

تعیین مشخصات مکانیک شکست مخلوط‌های آسفالتی گرم (WMA) در دماهای کم بر پایه نتایج آزمایش SCB

امیر کاووسی*، استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
سیدمحسن متولی‌زاده، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه
تربیت مدرس، تهران

Email: kavussia@modares.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۱۴ - پذیرش: ۱۳۹۸/۰۵/۲۴

چکیده

مخلوط‌های آسفالتی گرم (WMA) به عنوان یکی از روش‌های رایج تولید آسفالت در صنعت روسازی مورد توجه قرار گرفته‌اند. استفاده از این نوع مخلوط مزایای متعددی، از جمله منافع اقتصادی و زیست‌محیطی، دارد. از سوی دیگر، از جمله نگرانی‌های عمده‌ای که در رابطه با عملکرد مخلوط‌های آسفالت گرم وجود دارد، خرابی ترک‌های دمای کم می‌باشد. در این پژوهش، آزمایش بارگذاری خمشی نمونه‌های نیم‌دایره‌ای (SCB)، که روشی بر مبنای مشخصات مکانیک شکست می‌باشد، مورد استفاده قرار گرفت تا رفتار این نوع از مخلوط‌های آسفالتی در شرایط دمای کم بررسی و ارزیابی شود. آزمایش بارگذاری خمشی نمونه نیم‌دایره‌ای در سه دمای مختلف در شرایط دمای کم (صفر، ۱۰- و ۲۰- درجه سلسیوس) صورت پذیرفت. نتایج آزمایش شکست نشان داد که مخلوط‌های تولید شده با افزودنی‌های شیمیایی WMA، مقاومت شکست بالایی در مقایسه با مخلوط‌های گرم تولید شده با افزودنی‌های آلی (آرگانیک) و فن‌آوری کف‌گیری دارند. به علاوه، مخلوط WMA کف‌گیری، ضعیف‌ترین عملکرد در شرایط دمای کم را از خود نشان داد. نهایتاً، اینگونه نتیجه‌گیری شد که قضاوت در مورد مقاومت مخلوط‌های آسفالتی گرم در شرایط دمای کم وابستگی شدیدی به نوع فن‌آوری و افزودنی مورد استفاده و همچنین شرایط تولید مخلوط (دمای تهیه، میزان افزودنی مورد استفاده و شرایط آزمایشگاهی) دارد.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالتی، آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای، کف‌گیر، ترک‌های حرارتی

۱. مقدمه

با تکرار بارهای ترافیکی، ریزترک‌ها انتشار یافته و ترک‌های بزرگ‌تر را تشکیل می‌دهند (میرسیار، ۲۰۱۷). در تحقیقات پیشین، مشخصات قیر و درصد آن، کاربرد مصالح بازیافتی مانند تراشه‌های آسفالتی و همچنین فن‌آوری مورد استفاده برای تولید آسفالت گرم به عنوان شاخص‌های تأثیرگذار بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی WMA در شرایط دمای کم معرفی شده‌اند (کثیر و همکاران، ۲۰۱۸). از این رو، ارزیابی رفتار عملکرد دمای

ترک‌های حرارتی یکی از رایج‌ترین خرابی‌های روسازی‌های آسفالتی می‌باشند (فالچتو و همکاران، ۲۰۱۸؛ میرسیار، ۲۰۱۷). این نوع خرابی، عملکرد سازه‌ای و کیفی روسازی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (فالچتو و همکاران، ۲۰۱۸). به طور کلی، ریزترک‌ها تحت تأثیر شرایط مختلف آب‌وهوایی و تردد بارهای ترافیکی ایجاد می‌شوند.

کم مخلوط‌های آسفالتی گرم تولید شده با فن‌آوری‌های مختلف نقش بسیار تأثیرگذاری در تحلیل و پیش‌بینی عملکرد روسازی دارد.

مخلوط‌های آسفالتی را می‌توان از نظر دمای اختلاط و مصرف انرژی به چهار دسته کلی آسفالت سرد^۱، آسفالت نیمه‌گرم^۲، آسفالت گرم^۳ و آسفالت داغ^۴ تقسیم‌بندی نمود. مخلوط‌های آسفالتی گرم (WMA) به عنوان یکی از نوین‌ترین مخلوط‌ها در صنعت روسازی، در دمایی در بازه ۱۴۰ - ۱۱۰ درجه سلسیوس تولید می‌شوند. با توجه به نگرانی‌های موجود در رابطه با مصرف سوخت فسیلی از جانب سازمان‌های دوست‌دار محیط‌زیست و همچنین با توجه به افزایش قیمت سوخت در سطح جهان، فن-آوری‌های فوق‌الذکر با استقبال قابل توجهی از جانب مهندسان و متخصصان صنعت روسازی مواجه شدند. با این حال، در رابطه با هر یک از روش‌های تولید مخلوط-های آسفالتی نگرانی‌هایی وجود دارد. از آن جمله، در خصوص آسفالت‌هایی نظیر آسفالت سرد می‌توان به عدم پوشش‌دهی مناسب سنگدانه‌ها، درصد فضای خالی زیاد، زمان بسیار طولانی برای عمل‌آوری و آماده‌سازی پیش از اجازه عبور ترافیک و کاهش عملکرد بلندمدت این مخلوط‌ها اشاره نمود. به‌علاوه، معضلاتی نظیر ناکافی بودن پوشش سنگدانه‌ها و کاهش کارایی به دلیل احتمال وجود رطوبت در سنگدانه‌های مخلوط‌های آسفالت نیمه-گرم گزارش شده است. از این رو، مخلوط آسفالت گرم (WMA) به عنوان گزینه‌ای که عملکردی مابین مخلوط-های نیمه‌گرم و داغ دارد معرفی گردید. پژوهشگران، روش‌های مختلفی برای تولید این نوع مخلوط آسفالتی پیشنهاد نموده‌اند که می‌توان آنها را در سه دسته کلی تقسیم‌بندی نمود: مخلوط تولید شده به روش کف‌قیر، مخلوط‌های تولید شده با افزودنی‌های آرگاریک و مخلوط‌های آسفالتی گرم تولید شده با استفاده از افزودنی‌های شیمیایی. از این بین، آسفالت گرم کف‌قیری را می‌توان با استفاده از روش‌های افزودن آب به طور مستقیم و یا استفاده از افزودنی‌های حاوی ذرات آب به

قیر داغ تولید نمود (کاووسی و هاشمیان، ۲۰۱۳). افزودنی‌های آلی که موادی با خاصیت مومی می‌باشند، به طور عمده از هیدروکربن‌های پارافینی تشکیل می‌شوند. افزودنی‌های آلی منجر به کاهش قابل توجه ویسکوزیته قیر در دماهای بالاتر از دمای ذوب افزودنی مومی می‌شود. از رایج‌ترین انواع این خانواده از افزودنی‌ها می‌توان به Sasobit، Asphaltan A و Sonnewarmix اشاره نمود (هیل و همکاران، ۲۰۱۲). افزودنی‌های شیمیایی دسته دیگری می‌باشند که در تولید مخلوط WMA مورد استفاده قرار می‌گیرند. این خانواده از افزودنی‌ها، با مشخصاتی مرکب از خاصیت ایجاد بار سطحی^۵، بهبود پوشش‌دهی، کارایی مخلوط و تراکم‌پذیری، عملکرد مخلوط آسفالتی را تحت تأثیر قرار می‌دهند (شیواکومار و سورشا، ۲۰۱۸). نکته حائز اهمیت در این زمینه ماهیت ساختاری و عملکردی این نوع افزودنی‌ها می‌باشد که عملکردی با خاصیت ضدعریان‌شدگی دارند. Evotherm، Iterlow T و Zycotherm را می‌توان به عنوان نمونه‌هایی از این خانواده نام برد (هیل و همکاران، ۲۰۱۲). نتایج ارائه شده در پژوهش‌های پیشین نشان داده که عملکرد مخلوط‌های تولید شده با فن‌آوری‌های مختلف آسفالت WMA با یکدیگر متفاوت می‌باشد. هیل و همکاران (۲۰۱۲) در پژوهش خود نتیجه گرفتند که به طور کلی نمی‌توان در رابطه با عملکرد مخلوط‌های آسفالتی گرم در مقایسه با مخلوط آسفالتی داغ قضاوت دقیق و کاملی ارائه داد. زیرا متناسب با فن‌آوری تولید، شرایط تولید مخلوط و همچنین نحوه عمل‌آوری مخلوط، عملکرد آن نیز متفاوت خواهد بود. از این رو، مشخصات مکانیکی مخلوط‌های WMA، رتبه‌بندی عملکردی آنها و جایگاه آنها نسبت به مخلوط‌های داغ رایج به عنوان یکی از نقاط ابهام باقی مانده است.

مکانیک شکست به عنوان یک ابزار توانمند برای ارزیابی رفتار ترک‌خوردگی مواد مختلف پیشنهاد شده است (رهبر رستگار، ۲۰۱۷). این روش برای ارزیابی

۱- Cold Mix Asphalt

۲- Half-Warm Mix Asphalt

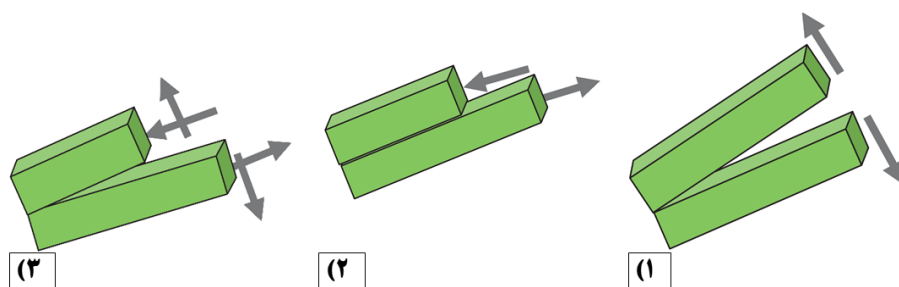
۳- Warm Mix Asphalt (WMA)

۴- Hot Mix Asphalt

۵- Surfactant

ترک‌های حرارتی مخلوط‌های آسفالتی معرفی نمود. به طور کلی، سه حالت کلی شکست در مخلوط‌های آسفالتی رخ می‌دهد که با استفاده از آزمایش‌های مکانیک شکست می‌توان آنها را ارزیابی نمود (شکل ۱). نمونه‌های SCB با توجه به شرایط هندسی قادر به شبیه‌سازی شکست در دو حالت بازشدگی و برش و همچنین ترکیب این دو حالت می‌باشند. تغییرات دمایی موجب ایجاد تنش‌های کششی حرارتی در مخلوط‌های آسفالتی می‌شود. این نوع از ترک‌ها که تحت اثر کشش رخ می‌دهد منجر به وقوع شکست حالت ۱ می‌شود. به علاوه، عبور ترافیک نیز متناسب با موقعیت قرارگیری چرخ‌های وسایل نقلیه منجر به شکست نمونه در حالت برش (حالت ۲) و ترکیب این دو (حالت ۳) می‌شود.

عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در برابر ترک‌های حرارتی به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است (ژو و همکاران، ۲۰۱۷). از این رو، آزمایش‌های متعددی بر پایه مکانیک شکست به منظور ارزیابی رفتار ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی پیشنهاد شده‌اند. از آن جمله، می‌توان به آزمایش‌های نمونه دیسک‌شکل کششی^۱، نمونه نیم‌دایره‌ای خمشی^۲ و نمونه تیر خمشی درزدار^۳ اشاره نمود (رهبر رستگار، ۲۰۱۷). ژو و همکاران (۲۰۱۷) نتیجه گرفتند که ضریب تغییرات نمونه‌های SCB و DCT به طور معمول کمتر از ۱۵٪ می‌باشد. به علاوه، آزمایش SCB را با توجه به خصوصیات از قبیل سهولت، تکرارپذیری و حساسیت به پارامترهای مخلوط، می‌توان به عنوان یک روش رضایت‌بخش برای ارزیابی خرابی



شکل ۱. حالت‌های مختلف شکست مخلوط آسفالتی تحت بار متحرک: حالت ۱ - شکست در شرایط بازشدگی، حالت ۲ - شکست در شرایط برش و حالت ۳ - ترکیب حالت‌های ۱ و ۲ (علیها و همکاران، ۲۰۱۶)

شماره ۱ تحت بارگذاری خمشی سه‌نقطه‌ای قرار گرفته و رفتار آنها مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲. پیشینه تئوریک تحلیل نتایج به روش مکانیک شکست

ضریب شدت تنش و انرژی شکست را می‌توان به عنوان ابزارهای ارزیابی مشخصات مکانیک شکست مواد مختلف معرفی نمود. ضریب شدت تنش که بر پایه تئوری مکانیک شکست الاستیک خطی^۴ تعریف می‌شود در شرایط خاصی که بتوان رفتار آسفالت را الاستیک فرض نمود، قابل استفاده می‌باشد. از سوی دیگر، انرژی شکست

هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی مقاومت مخلوط‌های WMA تولید شده با فن‌آوری‌های مختلف در برابر خرابی ترک‌خوردگی حرارتی در شرایط دمایی کم می‌باشد. از این رو، انواع مختلف مخلوط‌های WMA مانند: WMA تولید شده با افزودنی‌های آرگانیک، شیمیایی و فن‌آوری کف‌گیر برای ارزیابی حساسیت دمایی این نوع مخلوط‌ها و مقایسه آنها با مخلوط آسفالت داغ متداول (HMA) مورد آزمایش قرار گرفتند. از آنجایی که ترک‌های حرارتی منجر به ایجاد تنش کششی در مخلوط آسفالتی می‌شود، نمونه‌های مورد نظر در حالت شکست

۱- Disk-Shaped Compact Tension (DCT)

۲- Semi-Circular Bending (SCB)

۳- Single Edge Notch Beam (SENB)

۴- Linear Elastic Fracture Mechanic (LEFM)

که در آن، K_I ضریب شدت تنش $(N/mm^{3/2})$ ، Y_I شاخص شکل، σ تنش در نوک ترک (N/mm^2) و a طول ترک (mm) می‌باشد.

برای تعیین مقدار حدی ضریب شدت تنش (K_{IC})، مقدار σ باید با σ_{max} جایگذاری شود. پژوهشگران پیشین، روش المان محدود را به عنوان روشی قابل اعتماد به منظور تعیین شاخص Y_I برای هندسه‌های مختلف نمونه‌های آزمایشگاهی پیشنهاد نموده‌اند.

۲-۲. انرژی شکست

انرژی شکست به عنوان پارامتری غیر وابسته به تئوری LEFM معرفی شده است که مقدار آن معادل انرژی مورد نیاز برای تشکیل یک واحد سطح شکست در مواد می‌باشد (ژو و همکاران، ۲۰۱۷؛ سوم و همکاران، ۲۰۱۸). انرژی شکست توسط کار شکست (W_f) و مساحت سطح شکست (A_{lig}) تعیین می‌شود (رابطه ۲). در این رابطه، مساحت سطح شکست، با ضخامت نمونه و مقطع شکست تعریف می‌شود.

$$G_f = \frac{W_f}{A_{lig}} \quad (2)$$

۳. برنامه آزمایشگاهی

از آنجایی که در این تحقیق، انواع مختلف روش‌های تولید مخلوط آسفالتی گرم (WMA) مورد کاربرد و ارزیابی قرار گرفته است، لذا، در این بخش، مشخصات فیزیکی و شیمیایی مصالح سنگی و قیر مورد استفاده به همراه روش‌های استفاده شده در فرایند تولید مخلوط‌های WMA شرح داده شده است.

۳-۱. مواد و مصالح

سنگدانه‌های معدنی شکسته شده از مصالح رودخانه‌ای واقع در جنوب شرق تهران برای استفاده در این تحقیق تهیه گردید. برای تعیین اجزای مواد تشکیل‌دهنده و شناخت ماهیت آن‌ها، آزمایش XRF^۲ انجام شد که نتایج آن در جدول ۱ آورده شده است. نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که نزدیک به ۶۰٪ مشتقات مصالح سنگی مورد

پارامتری غیروابسته به این تئوری بوده و برای ارزیابی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در شرایط دمایی و بارگذاری مختلف (صرف نظر از رفتار الاستیک و پلاستیک مخلوط-های آسفالتی) قابل استفاده است. در ادامه، هر یک از این پارامترها به طور مختصر شرح داده شده‌اند.

۲-۱. ضریب شدت تنش

ضریب شدت تنش (K) به عنوان یکی از پارامترهای تحلیل رفتار مکانیک شکست مواد تابع تنش وارده به نمونه و مشخصات هندسه آن می‌باشد (سوها و بیلگیری، ۲۰۱۵). از طرفی، این ضریب بر پایه تئوری مکانیک شکست مصالح الاستیک خطی استوار است. در تحقیقات پیشین، این‌گونه نتیجه‌گیری شده که در صورت افت دمای مخلوط آسفالتی به کمتر از دمای عبور شیشه^۱ آن، می‌توان با تقریب رضایت‌بخشی از این تئوری و ضریب‌های وابسته به آن برای تحلیل نتایج و عملکرد مخلوط‌های آسفالتی استفاده نمود (میرسیار، ۲۰۱۷). دمای عبور شیشه به عنوان شاخص تغییر رفتار مصالح از شرایط لاستیکی^۲ یا ویسکوز به حالت شکننده تعریف می‌شود. تغییر حالت مواد به شرایط شیشه‌ای همراه با تغییر ناگهانی مشخصات مکانیکی و ترمودینامیک آنها خواهد بود (کریز و همکاران، ۲۰۰۸).

مقدار بحرانی این ضریب در حالت ۱ بارگذاری که تحت عنوان K_{IC} معرفی می‌گردد، ضریب شدت تنش در زمان شکل‌گیری ترک را نشان می‌دهد. بر اساس رویکرد مکانیک شکست مصالح الاستیک خطی، می‌توان از این مقدار برای ارزیابی مقاومت ترک‌خوردگی مواد مختلف استفاده نمود (سوها و بیلگیری، ۲۰۱۶). اخیراً، تلاش‌های متعددی به منظور ارائه رابطه ریاضی برای محاسبه این ضریب در شرایط حالت ۱ بارگذاری صورت پذیرفته است (سائوما و همکاران، ۱۹۸۹؛ علیها و همکاران، ۲۰۱۶). کلیه این پژوهش‌ها از فرم کلی K_I که ضریب شدت تنش در حالت ۱ بارگذاری می‌باشد، تبعیت می‌نمایند (رابطه ۱):

$$K_I = \sigma \times \sqrt{\pi a} \times Y_I \quad (1)$$

^۱- Glass Transition Temperature

^۲- Rubbery

^۳- X-Ray Fluorescence

قیر و مخلوط‌های آسفالتی دانشگاه تربیت مدرس صورت پذیرفت. براساس پیشنهادهای پژوهش‌های پیشین (مالیک و همکاران، ۲۰۰۸؛ هیل و همکاران، ۲۰۱۲)، ساسوبیت به میزان ۱/۵ درصد وزنی قیر به عنوان اصلاح کننده ارگانیک مورد استفاده قرار گرفت. لازم به ذکر است که پیش از اختلاط قیر و ساسوبیت، این افزودنی به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس به طور کامل ذوب شد و سپس قیر داغ و ساسوبیت مایع توسط همزن مکانیکی برشی با سرعت کم^۲ با یکدیگر مخلوط شدند. با توجه به اینکه Iterlow T یک افزودنی مایع می‌باشد، این افزودنی نیز با قیر داغ توسط همزن با سرعت کم مخلوط شد. میزان Iterlow T استفاده شده برای اصلاح قیر ۰/۳ درصد وزن قیر بر اساس پیشنهاد تولیدکننده بود. از سوی دیگر، درصد قیر بهینه مخلوط آسفالت گرم کف‌قیری بر اساس روش ارائه شده در NCHRP Report 807 (نیوکم، ۲۰۱۶) ۵/۷ درصد وزن مخلوط تعیین گردید. درصد قیر بهینه مخلوط HMA نیز با استفاده از روش طرح اختلاط مارشال معادل ۵/۸ درصد به دست آمد. برای تهیه مخلوط‌های آسفالت گرم حاوی افزودنی‌های شیمیایی و ارگانیک، قیرهای اصلاح شده متناسب با درصد قیر مخلوط HMA استفاده شدند (مقدس‌نژاد و همکاران، ۲۰۱۴).

مشخصات انواع مختلف مخلوط‌های آسفالتی و همچنین شرایط آزمایشگاهی برای ارزیابی مشخصات مکانیک شکست آنها در جدول ۳ آورده شده است.

استفاده در این پژوهش از ترکیبات SiO_2 تشکیل شده است. این نتیجه نشان‌دهنده سهم بالای سیلیس در مصالح انتخاب شده می‌باشد. همچنین، این مصالح در مجاورت دمای ۹۵۰ درجه سلسیوس بیش از ۱۰٪ جرم خود را از دست دادند که نشانگر وجود مواد آلی در ترکیبات آنها می‌باشد. مشخصات فیزیکی مصالح سنگی در جدول ۲ ارائه شده است که مقایسه این نتایج با حدود آیین‌نامه‌ای بیانگر مناسب بودن سنگدانه‌ها جهت تولید مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد. همچنین، دانه‌بندی متراکم مطابق با نمودار دانه‌بندی نمره ۴ ارائه شده در نشریه ۲۳۴ ایران به منظور تولید مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار گرفت. لازم به ذکر است که حداکثر اندازه اسمی سنگدانه‌ها در این دانه‌بندی ۱۹ میلی‌متر بوده و منحنی حد وسط به عنوان معیار تولید مخلوط مورد استفاده قرار گرفت. به‌علاوه، قیر درجه نفوذی ۷۰-۶۰ به عنوان قیر پایه برای تولید مخلوط‌های آسفالتی گرم و داغ (WMA و HMA) استفاده شد.

از آنجایی که هدف این تحقیق ارزیابی عملکرد دمای کم خانواده‌های مختلف مخلوط‌های آسفالتی WMA و مقایسه عملکرد آنها با مخلوط شاهد HMA می‌باشد، لذا ساسوبیت به عنوان افزودنی آلی (ارگانیک) و Iterlow T به عنوان افزودنی شیمیایی استفاده شدند. همچنین، دستگاه آزمایشگاهی تولید کف‌قیر ویرتگن^۱ نیز برای تولید مخلوط WMA کف‌قیری استفاده شد. فرایند تولید کف‌قیر و مخلوط WMA کف‌قیری در آزمایشگاه

جدول ۱. نتایج آزمایش XRF روی مصالح سنگی

درصد	محتویات
۱۰/۴۲	افت وزنی در دمای ۹۵۰ درجه سلسیوس (L.O.I)
۱/۵۰۳	سدیم اکسید (Na_2O)
۱/۴۸۴	منیزیم اکسید (MgO)
۷/۶۴۶	آلومینیوم اکسید (Al_2O_3)
۵۹/۹۴۳	سیلیسیم دی‌اکسید (SiO_2)
۲/۹۵۱	پتاسیم اکسید (K_2O)
۱۳/۳۶۸	کلسیم اکسید (CaO)
۱/۹۸۵	اکسید آهن (Fe_2O_3)
۰/۷	دیگر محتویات

^۱- Wirtgen

^۲- Low-shear mixer

جدول ۲. مشخصات فیزیکی مصالح سنگی

محدوده قابل قبول	نتایج			مشخصه
	فیلر	ریزدانه	درشت دانه	
-	۲/۵۷۳	۲/۴۸۶	۲/۵۲۳	وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
حداقل ۵۰	-	۸۱	-	ارزش ماسه‌ای
-	-	-	۵۰۰	تعداد چرخش
حداکثر ۳۰	-	-	۱۵/۳	ضریب سایش
حداقل ۱۰۰	-	-	۱۰۰	یک وجه
حداقل ۹۰	-	-	۹۳	دو وجه

جدول ۳. خلاصه برنامه آزمایشگاهی

جزئیات			مشخصه	
مخلوط آسفالتی گرم (WMA)				
فن آوری کف‌قیر	افزودنی شیمیایی (Iterlow T)	افزودنی ارگانیک (ساسوبیت)	مخلوط آسفالتی داغ (HMA)	انواع مخلوط‌های مورد ارزیابی
			صفر، ۱۰- و ۲۰-	دمای آزمایش (درجه سلسیوس)
			حالت بازشدگی (مود ۱)	حالت بارگذاری مکانیک شکست

۲-۳. فن آوری کف‌قیر

شده و منجر به افزایش حجم قیر در حدود ۱۵-۵ برابر می‌شود. این روش بر پایه انبساط آب طی فرایند تبخیر می‌باشد. در این روش، افزایش سطح مخصوص قیر منجر به بهبود پوشش‌دهی و کارایی بهتر مخلوط در دماهای کم اختلاط می‌شود (کاووسی و هاشمیان، ۲۰۱۲).
دستگاه Wirtgen WLB-10 که در شکل ۲ نشان داده شده است، برای تولید کف‌قیر مورد استفاده قرار گرفت. در این سیستم، قیر داغ (۱۷۰ درجه سلسیوس) به صورت همزمان با آب سرد و هوای تحت فشار به محفظه انبساط تزریق می‌شود. درصد آب بهینه برای تولید کف‌قیر، متناسب با مشخصات قیر در بازه ۱-۳ درصد وزنی کف‌قیر متغیر می‌باشد. نسبت انبساط^۱ (ER) و نیم‌عمر^۲ (HL) دو پارامتر تجربی هستند که به منظور ارزیابی و بهینه نمودن مشخصات فیزیکی کف‌قیر مورد استفاده قرار می‌گیرند (ایوانسکی و همکاران، ۲۰۱۴؛ پورتیلو و سبون، ۲۰۱۶). ER نسبت افزایش حجم قیر

فن آوری کف‌قیری یکی از روش‌هایی است که در سال‌های اخیر به صورت چشم‌گیری برای تولید مخلوط‌های WMA مورد استفاده قرار گرفته است. هیل و همکاران (۲۰۱۸)، گزارش کردند که ۷۷/۹ درصد از مخلوط‌های WMA تولید شده در سال ۲۰۱۳ در آمریکا با این روش تولید شده‌اند. به طور کلی، دو روش شاخص برای تولید کف‌قیر در صنعت آسفالت پیشنهاد شده است: افزودنی-های حامل آب^۱ و فرایند بر پایه آب^۲ (بناکیست و اندرسون، ۲۰۱۱؛ مَهد حسن و همکاران، ۲۰۱۷). در روش افزودنی‌های حامل آب، از افزودنی‌هایی که حاوی درصد مشخصی آب می‌باشند، استفاده می‌شود. این افزودنی‌ها در مجاروت حرارت، غشای خود را از دست داده و منجر به آزاد شدن آب موجود و ایجاد حباب و افزایش حجم قیر می‌شوند (مَهد حسن و همکاران، ۲۰۱۷). اما، در فرایند بر پایه آب، آب به طور مستقیم به قیر داغ تزریق

^۱- Water-bearing additives

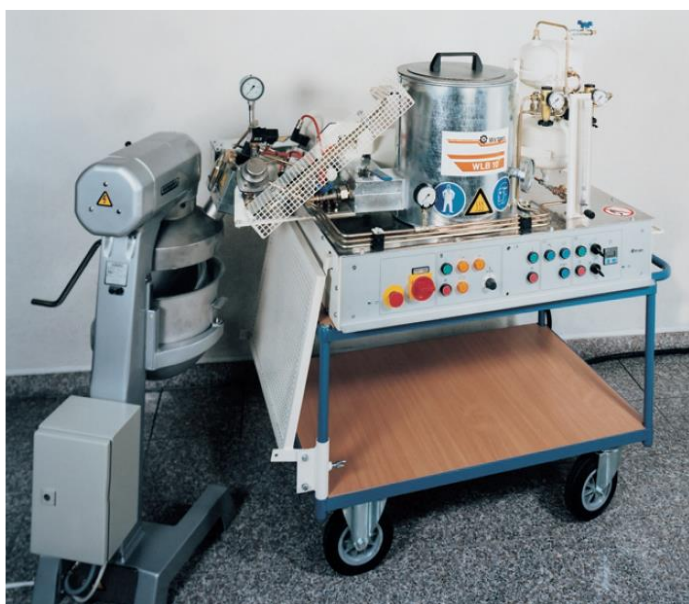
^۲- Water-based processes

^۳- Expansion Ratio (ER)

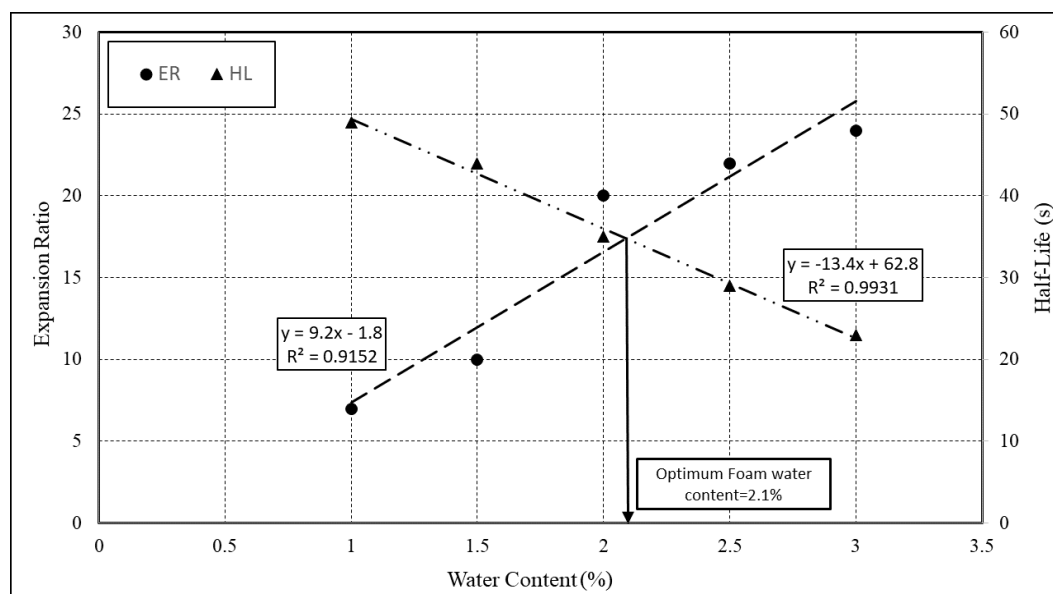
^۴- Half Life (HL)

آب برای تولید کف‌قیر بهینه باید با توجه به تغییرات هر دو شاخص تعیین گردد. از این رو، پارامترهای ER و HL در نموداری مطابق با شکل ۳ بر اساس درصدهای مختلف آب ترسیم می‌شوند. نهایتاً، درصد آب بهینه بر اساس نقطه تقاطع نمودارهای برازش شده بر شاخص‌های ER و HL به دست می‌آید. در این پژوهش، درصد آب بهینه برای تولید کف‌قیر بهینه ۲/۱ درصد وزن قیر تعیین شد. نتایج درصد آب بهینه کف‌قیر در شکل ۳ ارائه شده است.

می‌باشد که از تقسیم حداکثر حجم کف‌قیر به حجم اولیه قیر تعیین می‌شود (ایوانسکی و همکاران، ۲۰۱۴). به-علاوه، نیم‌عمر بیانگر زمان لازم (بر حسب ثانیه) تا ۵۰٪ افت حجمی حباب‌های کف‌قیر نسبت به حجم حداکثر کف‌قیر می‌باشد. لازم به ذکر است که ER و HL به ترتیب شاخص‌هایی برای تشریح ویسکوزیته و استقامت کف‌قیر می‌باشند که در فرایند تعیین طرح بهینه تولید کف‌قیر مورد استفاده قرار می‌گیرند. از آنجایی که افزایش میزان آب منجر به افزایش ER و کاهش HL می‌شود، لذا میزان

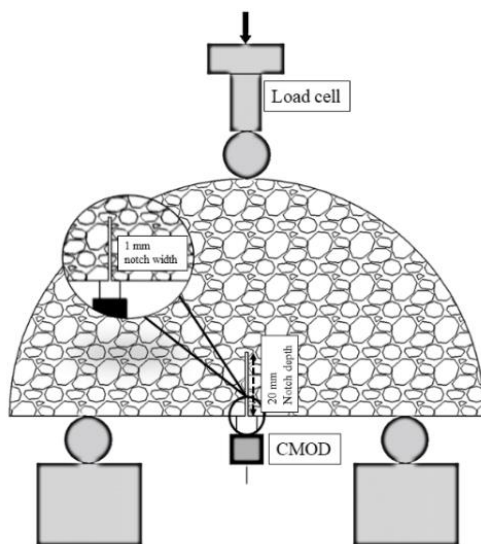


شکل ۲. دستگاه تولید کف‌قیر در مقیاس آزمایشگاهی (Wirtgen, WLB-10)



شکل ۳. نسبت انبساط، نیم‌عمر و درصد آب بهینه کف‌قیر

گرفت. سپس، نمونه‌های SCB در معرض بار مونوتونیک قرار گرفتند. در این پژوهش، به منظور اطمینان از یکسان بودن شرایط بارگذاری نمونه‌های مختلف، نرخ بازشدگی دهانه ترک^۲ با سرعت ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه کنترل و تثبیت شد. به این منظور، از دستگاه UTM-25 آزمایشگاه قیر و مخلوط‌های آسفالتی دانشگاه تربیت مدرس برای اعمال بار و یک کرنش‌سنج برای کنترل نرخ بازشدگی دهانه ترک استفاده شد. نحوه قرارگیری نمونه SCB و کرنش‌سنج و شرایط تکیه‌گاه‌های بارگذاری در شکل ۴ آورده شده است.



شکل ۴. جزئیات قرارگیری نمونه تحت آزمایش SCB

گردد. پیش از انجام آزمایش، نمونه‌های SCB در محفظه کنترل دما برای مدت حداقل ۴ ساعت قرار گرفتند تا از اینکه کلیه نمونه‌ها در شرایط دمایی ثابت قرار دارند اطمینان حاصل شود.

۴. آزمایش بارگذاری خمشی نمونه نیم-دایره‌ای

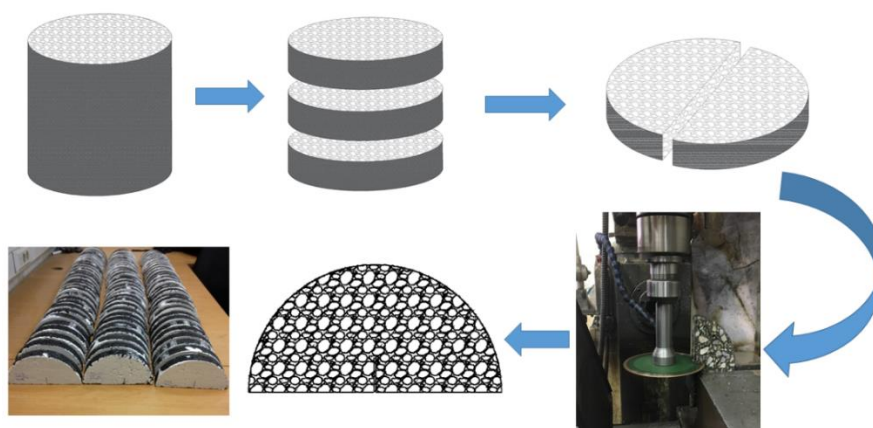
آزمایش بارگذاری خمشی نمونه نیم‌دایره‌ای^۱ (SCB) یکی از تست‌های رایج مکانیک شکست می‌باشد که در آن نمونه نیم‌دایره‌ای ترک‌دار در معرض بارگذاری خمشی سه-نقطه‌ای قرار می‌گیرد (شکل ۴). در این تحقیق، بارگذاری حالت ۱ که در آن نمونه آسفالتی در معرض شکست در شرایط بازشدگی قرار می‌گیرد، با استفاده از تکیه‌گاه‌های متقارن و با لحاظ نمودن نسبت فاصله تکیه‌گاه‌ها به قطر نمونه معادل ۰/۶۶ مورد استفاده قرار



نمونه‌های آسفالتی SCB از استوانه‌های ۶ اینچی با استفاده از دستگاه برش مطابق با آنچه در شکل ۵ نشان داده شده است، به دست آمدند. همچنین، یک ترک به عمق ۲ سانتی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر در مرکز نمونه‌ها ایجاد گردید تا شکست نمونه در شرایط حالت ۱ ارزیابی

۱- Semi-Circular Bending Test (SCB)

۲- Crack Mouth Opening Displacement (CMOD)

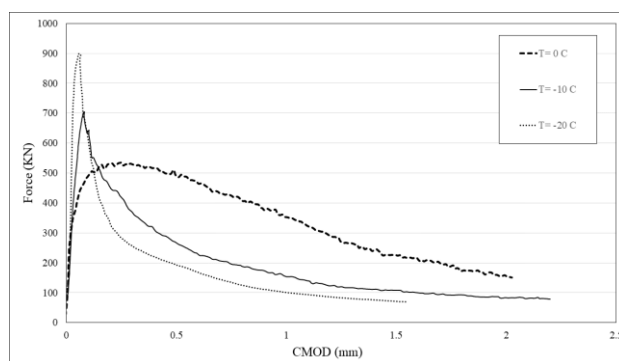


شکل ۵. مراحل آماده‌سازی نمونه‌های SCB

دما در شرایط دمایی کم منجر به افزایش سختی و شکننده شدن نمونه‌ها می‌شود. در این شرایط، نمونه‌ها پس از تحمل تغییر شکل بسیار کمی در مقایسه با نمونه‌هایی که در دماهای بیشتر تحت آزمایش قرار می‌گیرند، شکسته می‌شوند. از طرف دیگر، افزایش دمای آزمایش از ۲۰- تا صفر درجه سلسیوس منجر به شکل‌پذیری بیشتر و کاهش حداکثر بار قابل تحمل می‌شود.

نتایج و تحلیل

نمونه‌ای از نتایج به دست آمده از آزمایش‌های مکانیک شکست در شکل ۶ ارائه شده است که در آن نمودار بار-بازشدگی دهانه ترک^۱ مخلوط آسفالت داغ (HMA) در سه دمای مختلف ارائه شده است. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود، رفتار مکانیک شکست نمونه‌های HMA نسبت به دمای آزمایش بسیار حساس است. افت



شکل ۶. نتایج Load-CMOD مخلوط آسفالتی داغ (HMA) بر اساس آزمایش SCB

شکل نمونه SCB استفاده گردید. رابطه عمومی ضریب شکل (Y_1) بر اساس پارامتر K_I و مشخصات هندسی نمونه SCB در رابطه ۴ ارائه شده است (علیها و همکاران، ۲۰۱۶) که در آن، شعاع نمونه، t و a به ترتیب ضخامت نمونه و طول ترک می‌باشند، P بار اعمالی و S_1 و S_2 فواصل تکیه‌گاه‌ها از مرکز نمونه را نشان می‌دهند و K_I ضریب شدت تنش در حالت ۱ بارگذاری می‌باشد که باید بر اساس نتایج تحلیل عددی نمونه SCB تعیین شود.

۵-۱. بررسی مشخصات مکانیک شکست

در این بخش، نتایج به دست آمده از بارگذاری خمشی نمونه‌های SCB توسط دو شاخص طاقتم خمشی (ضریب شدت تنش) و انرژی شکست مورد تحلیل قرار گرفته است.

۵-۱-۱. ارزیابی طاقتم خمشی

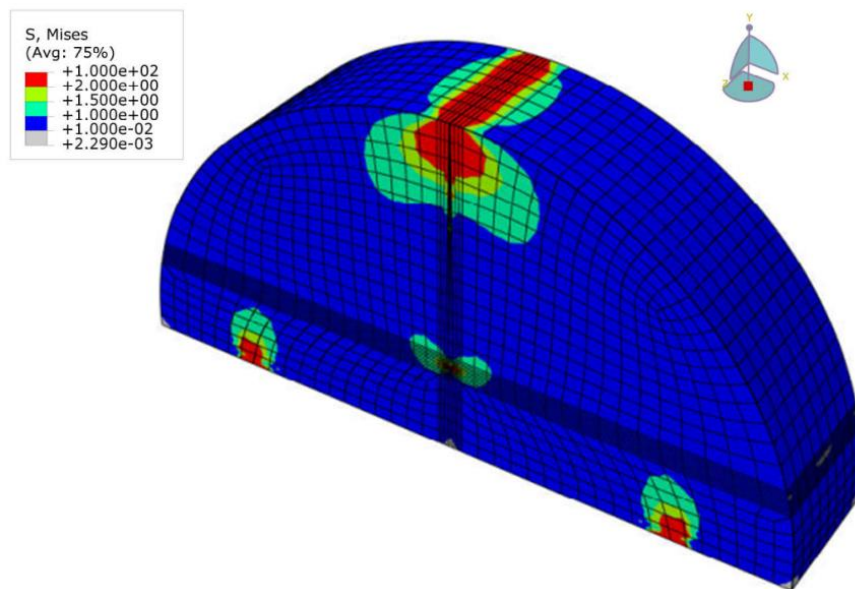
در این پژوهش، نمونه SCB توسط نرم افزار آباکوس مدل‌سازی و تحلیل شد و از نتایج آن برای محاسبه ضریب

^۱- Load-CMOD

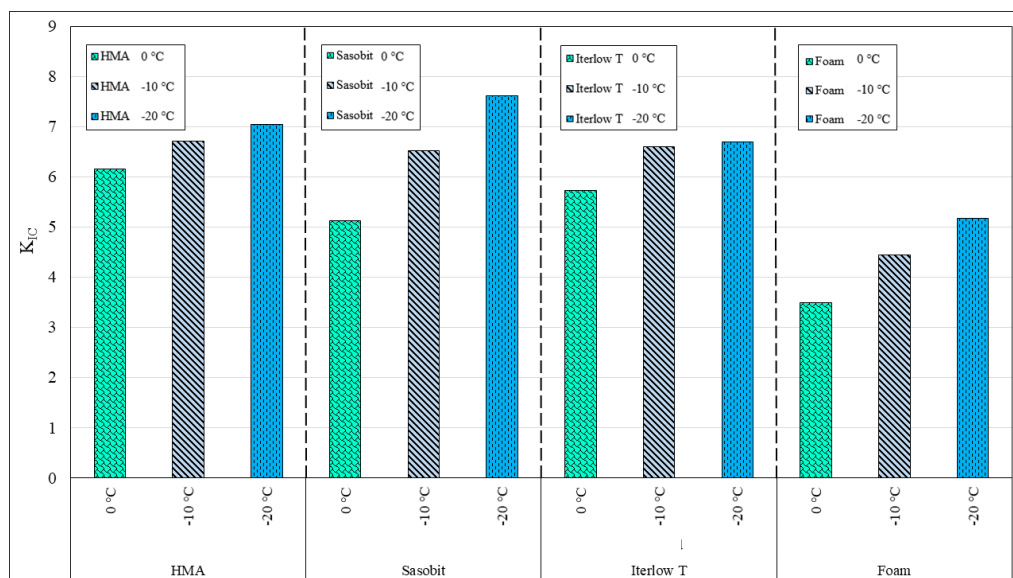
است. لازم به ذکر است که برای معرفی مشخصات مکانیکی مواد در نرم‌افزار آباکوس، مدول یانگ و ضریب پواسون به ترتیب ۱۲۵۰۰ مگاپاسکال و ۰/۳۵ در نظر گرفته شدند (عامری و همکاران، ۲۰۱۱). لازم به ذکر است که مقادیر مدول یانگ و ضریب پواسون استفاده شده در این بخش مربوط به خواص مخلوط‌های آسفالتی در شرایط دمای زیر صفر می‌باشد. نهایتاً، بر اساس نتایج تحلیل عددی، ضریب هندسه نمونه ۴/۰۹۱ به دست آمد. بر این اساس و با استفاده از رابطه ۴، مقادیر ضریب شدت تنش نمونه‌های آزمایش شده محاسبه و در شکل ۸ ارائه شده است.

$$Y_1(\alpha, \frac{a}{R}, \frac{S_1}{R}, \frac{S_2}{R}) = \frac{K_1}{\sqrt{\pi a}} \times \frac{2R_t}{P} \quad (4)$$

دریان و همکاران (۲۰۱۱)، گزارش دادند که پارامترهای نرمال شده نوک ترک مانند Y_1 ، به بار اعمالی، ضخامت نمونه و مشخصات مصالح وابسته نمی‌باشند. از این رو، با مدل‌سازی یک نمونه SCB با شعاع ۷۵ میلی‌متر، طول ترک ۲۰ میلی‌متر و ضخامت ۳۰ میلی‌متر بر اساس هندسه نمونه‌های آزمایشگاهی و اعمال یک بار مونوتونیک مطابق با شرایط بارگذاری آزمایشگاهی، ضریب شکل نمونه تعیین شد. شرایط مش‌بندی و توزیع تنش پس از اعمال بار بر نمونه در شکل ۷ آورده شده



شکل ۷. مدل‌سازی سه‌بعدی نمونه SCB در نرم‌افزار آباکوس برای تعیین ضریب هندسه نمونه



شکل ۸. مقادیر ضریب شدت تنش مخلوط‌های WMA تحت بارگذاری حالت ۱ شکست

این شکل مشاهده می‌شود، صرفنظر از نوع مخلوط، افت دما منجر به کاهش انرژی شکست می‌شود. مرور ادبیات صورت پذیرفته نشان می‌دهد که در تحقیقات پیشین نیز نتایجی مشابه با این مشاهده گزارش شده بود (لی و ماراستینو، ۲۰۱۰؛ ژو و همکاران، ۲۰۱۷). نتایج تحلیل واریانس که توسط نرم‌افزار SPSS صورت پذیرفت نشان می‌دهد که مقادیر انرژی شکست محاسبه شده در این پژوهش در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار می‌باشند (جدول ۴). به علاوه، تفاوت‌های مشاهده شده بین انرژی شکست نمونه‌های مختلف، بیشتر تحت تأثیر متغیرهای آزمایشگاهی (روش تولید مخلوط و دمای آزمایش) می‌باشد و تأثیر خطاهای آزمایشگاهی قابل صرفنظر کردن می‌باشد. همچنین، مدل رگرسیون برای ارزیابی نتایج و سنجش حساسیت انرژی شکست به پارامترهای آزمایشگاهی تولید شد که در رابطه ۵ آورده شده است. در مدل ارائه شده، دمای آزمایش برابر صفر، ۱۰- و ۲۰- درجه سلسیوس می‌باشند. همچنین، هر یک از فن‌آوری‌های تولید آسفالت نیز به ترتیب با کدهای ۱، ۲، ۳ و ۴ به مدل معرفی می‌شوند. لازم به ذکر است، کد شماره ۱ معرف HMA، کد شماره ۲ معرف WMA ساسوبیتی، کد شماره ۳ معرف WMA با افزودنی شیمیایی و کد شماره ۴ معرف WMA کفگیری می‌باشد. ضریب تعیین (R^2) مدل تولید شده ۹۳٪ می‌باشد که بیانگر همبستگی قابل قبول نتایج می‌باشد. همچنین، پارامتر Adjusted R^2 این مدل برابر ۸۷٪ می‌باشد که نشان‌دهنده توانایی این مدل در پیش‌بینی انرژی شکست می‌باشد.

$$G_f = 3.994 + 0.289 \times Tech. + 0.385 \times Temp. + 0.094 \times Tech. \times Temp. \quad (5)$$

نتایج ارائه شده در شکل ۸ نشان می‌دهد که با کاهش دمای آزمایش، ضریب شدت تنش افزایش می‌یابد. به عبارتی، اینگونه می‌توان نتیجه‌گیری نمود که مقاومت نمونه‌های آسفالتی در برابر ترک‌خوردگی تحت تأثیر افت دما افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، با مقایسه عملکرد مخلوط‌های مختلف در دمای ۲۰- درجه سلسیوس، مشاهده می‌شود که مخلوط WMA تولید شده با ساسوبیت بیشترین مقدار K_{IC} را در مقایسه با دیگر مخلوط‌ها نشان می‌دهد. به علاوه، مقادیر ضریب شدت تنش مخلوط‌های HMA و WMA تولید شده با افزودنی‌های شیمیایی نزدیک به یکدیگر می‌باشند. از آنجایی که افزودنی‌های شیمیایی تولید مخلوط‌های WMA خاصیت ضدعریان‌شدگی^۱ دارند، این رویداد قابل پیش‌بینی بود. در مقابل، مخلوط کفگیری کمترین میزان K_{IC} را نشان می‌دهد. این مشاهده نشان‌دهنده حساسیت شدید مخلوط آسفالت گرم کفگیری به افت دما می‌باشد. به طور کلی، اینگونه می‌توان گزارش نمود که مخلوط HMA کمترین حساسیت را به تغییرات دمایی در شرایط دمای کم دارد. همچنین، بر اساس نتایج ضریب شدت تنش مشاهده شد که فن‌آوری افزودنی‌های شیمیایی مخلوط‌هایی با عملکردی مشابه نمونه شاهد ارائه داد. این مشاهدات با نتایج ارائه شده توسط پژوهشگران پیشین (هیل و همکاران، ۲۰۱۲) همراستا می‌باشد.

۲-۱-۵. انرژی شکست

انرژی شکست (G_f) مخلوط‌های آسفالتی ارزیابی شده در این تحقیق در شکل ۹ ارائه شده است. همانگونه که در

جدول ۴. پارامترهای تحلیل واریانس روی نتایج انرژی شکست بر حسب متغیرهای پژوهش

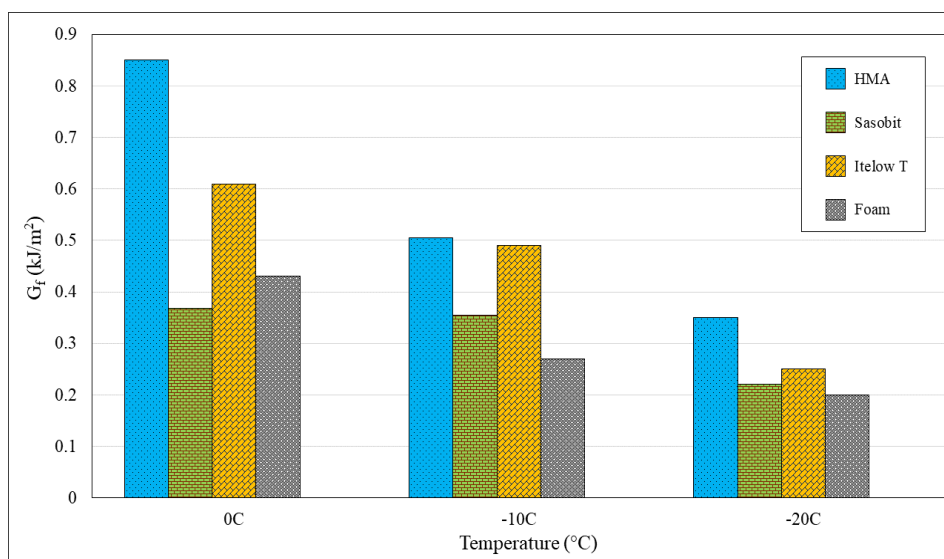
		Sum of squares	df	Mean square	F	Sig.
Temperature	Between Groups	0.849	2	0.425	21.925	0.000
	Within Groups	1.337	69	0.19		
	Total	2.186	71			
Technologies	Between Groups	0.702	3	0.234	10.725	0.000
	Within Groups	1.484	68	0.022		
	Total	2.186	71			

^۱- Anti-Stripping

WMA کفگیری در شرایط دمای کم منجر به آسیب-پذیری و حساسیت شدید آن نسبت به کاهش دما می-شود. از این رو، مخلوط WMA کفگیری ضعیف‌ترین عملکرد را در میان دیگر انواع مخلوط WMA از خود نشان داد. بر خلاف مخلوط‌های WMA تولید شده با کفگیر و ساسوبیت، مخلوط‌های تولید شده با به‌کارگیری افزودنی‌های شیمیایی عملکرد بهتری ارائه دادند. همانگونه که پیش از این نیز بیان شده بود، این مشاهده می‌تواند به واسطه خواص ذاتی ضدعریان شدگی این خانواده از افزودنی‌ها باشد.

انرژی شکست با افت دمای آزمایش کاهش یافت. این روند به دلیل شکننده شدن مخلوط‌های آسفالتی در شرایط دمای کم بوده و جدا از تأثیر نوع مخلوط می‌باشد. در این شرایط، با افت شدید دما، حداکثر بار در لحظه وقوع ترک افزایش می‌یابد که این رویداد به دلیل ترد شدن مخلوط می‌باشد (شکل ۸). اما افت شدید دما و تردشدگی منجر به کاهش قابل توجه در قابلیت اتلاف انرژی^۱ در ناحیه ترک خورده (پساترک‌خوردگی^۲) می-شود. لذا، انرژی شکست مخلوط‌های آسفالتی در شرایط مورد بحث به شکل قابل توجهی کاهش می‌یابد.

انرژی شکست مخلوط‌های WMA در دمای صفر درجه سلسیوس به طور قابل توجهی کمتر از انرژی شکست مخلوط آسفالت داغ (HMA) می‌باشد (شکل ۹). این اختلاف تحت تأثیر افت دما از صفر تا ۲۰- درجه سلسیوس کاهش می‌یابد. نکته مهمی که باید مورد توجه قرار گیرد، حساسیت انرژی شکست به روش تولید مخلوط WMA می‌باشد. در واقع، انرژی شکست به خوبی تأثیر روش تولید مخلوط آسفالتی بر عملکرد دمای کم آن را گزارش می‌نماید. اما، شاخص K_{IC} که در بخش پیشین مورد استفاده قرار گرفت، در این زمینه توانایی کافی را ندارد. نتایج G_f نشان می‌دهد که انرژی شکست مخلوط-های WMA تولید شده با افزودنی‌های شیمیایی در مقایسه با سایر مخلوط‌های WMA بیشتر است. از طرف دیگر، کمترین مقاومت در برابر ترک‌های حرارتی در شرایط دمایی خیلی کم متعلق به مخلوط‌های آسفالت گرم کفگیری می‌باشد. به علاوه، در دمای صفر درجه سلسیوس، حداقل مقدار انرژی شکست مربوط به مخلوط تهیه شده با Sasobit بود. در حالی که با کاهش دمای آزمایش تا ۲۰- درجه سلسیوس، آسیب‌پذیری مخلوط آسفالت کفگیری (WMA-Foam) در برابر خرابی دمای کم افزایش نشان داد. در واقع، رطوبت موجود در مخلوط



شکل ۹. نتایج انرژی شکست مخلوط‌های WMA

^۲- Post-Cracking Zone

^۱- Energy Dissipation

با سایر مخلوط‌های WMA ، مقاومت بیشتری در برابر خرابی ترک‌های حرارتی نشان داد. همچنین، انرژی شکست مخلوط HMA نسبت به مخلوط‌های WMA بیشتر بود.

۵-۲-۲. تأثیر دمای آزمایش

از آنجایی که مخلوط‌های آسفالتی، موادی ویسکو-الاستیک هستند، دما و نرخ بارگذاری می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر رفتار مکانیک شکست آن‌ها داشته باشند. از این رو، در این بخش حساسیت مخلوط‌های آسفالتی مورد بحث نسبت به تغییرات دما در شرایط دمای کم با رویکرد مکانیک شکست مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر اساس نتایج این پژوهش، می‌توان بیان نمود که صرفنظر از تأثیر نوع و روش تولید مخلوط آسفالتی، افت شدید دما در شرایط دمای کم منجر به تردشدگی و شکنندگی شدید مخلوط‌های آسفالتی شده و این پدیده منجر به کاهش قابل توجه انرژی شکست شد. به عنوان مثال، مخلوط‌های HMA و WMA کف‌گیری تحت اثر کاهش دما از دمای صفر به ۲۰- درجه سلسیوس به ترتیب ۵۸٪ و ۵۳٪ افت نشان دادند. از طرف دیگر، با بررسی نتایج K_{1c} مشاهده گردید که مقادیر ضریب شدت تنش متناسب با کاهش دمای آزمایش، افزایش می‌یابند. این مشاهده بیانگر اثر دما بر سخت‌شدگی و کاهش شکل‌پذیری مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد. لذا، اینگونه می‌توان نتیجه‌گیری نمود که با افت دمای آزمایش، مخلوط‌های آسفالتی تردتر شده و مقاومتشان تا لحظه ترک‌خوردگی افزایش می‌یابد. اما، انرژی شکست که بیانگر مقاومت مخلوط در برابر ایجاد و انتشار ترک می‌باشد، با کاهش دما به شدت افت می‌نماید. نتایج این بخش همسو با نتایج پژوهش‌های پیشین می‌باشد.

۶. نتیجه‌گیری

عملکرد مکانیک شکست انواع مختلف مخلوط‌های آسفالت WMA تهیه شده با افزودنی‌های ارگانیک، افزودنی‌های شیمیایی و فن‌آوری کف‌گیر در برابر ترک‌های حرارتی در این پژوهش مورد ارزیابی قرار گرفت. به

۲-۵. ارزیابی تأثیر پارامترهای آزمایشگاهی بر

مقاومت ترک‌خوردگی مخلوط‌های WMA

همانگونه که در بخش‌های پیشین بیان شد، دمای آزمایش و روش تولید مخلوط تأثیر قابل توجهی بر مشخصات مکانیک شکست مخلوط‌های آسفالتی دارد. از آنجایی که اندرکنش دمای آزمایش و فن‌آوری تولید مخلوط نتیجه نهایی ارزیابی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، لذا در این بخش تأثیر هر یک از متغیرهای آزمایشگاهی به تنهایی بحث و بررسی شده است.

۱-۲-۵. تأثیر فن‌آوری تولید مخلوط

نتایج تحلیل واریانس، که پیش از این در جدول ۴ ارائه شده بود، نشان داد که انرژی شکست می‌تواند به طور رضایت‌بخشی برای ارزیابی اثر روش تولید بر رفتار دمای کم مخلوط‌های آسفالتی WMA و HMA مورد استفاده قرار گیرد. نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که مخلوط HMA در مقایسه با مخلوط‌های WMA در برابر ترک‌های حرارتی مقاوم‌تر می‌باشد. همچنین، ارزیابی مخلوط‌های WMA از نظر روش تولید نشان می‌دهد که مخلوط‌های تولید شده با افزودنی‌های شیمیایی، افزودنی ارگانیک و فن‌آوری کف‌گیر به ترتیب در برابر ترک‌های حرارتی مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهند. ضعف مخلوط آسفالت گرم تهیه شده با ساسوبیت در مقایسه با مخلوط آسفالت گرم تولید شده توسط افزودنی شیمیایی به دلیل ساختار مومی ساسوبیت می‌باشد که منجر به شکنندگی شدن مخلوط در دمای بسیار کم می‌شود. تشکیل این ساختار ترد منجر به افزایش شدید حساسیت مخلوط به تغییرات دمایی می‌شود. همچنین، مخلوط WMA کف-گیری در مقایسه با دیگر مخلوط‌های ارزیابی شده، بیشتر مستعد خرابی ترک‌های دمایی می‌باشد. این پدیده به دلیل حضور رطوبت در فرایند تولید کف‌گیر که اثر یخ-زدگی در شرایط دمای کم را افزایش می‌دهد، رخ می‌دهد. به عبارتی، رطوبت محبوس در نمونه کف‌گیری در شرایط دمای بسیار کم یخ‌زده و با افزایش حجم منجر به وقوع و گسترش ریزترک‌ها^۱ در نمونه می‌شود. به طور کلی، مخلوط WMA تولید شده با افزودنی شیمیایی در مقایسه

^۱- Micro cracks

نوع افزودنی، میزان استفاده از افزودنی و روش تهیه مخلوط بستگی دارد.

- نتایج ارزیابی انرژی شکست مخلوط‌های آسفالتی نشان داد که در دماهای ۱۰- و ۲۰- درجه سلسیوس، مخلوط تولید شده توسط فن‌آوری کف‌قیر کمترین مقاومت در برابر ترک‌خوردگی را در مقایسه با دیگر مخلوط‌ها دارا می‌باشد. اما، در دمای صفر درجه سلسیوس، ضعیف‌ترین عملکرد متعلق به مخلوط WMA تولید شده توسط ساسوبیت می‌باشد.

- به طور کلی، مقاومت شکست مخلوط‌های گرم تولید شده توسط افزودنی‌های آلی و فن‌آوری کف‌قیر در شرایط دمای کم به طور قابل توجهی کمتر از مخلوط‌های HMA و WMA تولید شده با افزودنی شیمیایی می‌باشد. این پدیده به دلیل خاصیت ذاتی افزودنی‌های شیمیایی می‌باشد که منجر به بهبود عملکرد مخلوط تولید شده با این فن‌آوری‌ها می‌شوند.

این منظور، مخلوط‌های آسفالتی در دمای زیر صفر و در شرایط حالت ۱ شکست توسط آزمایش بارگذاری خمشی سه‌نقطه‌ای نمونه SCB مورد آزمایش قرار گرفتند. به طور خلاصه، از این پژوهش اینگونه می‌توان نتیجه گرفت که:

- ضریب شدت تنش که بر اساس تئوری LEFM تعریف شده است، با افزایش شکنندگی مصالح (کاهش دمای آزمایش) افزایش چشمگیری پیدا کرد. از این رو، این ضریب قابلیت ارزیابی رفتار مخلوط‌های آسفالتی در شرایط پساترک‌خوردگی را ندارد. از طرف دیگر، انرژی شکست رفتار مخلوط‌های آسفالتی را تا لحظه شکست ارزیابی می‌نماید.

- نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مخلوط HMA در مقایسه با فن‌آوری‌های WMA ارزیابی شده در این تحقیق مقاومت ترک‌خوردگی بیشتری دارد. به علاوه، در بین فن‌آوری‌های WMA، مخلوط تولید شده با افزودنی شیمیایی بیشترین مقاومت را دارا می‌باشد. اما نکته قابل توجه عملکرد مخلوط‌های WMA تولید شده با افزودنی‌های شیمیایی می‌باشد که شدیداً به

۷. مراجع

- Aliha, M. R. M., Bahmani, A. and Akhondi, S. 2016. "Mixed mode fracture toughness testing of PMMA with different three-point bend type specimens". *Eur. J. Mech./ A Solids*, 58: 148-162. doi: 10.1016/j.euromechsol.2016.01.012
- Ameri, M., Mansourian, A., Heidary Khavas, M., Aliha, M. R. M. and Ayatollahi, M. R. 2011. "Cracked asphalt pavement under traffic loading- A 3D finite element analysis". *Eng. Fract. Mech.*, 78(8): 1817-1826. doi: 10.1016/j.engfracmech.2010.12.013
- Bonaquist, R. and Anderson, D. A. 2011. "Investigation of short-term laboratory aging of neat and modified asphalt binders". The National Academies Press, Washington, DC, <https://doi.org/10.17226/14613>.
- Darban, H., Haghpanahi, M. and Assadi, A. 2011. "Determination of crack tip parameters for ASCB specimen under mixed mode loading using finite element method". *Comput. Mater. Sci.*, 50(5): 1667-1674. doi: 10.1016/j.commatsci.2010.12.027.
- Falchetto, A. C., Moon, K. H., Wang, D., Riccardi, C. and Wistuba, M. P. 2018. "Comparison of low-temperature fracture and strength properties of asphalt mixture obtained from IDT and SCB under different testing configurations". *Road Mater. Pavement Design*, 19(3): 591-604. doi: 10.1080/14680629.2018.1418722.
- Hill, B., Behnia, B., Buttlar, W. G. and Reis, H. 2012. "Evaluation of warm mix asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement through mechanical performance tests and an acoustic emission approach". *J. Mater. Civ. Eng.*, 25(12): 1887-1897. doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000757.
- Hill, B., Oldham, D., Behnia, B., Fini, E. H., Buttlar, W. G. and Reis, H. M. 2018. "Evaluation of low temperature viscoelastic properties and fracture behavior of bio-asphalt mixtures". *Int. J. Pavement Eng.*, 19(4): 362-369. doi: 10.1080/10298436.2016.1175563.
- Iwański, M., Chomicz-Kowalska, A. and Mrugała, J. 2014. "Application of the synthetic wax to improve the foamed bitumen parameters used in half-warm bituminous mixtures". The 9th International Conference "Environmental Engineering", 22-23 May, Vilnius, Lithuania. doi: 10.3846/enviro.2014.154.
- Kaseer, F., Yin, F., Arambula-Mercado, E., Martin, A. E., Daniel, J. S. and Salari, S. 2018. "Development of an index to evaluate the cracking potential of asphalt mixtures using the semi-circular bending test". *Constr. Build. Mater.*, 167: 286-298. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.014.
- Kavussi, A. and Hashemian, L. 2012. "Laboratory evaluation of moisture damage and rutting potential of

- WMA foam mixes". *Int. J. Pavement Eng.*, 13(5): 415-423. doi: 10.1080/10298436.2011.597859.
- Kavussi, A. and Hashemian, L. 2013. "Properties of WMA-foam mixes based on major mechanical tests. *J. Civ. Eng. Manage.*, 17(2): 207-216. doi: 10.3846/13923730.2011.576825.
- Kriz, P., Stastna, J. and Zanzotto, L. 2008. "Glass transition and phase stability in asphalt binders". *Road Mater. Pavement Design*, 9: 37-65. doi: 10.1080/14680629.2008.9690158.
- Li, X. J. and Marasteanu, M. O. 2010. "Using semi circular bending test to evaluate low temperature fracture resistance for asphalt concrete". *Exp. Mech.*, 50(7): 867-876. doi: 10.1007/s11340-009-9303-0.
- Mallick, R. B., Kandhal, P. S. and Bradbury, R. L. 2008. "Using warm-mix asphalt technology to incorporate high percentage of reclaimed asphalt pavement material in asphalt mixtures". *Transport. Res. Record: J. Transport. Res. Board*, 2051(1): 71-79. doi: 10.3141/2051-09.
- Mirsayar, M. M. 2017. "On the low temperature mixed mode fracture analysis of asphalt binder- Theories and experiments". *Eng. Fract. Mech.*, 186: 181-194. doi: 10.1016/j.engfracmech.2017.10.010.
- Moghadas Nejad, F., Azarhoosh, A., Hamedi, G. H. and Roshani, H. 2014. "Rutting performance prediction of warm mix asphalt containing reclaimed asphalt pavements". *Road Mater. Pavement Design*, 15(1): 207-219. doi: 10.1080/14680629.2013.868820.
- Mohd Hasan, M. R., You, Z. and Yang, X. 2017. "A comprehensive review of theory, development, and implementation of warm mix asphalt using foaming techniques". *Constr. Build. Mater.*, 152: 115-133. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.135.
- Newcomb, D. E. 2015. "Properties of foamed asphalt for warm mix asphalt applications". NCHRP Report 807, The National Academies Press, Washington, DC. <https://doi.org/10.17226/22145>.
- Portillo, O. and Cebon, D. 2016. "Fracture mechanics of idealised bituminous mixes". *Int. J. Pavement Eng.*, 17(2): 103-122. doi: 10.1080/10298436.2014.925556.
- Rahbar-Rastegar, R. 2017. "Cracking in asphalt pavements: Impact of component properties and aging on fatigue and thermal cracking". University of New Hampshire.
- Saha, G. and Biligiri, K. P. 2015. "Fracture damage evaluation of asphalt mixtures using semi-circular bending test based on fracture energy approach". *Eng. Fract. Mech.*, 142: 154-169. doi: 10.1016/j.engfracmech.2015.06.009.
- Saha, G. and Biligiri, K. P. 2016. "Homothetic behaviour investigation on fracture toughness of asphalt mixtures using semicircular bending test". *Constr. Build. Mater.*, 114: 423-433. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.169.
- Saouma, V. E., Ayari, M. L. and Boggs, H. 1989. "Fracture mechanics of concrete gravity dams". PP. 311-333. *In: Shah, S. P. and Swartz, S. E. (Eds.), Fracture of Concrete and Rock*, Springer, New York. doi: 10.1007/978-1-4612-3578-1_31.
- Shiva Kumar, G. and Suresha, S. N. 2018. "State of the art review on mix design and mechanical properties of warm mix asphalt". *Road Mater. Pavement Design*, 20(7): 1501-1524. doi: 10.1080/14680629.2018.1473284.
- Somé, S. C., Feeser, A. and Pavoine, A. 2018. "Numerical and experimental investigation of mode I cracking of asphalt concrete using semi-circular bending test". *Constr. Build. Mater.* 169: 34-46. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.161.
- Zhu, Y. Dave, E. V., Rahbar-Rastegar, R., Daniel, J. S. and Zofka, A. 2017. "Comprehensive evaluation of low temperature fracture indices for asphalt mixtures". *Road Mater. Pavement Design*, 18(4): 67-490. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1389085>.

تعیین، مشخصات مکانیک شکست مخلوط‌های آسفالت، گرم (WMA) در دماهای کم بر پایه نتایج آزمایش، SCB