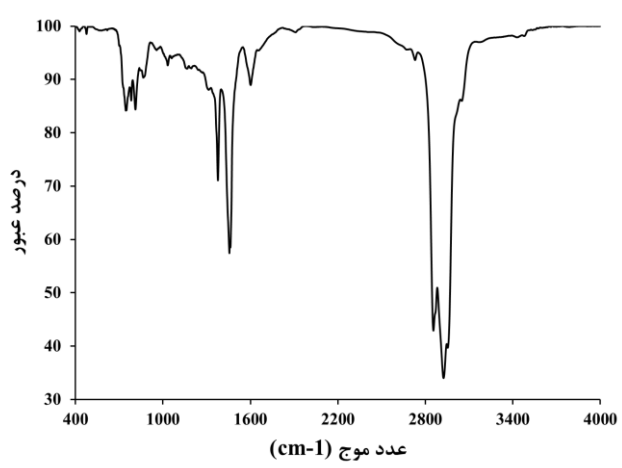
۲-۱-۵. عامل جوان‌ساز

در این پژوهش، از عامل جوان‌ساز سایکلوژن، تولید شده در شرکت کربن تک، واقع در اصفهان، استفاده شده است. جوان‌ساز سایکلوژن در دسته‌بندی جوان‌سازهای

¹ - Fourier Transform Infrared Spectrometer

جدول ۴. مشخصات جوانساز

ویژگی	مقدار
حالت فیزیکی	مایع
رنگ	سیاه
حلالیت در آب	ندارد
چگالی (g/cm^3) در ۲۵ درجه سلسیوس	۰/۹۷۳
ویسکوزیته در ۱۳۵ درجه سلسیوس (cSt)	۱۰
درجه اشتعال ($^{\circ}\text{C}$)	۲۱۸



شکل ۳. نتایج آزمایش طیفسنجی مادون قرمز (FTIR) عامل جوانساز

۲-۲. آماده سازی نمونه ها

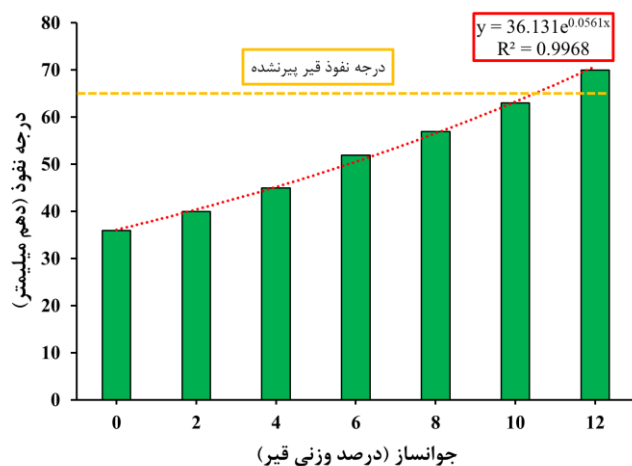
۲-۲-۱. تعیین درصد بهینه جوانساز

قیر استخراج شده از تراشه آسفالتی تا دمای ۱۴۰ درجه سلسیوس گرم شده و سپس درصدهای مختلف جوانساز مورد نظر به آن افزوده شد. به منظور پخش شدن^۱ ماده جوانساز در قیر پیرشده، قیر آماده شده به مدت ۶ ساعت در آون با دمای ۱۴۰ درجه سلسیوس قرار داده شد (جهانبخش و همکاران، ۲۰۱۹). به منظور بررسی تأثیر جوانساز بر قیر استخراج شده از تراشه آسفالتی،

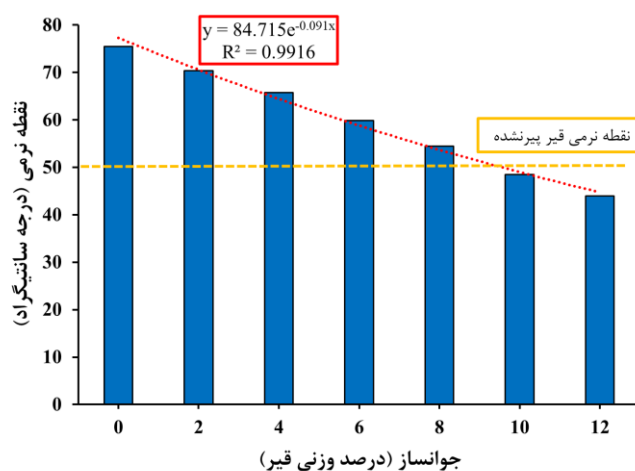
آزمایش های درجه نفوذ (ASTM D5)، نقطه نرمی (ASTM D36) و ویسکومتر چرخشی^۲ (RV) (ASTM D4402) روی قیر خالص و همچنین قیر حاوی درصدهای مختلف جوانساز (۲ تا ۱۲ درصد وزنی قیر) صورت پذیرفت. شکل ۴، نتایج آزمایش درجه نفوذ را نشان می دهد. با افزایش درصد جوانساز، درجه نفوذ افزایش پیدا می کند که نشان دهنده افزایش نرمی قیر سخت شده است. همچنین، شکل ۵، نتایج آزمایش اندازه گیری نقطه نرمی را نشان می دهد. با افزایش درصد جوانساز، نقطه نرمی کاهش پیدا می کند.

²- Rotational viscometer

¹- Diffusion



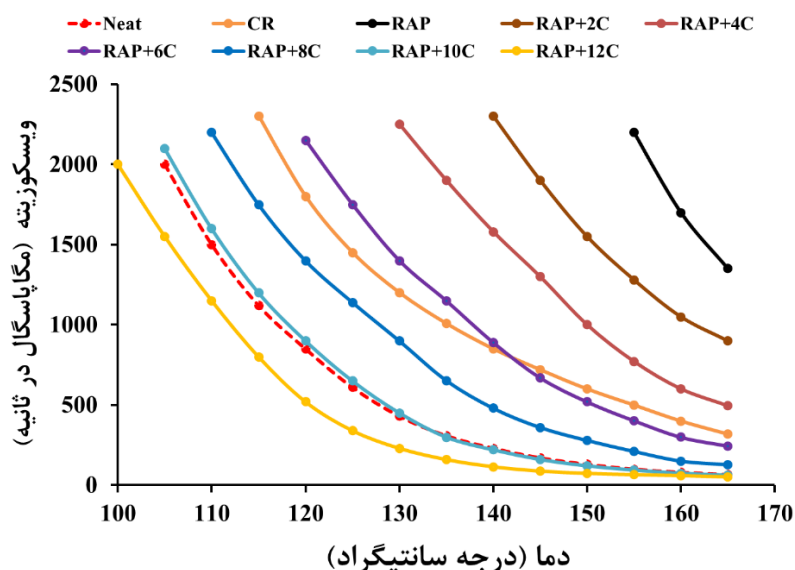
شکل ۴. درجه نفوذ قیر به دست آمده از تراشه آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف جوانساز



شکل ۵. نقطه نرمی قیر استخراج شده از تراشه آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف جوانساز

همچنین، در قیر حاوی ۱۰٪ جوانساز، ویسکوزیته آن به قیر خالص نزدیک شده است. با توجه به نتایج آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی و همچنین ویسکومتر چرخشی، درصد جوانساز مورد استفاده در این پژوهش برابر ۱۰ درصد وزنی قیر موجود در تراشه آسفالتی در نظر گرفته شده است.

آزمایش ویسکومتر چرخشی در دماهای ۱۰۰ تا ۱۶۵ درجه سلسیوس (با بازه دمایی ۵ درجه سلسیوس) انجام شده است. نتایج آزمایش (شکل ۶) نشان می‌دهد که ویسکوزیته قیر استخراج شده از تراشه آسفالتی، در مقایسه با قیر خالص پیر نشده، بسیار زیاد است و افزودن عامل جوانساز، باعث کاهش ویسکوزیته آن شده است.



شکل ۶. نتایج آزمایش اندازه گیری ویسکوزیته قیر استخراج شده از تراشه آسفالتی حاوی درصد های مختلف جوان ساز با استفاده از ویسکومتر چرخشی

و عامل جوان ساز به دست آمد. فضای خالی نمونه ها ۴٪ در نظر گرفته شد. برای دمای تراکم، ویسکوزیته 170 ± 20 سانتی استوکس و برای دمای اختلاط، ویسکوزیته 280 ± 30 سانتی استوکس انتخاب شد (بیلدیریم و همکاران، ۲۰۰۰). جدول ۴، نام گذاری نمونه های ساخته شده همراه با افزودنی استفاده شده در آن و جدول ۵، دمای اختلاط و تراکم نمونه های معمولی و نمونه های ساخته شده با قیر اصلاح شده را نشان می دهند.

۲-۲-۲. ساخت نمونه های مخلوط آسفالتی

پس از تعیین درصد بهینه جوان ساز، درصد بهینه قیر جهت ساخت مخلوط آسفالتی به روش سوپریو مشخص گردید (کامینسکی و همکاران، ۱۹۹۴). بدین منظور، برای هر کدام از درصد های مختلف تراشه آسفالتی، درصد قیر بهینه طراحی محاسبه شده است. درصد قیر بهینه نمونه های شاهد برابر ۵٪، نمونه های حاوی ۲۵٪ تراشه آسفالتی برابر ۵/۵ درصد و نمونه های حاوی ۵۰٪ تراشه آسفالتی برابر ۶٪ وزنی کل مخلوط شامل سنگ دانه، قیر

جدول ۴. نام گذاری نمونه های ساخته شده و مورد استفاده در این پژوهش

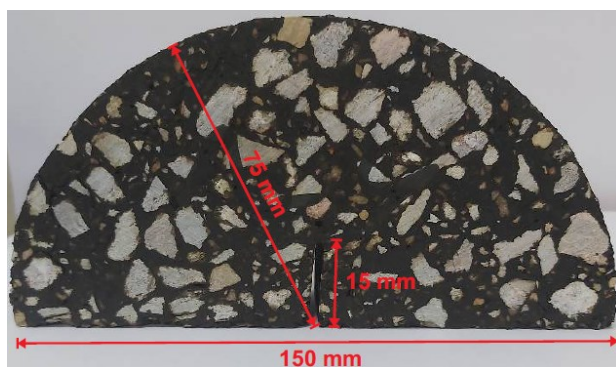
کد نمونه	درصد پودر لاستیک	درصد جوان ساز	درصد تراشه آسفالت
V	-	-	-
VC	۱۰	-	-
R25	-	-	۲۵
R25-J	-	۱۰	۲۵
R25-C-J	۱۰	۱۰	۲۵
R50	-	-	۵۰
R50-J	-	۱۰	۵۰

جدول ۵. دمای اختلاط و تراکم نمونه‌های معمولی و نمونه‌های ساخته شده با قیر اصلاح شده

دمای تراکم (°C)	دمای اختلاط (°C)	نمونه
۱۳۴/۰ - ۱۴۱/۴	۱۴۸/۸ - ۱۵۳/۸	نمونه‌های حاوی قیر معمولی
۱۶۷/۴ - ۱۷۰/۳	۱۷۳/۱ - ۱۷۵/۰	نمونه‌های قیر حاوی پودر لاستیک

دست‌یابی به تراکم یکنواخت در کلیه نمونه‌ها، ۲/۵ سانتی‌متر از بخش بالا و پایین نمونه برش داده شد. برای آزمایش خمش نیم‌استوانه در دمای کم، نمونه‌ها با ضخامت ۲/۵ سانتی‌متر برش داده شدند. سپس، هر دیسک به دست آمده، به دو نیم‌دایره تقسیم شده و در هر کدام یک شیار قائم به ارتفاع ۱۵ میلی‌متر و ضخامت ۳ میلی‌متر ایجاد شده است (AASHTO TP105, 2013). شکل ۷، نمونه آماده شده جهت انجام آزمایش را نشان می‌دهد.

قیر تا دمای اختلاط و مصالح سنگی تا ۲۰ درجه سلسیوس بیشتر از این دما گرم شدند. سپس، نمونه‌ها با استفاده از دستگاه تراکم ژیراتوری، با در نظر گرفتن حداکثر اندازه اسمی سنگ‌دانه ۱۲/۵ میلی‌متر، مطابق آیین‌نامه سوپریپو ساخته شدند. به منظور انجام آزمایش‌های حساسیت رطوبتی و مقاومت کششی غیرمستقیم، نمونه‌های ۱/۲ کیلوگرمی ساخته شدند و برای آزمایش‌های مرتبط با شکست، نمونه‌های ۴/۵ کیلوگرمی (قطر ۱۵ سانتی‌متر) تهیه شدند. سپس، به منظور



شکل ۷. نمونه SCB ساخته شده به منظور انجام آزمایش

است. مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$S_t = \frac{2 \times P}{\pi \times t \times D} \quad (1)$$

که در آن، S_t مقاومت کششی غیرمستقیم (مگاپاسکال)، P حداکثر بار وارده (نیوتن)، t ضخامت نمونه (میلی‌متر) و D قطر نمونه (میلی‌متر) است.

۲-۳. روش انجام آزمایش‌ها

۲-۳-۱. آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم^۱

این آزمایش به منظور محاسبه مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط آسفالتی انجام شده است. آزمایش در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و با نرخ بارگذاری ۵۰ میلی‌متر در دقیقه مطابق استاندارد (ASTM D6931, 2007) انجام شده

^۱ - Indirect tensile strength test

اندازه‌گیری شود. انرژی شکست با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شده است (لو و همکاران، ۲۰۲۱):

$$G_f = \frac{W_f}{A_{lig}} \quad (3)$$

که در آن، G_f انرژی شکست (ژول بر متر مربع)، W_f کار شکست (ژول) و A_{lig} مساحت ناحیه بدون شیار (متر مربع) است. همچنین، چقرمگی شکست از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$K_I = Y_I \frac{P_{cr}}{2Rt} \sqrt{\pi a} \quad (4)$$

که در آن، K_I چقرمگی شکست در مد اول شکست (مگاپاسکال در مجذور متر)، R شعاع نمونه معادل ۷۵ میلی‌متر، t ضخامت نمونه معادل ۲۵ میلی‌متر، P_{cr} بیشینه بار است که از آزمایش تعیین می‌شود و a ارتفاع شیار معادل ۱۵ میلی‌متر است. همچنین، Y_I تابعی بدون بُعد می‌باشد که از رابطه (۵) بر حسب a و R محاسبه می‌شود:

$$Y_{I(0.8)} = 4.782 + 1.219 \left(\frac{a}{R} \right) + 0.063 \exp \left(7.045 \left(\frac{a}{R} \right) \right) \quad (5)$$

۳. نتایج و بحث

۳-۱. آزمایش کشش غیرمستقیم

شکل ۸، نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم را نشان می‌دهد. این آزمایش جهت ارزیابی میزان سختی مخلوط آسفالتی در دمای میانی صورت پذیرفته است. با افزودن پودر لاستیک به قیر پایه، با توجه به آنکه پودر لاستیک به استقامت مخلوط آسفالتی کمک می‌کند، انتظار می‌رود که نمونه ساخته‌شده با بهبود عملکرد همراه باشد. طبق نتایج، با افزودن پودر لاستیک به نمونه شاهد، افزایش بیش از ۳۰٪ مقاومت کششی غیرمستقیم حاصل شده است. همچنین، در مخلوط‌های حاوی ۲۵ و ۵۰ درصد تراشه

۲-۳-۲. نرخ مقاومت کششی (TSR)

مطابق استاندارد AASHTO T283، آزمایش حساسیت رطوبتی روی نمونه‌های آسفالتی تهیه‌شده با درصد بهینه قیر انجام شد. هدف از این آزمایش، ارزیابی ویژگی‌های حساسیت مخلوط نسبت به رطوبت است. این آزمایش روی نمونه‌های متراکم شده با هوای 7 ± 1 درصد انجام شد. سه نمونه آسفالتی به‌عنوان شاهد (نمونه‌های خشک) و سه نمونه با قرارگیری در شرایط رطوبتی مورد آزمایش قرار گرفتند. نمونه‌ها برای استحکام کششی غیرمستقیم با نرخ بارگذاری ثابت ۵۰ میلی‌متر در دقیقه در دمای ۲۵ درجه سلسیوس تحت آزمایش قرار گرفتند. نتایج به‌دست آمده از نمونه‌های خشک با نمونه‌هایی که تحت شرایط رطوبتی قرار گرفتند، با استفاده از رابطه (۲) مقایسه شدند (AASHTO T283, 2007):

$$TSR = \frac{S_2}{S_1} \times 100 \quad (2)$$

که در آن، TSR نرخ مقاومت کششی (درصد)، S_1 میانگین مقاومت کششی نمونه‌های خشک (مگاپاسکال) و S_2 میانگین مقاومت کششی نمونه‌های تحت شرایط رطوبتی است.

۲-۳-۳. آزمایش خمش نیم‌دایره (SCB) در دمای کم

آزمایش خمش نیم‌استوانه، آزمایشی برای ارزیابی انتشار ترک مخلوط آسفالتی در دماهای کم و متوسط است (سها و بیلگیری، ۲۰۱۶). این آزمایش مطابق استاندارد، به‌منظور محاسبه انرژی شکست^۱ (G_f) و چقرمگی شکست^۲ (K_I) در دماهای صفر، ۱۰- و ۲۰- درجه سلسیوس انجام شده است (AASHTO TP105, 2013). سرعت بارگذاری ۰/۰۱ میلی‌متر بر ثانیه بوده است. در سراسر طول آزمایش، فیلم‌برداری از نمونه‌ها صورت گرفته است تا در انتهای آزمایش، بازشدگی دهانه ترک

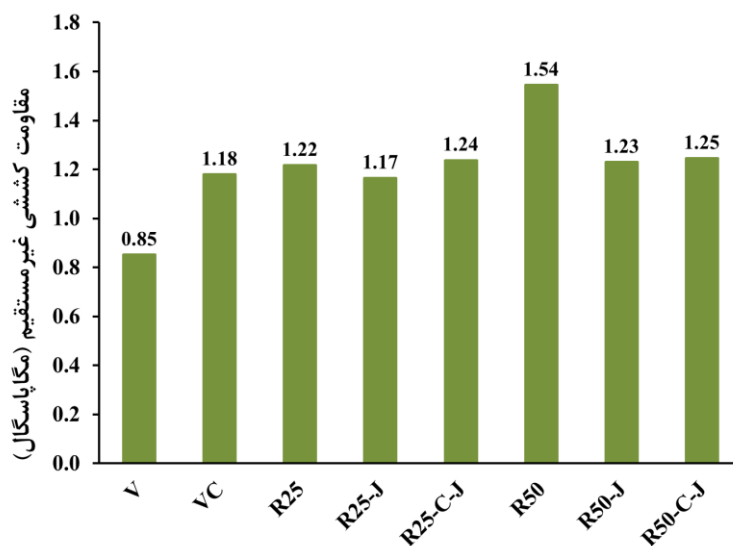
²- Fracture Toughness

¹- Fracture Energy

آسفالتی است. زیرا درصد قیر پیرشده موجود در مخلوط حاوی ۵۰٪ تراشه آسفالتی نسبت به مخلوط حاوی ۲۵٪ تراشه آسفالتی بیشتر بوده که با افزودن عامل جوان‌ساز، خصوصیات آن به قیر پایه نزدیک شده است. همچنین، با افزودن پودر لاستیک، بهبود مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها مشاهده می‌گردد. میزان پودر لاستیک در نمونه‌های حاوی ۵۰٪ تراشه آسفالتی از مخلوط‌های حاوی ۲۵٪ تراشه آسفالتی کمتر می‌باشد، زیرا قیر جدید افزوده شده کمتر است. در نتیجه در نمونه‌های حاوی ۲۵٪ تراشه آسفالتی نسبت به نمونه‌های حاوی ۵۰٪ تراشه آسفالتی، با افزودن پودر لاستیک، افزایش بیشتر مقاومت کششی غیرمستقیم مورد انتظار بوده است.

آسفالتی، از مقدار قیر خالص کاسته شده و به‌جای آن قیر پیرشده جایگزین شده است. بنابراین، افزایش سختی مخلوط مورد انتظار بوده که در نتایج شکل ۸ مشاهده می‌گردد. با افزایش درصد تراشه آسفالتی، میزان استقامت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها افزایش یافته، که قابل‌انتظار بوده است. توجه به این نکته ضروری است که افزایش استقامت کششی غیرمستقیم برای نمونه‌های حاوی تراشه آسفالتی بدون جوان‌ساز، لزوماً به معنای بهبود عملکرد آن‌ها نمی‌باشد.

با افزودن جوان‌ساز، کاهش استقامت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی حاصل شده است. این میزان کاهش سختی در مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۵۰٪ تراشه آسفالتی، بیش از نمونه‌های حاوی ۲۵٪ تراشه



شکل ۸. نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم نمونه‌های مختلف

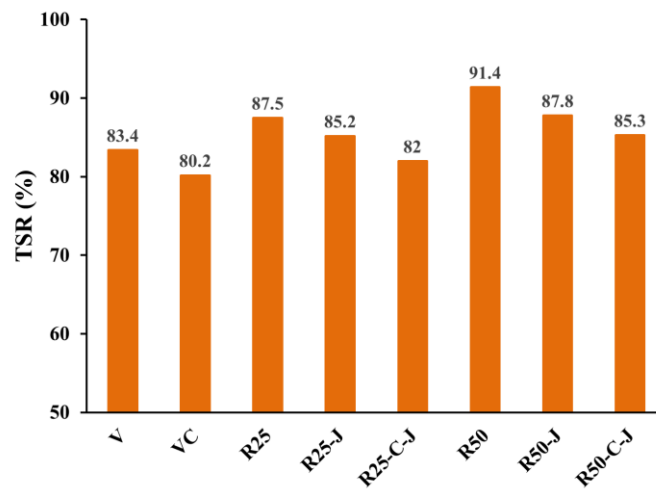
آسفالتی نسبت داد. با توجه به اینکه در مخلوط‌های حاوی ۲۵٪ تراشه آسفالتی، ۰/۲ درصد افزایش درصد قیر کل (شامل قیر پیرشده و جدید) و در مخلوط‌های حاوی ۵۰٪ تراشه آسفالتی، ۰/۴ درصد افزایش قیر کل محاسبه گردیده است، حساسیت رطوبتی در این نمونه‌ها با بهبود همراه بوده است. با افزودن پودر لاستیک و همچنین ترکیب پودر لاستیک و جوان‌ساز، حساسیت رطوبتی

۲-۳. حساسیت رطوبتی

شکل ۹، نرخ مقاومت کششی را برای نمونه‌های مختلف مورد استفاده در این پژوهش نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، افزودن تراشه آسفالتی باعث بهبود حساسیت رطوبتی شده است. علت بهبود حساسیت رطوبتی در اثر افزودن تراشه آسفالتی را می‌توان به طرح اختلاط جدید و به‌دست آوردن قیر بهینه برای مخلوط‌های حاوی تراشه

نتایج باشد. به صورت کلی، حساسیت رطوبتی هیچیک از ترکیبات ارائه شده کمتر از ۸۰٪ مشاهده نشده است.

کاهش پیدا کرده است. استفاده از فیلر حاوی پودر لاستیک و همچنین جوانساز مورد استفاده می تواند از دلایل این

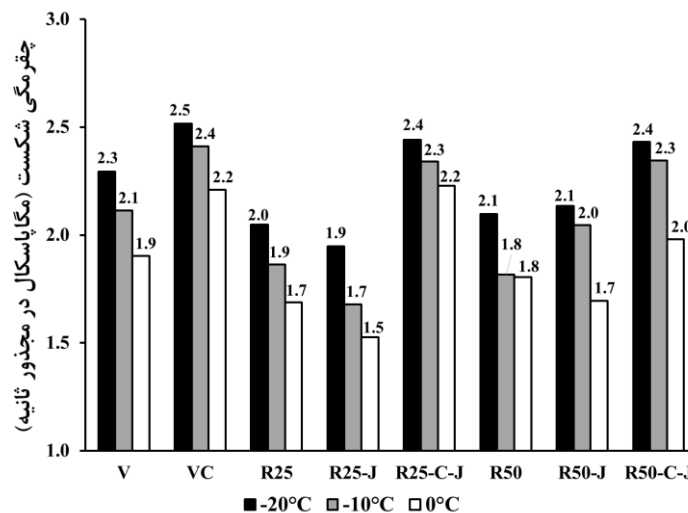


شکل ۹. نتایج حساسیت رطوبتی نمونه های مختلف

چقرمگی در دماهای صفر، ۱۰- و ۲۰- درجه سلسیوس را نشان می دهد. افزودن پودر لاستیک، برای نمونه شاهد و نمونه های حاوی تراشه، باعث افزایش چقرمگی شده است. کاهش دما، به صورت کلی باعث افزایش شاخص چقرمگی می شود. در دماهای کمتر، به دلیل کاهش دما و نزدیک شدن خواص نمونه های آسفالتی به حالت الاستیک، انتظار می رود نتایج چقرمگی با قدرت بیشتری قابل استناد باشد.

۳-۳. آزمایش خمش نیم استوانه در دمای کم

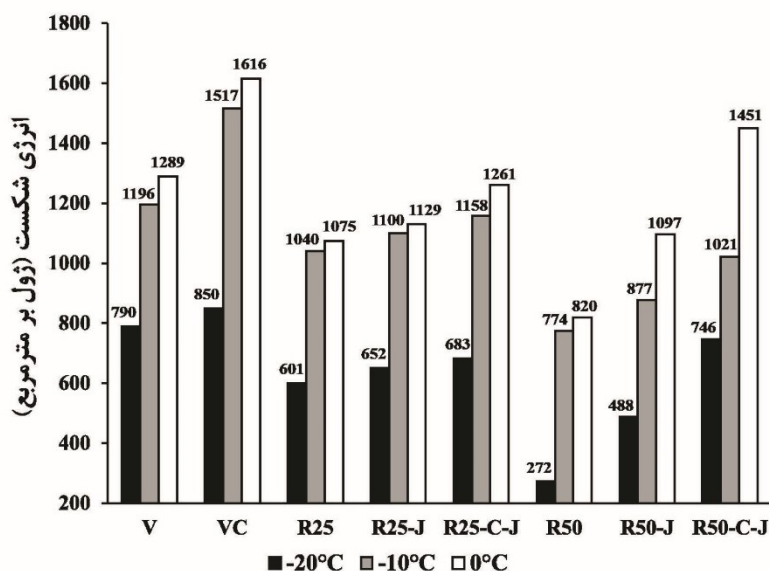
در آزمایش خمش نیم استوانه در دمای کم، پارامترهای اصلی خروجی شامل شاخص چقرمگی (KI) و انرژی شکست (G) می باشد. با کاهش دما، مخلوط آسفالتی از خواص ویسکوالاستیک به حالت الاستیک تغییر وضعیت می دهد. شاخص چقرمگی بر مبنای روابط الاستیک می باشد و رابطه مستقیم با بیشینه بار قابل تحمل نمونه ها در انجام آزمایش خمش نیم استوانه دارد. شکل ۱۰، نتایج



شکل ۱۰. نتایج چقرمگی در آزمایش خمش نیم استوانه در دمای صفر، ۱۰- و ۲۰- درجه سلسیوس

آسفالتی، به مقدار ۱۰۷۵ ژول بر متر مربع کاهش یافته است و سپس در مخلوط حاوی ۰.۵٪ تراشه آسفالتی، برابر ۸۲۰ ژول بر متر مربع شده است. همان گونه که مورد انتظار بود، با افزودن تراشه آسفالتی، مقاومت مخلوط در برابر رشد ترک در دمای کم کاهش یافت. همچنین، با افزودن عامل جوان ساز در مخلوط های حاوی ۰.۲۵٪ و ۰.۵٪ تراشه آسفالتی، افزایش مقدار انرژی شکست مشاهده می شود؛ زیرا بخشی از خواص قیر پیر شده با جوان ساز اصلاح گردیده است. همچنین، با افزودن پودر لاستیک و جوان ساز به نمونه های بازیافتی، مقدار انرژی شکست افزایش پیدا کرده است که نشان دهنده بهبود خواص مخلوط در برابر رشد ترک می باشد. به عنوان مثال، در دمای ۲۰- درجه سلسیوس، با افزودن جوان ساز در نمونه حاوی ۰.۲۵٪ تراشه، مقدار انرژی شکست از ۶۰۱ ژول بر متر مربع با اندکی افزایش به مقدار ۶۵۲ ژول بر متر مربع و با افزودن پودر لاستیک، به مقدار ۶۸۳ ژول بر متر مربع افزایش داشته است.

با افزودن جوان ساز به نمونه های حاوی تراشه آسفالت، انتظار بهبود شرایط عملکردی مورد انتظار است؛ در صورتی که شاخص چقرمگی در نمونه حاوی ۰.۲۵ درصد تراشه آسفالتی با کاهش همراه شده است. شاخص دیگری که در این قسمت از پژوهش مورد بررسی قرار گرفته، شاخص انرژی شکست است. شاخص انرژی شکست به دلیل آنکه به صورت هم زمان دو شاخص (میزان بارگذاری و میزان تغییر شکل) را در نظر می گیرد، نسبت به شاخص چقرمگی که فقط حداکثر بار وارد شده را در نظر می گیرد، بهتر می تواند نتایج را نشان دهد. شکل ۱۱، نتایج انرژی شکست در دمای صفر، ۱۰- و ۲۰- درجه سلسیوس را نشان می دهد. مطابق نتایج، با افزودن تراشه آسفالتی به نمونه شاهد و همچنین افزایش درصد تراشه، شاخص انرژی شکست کاهش پیدا کرده است. به عنوان مثال، در نمونه شاهد، در دمای صفر درجه سلسیوس، مقدار انرژی شکست برابر ۱۲۸۹ ژول بر متر مربع به دست آمده است که در مخلوط حاوی ۰.۲۵٪ تراشه



شکل ۱۱. نتایج انرژی شکست در آزمایش خمش نیم استوانه در دمای صفر، ۱۰- و ۲۰- درجه سلسیوس

ژول بر متر مربع شده است که کاهش قابل توجهی نسبت به نمونه اولیه در همین دما دارد. با افزودن جوان ساز و

با افزایش درصد تراشه آسفالتی به میزان ۰.۵٪ در دمای ۲۰- درجه سلسیوس، مقدار انرژی شکست عدد ۲۷۲

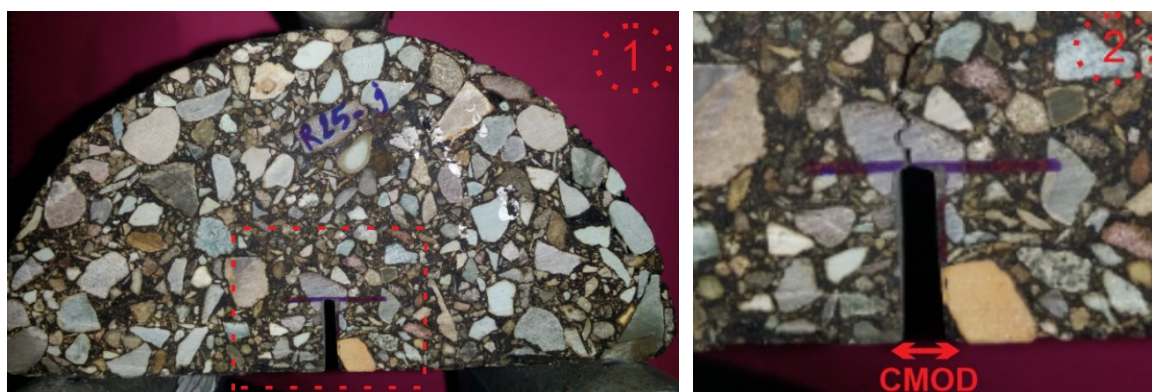
کم مخلوط‌های آسفالتی (تا ۲۰- درجه سلسیوس) در مقابل شاخص چقرمگی شکست دارد.

۳-۴. بازشدگی دهانه ترک

به منظور محاسبه بازشدگی دهانه ترک^۱ (CMOD)، در طول آزمایش از نمونه‌ها فیلم برداری شده است. با استفاده از نرم‌افزار پردازش تصویر GOM Correlate، بازشدگی دهانه ترک در انتهای آزمایش اندازه‌گیری شده است. به این منظور، فیلم برداری صورت گرفته، به تصاویر با فواصل زمانی نیم ثانیه تبدیل شده و به کمک نرم‌افزار تحلیل شده است. چگونگی اندازه‌گیری بازشدگی دهانه ترک، در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در شکل ۱۳، میزان بازشدگی دهانه ترک برای نمونه‌های آزمایش شده در دماهای صفر، ۱۰- و ۲۰- درجه سلسیوس ارائه شده است. از نتایج شکل ۱۳ مشخص است که با کاهش دمای آزمایش، میزان بازشدگی دهانه ترک کاهش پیدا کرده است که نشان‌دهنده ترد شدن نمونه‌ها می‌باشد. همچنین، به صورت کلی، نتایج نشان می‌دهد که افزودن تراشه آسفالتی باعث ترد شدن نمونه‌ها و کاهش بازشدگی دهانه ترک می‌گردد. افزودن جوان‌ساز باعث افزایش بازشدگی دهانه ترک و افزایش شکل‌پذیری نمونه‌ها در دماهای یکسان می‌شود.

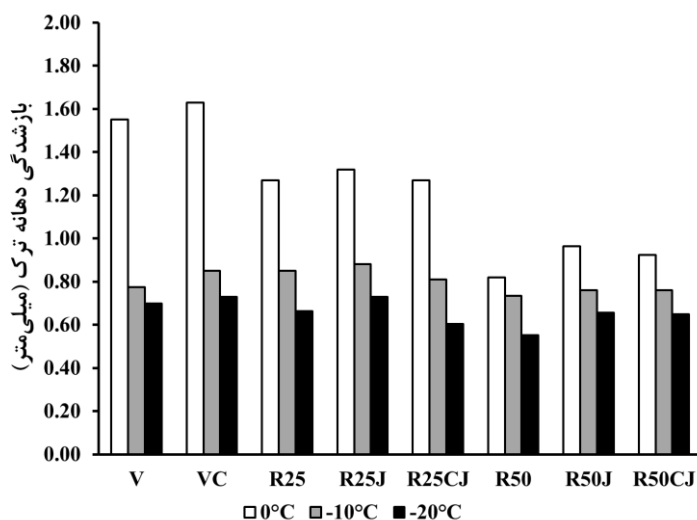
سپس پودر لاستیک، شاخص انرژی شکست به ترتیب با افزایش نسبتاً زیادی به مقدار ۴۸۸ و ۷۶۴ ژول بر متر مربع رسیده است که به مقدار نمونه شاهد نزدیک شده است. این بهبود نسبتاً زیاد به این دلیل است که در نمونه‌های حاوی ۵۰٪ تراشه، میزان قیر پیرشده بیشتری بازسازی شده است و عملکرد مخلوط در برابر ترک خوردگی دمای کم را بهبود داده است. همچنین، کاهش دما باعث کاهش مقدار انرژی شکست گردیده است؛ زیرا با کاهش دما، بار حداکثر افزایش می‌یابد. اما میزان تغییر شکل به مقدار زیادی کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه رشد ترک در آن‌ها با انرژی کمتری صورت می‌پذیرد.

به طور کلی، نتایج به دست آمده از آزمایش‌های خمش نیم‌استوانه در دماهای متفاوت نشانگر این موضوع می‌باشد که شاخص چقرمگی شکست و انرژی شکست در ترکیب جدید پیشنهاد شده، افزایش پیدا کرده است. در نتیجه ترکیب پیشنهاد شده در برابر ترک‌های دمای کم، مقاومت بهتری از نمونه‌های بازیافتی معمولی دارند و حتی قابل مقایسه با مخلوط‌های اولیه می‌باشند. همچنین، شاخص انرژی شکست به دلیل بررسی هم‌زمان میزان بارگذاری وارد شده و تغییر شکل ایجاد شده در نمونه‌ها، قابلیت بهتری در تمیز دادن خصوصیات شکست دمای



شکل ۱۲. روش محاسبه میزان بازشدگی ترک در آزمایش خمش دیسک نیم‌استوانه با استفاده از نرم‌افزار GOM

1- Crack mouth opening displacement



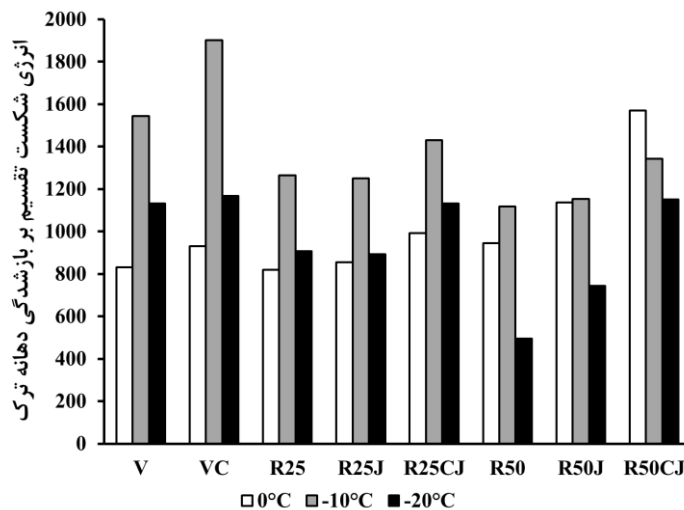
شکل ۱۳. نتایج بازشدگی دهانه ترک

۳-۵. بررسی توأم انرژی شکست و بازشدگی

دهانه ترک

انرژی شکست، معیاری مناسب جهت بررسی مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر شکست می‌باشد. هرچه این شاخص بیشتر باشد، نشان‌دهنده افزایش انرژی جهت رشد ترک می‌باشد. همچنین، میزان بازشدگی دهانه ترک معیاری مناسب جهت بررسی میزان خرابی در آزمایش خمش نیم‌استوانه می‌باشد. در نتیجه، در دمای یکسان، هرچه میزان انرژی شکست بیشتر و بازشدگی دهانه ترک کمتر باشد، عملکرد مخلوط آسفالتی بهتر خواهد بود. بنابراین، بررسی هم‌زمان میزان انرژی شکست و بازشدگی دهانه ترک، درک بهتری را از عملکرد نمونه‌ها به دست خواهد داد (زیاری و همکاران، ۲۰۱۹). شکل ۱۴، شاخص انرژی شکست - بازشدگی دهانه ترک (انرژی شکست تقسیم بر میزان بازشدگی دهانه ترک) را نشان می‌دهد. این شاخص می‌تواند معیار مناسبی جهت بررسی نمونه‌ها در دمای یکسان باشد. در دمای یکسان،

هرچه میزان انرژی شکست افزایش پیدا کند و یا میزان بازشدگی دهانه ترک کاهش پیدا کند، عملکرد نمونه‌ها در برابر رشد ترک، بهتر خواهد بود. شکل ۱۴ نشان می‌دهد که با افزودن پودر لاستیک به نمونه‌های شاهد، شاخص انرژی تقسیم بر بازشدگی دهانه ترک، افزایش قابل توجهی در هر سه دمای آزمایش داشته که قابل انتظار بوده است. همچنین، کاهش این شاخص در نمونه‌های حاوی ۲۵ و ۵۰ درصد تراشه آسفالتی نسبت به نمونه شاهد مشهود می‌باشد. افزودن جوان‌ساز به نمونه‌های حاوی تراشه باعث بهبود این شاخص شده است. همچنین، در ترکیب نمونه‌های حاوی تراشه به همراه پودر لاستیک و جوان‌ساز، بهبود این شاخص نسبت به نمونه‌های بدون پودر لاستیک بیشتر بوده است. به‌طور کلی، نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که این شاخص، قابلیت مناسبی جهت بررسی و مقایسه عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در برابر ترک‌خوردگی و خرابی دارد.



شکل ۱۴. انرژی شکست- بازشدگی دهانه ترک برای دماهای صفر، ۱۰- و ۲۰- درجه سلسیوس

۴. نتیجه گیری

مخلوط آسفالتی مرتبط گردد که این افزایش سختی

با افزایش درصد تراشه آسفالتی ارتباط دارد.

- افزودن عامل جوانساز سایکلوژن در درصد بهینه یافت شده در پژوهش (۱۰ درصد وزنی قیر موجود در تراشه)، با توجه به قابلیت بهبود خواص قیر پیرشده موجود در تراشه آسفالتی، مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر گسترش ترک در دمای کم را بهبود داده است.

- به کارگیری قیر اصلاح شده با پودر لاستیک در مخلوط های آسفالتی حاوی تراشه آسفالت و جوانساز سایکلوژن منجر به بهبود عملکرد مخلوط به دست آمده در برابر ترک خوردگی در دمای کم می گردد. لازم به ذکر است که ترکیب پیشنهادشده در این پژوهش می تواند مخلوط آسفالتی حاوی ۵۰ درصد تراشه آسفالتی با عملکردی نزدیک به مخلوط آسفالتی معمولی در برابر ترک خوردگی ایجاد کند.

- نتایج آزمون های SCB در دمای صفر، ۱۰- و ۲۰- درجه سلسیوس مؤید این نتیجه گیری است که آزمون SCB بر پایه مکانیک شکست قابلیت ارزیابی ترک خوردگی دمای کم مخلوط آسفالتی را دارا می باشد. علاوه بر این، نتایج نشان داد که شاخص

در این پژوهش، به بررسی خواص ترک خوردگی مخلوط های آسفالتی حاوی تراشه آسفالتی به همراه عامل جوانساز سایکلوژن و پودر لاستیک پرداخته شد. همچنین، در هنگام آزمایش، میزان بازشدگی دهانه ترک اندازه گیری شد. نتایج به دست آمده در این پژوهش نشان داد که می توان با افزودنی پیشنهاد شده در مخلوط های حاوی تراشه آسفالتی، ترکیب های نسبتاً جدیدی را ارائه نمود که مقاومت مناسبی در برابر ترک خوردگی داشته باشند. همچنین، مصرف مواد اولیه و به سبب آن هزینه تولید را نسبت به مخلوط آسفالتی معمولی کاهش داد. از نتایج به دست آمده می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- تراشه آسفالتی منجر به افزایش درصد قیر بهینه مخلوط آسفالتی، با توجه به عدم تغییر شرایط طرح اختلاط، می گردد.

- جایگزینی بخشی از مخلوط آسفالتی با تراشه آسفالتی، منجر به افزایش استقامت کششی غیرمستقیم در دمای میانی (۲۵ درجه سلسیوس) و نیز کاهش انرژی شکست مخلوط آسفالتی در دماهای کم (صفر، ۱۰- و ۲۰- درجه سلسیوس) می گردد. علت آن می تواند به نقش تراشه آسفالتی در افزایش سختی

- انرژی شکست در مقایسه با شاخص چقرمگی، قابلیت بیشتری در تمیز دادن مقاومت نمونه‌های آسفالتی در برابر ترک خوردگی را دارد. لازم به ذکر است که با کاهش دما و نزدیک تر شدن رفتار مخلوط آسفالتی به رفتار الاستیک، شاخص چقرمگی نیز در تفکیک خصوصیات شکست عملکرد بهتری دارد.
- مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۲۵ درصد و ۵۰ درصد تراشه آسفالتی، به همراه مواد افزودنی به کاررفته در این پژوهش، قابلیت استفاده به عنوان جایگزین مخلوط آسفالتی پایه با عملکردی مشابه در جهت کاهش هزینه‌ها و حفظ محیط زیست را دارا می‌باشند.
 - نتایج بررسی بازشدگی نهایی دهانه ترک نشان می‌دهد که کاهش دما و همچنین افزایش استفاده از تراشه باعث کاهش بازشدگی دهانه ترک شده است و در نتیجه افزایش تردشدگی نمونه‌های مخلوط آسفالتی را نشان می‌دهد.
 - شاخص ترکیبی انرژی شکست - بازشدگی دهانه ترک می‌تواند به عنوان معیار مناسبی جهت بررسی تأثیر تراشه آسفالتی و افزودنی‌های جوان‌ساز و پودر لاستیک در نمونه‌های مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار گیرد.
 - با توجه به شاخص انرژی شکست - بازشدگی دهانه ترک، ترکیب معرفی شده تراشه آسفالتی (تا ۵۰٪) به همراه جوان‌ساز و پودر لاستیک، می‌تواند باعث بهبود عملکرد نمونه مخلوط آسفالتی در برابر ترک خوردگی در دماهای کم شود، حتی به عملکرد نمونه شاهد نزدیک شود و در مواردی نیز عملکرد بهتری داشته باشد.

۵. مراجع

- AASHTO T283. 2007. "Standard method of test for resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage". American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO TP105. 2013. "Standard method of test for determining the fracture energy of asphalt mixtures using the semicircular bend geometry (SCB)(p. 14)". American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Al-Qadi, I. L., Qazi, A. and Carpenter, S. H. 2012. "Impact of high RAP content on structural and performance properties of asphalt mixtures". Research Report FHWA-ICT-12-002.
- Ali, A. W., Mehta, Y. A., Nolan, A., Purdy, C. and Bennert, T. 2016. "Investigation of the impacts of aging and RAP percentages on effectiveness of asphalt binder rejuvenators". Constr. Build. Mater., 110: 211-217. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.013>
- Ameli, A., Babagoli, R. and Aghapour, M. 2016. "Laboratory evaluation of the effect of reclaimed asphalt pavement on rutting performance of rubberized asphalt mixtures". Petrol. Sci. Technol., 34(5): 449-453.
- Artamendi, I., Phillips, P. and Allen, B. 2009. "Workability of bituminous mixtures incorporating reclaimed asphalt". Sixth International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control (MAIREPAV6), International Society for Maintenance and Rehabilitation of Transportation Infrastructure, Transportation Research Board.
- ASTM C702. 2018. "Standard practice for reducing samples of aggregate to testing size". American Society for Testing Materials. <https://doi.org/10.1520/C0702>
- ASTM D2172. 2011. "Standard test methods for quantitative extraction of bitumen from bituminous paving mixtures". American Society for Testing and Materials. <https://doi.org/10.1520/D2172-11.2>
- ASTM D6307. 2016. "Standard test method for asphalt content of asphalt mixture by ignition method". American Society for Testing Materials.
- ASTM D6931. 2007. "Standard test method for indirect tensile (IDT) strength of bituminous mixtures". American Society for Testing Materials. <https://doi.org/10.1520/D6931-12.2>
- Baghaee Moghaddam, T. and Baaj, H. 2016. "The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: A systematic review". Constr. Build. Mater., 114: 805-816.
- Behnood, A. 2019. "Application of rejuvenators to improve the rheological and mechanical properties of asphalt binders and mixtures: A review". J. Clean. Prod., 231: 171-182. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro>

.2019.05.209

- Behroozikhah, A., Morafa, S. H. and Aflaki, S. 2017. "Investigation of fatigue cracks on RAP mixtures containing Sasobit and crumb rubber based on fracture energy". *Constr. Build. Mater.*, 141: 526-532. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.011>
- Bonicelli, A., Calvi, P., Martinez-Arguelles, G., Fuentes, L. and Giustozzi, F. 2017. "Experimental study on the use of rejuvenators and plastomeric polymers for improving durability of high RAP content asphalt mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 155: 37-44. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.013>
- Cavalli, M. C., Zaumanis, M., Mazza, E., Partl, M. N. and Poulikakos, L. D. 2018. "Aging effect on rheology and cracking behaviour of reclaimed binder with bio-based rejuvenators". *J. Clean. Prod.*, 189: 88-97.
- Chen, X. and Solaimanian, M. 2019. "Evaluating fracture properties of crumb rubber modified asphalt mixes". *Int. J. Pavement Res. Technol.*, 12: 407-415. <https://doi.org/10.1007/s42947-019-0048-6>
- Cominsky, R. J., Huber, G. A., Kennedy, T. W. and Anderson, M. 1994. "The superpave mix design manual for new construction and overlays". SHRP-A-407, Strategic Highway Research Program, Washington, DC.
- Epps, A., Fawaz Kaseer, M., Arámbula-Mercado, E., Baja, A., Garcia Cucalon, L., Yin, F., Chowdhury, A., Epps, J., Glover, C., Hajj, Y., E., Morian, N., Sias Daniel, J., Oshone, M., Rahbar-Rastegar, R., Ogbo, C. and King, G. 2020. "Evaluating the effects of recycling agents on asphalt mixtures with high RAS and RAP binder ratios". NCHRP Research Report 927. <https://doi.org/10.17226/25749>
- Girimath, S., Singh, D., Manthos, E. and Mampearachchi, W. K. 2018. "Effects of reclaimed asphalt binder on rheological properties and cohesion energy of crumb rubber modified binder". *Innov. Infrastruct. Solut.*, 3: 57. <https://doi.org/10.1007/s41062-018-0164-1>
- Haghshenas, H., Nabizadeh, H., Kim, Y. R. and Santosh, K. 2016. "Research on high-rap asphalt mixtures with rejuvenators and WMA additives". Nebraska Department of Roads Research Report, Report SPR-P1(15) M016.
- He, G. P. and Wong, W. G. 2008. "Effects of moisture on strength and permanent deformation of foamed asphalt mix incorporating RAP materials". *Constr. Build. Mater.*, 22(1): 30-40.
- He, H., Zhang, E., Fatokoun, S. and Shan, L. 2018. "Effect of the softer binder on the performance of repeated RAP binder". *Constr. Build. Mater.*, 178: 280-287.
- Jahanbakhsh, H., Karimi, M. M., Moghadas Nejad, F. and Jahangiri, B. 2016. "Viscoelastic-based approach to evaluate low temperature performance of asphalt binders". *Constr. Build. Mater.*, 128: 384-398. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.073>
- Jahanbakhsh, H., Karimi, M. M., Naseri, H. and Moghadas Nejad, F. 2019. "Sustainable asphalt concrete containing high reclaimed asphalt pavements and recycling agents: Performance assessment, cost analysis, and environmental impact". *J. Clean. Prod.*, 244: 118837. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118837>
- Kocak, S. 2016. "Interaction between recycled tire rubber, polymers and high amount of reclaimed asphalt pavements". PhD Dissertation, Michigan State University.
- Kriz, P., Grant, D. L., Veloza, B. A., Gale, M. J., Blahey, A. G., Brownie, J. H., Shirts, R. D. and Maccarrone, S. 2014. "Blending and diffusion of reclaimed asphalt pavement and virgin asphalt binders". *Road Mater. Pavement Des.*, 15(Sup1): 78-112.
- Liang, M., Ren, S., Fan, W., Xin, X., Shi, J. and Luo, H. 2017. "Rheological property and stability of polymer modified asphalt: Effect of various vinyl-acetate structures in EVA copolymers". *Constr. Build. Mater.*, 137: 367-380.
- Lu, D. X., Bui, H. H. and Saleh, M. 2021. "Effects of specimen size and loading conditions on the fracture behaviour of asphalt concretes in the SCB test". *Eng. Fract. Mech.*, 242: 107452. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107452>
- Ma, Y., Zheng, K., Ding, Y., Polaczyk, P., Jiang, X. and Huang, B. 2022. "Binder availability and blending efficiency of reclaimed asphalt: A state-of-the-art review". *Constr. Build. Mater.*, 357: 129334.
- Mangiafico, S., Sauzéat, C., Di Benedetto, H., Pouget, S., Olard, F. and Planque, L. 2017. "Complex modulus and fatigue performances of bituminous mixtures with reclaimed asphalt pavement and a recycling agent of vegetable origin". *Road Mater. Pavement Des.*, 18(2): 315-330.
- Mazzoni, G., Bocci, E. and Canestrari, F. 2018. "Influence of rejuvenators on bitumen ageing in hot recycled asphalt mixtures". *J. Traffic Transport. Eng.*, 5(3): 157-168.
- Reyes-Ortiz, O., Berardinelli, E., Alvarez, A. E., Carvajal-Muñoz, Js. and Fuentes, L. G. 2012. "Evaluation of hot mix asphalt mixtures with replacement of aggregates by reclaimed asphalt pavement (RAP) material". *Proc. Soc. Behav. Sci.*, 53: 379-388.
- Saha, G. and Biligiri, K. P. 2016. "Fracture properties of asphalt mixtures using semi-circular bending test: A state-of-the-art review and future research". *Constr. Build. Mater.*, 105: 103-112. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.046>
- Shu, X. and Huang, B. 2014. "Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: An

- overview". *Constr. Build. Mater., Part B*, 67: 217-224. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.027>
- Tabatabaee, H. A. and Kurth, T. L. 2017. "Analytical investigation of the impact of a novel bio-based recycling agent on the colloidal stability of aged bitumen". *Road Mater. Pavement Des.*, 18: 131-140.
- Tang, S. 2014. "Evaluate the fracture and fatigue resistances of hot mix asphalt containing high percentage reclaimed asphalt pavement (RAP) materials at low and intermediate temperatures". PhD Dissertation, Iowa State University, Ames, Iowa, USA.
- Tran, N. H., Taylor, A. and Willis, R. 2012. "Effect of rejuvenator on performance properties of HMA mixtures with high RAP and RAS contents". NCAT Report, 5-12.
- Valdés, G., Pérez-Jiménez, F., Miró, R., Martínez, A. and Botella, R. 2011. "Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP)". *Constr. Build. Mater.*, 25(3): 1289-1297.
- Yan, Y., Roque, R., Cocconcelli, C., Bekoe, M. and Lopp, G. 2017. "Evaluation of cracking performance for polymer-modified asphalt mixtures with high RAP content". *Road Mater. Pavement Des.*, 18(Sup1): 450-470.
- Yildirim, Y., Solaimanian, M. and Kennedy, T. W. 2000. "Mixing and compaction temperatures for hot mix asphalt concrete". University of Texas at Austin, Center for Transportation Research.
- Zani, L., Giustozzi, F. and Harvey, J. 2017. "Effect of storage stability on chemical and rheological properties of polymer-modified asphalt binders for road pavement construction". *Constr. Build. Mater.*, 145: 326-335.
- Zaumanis, M., Mallick, R. and Frank, R. 2013. "Evaluation of rejuvenator's effectiveness with conventional mix testing for 100% reclaimed asphalt pavement mixtures". *Transport. Res. Record.*, 2370(1). <https://doi.org/10.3141/2370-03>
- Zaumanis, M., Mallick, R. B. and Frank, R. 2015. "Evaluation of different recycling agents for restoring aged asphalt binder and performance of 100% recycled asphalt". *Mater. Struct.*, 48(8): 2475-2488.
- Zaumanis, M., Boesiger, L., Kunz, B., Cavalli, M. C. and Poulidakos, L. 2019. "Determining optimum rejuvenator addition location in asphalt production plant". *Constr. Build. Mater.*, 198: 368-378.
- Ziari, H., Moniri, A., Bahri, P. and Saghafi, Y. 2019a. "Evaluation of performance properties of 50% recycled asphalt mixtures using three types of rejuvenators". *Petrol. Sci. Technol.*, <https://doi.org/10.1080/10916466.2018.1550505>
- Ziari, H., Moniri, A., Bahri, P. and Saghafi, Y. 2019b. "The effect of rejuvenators on the aging resistance of recycled asphalt mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 224: 217-224. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.181>
- Ziari, M. A., Hajikarimi, P., Kheirati Kazerooni, A. and Moghadas Nejad, F. 2019c. "Investigation of fracture and crack propagation characteristics of asphalt mixtures modified with polyphosphoric acid based on semi-circular bending (SCB) test". *J. Transport. Infrastruct. Eng.*, 5(4): 13-31. <https://doi.org/10.22075/jtie.2019.18304.1405>
- Ziari, H., Bananezhad, S., Bananezhad, A. and Ziari, M. A. 2022. "Immediate and long-term characteristics of recycling agents in the restoration of chemical properties of aged asphalt binder". *J. Mater. Civ. Eng.*, 34(12): 4022318.