

بررسی ترک‌خوردگی حرارتی در مخلوط‌های آسفالتی با روش انرژی آزاد سطحی، مشخصات رئولوژیک دمای کم قیر، آزمایش خمش نیم‌دایره و ویژگی‌های مصالح سنگی

میکائیل ناصری یالقوزآغاچ*، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سلماس
غلامحسین حامدی، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه گیلان، رشت
بابک گلچین، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل
رامین مشک‌آبادی، استادیار، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

Email: Mi.NY1356@iau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۱۸ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۰۲

چکیده

در تحقیقات گذشته، در بررسی رفتار ترک‌های حرارتی در مخلوط‌های آسفالتی، معمولاً خصوصیات قیر و یا رفتار مخلوط آسفالتی مورد توجه قرار گرفته است. در این روش‌ها، به نقش اجزای مختلف مخلوط آسفالتی در وقوع این خرابی‌ها توجه نمی‌شود. استفاده از مفهوم انرژی آزاد سطحی به همراه مشخصات پایه‌ای مواد تشکیل‌دهنده مخلوط آسفالتی می‌تواند در بررسی ترک‌های حرارتی نیز مورد توجه قرار گیرد. در این پژوهش، سعی شده تا نقش خصوصیات پایه‌ای مواد در رخداد این ترک‌ها به همراه پارامترهای انرژی آزاد سطحی بررسی شود. بدین منظور، مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی برای چهار نوع سنگدانه و هشت نوع قیر اندازه‌گیری شده است. همچنین، سختی خزشی قیر به همراه شیب نمودار سختی خزشی از آزمایش رئومتر تیرچه خمشی به دست آمده است. علاوه بر این موارد، ضخامت غشای قیر روی سطح سنگدانه، شاخص سنگدانه و مساحت سطح ویژه سنگدانه‌ها نیز تعیین شده است. به منظور بررسی پتانسیل ترک‌خوردگی حرارتی، از آزمایش خمش نیم‌دایره روی ۳۲ ترکیب مختلف مخلوط آسفالتی در دمای کم استفاده شده است. سپس، از روش‌های آماری برای بررسی ارتباط پارامترهای مذکور با نتایج آزمایش خمش نیم‌دایره استفاده گردیده است. تحلیل‌های آماری نشان می‌دهند که مشخصات پایه‌ای مواد شامل ضخامت غشای قیر روی سطح سنگدانه، شاخص سنگدانه، انرژی آزاد پیوستگی، انرژی آزاد چسبندگی، نسبت مؤلفه بازی به اسیدی انرژی آزاد سطحی و مساحت سطح ویژه سنگدانه تأثیر معنادار و مثبت بر شاخص‌های ترک‌خوردگی در آزمایش خمش نیم‌دایره، شامل انرژی شکست و چقرمگی شکست، دارند.

واژه‌های کلیدی: ترک‌خوردگی حرارتی، انرژی آزاد سطحی، خصوصیات رئولوژیک قیر، آزمایش خمش نیم‌دایره.

۱. مقدمه

یکی از پدیده‌های متداول در خرابی رویه‌های آسفالتی، وقوع ترک‌های حرارتی^۱ یا ترک‌های ناشی از دمای کم^۲ هستند که در آب‌وهوای سرد به وقوع می‌پیوندند. این ترک‌ها باعث تسریع در گسترش خرابی‌های سازه‌ای راه شده و در شرایط آب‌وهوای سرد و یا هنگام نوسان‌های دمای زیاد در طول روز رخ می‌دهند. زمانی که دمای لایه‌ی آسفالتی کاهش پیدا می‌کند، تنش‌های کششی موجب انقباض این لایه می‌گردد. از طرفی، نیروی اصطکاک در مقابل انقباض مقاومت می‌کند. اگر تنش کششی بیشتر از مقاومت کششی آسفالت باشد، ترک‌های حرارتی در رویه آسفالتی ایجاد می‌شود. ترک‌های حرارتی در درجه اول از دمای کم محیط ایجاد می‌گردند. پس از ایجاد ترک حرارتی، آب می‌تواند وارد ترک شده، باعث گسترش ترک و یا از دست رفتن تکیه‌گاه زیرین شود. این امر قابلیت سواری روسازی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. در گذشته، فرض بر این بود که ترک‌های حرارتی فقط مرتبط با مشخصات ماده چسباننده قیری در دمای کم است. در نتیجه، از آزمایش‌های مشخصات قیر در کنترل ترک‌های حرارتی استفاده می‌کردند. در عین حال، پارامترهای مختلفی در دماهای کم بر رفتار مخلوط آسفالتی اثر می‌گذارند. جونگ و وینسون (۱۹۹۴) در گزارش SHRP-A-400، پارامترهای مؤثر بر ترک حرارتی در رویه‌های آسفالتی را به سه گروه مصالح، عوامل محیطی و شکل هندسی سازه روسازی تقسیم کردند. از طرفی، مکانیسم وقوع خرابی‌ها در مخلوط‌های آسفالتی عمدتاً با خصوصیات مواد تشکیل‌دهنده آسفالت در ارتباط هستند.

امروزه، از مفهوم انرژی آزاد سطحی در بررسی انواع دیگری از خرابی‌های رویه‌های آسفالتی مانند خرابی رطوبتی استفاده شده است. شیائو و همکاران (۲۰۲۲) پارامترهای انرژی آزاد سطحی را در بررسی چسبندگی و

پیوستگی در یک سیستم متشکل از قیر و سنگدانه در حضور افزودنی‌های ضدعریان‌شدگی دارای ترکیبات آمین به‌کار بردند. در پژوهشی دیگر، چنگ و همکاران (۲۰۰۳) دو مدل برای شناسایی مکانیسم‌های خرابی رطوبتی پیشنهاد دادند. مدل گسیختگی چسبندگی به منظور آنالیز گسیختگی بین قیر-سنگدانه در حضور آب و مدل گسیختگی پیوستگی به منظور تحلیل گسیختگی در ماستیک پیشنهاد شد که هر دو مکانیسم با پارامترهای انرژی آزاد سطحی قیر-سنگدانه در ارتباط بودند. کرینگوس و همکاران (۲۰۰۸) به بررسی یک روش بر اساس محاسبات انرژی آزاد سطحی در شرایط مرطوب و خشک پرداختند. خروجی این پژوهش یک مدل پیوسته ویسکوالاستوپلاستیک بود که بر اساس خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مواد شکل گرفته است. آوارز و همکاران (۲۰۲۳) از مفهوم انرژی آزاد سطحی در دستیابی به مقدار بهینه افزودنی گرم آسفالتی برای چسبندگی بین قیر با سنگدانه استفاده نمودند. در این پژوهش، خرابی رطوبتی با اندازه‌گیری‌های انرژی آزاد سطحی بررسی شد. بهاسین (۲۰۰۶) با ابزارهای آزمایشگاهی و تحلیل‌های خود، اهمیت پارامترهای مختلف را در مورد خرابی رطوبتی آسفالت تشریح کرد. در این پژوهش، وی نشان داد که انرژی آزاد سطحی به صورت قابل قبولی با نتایج آزمایش‌های دینامیک برای مخلوط‌های آسفالتی ارتباط دارد. در ادامه، مساحت سطوح ویژه سنگدانه‌ها نیز برای محاسبه تأثیر نیروی قفل‌وبست سنگدانه‌ای در مقیاس میکرو به کار رفته است. بهاسین و همکاران (۲۰۰۷) در پژوهشی دیگر، از ترکیب ۱۲ نوع قیر-سنگدانه به منظور بررسی عملکرد آن‌ها در برابر حساسیت رطوبتی استفاده کردند. همچنین، شاخص‌هایی بر اساس مساحت سطح ویژه سنگدانه‌ها و روش انرژی آزاد سطحی برای این نمونه‌ها اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که استفاده از شاخص‌های مبتنی بر

1- Thermal cracking

2- Low temperature cracking

مفاهیم انرژی آزاد سطحی می‌تواند به توسعه مفاهیم مورد استفاده در طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی منجر شود. در پژوهشی، حامدی و مقدس نژاد (۲۰۱۶) به ارائه مدل‌های پیش‌بینی خرابی رطوبتی با مفهوم ترمودینامیک پرداختند. ایشان نشان دادند که انرژی آزاد چسبندگی بین قیر و سنگدانه در شرایط خشک، انرژی آزاد پیوستگی، مساحت سطح ویژه سنگدانه، قابلیت پوشش‌دهی سنگدانه‌ها به وسیله قیر و نیز ضخامت ظاهری غشای قیر روی سطح سنگدانه به صورت مستقیم در وقوع عریان‌شدگی، مخلوط آسفالتی تأثیر دارند. اسماعیلی و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از مقایسه نتایج آزمایش بارگذاری سیکلی در شرایط خشک و مرطوب با مقدار انرژی آزاد پیوستگی، انرژی آزاد چسبندگی، انرژی جداشدگی در حضور آب و پوشش‌پذیری قیر روی سطح سنگدانه و طرح اختلاط، روند عریان‌شدگی و فاکتورهای مؤثر در فازهای مختلف خرابی رطوبتی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش‌های بارگذاری تکراری در شرایط مرطوب و خشک جهت تعیین نسبت مدول سختی نشان دادند که خرابی رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی در دو فاز قبل و بعد از نقطه عریان‌شدگی اولیه با روند کاملاً متفاوت اتفاق می‌افتد.

از طرفی، مفهوم انرژی آزاد سطحی در بررسی ترک‌های خستگی نیز مورد توجه قرار گرفته است. اکبری و مدرس (۲۰۲۰) رابطه بین خستگی مخلوط آسفالتی دارای نانورس و نانوالومینا را با روش انرژی آزاد سطحی به دست آوردند. چنگ (۲۰۰۲) نشان داد که در صورتی که سایر خصوصیات مصالح مشابه باشد، خستگی مخلوط‌های آسفالتی رابطه مستقیمی با انرژی آزاد چسبندگی در سطح تماس قیر و سنگدانه دارد. اُفوری ابرس (۲۰۰۶) ترک‌خوردگی خستگی را به عنوان یکی از اساسی‌ترین خرابی‌هایی که در طول عمر مخلوط آسفالتی رخ می‌دهد، مورد ارزیابی قرار داد. وی از روش

مکانیستیک واسنجی شده با انرژی آزاد سطحی برای تخمین مقاومت در برابر ترک‌خوردگی خستگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با پلیمرهایی با ساختار 'SBS استفاده کرد. در مدل ارائه شده، علاوه بر پارامتر-های انرژی آزاد سطحی، پارامترهای بنیادی مصالح از قبیل کشش غیرمستقیم و پیرشدگی مد نظر قرار گرفت. نتایج پژوهش افوری ابرس نشان داد که روش مکانیستیک واسنجی شده با انرژی آزاد سطحی می‌تواند به عنوان یک روش مناسب برای پیش‌بینی مقدار عمر خستگی در مخلوط‌های آسفالتی حاوی پلیمر استفاده شود. به علاوه، خصوصیات هندسی و بافت سطح سنگدانه‌ها بر میزان چسبندگی بین قیر و سنگدانه و به تبع آن مقاومت خستگی مخلوط‌های آسفالتی تأثیر می‌گذارد. آذرهوش (۲۰۱۸) به مطالعه جامعی روی مفاهیم، اندازه‌گیری و عملکرد انرژی آزاد سطحی بر خرابی خستگی در مخلوط‌های آسفالتی پرداخت. در این پژوهش، تلاش شد تا مدلی برای پیش‌بینی مقدار عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی به وسیله پارامترهای طرح اختلاط و مفاهیم ترمودینامیک در حضور پارامترهای مرتبط با انرژی آزاد سطحی ارائه شود. تحلیل نتایج نشان داد که انرژی آزاد پیوستگی، انرژی آزاد چسبندگی قیر با سنگدانه‌ها، قابلیت پوشش‌دهی سنگدانه‌ها به وسیله قیر، ضخامت ظاهری غشای قیر، شاخص دانه مصالح سنگی و پارامتر خستگی به صورت مستقیم بر مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر خرابی خستگی تأثیر قابل توجه دارند. همچنین، آذرهوش و همکاران (۲۰۱۷) به اندازه‌گیری پارامترهای انرژی آزاد سطحی و ارتباط آن با نتایج آزمایش‌های مکانیکی ترک‌خوردگی خستگی پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که مخلوط‌های آسفالتی با سنگدانه سنگ‌آهک به علت مساحت سطح ویژه بزرگتر و زیاد بودن مقادیر انرژی آزاد چسبندگی، نسبت به نمونه‌های

¹ - Styrene-Butadiene-Styrene

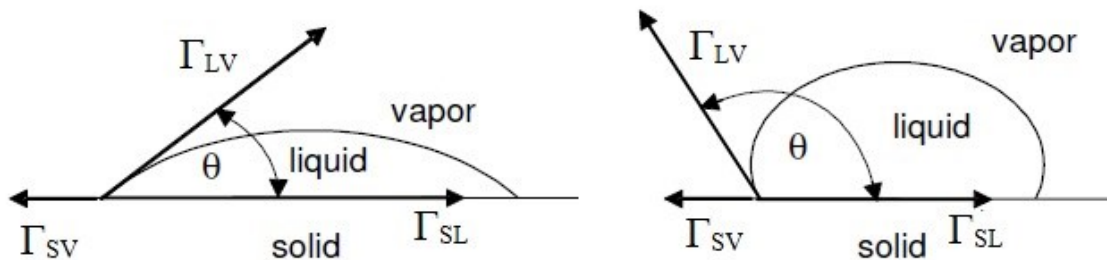
روش استاندارد را برای تعیین مشخصات ترک‌های حرارتی مخلوط‌های آسفالتی بر اساس اندازه‌گیری تنش و کرنش‌های حرارتی بیان کرده است. از طرفی، آزمایش کشش غیرمستقیم و تیرچه خمشی سه‌نقطه‌ای نیز در بعضی از تحقیقات استفاده شده است (یانگ و همکاران، ۲۰۲۲).

۲. تئوری انرژی آزاد سطحی

مخلوط آسفالتی از سنگدانه و قیر تشکیل می‌شود. خرابی‌های این مخلوط شدیداً به پیوستگی و چسبندگی بین این دو ماده ارتباط دارد. چسبندگی و پیوستگی بین این مواد را می‌توان با مفهوم انرژی آزاد سطحی بررسی کرد. انرژی آزاد سطحی یک جسم را می‌توان به مقدار کار لازم برای افزایش یک سطح واحد به سطح همان ماده در شرایط خلأ تعریف کرد. انرژی آزاد چسبندگی، مقدار انرژی مورد نیاز برای ایجاد دو سطح جدید در سطح مشترک دو ماده‌ی در تماس، مثل قیر و سنگدانه، است. مقدار کشش سطحی را می‌توان از مقدار زاویه تماس ناشی از یک قطره روی یک سطح کاملاً صاف و صلب تعیین کرد. تصویر زاویه تماس در شکل ۱ نمایش داده شده است. در این شکل، θ زاویه تماس در سطح مشترک جامد و مایع (SL) است. خط مماس در سطح مشترک مایع و گاز (LV) را نیز می‌توان مشاهده کرد (هفر، ۲۰۰۴).

ساخته‌شده با سنگدانه سیلیسی، عمر خستگی بیشتری دارند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، علی‌رغم پتانسیل زیاد به‌کارگیری روش‌های انرژی آزاد سطحی در شناسایی پتانسیل خرابی مخلوط‌های آسفالتی، هنوز از این مفاهیم در کنار مشخصات مواد و مصالح به‌کار رفته در مخلوط آسفالتی در بررسی ترک‌خوردگی حرارتی مخلوط‌های آسفالتی استفاده نشده است و بیشتر توجه‌ها معطوف به کاربرد مفاهیم تئوری انرژی آزاد سطحی در مورد خرابی‌های ناشی از رطوبت و خستگی بوده است. بر این اساس، در این پژوهش، سعی در بررسی پارامترهای مؤثر در رخداد ترک‌خوردگی حرارتی با تمرکز بر خصوصیات انرژی آزاد سطحی به همراه سایر خصوصیات پایه‌ای مواد است. بدین منظور، سعی شده تا این پارامترها در قالب مدل‌های پیش‌بینی عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر ترک‌خوردگی حرارتی در دمای کم ارائه شوند. برای نمایش ترک‌خوردگی حرارتی در این تحقیق، از آزمایش نیم‌دایره خمشی در دمای کم استفاده شده است. ال‌قدسی و همکاران (۲۰۲۰)، باومانیس و همکاران (۲۰۲۱) و اورنگزب و همکاران (۲۰۱۲) در پژوهش‌های خود از آزمایش نیم‌دایره خمشی در دمای کم برای بررسی ترک‌خوردگی حرارتی مخلوط‌های آسفالتی استفاده نموده‌اند. لازم به ذکر است که روش خمش نیم‌صفحه، اغلب برای کنترل گسترش ترک در مخلوط آسفالتی روش مناسبی است. ضمناً، ASTM D8303 (۲۰۲۰)



شکل ۱. تفاوت در زاویه تماس آب روی سطح آب‌دوست و آب‌گریز (هفر، ۲۰۰۴)

انرژی آزاد سطحی مواد به وسیله چندین تئوری و با توجه به ساختار مولکولی مواد تشریح شده است. یکی از این تئوری‌های رایج، تئوری اسیدی-بازی است (یالقوزآغاچ و همکاران، ۲۰۲۱). مطابق این تئوری، انرژی آزاد سطحی کل هر ماده به سه مؤلفه غیرقطبی (LW)، اسید لویس^۱ و باز لویس^۲ تقسیم می‌گردد. با ترکیب این پارامترها، انرژی آزاد سطحی کل به روش زیر تعیین می‌شود:

$$\Gamma = \Gamma^{LW} + \Gamma^{\pm} = \Gamma^{LW} + 2\sqrt{\Gamma^+ \Gamma^-} \quad (7)$$

که Γ انرژی آزاد سطحی کل ماده، Γ^{LW} مؤلفه غیرقطبی انرژی آزاد سطحی، Γ^{\pm} مؤلفه قطبی انرژی آزاد سطحی، Γ^+ مؤلفه اسیدی و Γ^- مؤلفه بازی است. مطابق اصول ون اوس، قسمت اسیدی-بازی از پارامترهای اسید و باز لویس مطابق رابطه زیر تشکیل می‌شود:

$$\Gamma^{\pm} = \Gamma^{AB} = 2\sqrt{\Gamma^+ \Gamma^-} \quad (8)$$

مطابق مفاهیم ترمودینامیک، انرژی آزاد پیوستگی (ΔG^{ic})، مقدار انرژی مورد نیاز برای تشکیل یک ترک با سطح واحد در داخل یک ماده است. بر اساس تعریف انرژی آزاد سطحی، کار پیوستگی برای مواد مختلف به شرح زیر است:

$$W^c = 2\Gamma^c \quad (9)$$

که Γ^A انرژی آزاد سطحی کل ماده مورد نظر می‌باشد. مفهوم گسیختگی پیوستگی در داخل قیر را می‌توان در منبع (الکادی و همکاران، ۲۰۱۴) ملاحظه کرد. انرژی آزاد چسبندگی (ΔG^a) از دو مؤلفه اصلی تشکیل شده است: این مؤلفه‌ها، مؤلفه غیرقطبی یا لیفشیتز-ون در والز و مؤلفه قطبی یا اسیدی-بازی است. برای تعیین انرژی آزاد چسبندگی بین قیر و سنگدانه، رابطه (۱۰) استفاده می‌شود.

به هر سطح تماس، یک انرژی آزاد سطحی نسبت داده می‌شود. Γ_{SV} مقدار انرژی آزاد سطحی برای جسم جامد در تماس با بخار مایع، Γ_{LV} مقدار کشش سطحی یک مایع در تماس با بخار مایع و Γ_{SL} مقدار انرژی آزاد تماسی در سطح تماس مایع و جامد است. نتیجه تعادل نیروهای سه سطح مطابق شکل ۱ به صورت رابطه یانگ (رابطه ۱) نمایش داده می‌شود:

$$\Gamma_{SV} = \Gamma_{SL} + \Gamma_{LV} \cos \theta \quad (1)$$

از طرف دیگر، رابطه دوپره (۲) برای کار چسبندگی بین دو ماده برقرار است:

$$W_{SL} = \Gamma_S + \Gamma_L - \Gamma_{SL} \quad (2)$$

انرژی آزاد چسبندگی جسم جامد با انرژی سطح تماس جامد و بخار برابر نیست. پس:

$$\Gamma_{SV} = \Gamma_S - \pi_e \quad (3)$$

که در آن Γ_S انرژی آزاد سطحی جسم جامد در تماس با گاز خود و π_e فشار توزیعی تعادل می‌باشد (هفر، ۲۰۰۴). با ترکیب این معادلات، رابطه یانگ-دوپره به صورت زیر بیان می‌شود:

$$W_{SL} = \Gamma_L (1 + \cos \theta) + \pi_e \quad (4)$$

محققین نشان داده‌اند که مقدار فشار توزیعی تعادل در اندازه‌گیری‌های انرژی آزاد سطحی برای پلیمرها برابر با عدد صفر است که این موضوع برای قیر نیز صادق است (بهاسین، ۲۰۰۶). رابطه (۵) را می‌توان از رابطه (۴) و روش صفحه ویلهلمی به دست آورد.

$$W_{SL} = \Gamma_L (1 + \cos \theta) \quad (5)$$

برای مواد جامدی مانند سطح سنگدانه، نمی‌توان فشار توزیعی را مساوی صفر فرض کرد. رابطه (۶) برای اندازه‌گیری مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌ها با کمک دستگاه جذب همگانی است که در این تحقیق به کار گرفته شده است.

$$W_{SL} = 2\Gamma_L + \pi_e \quad (6)$$

² - Lewis base component

¹ - Lewis acid component

کانی‌های تشکیل‌دهنده خود هستند و امکان در نظر گرفتن طیف متفاوت سنگدانه‌ها را می‌دهند. کانی دی‌اکسید سیلیسیم که عامل اسیدی بودن سنگدانه‌ها می‌باشد در سنگدانه‌های سیلیسی غالب است. در طرف مقابل، کانی اکسید کلسیم که معرف بازی بودن سنگدانه‌ها است در سنگدانه‌های سنگ‌آهک غالب می‌باشد. خصوصیات فیزیکی سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است. دانه‌بندی سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش، دانه‌بندی میانی شماره ۴ نشریه ۲۳۴ است (شکل ۲). حداکثر اندازه سنگ‌دانه‌ها ۱۹ میلی‌متر و اندازه اسمی سنگدانه‌ها برابر ۱۲/۵ میلی‌متر بود. در این پژوهش، برای پیش‌بینی ترک‌خوردگی حرارتی از ۳۲ ترکیب مختلف قیر و سنگدانه استفاده گردید. در این ترکیب‌ها، سعی شد تا طیف متفاوتی از سنگدانه‌ها و قیرها با درجات مختلف حساسیت در برابر ترک‌خوردگی حرارتی انتخاب شود. ترکیب‌های مختلف مخلوط آسفالتی در جدول ۲ نمایش داده شده است.

$$\begin{aligned} \Delta G^a &= -W^a = \Delta G^{aLW} + \Delta G^{aAB} \quad (10) \\ &= -2 \left[\left(\sqrt{\Gamma_2^{LW} \Gamma_1^{LW}} \right) \right. \\ &\quad \left. + \left(\sqrt{\Gamma_2^+ \Gamma_1^-} \right) \right. \\ &\quad \left. + \left(\sqrt{\Gamma_2^- \Gamma_1^+} \right) \right] \end{aligned}$$

که در آن، ΔG^a انرژی آزاد چسبندگی، ΔG^{aLW} مؤلفه غیرقطبی انرژی آزاد چسبندگی، ΔG^{aAB} مؤلفه قطبی انرژی آزاد چسبندگی، Γ_1^+ ، Γ_1^- ، Γ_1^{LW} مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر، Γ_2^+ و Γ_2^- ، Γ_2^{LW} مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی سنگدانه هستند.

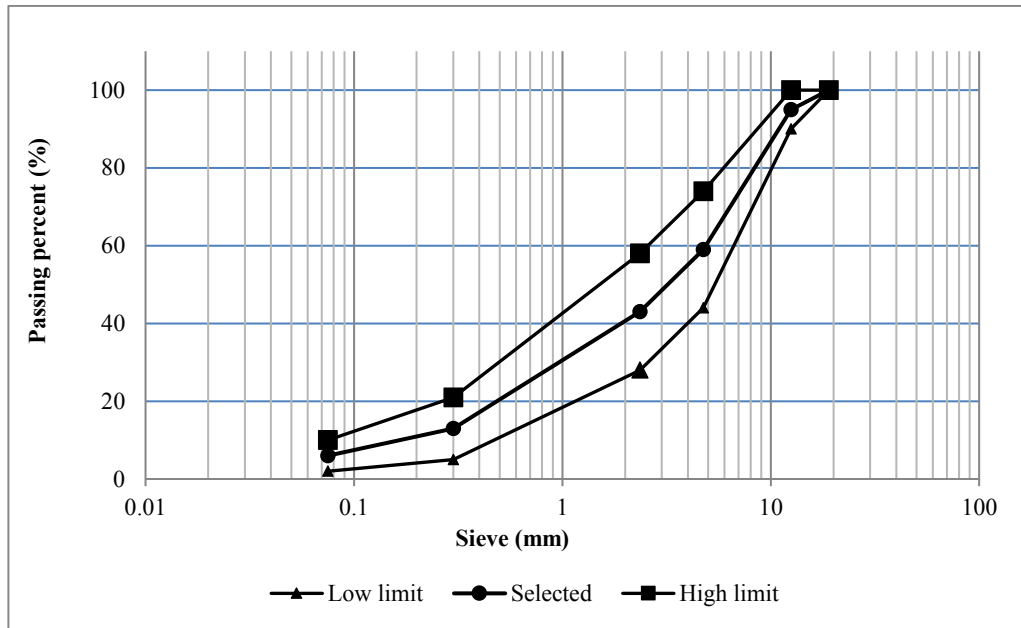
۳. مواد و روش‌ها

۳-۱. مواد

در این پژوهش، از هشت نوع قیر عملکردی استفاده شده است. این قیرها از شرکت قیرسازی آذربایجان عایق‌کار تهیه شدند. همچنین، چهار نوع سنگدانه برای آزمایش‌ها انتخاب شدند. مصالح مورد استفاده شامل دو نوع سنگدانه سنگ‌آهک و دو نوع سنگدانه سیلیسی بود. دلیل انتخاب این سنگدانه‌ها این بود که دارای تفاوت در

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی سنگدانه‌های مورد استفاده

آزمایش	استاندارد	سنگ‌آهک نوع یک	سنگ‌آهک نوع دو	سیلیسی نوع یک	سیلیسی نوع دو
وزن مخصوص حجمی (g/cm ³)		۲/۵۱	۲/۴۱	۲/۶۰	۲/۵۶
وزن مخصوص مؤثر (g/cm ³)	ASTM C 127	۲/۵۵	۲/۴۹	۲/۶۳	۲/۶۰
وزن مخصوص ظاهری (g/cm ³)		۲/۵۷	۲/۵۲	۲/۶۵	۲/۶۲
حداکثر سایش لس‌آنجلس (%)	ASTM C 131	۲۱	۲۰	۱۸	۲۳
افت وزنی در برابر سولفات سدیم (%)	ASTM C 88	۵	۷	۶	۳



شکل ۲. دانه بندی سنگدانه های مورد استفاده در این پژوهش برای ساخت نمونه های مخلوط آسفالتی

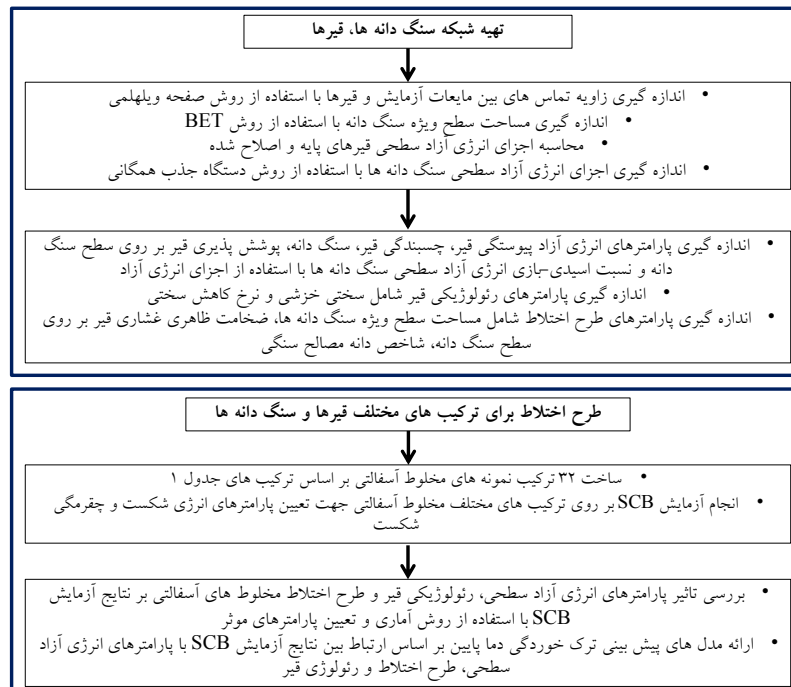
جدول ۲. ترکیب های مختلف مخلوط آسفالتی

ردیف	نوع سنگدانه	نوع قیر	ردیف	نوع سنگدانه	ردیف
۱	آهکی نوع ۱	۱۶-۵۲	۱۷	سیلیسی نوع ۱	۱۶-۵۲
۲	آهکی نوع ۱	۲۲-۵۲	۱۸	سیلیسی نوع ۱	۲۲-۵۲
۳	آهکی نوع ۱	۲۲-۵۸	۱۹	سیلیسی نوع ۱	۲۲-۵۸
۴	آهکی نوع ۱	۱۶-۶۴	۲۰	سیلیسی نوع ۱	۱۶-۶۴
۵	آهکی نوع ۱	۲۲-۶۴	۲۱	سیلیسی نوع ۱	۲۲-۶۴
۶	آهکی نوع ۱	۱۶-۷۰	۲۲	سیلیسی نوع ۱	۱۶-۷۰
۷	آهکی نوع ۱	۱۰-۷۰	۲۳	سیلیسی نوع ۱	۱۰-۷۰
۸	آهکی نوع ۱	۱۰-۷۶	۲۴	سیلیسی نوع ۱	۱۰-۷۶
۹	آهکی نوع ۲	۱۶-۵۲	۲۵	سیلیسی نوع ۲	۱۶-۵۲
۱۰	آهکی نوع ۲	۲۲-۵۲	۲۶	سیلیسی نوع ۲	۲۲-۵۲
۱۱	آهکی نوع ۲	۲۲-۵۸	۲۷	سیلیسی نوع ۲	۲۲-۵۸
۱۲	آهکی نوع ۲	۱۶-۶۴	۲۸	سیلیسی نوع ۲	۶۴-۱۶
۱۳	آهکی نوع ۲	۲۲-۶۴	۲۹	سیلیسی نوع ۲	۶۴-۲۲
۱۴	آهکی نوع ۲	۱۶-۷۰	۳۰	سیلیسی نوع ۲	۷۰-۱۶
۱۵	آهکی نوع ۲	۱۰-۷۰	۳۱	سیلیسی نوع ۲	۷۰-۱۰
۱۶	آهکی نوع ۲	۱۰-۷۶	۳۲	سیلیسی نوع ۲	۷۶-۱۰

۲-۳. طراحی آزمایش

در قسمت بعدی، آزمایش ترک خوردگی کم‌دما روی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از روش آزمایش خمش نیم‌دایره (SCB) در دمای منفی ۱۰ درجه سلسیوس انجام شد. در نهایت، با استفاده از روش‌های آماری، میزان تأثیر پارامترهای تعیین شده بر ترک خوردگی حرارتی مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی قرار گرفت و مدل‌های پیش‌بینی رفتار مخلوط‌های آسفالتی در برابر خرابی حرارتی ارائه شد. لازم به ذکر است که گاه تعدادی از محققین از روش‌هایی مانند شبکه‌های عصبی نیز در پیش‌بینی رفتار مصالح روسازی استفاده کرده‌اند (غنی‌زاده، ۱۳۹۴؛ شرافتی‌سوها و همکاران، ۱۳۹۸). فلوجارت روش تحقیق در شکل ۳ نمایش داده شده است. متغیرهای مستقل و وابسته که در پیش‌بینی مدل ترک خوردگی حرارتی به کار گرفته شده‌اند در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

پس از تهیه مصالح، مقدار انرژی آزاد سطحی برای سنگدانه‌ها و قیرها مشخص شد. انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌ها با روش دستگاه جذب همگانی^۱ و انرژی آزاد سطحی قیرها با روش صفحه ویلهلمی^۲ اندازه‌گیری گردید. در ادامه، با استفاده از روابط ترمودینامیک، مؤلفه‌های مختلف مربوط به انرژی آزاد پیوستگی قیر، انرژی آزاد چسبندگی قیر-سنگدانه و نسبت مؤلفه اسیدی-بازی انرژی آزاد سنگدانه‌ها محاسبه شدند. علاوه بر پارامترهای انرژی آزاد سطحی در بررسی ترک خوردگی حرارتی مخلوط آسفالتی، پارامترهای سختی خزشی قیر (S) از آزمایش رئومتر تیرچه خمشی، ظرفیت وارفتگی تنش قیر (m-value) از آزمایش رئومتر تیرچه خمشی، شاخص مصالح سنگی، مساحت سطح ویژه مصالح سنگی و ضخامت ظاهری غشای قیر روی سطح سنگدانه از روابط وزنی-حجمی محاسبه شدند.



شکل ۳. فلوجارت روش تحقیق

^۲- Wilhelmy plate

^۱- Universal sorption device (USD)

جدول ۳. متغیرهای مستقل و وابسته در تحلیل آماری مورد استفاده در این پژوهش

آنالیز اول	آنالیز دوم
متغیرهای مستقل	متغیرهای مستقل
متغیر وابسته	متغیر وابسته
سختی خزشی قیر آزمایش BBR	سختی خزشی قیر آزمایش BBR
ظرفیت وارفتگی تنش قیر از آزمایش BBR	ظرفیت وارفتگی تنش قیر m از آزمایش BBR
انرژی آزاد پیوستگی	انرژی آزاد پیوستگی
انرژی آزاد چسبندگی	انرژی آزاد چسبندگی
نسبت مؤلفه بازی به اسیدی انرژی آزاد	نسبت مؤلفه بازی به اسیدی انرژی آزاد
سطحی سنگدانه	سطحی سنگدانه
مساحت سطح ویژه سنگدانه	مساحت سطح ویژه سنگدانه
ضخامت ظاهری غشای قیر روی سطح سنگدانه	ضخامت ظاهری غشای قیر روی سطح سنگدانه
شاخص مصالح سنگی	شاخص مصالح سنگی
انرژی شکست از آزمایش SCB	چقرمگی شکست از آزمایش SCB

۳-۳. آزمایش‌ها

۳-۳-۱. انرژی آزاد سطحی قیر

که در آن، θ زاویه تماس دینامیک بین قیر و مایع آزمایش، P_t محیط صفحه آغشته شده به قیر و Γ_L انرژی آزاد سطحی کل مایع می باشد. حال، می توان رابطه (۱۴) را به دست آورد:

$$\cos \theta = \frac{\Delta F + V_{im}(\rho_L - \rho_{air})g}{P_t \Gamma_L} \quad (14)$$

با رابطه Young-Dupre و با فرض قابل اغماض بودن تعادل فشار غشا برای قیر، رابطه (۱۵) به صورت زیر به دست می آید:

$$\Gamma_L(1 + \cos \theta) = 2(\sqrt{\Gamma_S^{LW} \Gamma_L^{LW}} + \sqrt{\Gamma_S^+ \Gamma_L^-} + \sqrt{\Gamma_S^- \Gamma_L^+}) \quad (15)$$

که Γ_{Li}^{LW} ، Γ_{Li}^+ و Γ_{Li}^- مؤلفه‌های تعریف شده برای انرژی آزاد سطحی مایع مورد استفاده و Γ_S^{LW} ، Γ_S^+ و Γ_S^- مؤلفه‌های تعریف شده برای انرژی آزاد سطحی قیر هستند. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، پارامتر زاویه تماس (θ) در رابطه (۱۴) را می توان از آزمایش صفحه ویلهلمی به دست آورد. برای به دست آوردن مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر، مشابه مؤلفه‌های انرژی آزاد

زاویه تماس بین قیر و یک مایع را می توان با روش صفحه ویلهلمی به دست آورد. هنگامی که این صفحه در هوا معلق باشد، رابطه (۱۱) برای تعیین مقدار نیروی لازم برای نگه داشتن آن در حالت تعادل به کار می رود:

$$F = W_{plate} + W_{asphalt} - V \cdot \rho_{air} \cdot g \quad (11)$$

که F مقدار نیروی لازم برای ثابت نگه داشتن صفحه، W_{plate} مقدار وزن صفحه فلزی، $W_{asphalt}$ وزن چسباننده قیر، V مقدار حجم صفحه قیری، g شتاب جاذبه محل و ρ_{air} وزن مخصوص هوا می باشد. زمانی که صفحه آغشته شده به قیر در مایع غوطه ور می شود، رابطه (۱۱) به رابطه (۱۲) تبدیل می گردد:

$$F = W_{plate} + W_{asphalt} - V_{im} \cdot \rho_L \cdot g - (V - V_{im}) \cdot \rho_{air} \cdot g \quad (12)$$

که در آن، ρ_L وزن مخصوص مایع، V_{im} حجم قسمت غوطه ور صفحه آغشته به قیر و V حجم کل صفحه قیری است. با ترکیب دو رابطه بالا، رابطه (۱۳) به دست می آید:

$$\Delta F = P_t \Gamma_L \cos \theta - V_{im} \cdot \rho_L \cdot g + V_{im} \cdot \rho_{air} \cdot g \quad (13)$$

است. از رابطه^۱ BET، مساحت سطح ویژه سنگدانه به روش زیر تعیین می‌شود:

$$A = \left(\frac{n_m N_0}{M}\right) \alpha \quad (19)$$

در این رابطه، N_0 عدد آوگادرو، α سطح تصویر شده یک مولکول و n_m ظرفیت تک‌لایه می‌باشد که طبق رابطه (۲۰) به دست می‌آید:

$$n_m = \left(\frac{1}{S + I}\right) \quad (20)$$

در این رابطه، S و I شیب و عرض از مبدأ نمودار رابطه بین $\frac{P}{P_n}$ و $\frac{P}{n(P_n - P)}$ هستند، n فشار بخار اشباع، p فشار بخار جزئی و n جرم بخار جذب شده نسبت به جرم سنگدانه است. در این پژوهش، با توجه به مطالعات پیشین (بهاسین، ۲۰۰۶)، از سه مایع شاخص به نام‌های آب (قطبی)، گلیسرول (نیمه قطبی) و فرمامید (غیر قطبی) استفاده شده است.

۳-۳-۳. آزمایش رئومتر تیرچه خمشی (BBR)

دو پارامتر به وسیله BBR مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. اولی، سختی خزشی که میزان مقاومت قیر به بارگذاری ثابت است و دومی، نرخ وارفنگی تنش (m-value) که مقدار تغییر سختی قیر در زمان اعمال بار است. این آزمایش مطابق با استاندارد AASHTO T313 (۲۰۱۹) انجام شده است.

۳-۳-۴. آزمایش شاخص مصالح سنگی

شکل هندسی دانه‌های مصالح سنگی را می‌توان به طور کامل برحسب سه خاصیت مستقل، یعنی فرم (شکل)، گوشه‌داری (تیزگوشگی) و بافت سطحی بیان نمود. فرم منعکس‌کننده تغییرات در نسبت‌های دانه، گوشه‌داری منعکس‌کننده تغییرات در گوشه‌ها و بافت سطحی برای تشریح بی‌نظمی‌های رویه یا زبری در مقیاس بسیار

سطحی سنگدانه‌ها، نیاز به حداقل سه مایع آزمایشگاهی است. رابطه (۱۵) برای قیر مورد نظر برای هر سه مایع به کار می‌رود و یک سیستم شامل سه رابطه برای تعیین سه جزء انرژی آزاد سطحی (سه مجهول) به کار می‌رود. در این پژوهش، از سه مایع شاخص آب (قطبی)، اتیلن گلیکول (نیمه قطبی) و دی‌یدیدمتان (غیر قطبی) استفاده شده است.

۳-۳-۲. انرژی آزاد سطحی سنگدانه

معادله ۱۶ ارتباط بین کار چسبندگی بین یک بخار و یک ماده در فاز جامد را بر اساس تئوری اسیدی-بازی به مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی مرتبط می‌سازد. نماد V معرف بخار و نماد S معرف ماده جامد است،

$$W_{S,V}^a = 2(\sqrt{\Gamma_S^{LW} \Gamma_V^{LW}}) + 2(\sqrt{\Gamma_S^+ \Gamma_V^-}) + 2(\sqrt{\Gamma_S^- \Gamma_V^+}) \quad (16)$$

معادله ۱۷، کار حاصل از چسبندگی بین یک سنگدانه و یک بخار مایع را به گسترش فشار بخار روی سطح سنگدانه ارتباط می‌دهد.

$$W_{S,V}^a = 2\Gamma_V^{Total} + \pi_e \quad (17)$$

که در آن، $W_{S,V}^a$ کار چسبندگی بین سنگدانه و بخارهای مایع مورد آزمایش، Γ_V^{total} انرژی آزاد سطحی کل مایع‌های مورد آزمایش و π_e فشار توزیع تعادلی بخار مایع روی سطح سنگدانه می‌باشند. فشار توزیع تعادلی بخار مایع برای سطح سنگدانه از رابطه (۱۸) به دست می‌آید:

$$\pi_e = \frac{RT}{MA} \int_0^{p_n} \frac{n}{p} dp \quad (18)$$

که در آن، R مقدار ثابت گازها، T دمای آزمایش برحسب درجه کلوین، M مقدار جرم مولکولی برای بخار مایع، n مقدار جرم بخار جذب شده در واحد جرم سنگدانه در فشار بخار p و A مقدار مساحت سطح ویژه سنگدانه

¹ - Branauer, Emmett, and Teller (BET)

نام‌گذاری می‌شود. این پارامترها مشخصات شکست مخلوط آسفالتی را تعریف می‌کنند (-AASHTO TP105، ۲۰۱۵). در این تحقیق، از هر دو پارامتر به عنوان معیارهای ترک‌خوردگی دماکم حرارتی مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده است.

ترک‌خوردگی در بارگذاری به وسیله جابجایی دهانه ترک^۴ متصل به کف نمونه کنترل می‌گردد. در انجام آزمایش و بارگذاری، نرخ ثابت این جابجایی را برابر ۰/۰۰۵ میلی‌متر بر ثانیه در نظر می‌گیرند و پس از ثبت جابجایی خطوط بار در محاسبه چقرمگی شکست و انرژی شکست استفاده می‌شود. قبل از بارگذاری برای اطمینان از تماس یکنواخت بین صفحه بارگذاری و نمونه، بارهای تماسی با مقدار حداکثر بار از ۰/۳ kN اعمال می‌شود (ماراستینو و همکاران، ۲۰۰۷). انرژی شکست (G_f) و چقرمگی شکست (K_{Ic}) با کمک روابط (۲۲) و (۲۳) قابل تخمین می‌باشند.

$$G_f = \frac{W_f}{Alig} \quad (22)$$

که در آن G_f انرژی شکست (J/m^2)، W_f کار شکست (J) که ناحیه زیر منحنی بار-تغییر مکان اندازه‌گیری شده ($\int Pdu$) می‌باشد، P نیروی اعمالی (N)، u میانگین جابجایی در راستای بارگذاری (m)، $Alig$ ناحیه شکاف می‌باشد که برابر است با $(r-a)*t$ ، r شعاع نمونه (m)، a طول قاج (m) و t ضخامت قاج (m) است. از استاندارد AASHTO TP105 (۲۰۱۵) و روش به‌کار رفته در تحقیقات لی و ماراستینو (۲۰۰۶)، پارامتر K_{Ic} (چقرمگی شکست) مطابق رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$k_{Ic} = \sigma_0 \sqrt{\pi a} Y_{I(0.8)} \quad (23)$$

که در آن، K_{Ic} چقرمگی شکست ($MPa \cdot mm^{0.5}$)، $\sigma_0 = \frac{P}{2rt}$ ، بار اعمال شده (MN)، r شعاع نمونه (m)،

کوچک کاربرد دارد. بافت سطحی عمدتاً تابعی از کانی-های مصالح سنگی است، در حالی که، گوشه‌داری متأثر از سنگ‌شکن می‌باشد. تأثیر هم‌زمان شکل دانه و بافت سطحی مصالح سنگی را می‌توان با استفاده از آزمایش شاخص دانه منطبق بر استاندارد ASTM D3398 (۲۰۰۶) تعیین نمود.

۳-۳-۵. ضخامت ظاهری غشای قیر

این پارامتر، یکی از عوامل مؤثر در وقوع ترک‌خوردگی حرارتی و شدت آن است. در تعیین این پارامتر، از روش طرح شده در گزارش NCHRP 673 مطابق رابطه (۲۱) استفاده گردید (جنکس و همکاران، ۲۰۱۱). در این رابطه، صورت کسر معرف حجم قیر مصرف‌شده در واحد حجم مخلوط آسفالتی و مخرج کسر نشان‌دهنده سطح سنگدانه‌ها در واحد حجم مخلوط آسفالتی است (کریستنسن و بوناکوئیست، ۲۰۰۶):

$$AFT = \frac{1000 \times VBE}{S_s \times P_s \times G_{mb}} \quad (21)$$

که در آن AFT ضخامت ظاهری قیر (μm)، VBE درصد حجم قیر مؤثر نسبت به حجم کل مخلوط آسفالتی ($\%$)، S_s مقدار مساحت سطح ویژه ظاهری سنگدانه‌ها (m^2/kg)، P_s درصد وزن سنگدانه‌ها به وزن کل مخلوط ($\%$) و G_{mb} وزن ویژه حجمی مخلوط (kg/m^3) هستند.

۳-۳-۶. آزمایش‌های مخلوط آسفالتی

آزمایش SCB برای تعیین انرژی شکست^۱ و چقرمگی شکست^۲ در مخلوط‌های آسفالتی در دماهای کم استفاده می‌شود. انرژی شکست، مقدار انرژی مورد نیاز برای وقوع ترک با سطح واحد تعریف می‌گردد. چقرمگی شکست که به آن K_{Ic} هم گفته می‌شود، مقدار K_{Ic} بحرانی است. K_{Ic} مقدار فاکتور شدت تنش^۳ در نوع یک شکست است. مقدار بحرانی آن در بار حداکثر به نام K_{Ic}

^۲- Stress intensity factor

^۴- Crack mouth opening displacement

^۱- Fracture energy

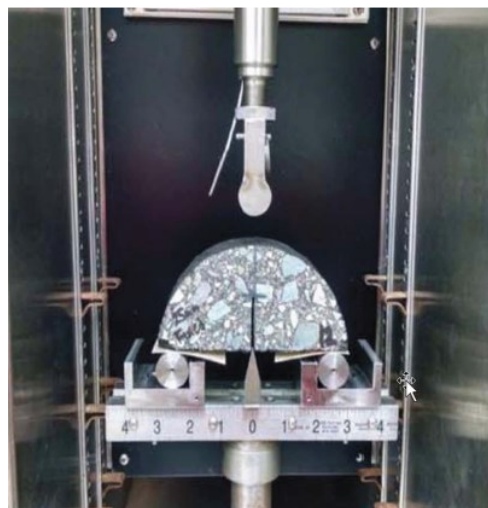
^۲- Fracture toughness

در دمای ۱۰- انجام شده است. آزمایش SCB در زاویه و عمق‌های مختلف ترک انجام می‌شود. با توجه به اینکه ترک خوردگی دمای کم ناشی از انقباض یکباره و یا سیکل‌های انقباض-انبساط لایه آسفالتی است، از این رو به نظر می‌رسد که استفاده از بارگذاری که باعث ایجاد مد یک شکست باشد، به عملکرد واقعی مخلوط آسفالتی در برابر ترک خوردگی دمای کم نزدیک‌تر باشد. در این تحقیق، از مد یک شکست استفاده شد و ترک مستقیم در نمونه‌ها ایجاد شد.

t ضخامت نمونه (m)، a طول قاج (m) و Y_1 فاکتور شدت تنش نرمال شده (بدون بُعد) است. برای ابعاد آزمایش SCB مورد استفاده در این روش، مقدار Y_1 از رابطه (۲۴) محاسبه می‌شود:

$$(24) \quad Y_{I(0.8)} = 4.782 + 1.219 \left(\frac{a}{r}\right) + 0.063 \exp(7.045 \left(\frac{a}{r}\right))$$

قرارگیری نمونه در دستگاه در شکل ۴ نشان داده شده است. لازم به ذکر این است که کل آزمایش‌های SCB



شکل ۴. نحوه قرارگیری نمونه در آزمایش SCB

سفت‌تر دارای خصوصیات قطبی بیشتر و قیرهای نرم‌تر دارای خصوصیات غیرقطبی بیشتر باشند. نتایج نشان می‌دهند که مؤلفه قطبی قیر در مقایسه با مؤلفه غیرقطبی آن عدد بسیار کوچکی است. بنابراین، نظر به اینکه قسمت عمده‌ای از انرژی آزاد سطحی کل قیر را جزء غیرقطبی تشکیل می‌دهد، می‌توان گفت که پیوند آن با مواد دیگر نیز عمدتاً با جزء غیرقطبی و پیوندهای کووالانسی است. همچنین، به‌کارگیری قیرهای نرم، باعث افزایش قابل توجه در مؤلفه غیرقطبی انرژی آزاد سطحی

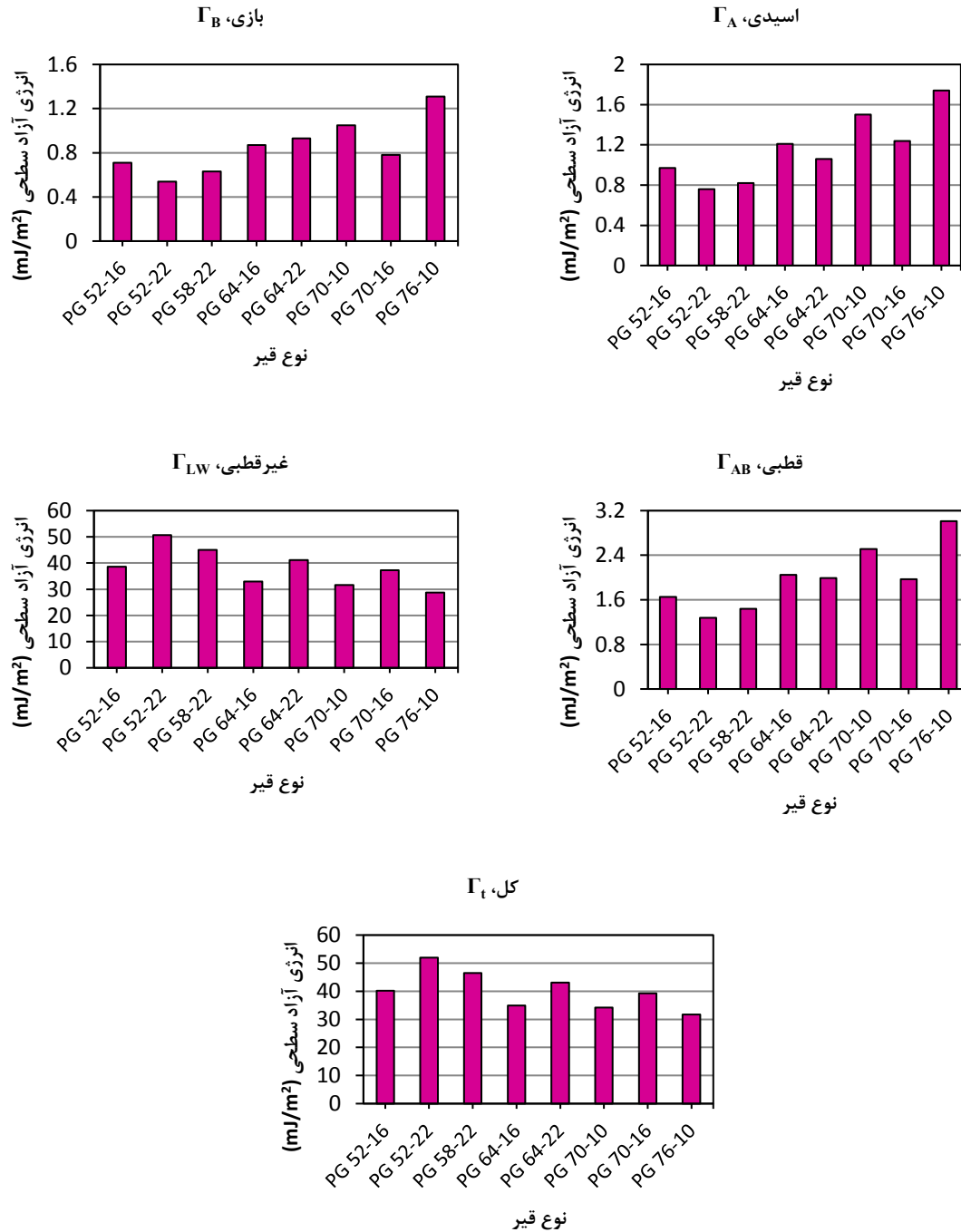
۴. نتایج و بحث

۴-۱. نتایج پارامترهای انرژی آزاد قیر

در شکل ۵، مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی هشت نوع قیر عملکردی مختلف ارائه شده است. نتایج مطالعات پیشین بر اساس آنالیز SARA^۱ نشان می‌دهد که قیرهای سفت‌تر و با مدول زیادتر دارای مقادیر بیشتر آسفالتن نسبت به قیرهای نرم‌تر هستند (شو و همکاران، ۲۰۱۹). از سوی دیگر، بر اساس نظر پژوهشگران، آسفالتن باعث خصوصیات قطبی زیاد در قیر می‌شود (براون و همکاران، ۲۰۰۹). از این رو، این انتظار وجود دارد که قیرهای

^۱- Saturates, aromatics, resins, and asphaltenes

می‌گردد. این مورد با افزایش انرژی آزاد سطحی کل آنها و مقاومت در برابر گسیختگی پیوستگی همراه است.



شکل ۵. مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیرهای مورد استفاده (mJ/m²)

۲-۴. انرژی آزاد سطحی سنگدانه

همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، سنگدانه‌های سنگ‌آهک دارای مؤلفه‌های بازی حداکثر می‌باشند که مطابق با نتایج آنالیز کانی‌شناسی سنگدانه‌ها است. از این رو، این انتظار وجود دارد که سنگدانه‌های سنگ‌آهک در مقایسه با دو نوع سنگدانه دیگر اتصال بهتری با قیر برقرار سازند. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، سنگدانه‌های اسیدی دارای مؤلفه اسیدی-بازی (قطبی) بزرگتری هستند. در پژوهشی که توسط گلچین و همکاران (۲۰۲۲) انجام شده، ارتباط بین قطبیت و چسبندگی در سنگدانه‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت.

همچنین، مؤلفه‌های غیرقطبی سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۴ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سنگدانه‌ها در مقایسه با مؤلفه‌های قطبی از مؤلفه‌های غیرقطبی به مراتب کوچک‌تری برخوردار می‌باشند. مؤلفه غیرقطبی در سنگدانه‌ها با تشکیل پیوند کووالانسی با مؤلفه غیرقطبی قیر می‌تواند موجب بهبود مقاومت مخلوط آسفالتی به وسیله افزایش چسبندگی بین سنگدانه و قیر شوند.

همان‌گونه که قبلاً گفته شد و در جدول ۴ نیز مشاهده می‌شود، مؤلفه بازی انرژی آزاد سطحی همه سنگدانه‌ها از مؤلفه اسیدی آن به مراتب بزرگتر است و از این جهت روند مشابهی دارند. تفاوت بسیار مهم در نسبت مؤلفه بازی به اسیدی است که نتایج آن در جدول ۴ نشان داده شده است. با توجه به اطلاعات این جدول، مشاهده می‌شود که سنگدانه‌های سنگ‌آهک نوع B دارای نسبت مؤلفه بازی به اسیدی ۱۹/۳۷ می‌باشند که این نسبت در مورد سنگدانه‌های سیلیسی بسیار کمتر است و به ترتیب در مورد سنگدانه‌های سیلیسی نوع A و B به ۱۴/۷۵ و ۱۸/۱۷ می‌رسد. نتیجه این موضوع در میزان چسبندگی سنگدانه‌ها به قیرهایی که عموماً خصوصیات اسیدی دارند، بسیار اهمیت دارد زیرا هر چه سنگدانه خصوصیات بازی بیشتری داشته باشد، چسبندگی بهتری با قیر ایجاد می‌کند.

ستون آخر جدول ۴، مساحت سطح ویژه سنگدانه‌ها را نشان می‌دهد که بر اساس رابطه BET از خروجی‌های دستگاه جذب همگانی بر اساس رابطه (۱۹) به دست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که سنگدانه‌های سنگ‌آهک به دلیل داشتن سطح زبر و با خلل و فرج بیشتر دارای مساحت سطح ویژه بزرگتری نیز هستند. این سطح ویژه از آن جهت دارای اهمیت است که چسبندگی بین قیر-سنگدانه به صورت نیرو یا انرژی در واحد سطح بیان می‌شود و هر چه سطح تماس بزرگتری بین آن‌ها وجود داشته باشد، انرژی بیشتری برای گسیختگی چسبندگی مورد نیاز است.

جدول ۴. مؤلفه انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌های تحقیق (ergs/cm^2)

نوع سنگدانه	مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی						
	اسیدی، Γ_A	بازی، Γ_B	قطبی، Γ_{AB}	غیرقطبی، Γ_{LW}	کل، Γ_t	نسبت مؤلفه بازی به اسیدی انرژی آزاد سطحی	مساحت سطح ویژه (m^2/gr)
سنگ‌آهک A	۱۳/۴	۲۵۹/۰	۱۱۷/۷	۶۸/۱	۱۵۸/۸	۱۹/۳۷	۱/۲۸
سنگ‌آهک B	۱۵/۴	۴۳۲/۹	۱۶۳/۳	۷۴/۳	۲۳۷/۶	۲۸/۱۱	۱/۱۸
سیلیسی A	۳۲/۹	۴۸۵/۴	۲۵۲/۷	۳۱/۲	۲۸۳/۹	۱۴/۷۵	۰/۳۲
سیلیسی B	۲۸/۱	۵۱۰/۶	۲۳۹/۶	۳۶/۸	۲۷۶/۴	۱۸/۱۷	۰/۶۵

۴-۳. پارامترهای انرژی آزاد سطحی

۴-۳-۱. انرژی آزاد پیوستگی

در جدول ۵، انرژی آزاد پیوستگی قیرها نشان داده شده است. با توجه به نتایج جدول، مشاهده می‌شود که بازه مقادیر انرژی آزاد پیوستگی از $63/51 \text{ ergs/cm}^2$ تا $103/96 \text{ ergs/cm}^2$ متغیر است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، قیرهای PG 58-22، PG 56-22 و PG 64-22 دارای بیشترین مقادیر انرژی آزاد پیوستگی هستند. این بدان معناست که برای گسیختگی قیرهای نرم، انرژی بیشتری مورد نیاز است. کمترین میزان انرژی مورد نیاز

برای ایجاد ترک با سطح واحد مربوط به قیر PG 76-10 است که برای ایجاد ترک یک سانتی‌متر مربعی نیاز به $63/51 \text{ erg}$ انرژی می‌باشد. علاوه بر این، نتایج این پژوهش همانند پژوهش‌های پیشین (بهاسین، ۲۰۰۶؛ بهاسین و همکاران، ۲۰۰۶؛ چنگ، ۲۰۰۲) نشان می‌دهد که بخش مهمی از افزایش مقاومت قیر در برابر ترک ناشی از مؤلفه‌های غیرقطبی انرژی آزاد سطحی قیر است و مؤلفه‌های اسیدی-بازی نقش چندانی در تضعیف یا بهبود مقاومت قیر در برابر این نوع ترک ندارند. در واقع، مؤلفه‌های قطبی می‌توانند بیشتر بر میزان چسبندگی قیر و سنگدانه مفید باشند.

جدول ۵. مقادیر انرژی آزاد پیوستگی قیرهای مورد استفاده در این پژوهش

نوع قیر	انرژی آزاد پیوستگی (ergs/cm^2)
PG 52-16	۸۰/۴۳
PG 52-22	۱۰۳/۹۶
PG 58-22	۹۲/۹۵
PG 64-16	۶۹/۹۰
PG 64-22	۸۶/۲۵
PG 70-10	۶۸/۳۰
PG 70-16	۷۸/۴۵
PG 76-10	۶۳/۵۱

۴-۳-۲. انرژی آزاد چسبندگی

چسبندگی در سطح تماس قیر-سنگدانه به‌وسیله مؤلفه انرژی آزاد سطحی قیر و سنگدانه محاسبه و نتایج آن در جدول ۶ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سنگ‌آهک نوع B در مقایسه با سایر سنگدانه‌ها چسبندگی مناسب‌تری را با انواع قیر ایجاد می‌کند. از این‌رو، انتظار می‌رود در مخلوط‌های آسفالتی حاوی

سنگ‌آهک نوع B، ترک‌خوردگی از نوع گسیختگی در سطح تماس قیر و سنگدانه کمتر مشاهده شود. سنگدانه سیلیسی نوع A دارای کمترین مقدار مقاومت چسبندگی قیر-سنگدانه در قیرهای مختلف است. در کل، دو نوع سنگدانه سیلیسی دارای مقاومت چسبندگی کمتری در مقایسه با سنگدانه‌های سنگ‌آهک بوده‌اند.

جدول ۶. مقادیر انرژی آزاد چسبندگی در ترکیب‌های مختلف مخلوط آسفالتی

انرژی آزاد چسبندگی				نوع قیر
سنگدانه سیلیسی نوع B	سنگدانه سیلیسی نوع A	سنگ آهک نوع B	سنگ آهک نوع A	
۱۲۸/۷۵	۱۲۲/۴۰	۱۵۴/۶۳	۱۴۰/۳۳	PG 52-16
۱۳۳/۵۸	۱۲۶/۳۹	۱۶۴/۸۰	۱۵۰/۹۵	PG 52-22
۱۳۰/۷۶	۱۲۳/۹۸	۱۵۹/۶۱	۱۴۵/۷۲	PG 58-22
۱۲۹/۱۹	۱۲۳/۲۵	۱۵۱/۹۸	۱۳۶/۸۹	PG 64-16
۱۳۴/۵۷	۱۲۸/۰۸	۱۶۰/۹۹	۱۴۶/۰۵	PG 64-22
۱۳۴/۴۶	۱۲۸/۵۶	۱۵۵/۹۸	۱۳۹/۷۵	PG 70-10
۱۳۳/۷۵	۱۲۷/۳۹	۱۵۸/۵۰	۱۴۳/۰۵	PG 70-16
۱۳۶/۷۷	۱۳۱/۱۲	۱۵۶/۲۸	۱۳۹/۲۹	PG 76-10

۴-۴. نتایج پارامترهای رئولوژیک قیر

۴-۴-۱. سختی خزشی قیر

نتایج مربوط به سختی خزشی قیرهای مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۷ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، قیرهای با درجه کم، عملکردی منفی‌تر دارای مقادیر سختی کمتری نسبت به قیرهای با

درجه کم عملکردی نزدیک‌تر به صفر هستند. مقدار سختی خزشی قیر PG 76-10 برابر $193/04 \text{ MPa}$ است که در هشت قیر مورد استفاده در این پژوهش بیشترین مقدار را دارد. از سوی دیگر، کمترین مقدار سختی خزشی مربوط به قیر PG 58-22 است که سختی خزشی در این قیر برابر $73/48 \text{ MPa}$ به دست آمده است.

جدول ۷. سختی خزشی قیرهای مورد استفاده در این پژوهش

نوع قیر	سختی خزشی (MPa)
PG 52-16	۱۲۴/۶۴
PG 52-22	۷۳/۴۸
PG 58-22	۹۸/۳۴
PG 64-16	۱۳۱/۷۴
PG 64-22	۱۱۷/۳۴
PG 70-10	۱۵۴/۹۸
PG 70-16	۱۳۸/۶۷
PG 76-10	۱۹۳/۰۴

۴-۴-۲. ظرفیت وارفتگی تنش قیر

نتایج ارائه شده در جدول ۸ نشان می‌دهد که مقدار نرخ کاهش سختی در قیرهای با درجه عملکردی مختلف تفاوت قابل ملاحظه‌ای دارد. تغییر نسبتاً سریع در سختی

بدان معنی است که قیر تمایل به حذف تنش‌هایی دارد که در صورت حذف نشدن تا سطح به وقوع پیوستن ترک خوردگی دمای کم، تجمع می‌کند. در مورد قیرهای نرم‌تر، این پارامتر عدد بزرگتری دارد و نشان‌دهنده این

70-10، PG 76-10 و PG 70-16 مقدار نرخ کاهش سختی کمتر از ۰/۳۰۰ را دارند که در دمای آزمایش انجام شده از نظر ترک خوردگی دماکم غیرقابل قبول است.

است که این نوع قیرها پتانسیل تطابق بیشتری با تغییر دما را دارند. در مورد قیرهای PG 52-22 و PG 58-22 نرخ کاهش سختی به ترتیب برابر ۰/۳۴۶ و ۰/۳۲۹ است که بهترین مقادیر در بین هشت نوع قیر مورد استفاده در این پژوهش است. قیرهای PG 52-16، PG 64-16، PG 70-10، PG 70-16 و PG 76-10

جدول ۸. ظرفیت وارفنگی تنش قیرهای مورد استفاده در این پژوهش

m-value	نوع قیر
۰/۲۸۴	PG 52-16
۰/۳۴۶	PG 52-22
۰/۳۲۹	PG 58-22
۰/۲۶۳	PG 64-16
۰/۳۱۵	PG 64-22
۰/۲۴۱	PG 70-10
۰/۲۴۸	PG 70-16
۰/۲۱۵	PG 76-10

۵-۴. شاخص مصالح سنگی

مقایسه با سنگدانه‌های گردگوشه می‌گردند. از سوی دیگر، بافت زبر مصالح سنگی سبب افزایش مقاومت شده و در قیاس با سطوح صاف مصالح رودخانه‌ای نیاز به قیر اضافه برای غلبه بر افت کارپذیری دارد. اگرچه پوشاندن مصالح سنگی دارای سطح صاف با لعاب نازک قیر ممکن است آسان‌تر باشد، لیکن قیر با مصالح سنگی زبر پیوند مکانیکی قوی‌تری تشکیل می‌دهد (مالیک و الکورچی، ۲۰۱۷). این مسئله موجب افزایش مقاومت مخلوط در برابر تنش‌های کششی ناشی از انقباض در دمای کم می‌شود. با توجه به مطالب فوق، در این پژوهش، انتظار می‌رود که مخلوط‌های آسفالتی حاوی سنگ‌آهک نوع دو و سیلیسی نوع یک به ترتیب دارای بهترین و بدترین عملکرد، با فرض ثابت بودن سایر پارامترها، باشند.

در این پژوهش، به منظور بررسی تأثیر هم‌زمان سه پارامتر شکل‌دانه، گوشه‌داری و بافت سطحی سنگدانه‌ها، از آزمایش شاخص دانه استفاده گشته و نتایج آن در جدول ۹ نشان داده شده است. بر اساس استاندارد ASTM D3398 (۲۰۰۶)، مقادیر بیشتر شاخص دانه بیانگر درصد شکستگی بیشتر و بافت سطحی زبرتر سنگدانه می‌باشد. مخلوط‌های آسفالتی حاوی سنگدانه‌های تیزگوشه و بافت سطحی زبر دارای بهترین عملکرد به عنوان روسازی‌های انعطاف‌پذیر می‌باشند، زیرا سنگدانه‌های تیزگوشه قفل و بست و اصطکاک بیشتری داشته و لذا موجب پایداری مکانیکی بهتر مخلوط‌های آسفالتی در

جدول ۹. نتایج آزمایش شاخص دانه برای چهار نوع سنگدانه مورد استفاده در این پژوهش

قطر الک (mm)	درصد عبوری (%)	درصد مانده (%)	شاخص مصالح سنگی برای مصالح مانده روی هر الک		
			سنگ آهک نوع یک	سنگ آهک نوع دو	سیلیسی نوع یک
۱۹	۱۰۰	۰	-	-	-
۱۲/۵	۹۵	۵	۱۶/۷	۱۷/۸	۱۵/۴
۴/۷۵	۵۹	۳۶	۱۶/۷	۱۷/۸	۱۵/۴
۲/۳۶	۴۳	۱۶	۱۵/۳	۱۶/۲	۱۴/۱
۰/۳	۱۳	۳۰	۱۳/۹	۱۴/۱	۱۳/۳
۰/۰۷۵	۶	۷	۱۳/۹	۱۴/۱	۱۳/۳
شاخص دانه برای کل مصالح سنگی			۱۵/۳۵۹۶	۱۶/۰۷۱۳	۱۳/۰۵۵۳
			۱۴/۳۵۲۱		

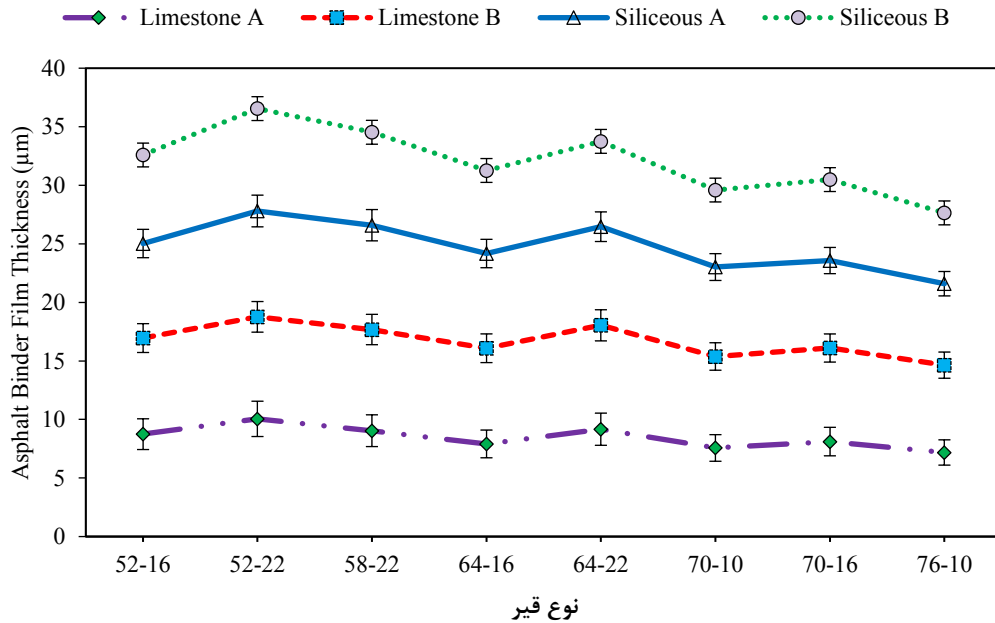
۶-۴. ضخامت ظاهری غشای قیر

محققین در گزارش NCHRP 576 بیان کرده‌اند که دلایلی برای ارتباط ضخامت ظاهری غشای قیر با عملکرد روسازی وجود دارد. این مطالب به صورت خاص با شیارشدگی و پیرشدگی مخلوط آسفالتی ارتباط پیدا می‌کند. مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر شیارشدگی با کاهش در فضای خالی بین مصالح سنگی و نیز کاهش سنگدانه‌های ریز افزایش می‌یابد. چون مقدار قیر مورد نیاز با کاهش فضای خالی در مصالح سنگی کاهش می‌یابد، می‌توان گفت که کاهش در مقدار قیر و ضخامت غشای قیر موجب افزایش مقاومت آسفالت در برابر پدیده شیارشدگی می‌شود. این موضوع باعث شده تا در NCHRP 576 مقدار ضخامت ظاهری غشای قیر ۱۰ میکرون را به عنوان مقدار حد بالا جهت جلوگیری از شیارشدگی بیان کنند. کم بودن مقادیر ضخامت ظاهری غشای قیر باعث می‌شود تا جابجایی و تراکم مخلوط آسفالتی مشکل باشد و این نوع مخلوط مستعد جدشدگی^۱، درصد فضای خالی زیاد در محل، نفوذپذیری زیاد و مستعد بودن در برابر گردشگری^۲ و ترک خوردگی خستگی و دماکم است. در NCHRP 576

مقدار ضخامت ظاهری غشای قیر ۶ میکرون را به عنوان مقدار حد پایین جهت جلوگیری از جدشدگی و ترک خوردگی مخلوط آسفالتی بیان می‌کند (جنکس و همکاران، ۲۰۱۱). نتایج ضخامت ظاهری غشای قیر در شکل ۶ نشان داده شده است. شکل ۶ نشان می‌دهد که ضخامت ظاهری غشای قیر در ۳۲ ترکیب مخلوط آسفالتی مورد استفاده در این پژوهش بین ۶/۶۲ تا ۱۰/۰۵ میکرون بوده است. نتایج ارائه شده نشان می‌دهد که ضخامت غشای قیر در مورد قیرهای نرم‌تر در سنگدانه‌های سنگ‌آهک نوع دو که دارای بیشترین خلل و فرج بوده است، بیشترین مقدار شده است. این موضوع در مورد دو نوع سنگدانه سیلیسی که دارای وزن مخصوص بیشتر و خلل و فرج سطحی کمتری هستند به صورت معکوس وجود دارد. نکته دیگر که در داده‌ها مشاهده می‌شود این است که قیرهای با درجه کمتر حد کم عملکردی (PG 52-22, PG 58-22, 64-22) دارای بیشترین ضخامت غشای قیر روی سطح سنگدانه خود بوده‌اند و به صورت معکوس، قیرهای سفت‌تر و با درجه بالاتر حد بالای عملکردی (PG 76-10, PG 70-16, 70-10) دارای مقادیر ضخامت کمتری از قیر روی سطح سنگدانه‌های خود هستند.

²- Raveling

¹- Segregation



شکل ۶. ضخامت ظاهری غشای قیر در مخلوط‌های مختلف

۴-۷. آزمایش SCB

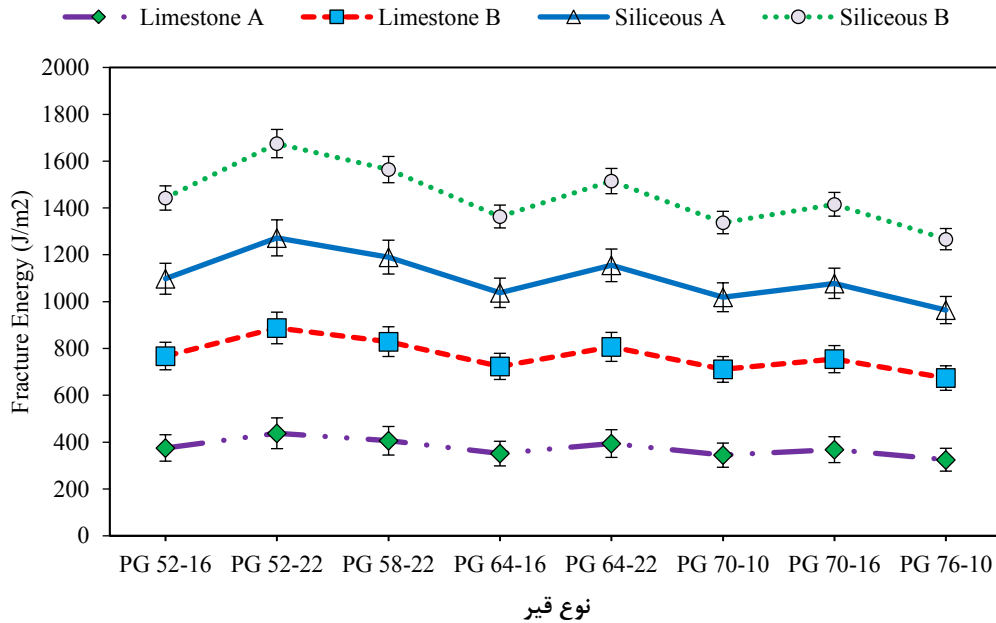
مطابق مطالعات انجام شده، چهار فاکتور مختلف بار حداکثر، سختی، انرژی شکست و چقرمگی شکست از آزمایش‌های SCB قابل استخراج است. با این وجود، سه پارامتر سختی، انرژی شکست و چقرمگی شکست به عنوان پارامترهای قابل اعتمادتری در آنالیز نتایج شکست و ترک‌خوردگی دماکم شناخته می‌شوند (ماراستینو و همکاران، ۲۰۰۴). در استاندارد AASHTO TP105 (۲۰۱۵) که به عنوان استاندارد اجرایی برای ترک‌خوردگی حرارتی پیشنهاد شده است، این سه پارامتر معرفی شده‌اند. همچنین، نتایج مطالعات دیگر نشان می‌دهد که دو فاکتور انرژی شکست و چقرمگی شکست بیشترین سازگاری را با نتایج میدانی ترک‌خوردگی حرارتی از خود نشان می‌دهند. با توجه به این مطالعات، در این پژوهش، دو پارامتر انرژی شکست و چقرمگی شکست به عنوان معیارهای ترک‌خوردگی حرارتی در نظر گرفته شده‌اند.

۴-۷-۱. انرژی شکست

نتایج مربوط به انرژی شکست در مخلوط‌های مختلف آسفالتی در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج ارائه شده در این شکل بیان می‌کند که نوع سنگدانه و نوع قیر تأثیر قابل توجهی بر انرژی شکست دارند. در حالت کلی می‌توان گفت که استفاده از سنگدانه‌های سنگ‌آهک باعث ایجاد مقدار انرژی شکست بیشتر در مخلوط‌های آسفالتی شده است. دلیل این امر را می‌توان به چسبندگی بیشتر بین قیر و سنگدانه، سطح متخلخل زیاد در سنگدانه‌های آهکی و شاخص سنگدانه‌ها نسبت داد. همچنین نوع سنگدانه و نوع قیر نیز یک عامل مهم در مقدار انرژی شکست برای مخلوط‌های آسفالتی است. با توجه به نتایج شکل ۷ می‌توان گفت که نمونه‌های مخلوط آسفالتی ساخته شده با قیرهای PG 52-22، PG 58-22 و PG 64-22 دارای بیشترین مقادیر انرژی شکست هستند. دلیل اصلی این مطلب را می‌توان به سختی کم و نرخ استهلاک سختی زیاد در این قیرها

از مخلوط‌های آسفالتی تا قبل از لحظه گسیختگی، انرژی بیشتری را جذب می‌کنند.

نسبت داد. این امر باعث انعطاف‌پذیری و سازگاری بیشتر با تغییرات در سختی می‌شود. نتیجه این است که این نوع

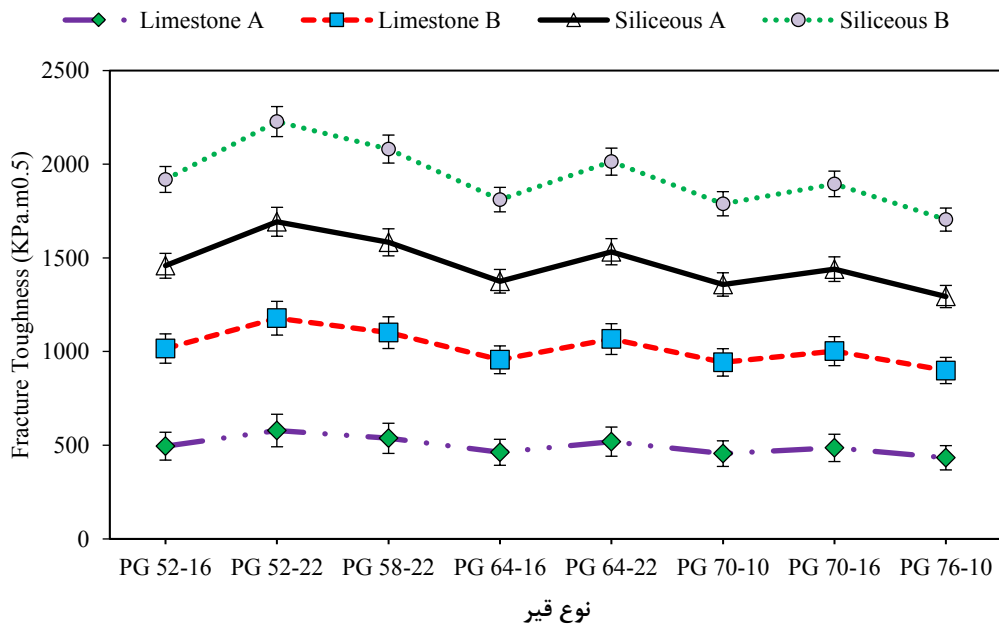


شکل ۷. انرژی شکست در مخلوط‌های آسفالتی مختلف

ترکیب‌های مختلف مخلوط آسفالتی وجود دارد. دامنه تغییرات این پارامتر در مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده در این پژوهش از $394/850 \text{ kPa.m}^{0.5}$ در نمونه‌های ساخته شده با قیر PG 76-10 و سنگدانه سیلیسی نوع اول تا $394/850 \text{ kPa.m}^{0.5}$ در نمونه‌های با قیر PG 52-22 و سنگدانه سنگ‌آهک نوع دوم متغیر بوده است. استفاده از قیرهای نرم با حد کمتر درجه عملکردی سبب شده تا پارامتر چقرمگی شکست افزایش یابد. همچنین، سنگدانه‌های سنگ‌آهک نیز در بهبود این پارامتر نقش مؤثری دارند.

۲-۷-۴. چقرمگی شکست

برای مشخص کردن میدان تنش در مجاورت نوک ترک، از فاکتور شدت تنش (K) استفاده می‌شود. مطالعات پیشین نشان می‌دهند که این پارامتر نسبت به پارامتر انرژی شکست به تغییرات دما و نرخ بارگذاری حساس‌تر است (ماراستینو و همکاران، ۲۰۰۷). نتایج چقرمگی شکست در مخلوط‌های آسفالتی این پژوهش در شکل ۸ نشان داده شده است. نتایج این شکل نشان می‌دهد که تفاوت قابل ملاحظه‌ای در پارامتر چقرمگی شکست در



شکل ۸. چقرمگی شکست در مخلوط‌های آسفالتی

۴-۸. تحلیل آماری

در این قسمت، تحلیل آماری و مدل‌سازی بر اساس متغیرهای مستقل انرژی آزاد سطحی و طرح اختلاط با متغیرهای وابسته، که عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر ترک‌خوردگی دماکم هستند و از آزمایش‌های SCB به دست آمده‌اند، انجام شده است. در تحلیل نتایج آزمایش از هشت متغیر مستقل شامل ضخامت ظاهری غشای قیر روی سنگدانه، شاخص سنگدانه، انرژی آزاد پیوستگی، انرژی آزاد چسبندگی، مساحت سطح ویژه سنگدانه، نسبت بازی به اسیدی انرژی آزاد سطحی، سختی و ظرفیت وارفتگی تنش استفاده شده است. در این تحلیل، دو متغیر وابسته انرژی شکست و چقرمگی شکست به عنوان معیارهای ترک‌خوردگی دماکم در نظر گرفته شده‌اند.

۴-۸-۱. مدل انرژی شکست

به منظور تحلیل تأثیر متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته انرژی شکست، از ANOVA^۱ استفاده شده است که نتایج آن در جدول ۱۰ ارائه شده است. با توجه به سطح اطمینان ۰/۰۵ (α=۰/۰۵)، درجه آزادی ۸ (برابر با تعداد متغیرهای مستقل) برای رگرسیون و درجه آزادی ۲۳ (۱- تعداد متغیرهای مستقل - تعداد نمونه‌ها) برای باقیمانده‌ها در تابع توزیع F، مقدار ناحیه بحرانی در رابطه (۲۵) تعریف می‌گردد:

$$F \geq F_{(0.05)}(8,23) = 25936 \quad (25)$$

با مقایسه مقدار حاصل از تابع توزیع F و مقدار بحرانی عبارت فوق می‌توان گفت که فرض عدم برازش مدل ارائه شده به وسیله این آزمون رد می‌شود. پس مدل قادر بوده برازش مناسبی بین متغیرهای وابسته و مستقل ایجاد کند. حال می‌توان گفت که ارتباط بین متغیرهای وابسته و مستقل تصادفی نیست.

^۱- Analysis of variance

جدول ۱۰. تحلیل واریانس متغیرهای مستقل روی متغیر وابسته انرژی شکست

مدل	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	Sig.
رگرسیون	۴۹۴۴۰/۱۲۳	۸	۶۱۸۰/۰۱۵	۲۵۹۳۶	۰/۰۰۰
باقیمانده	۵/۴۸۰	۲۳	۲۳۸		
مجموع	۴۹۴۴۵/۶۰۳	۳۱			

که نشان‌دهنده توصیف مناسب متغیرهای مستقل توسط متغیر وابسته است. مقدار ضریب تعیین تعدیل شده^۱ نیز برابر با ۰/۹۳۱ می‌باشد. مقدار خطای استاندارد تخمین نیز ۱۶/۱۰۸ به دست آمده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار ضریب تعیین طبق جدول ۱۱ برای مدل ارائه شده در این پژوهش ۰/۷۹۵ بوده است. همچنین، جذر این پارامتر، یعنی ضریب همبستگی چندگانه (R)، برابر با ۰/۹۲۱ می‌باشد

جدول ۱۱. جمع بندی نتایج مدل انرژی شکست

مدل	R	R ²	Adjusted R ²	خطای استاندارد تخمین
۱	۰/۹۳۱	۰/۸۴۸	۰/۷۹۵	۱۶/۱۰۸

ترک خوردگی در مخلوط‌های آسفالتی در شرایط دما کم اضافه یا کم می‌شود. با توجه به داده‌های ستون ضرایب معیار در جدول ۱۲، انرژی آزاد پیوستگی و انرژی آزاد چسبندگی بیشترین مقدار اثر را در افزایش انرژی شکست به عنوان معیار مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر ترک خوردگی دما کم داشته‌اند. این در حالی است که شاخص سختی مخلوط آسفالتی نیز تأثیر منفی قابل ملاحظه‌ای در عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر این خرابی ایجاد کرده است. با توجه به داده‌های این جدول می‌توان بیان داشت که تمام متغیرهای به کار گرفته شده در این تحقیق دارای ضرایب معناداری بر ترک خوردگی دما کم مخلوط‌های آسفالتی هستند. داده‌های ستون sig. نشان می‌دهد که همه متغیرهای مستقل مورد استفاده در این پژوهش بر متغیر انرژی شکست، که معیار ترک خوردگی دما کم است، به شکل معناداری مؤثر هستند.

در جدول ۱۲، ضرایب مدل رگرسیون چندگانه و آزمون‌های معناداری ضرایب نمایش داده شده است. ضرایب مدل رگرسیون همان ستون ضرایب غیرمعیار^۲ است. با توجه به داده‌های جدول، می‌توان بیان داشت که ضرایب مربوط به شاخص سنگدانه، ضخامت ظاهری غشای قیر روی سنگدانه، انرژی آزاد چسبندگی، انرژی آزاد پیوستگی، مساحت سطح ویژه سنگدانه، نسبت بازی بودن به اسیدی بودن انرژی آزاد سطحی و ظرفیت وارفتگی تنش، مثبت است. این موضوع نشان می‌دهد که با افزایش این پارامترها، انرژی شکست به عنوان مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر ترک خوردگی حرارتی افزایش می‌یابد. برعکس، می‌توان گفت که سختی اثر منفی بر مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر ترک خوردگی دما کم دارد و افزایش سختی قیر موجب می‌شود تا خرابی‌های ناشی از دمای کم روسازی افزایش یابد. این ضریب مشخص می‌کند که به ازای یک واحد تغییر در هر کدام از این پارامترها چه مقدار به مقاومت در برابر

²- Unstandardized coefficients

¹- Adjusted coefficient of determination

جدول ۱۲. ضرایب مدل پیش‌بینی ترک‌خوردگی دماکم بر اساس انرژی شکست

Sig.	t	ضرایب استاندارد		مدل
		Beta	Std. Error	
۰/۳۵۷	۰/۹۴۰		۱۶/۴۶۸	ثابت
۰/۰۰۰	۱۵/۸۳۸	۰/۱۲۱	۰/۳۵۵	ضخامت غشای قیر روی سنگدانه
۰/۰۰۵	۳/۱۱۴	۰/۱۱۳	۱/۲۶۶	شاخص سنگدانه
۰/۰۰۰	۴۸/۸۰۶	۰/۴۴۵	۰/۰۲۸	انرژی آزاد پیوستگی
۰/۰۰۰	۲۵/۶۰۲	۰/۲۶۷	۰/۰۳۳	انرژی آزاد چسبندگی
۰/۰۰۰	۵/۶۹۴	۰/۱۴۹	۲/۶۱۸	مساحت سطح ویژه سنگدانه
۰/۰۰۰	۴/۴۷۶	۰/۰۸۶	۰/۱۵۳	نسبت باز به اسید انرژی آزاد سطحی
۰/۰۰۰	-۱۹/۵۶۲	-۰/۱۷۶	۰/۰۱۱	سختی
۰/۰۰۰	۵/۸۳۷	۰/۰۵۴	۸/۳۲۴	نرخ وارفتگی تنش

ترک‌خوردگی دمایی در این قسمت بررسی شده است. نتایج تحلیل آنوا در جدول ۱۳ به منظور بررسی تأثیر هشت متغیر مستقل بر متغیر وابسته چقرمگی شکست ارائه شده است. مقدار سطح اطمینان در نظر گرفته شده ۰/۰۵ است. همچنین، درجه آزادی برای رگرسیون و باقیمانده‌ها به ترتیب ۸ و ۲۳ می‌باشد. بر این اساس، تابع توزیع F ، مقدار ناحیه بحرانی به صورت رابطه (۲۷) تعریف می‌شود:

$$F \geq F_{(0.05)}(8,23) = 25936 \quad (27)$$

با مقایسه مقدار به دست آمده از تابع توزیع F (۲۵۹۳۶) و مقدار به دست آمده از جدول ۱۳ می‌توان گفت که ارتباط بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته وجود دارد و تغییرات در متغیر وابسته ناشی از تغییر در هر متغیر وابسته تصادفی نیست و معنادار است.

در رابطه (۲۶)، مدل پیش‌بینی شاخص ترک‌خوردگی دماکم بر اساس انرژی شکست ارائه شده است.

$$G_f = 15.475 + 5.630AFT + 3.942I_a + 1.377CE + 0.85AE + 14.908SSA + 0.684BtoA - 0.206S + 48.588m \quad (26)$$

که در این رابطه، G_f انرژی شکست، AFT ضخامت ظاهری غشای قیر، I_a شاخص سنگدانه، CE انرژی آزاد پیوستگی، AE انرژی آزاد چسبندگی، SSA مساحت سطح ویژه سنگدانه، $B to A$ نسبت مؤلفه بازی به مؤلفه اسیدی انرژی آزاد سطحی برای سنگدانه‌ها، S سختی قیر و M نرخ وارفتگی تنش است.

۲-۸-۴. مدل چقرمگی شکست

مانند انرژی شکست، تأثیر هشت متغیر مستقل بر متغیر وابسته چقرمگی شکست به عنوان معیاری برای

جدول ۱۳. تحلیل واریانس متغیرهای مستقل روی متغیر وابسته چقرمگی شکست

مدل	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	Sig.
رگرسیون	۸۰۱۷۴/۷۵۴	۸	۱۰۰۲۱/۸۴۴	۴۲۱۷۷	۰/۰۰۰
باقیمانده	۵/۴۶۵	۲۳	۰/۲۳۸		
مجموع	۸۰۱۸۰/۲۱۹	۳۱			

توسط متغیر وابسته است. مقدار ضریب تعیین تعدیل شده نیز برابر با ۰/۹۶۹ می‌باشد که تأثیر تعداد متغیرهای مستقل و تعداد داده‌ها در شاخص برازش مدل دیده می‌شود. مقدار خطای استاندارد تخمین نیز ۸/۰۵۰ به دست آمده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار ضریب تعیین طبق جدول ۱۴ برای مدل ارائه شده در این پژوهش ۰/۹۵۱ بوده است. همچنین، جذر این پارامتر، یعنی ضریب همبستگی چندگانه (R)، برابر با ۰/۹۸۸ می‌باشد که نشان‌دهنده توصیف بسیار مناسب متغیرهای مستقل

جدول ۱۴. جمع‌بندی نتایج مدل چقرمگی شکست

مدل	R	R ²	Adjusted R ²	خطای استاندارد تخمین
۱	۰/۹۸۸	۰/۹۵۱	۰/۹۶۹	۸/۰۵۰

ضعیف شود. همان‌طور که از داده‌های ستون ضرایب معیار جدول ۱۵ مشخص است، انرژی آزاد پیوستگی و انرژی آزاد چسبندگی نسبت به سایر پارامترها تأثیر مثبت مشهودتری بر عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر ترک خوردگی دماکم دارند. با توجه به این جدول، می‌توان گفت که تمام متغیرهای به کار رفته در این تحقیق دارای ضرایب معنادار بر ترک خوردگی حرارتی مخلوط‌های آسفالتی هستند. با توجه به مقدار سطح اطمینان ۰/۰۵ ($\alpha=0/05$) می‌توان مشاهده نمود که همه متغیرهای مستقل مورد استفاده بر انرژی شکست به عنوان معیار ترک خوردگی حرارتی به شکل معناداری تأثیرگذار هستند.

در جدول ۱۵، ضرایب مدل رگرسیون چندگانه و آزمون‌های معناداری ضرایب نشان داده شده است. همان‌طور که از داده‌های این جدول مشخص است، افزایش در مقدار ضرایب مربوط به ضخامت ظاهری غشای قیر روی سنگدانه، شاخص سنگدانه، انرژی آزاد پیوستگی، انرژی آزاد چسبندگی، مساحت سطح ویژه سنگدانه، نسبت بازی به اسیدی انرژی آزاد سطحی و ظرفیت وارفتگی تنش تأثیر مثبت بر چقرمگی شکست به عنوان مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر ترک خوردگی دماکم دارد. سختی تنها پارامتری است که افزایش در آن باعث می‌شود تا پتانسیل ترک خوردگی دماکم در مخلوط آسفالتی افزایش یابد و مخلوط در برابر این خرابی

جدول ۱۵. ضرایب مدل پیش‌بینی ترک خوردگی دماکم بر اساس انرژی شکست

Sig.	t	ضرایب استاندارد		مدل
		Beta	Std. Error	
۰/۱۲۰	۱/۶۱۳		۱۶/۴۴۵	ثابت
۰/۰۰۰	۱۳/۶۹۱	۰/۰۸۲	۰/۳۵۵	ضخامت غشای قیر روی سنگدانه
۰/۰۰۴	۳/۱۵۳	۰/۰۹۰	۱/۲۶۴	شاخص سنگدانه
۰/۰۰۰	۷۰/۵۵۱	۰/۵۰۵	۰/۰۲۸	انرژی آزاد پیوستگی
۰/۰۰۰	۴۱/۸۸۸	۰/۳۴۳	۰/۰۳۳	انرژی آزاد چسبندگی
۰/۰۰۰	۴/۷۰۰	۰/۰۹۶	۲/۶۱۵	مساحت سطح ویژه سنگدانه

نسبت باز به اسید انرژری آزاد	۰/۸۰۶	۰/۱۵۳	۰/۰۷۹	۵/۲۸۳	۰/۰۰۰
سطحی					
سختی	-۰/۲۵۴	۰/۰۱۱	-۰/۱۷۱	-۲۴/۲۱۵	۰/۰۰۰
نرخ وارفتگی تنش	۳۶/۷۲۹	۸/۳۱۳	۰/۰۳۲	۴/۴۱۸	۰/۰۰۰

است. مهم‌ترین نتایج به دست آمده در این پژوهش عبارتند از:

- مخلوط‌های آسفالتی حاوی سنگدانه‌های سنگ‌آهک تیز گوشه همراه با بافت سطحی زیر دارای بهترین عملکرد به عنوان روسازی‌های انعطاف‌پذیر می‌باشند، زیرا سنگدانه‌های تیز گوشه قفل و بست و اصطکاک بیشتری داشته و لذا موجب پایداری مکانیکی بهتر مخلوط‌های آسفالتی در مقایسه با سنگدانه‌های گرد گوشه می‌گردند. این مسأله می‌تواند موجب افزایش مقاومت آسفالت در برابر تنش‌های کششی ناشی از انقباض در دمای کم شود.
- قیرهای با درجه کم عملکردی (نرم‌تر) دارای مؤلفه انرژری آزاد سطحی غیرقطبی بزرگ‌تر می‌باشند. برعکس، قیرهای سفت دارای مؤلفه قطبی انرژری آزاد سطحی بزرگ هستند. این نتایج، با مطالعات پیشین بر اساس تحلیل SARA هم‌راستا است که طبق آن قیرهای سفت‌تر و با مدول بالاتر دارای مقادیر بیشتری اسفالتهای نسبت به قیرهای نرم‌تر هستند که این موضوع باعث خصوصیات قطبی بیشتر در این قیرها شده است.
- مؤلفه غیرقطبی قیر به مراتب از مؤلفه‌های قطبی آن کمتر است که این موضوع سبب شکل‌گیری پیوندهای عمدتاً غیرقطبی بین قیر-سنگدانه می‌شود. همچنین، در مقایسه بین مؤلفه‌های قطبی قیر مشاهده می‌شود که قیرها خصوصیات اسیدی بیشتر نسبت به خصوصیات بازی‌شان دارند.
- قیرهای نرم‌تر دارای مقدار انرژری آزاد پیوستگی بزرگ‌تری نسبت به قیرهای سفت‌تر هستند. این بدین

مدل پیش‌بینی چقرمگی شکست طبق رابطه (۲۸) ارائه شده است.

$$FT = 26.528 + 4.860AFT + 3.985I_a \quad (28)$$

$$+ 1.988CE$$

$$+ 1.388AE$$

$$+ 12.290SSA$$

$$+ 0.806BtoA$$

$$- 0.254S$$

$$+ 36.729m$$

که پارامتر FT چقرمگی شکست است و سایر پارامترها قبلاً معرفی شده‌اند.

۵. نتیجه‌گیری

روش‌های متعددی به منظور بررسی ترک‌خوردگی حرارتی وجود دارند که معمولاً بر پایه نتایج آزمایش‌های مکانیکی به وسیله مفاهیم شکست روی مخلوط‌های آسفالتی یا نتایج آزمایش‌های رئولوژیک قیر استوارند. علی‌رغم گستردگی استفاده از این روش‌ها و سایر مدل‌های پیش‌بینی می‌توان گفت خلأ استفاده از مدل یا روش‌هایی بر پایه مشخصات مواد تشکیل‌دهنده مخلوط آسفالتی احساس می‌شود. در این تحقیق، سعی شد با مفهوم تئوری انرژری آزاد سطحی و متغیرهای سنگدانه و قیر، موضوع ترک‌خوردگی حرارتی در آسفالت بررسی گردد. بر این اساس، انرژری آزاد پیوستگی قیر، انرژری آزاد چسبندگی قیر-سنگدانه و نسبت بازی به اسیدی انرژری آزاد سطحی سنگدانه به همراه پارامترهای رئولوژیک قیر، خصوصیات سطحی سنگدانه و پارامترهای طرح اختلاط در ۳۲ ترکیب مخلوط آسفالتی بررسی شده است و تأثیر آن‌ها بر پارامترهای انرژری شکست و چقرمگی شکست به عنوان معیارهای ترک‌خوردگی دماکم تحلیل شده

- استفاده از سنگدانه‌های با تخلخل و خصوصیات بازی بیشتر باعث ایجاد مقدار انرژی شکست و چقرمگی شکست بیشتر در مخلوط‌های آسفالتی شده است. دلیل اصلی این امر را می‌توان در چسبندگی بیشتر بین قیر و سنگدانه و سطح متخلخل بیشتر سنگدانه آهکی و شاخص سنگدانه‌های آن دانست. نتایج تحلیل‌های آماری نشان می‌دهد که نوع سنگدانه تأثیر معناداری بر شاخص‌های انرژی شکست و چقرمگی شکست داشته است.
- قیرهای نرم‌تر دارای عملکرد بهتری از نظر شاخص انرژی شکست و چقرمگی شکست در رخداد ترک خوردگی دماکم هستند. دلیل این امر را می‌توان در سختی کم و نرخ استهلاک سختی زیاد در این قیرها دانست که باعث انعطاف و سازگاری بیشتر می‌گردد. این امر باعث می‌شود این نوع مخلوط آسفالتی تا قبل از زمان گسیختگی، انرژی بیشتری را جذب نماید.
- معنی است که برای گسیختگی در قیر نرم‌تر مقدار انرژی بیشتر لازم است. همچنین، این پژوهش نشان می‌دهد که قسمت عمده افزایش مقاومت قیر در برابر ترک در غشای قیر مربوط به بخش غیرقطبی انرژی آزاد سطحی قیر است و بخش اسیدی- بازی نقش قابل توجهی در تقویت یا تضعیف مقاومت قیر در برابر این ترک خوردگی ندارد.
- نتایج نشان می‌دهد که هر قدر سنگدانه دارای خصوصیات بازی بیشتر باشد، چسبندگی بین قیر و سنگدانه به نحو مناسب‌تری ایجاد می‌شود. دلیل این موضوع این است که قیر دارای مؤلفه اسیدی بزرگتری نسبت به مؤلفه بازی آن است. این موضوع موجب چسبندگی بهتر قیر با سنگدانه بازی با درصد‌های بیشتر CaO می‌شود.
- نتایج آزمایش‌های رئولوژیک قیر نشان می‌دهد که خصوصیات ترک خوردگی دماکم قیرهای مورد استفاده در این پژوهش به نحو قابل توجهی با یکدیگر تفاوت دارد.

۶. مراجع

- غنی‌زاده، ع. ۱۳۹۴. "کاربرد سیستم استنتاج تطبیقی عصبی - فازی به منظور مدل‌سازی شاخص ناهمواری بین‌المللی در روسازی‌های بتنی غیرمسلح درزدار". مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل.
- شرافتی‌سوها، م. دهقان‌بنادکی، ع. و خواری، م. ۱۳۹۸. "تخمین نسبت باربری کالیفرنیا در خاک‌های مردابی بهسازی شده با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی". مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل.
- AASHTO TP105. 2015. "Standard method for determining the fracture energy of asphalt mixtures using the semi circular bend geometry (SCB)". American Association of State Highway and Transportation Organization, Washington, DC.
- AASHTO T313. 2019. "Standard method of test for determining the flexural creep stiffness of asphalt binder using the bending beam rheometer (BBR)". Washington, DC.
- Akbari, A. and Modarres, A. 2020. "Fatigue response of HMA containing modified bitumen with nano-clay and nano-alumina and its relationship with surface free energy parameters". Road Mater. Pavement Design, 21(6): 1490-1513.
- Al-Qadi, I. L., Abauwad, I. M., Dhasmana, H. and Coenen, A. R. 2014. "Effects of various asphalt binder additives/modifiers on moisture-susceptible asphaltic mixtures". Illinois Center for Transportation.
- Al-Qudsi, A., Falchetto, A. C., Wang, D., Büchler, S., Kim, Y. S. and Wistuba, M. P. 2020. "Finite element cohesive fracture modeling of asphalt mixture based on the semi-circular bending (SCB) test and self-affine fractal cracks at low temperatures". Cold Reg. Sci. Tech., 169: 102916.
- Alvarez, A. E., Diaz, E. J., Mejía, R. A., Arámbula-Mercado, E. and Reyes-Ortiz, O. J. 2023. "Optimizing the dose of warm-mix asphalt additives by maximizing the asphalt-aggregate adhesion measured via surface-free energy". J. Mater. Civ. Eng., 35(2): 04022410.
- ASTM D3398. 2006. "Standard test method for index of aggregate particle shape and texture". West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D8303. 2020. "Standard test method for determining thermal cracking properties of asphalt mixtures through measurement of thermally induced stress and strain". West Conshohocken, PA, USA.
- Aurangzeb, Q., Al-Qadi, I. L., Pine, W. J., Trepanier, J. S. and Abuawad, I. M. 2012. "Thermal cracking potential in asphalt mixtures with high RAP contents". 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements: Mechanisms, Modeling, Testing, Detection and Prevention Case Histories (pp. 1271-1280). Springer, The Netherlands.
- Azarhoosh, A., Moghadas Nejad, F. and Khodaii, A. 2017. "The influence of cohesion and adhesion parameters on the fatigue life of hot mix asphalt". J. Adhes., 93(13): 1048-1067.
- Azarhoosh, A. R. 2018. "Evaluating fatigue of asphalt mixtures using surface free energy method". PhD Dissertation, Amirkabir University of Technology.
- Baumanis, J., Riekstins, A. and Balodis, A. 2021. "Investigation of comparability of TSRST and SCB cracking tests for evaluation of low-temperature properties in asphalt mixtures and use in quality control". In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 1202, No. 1, p. 012022). IOP Publishing.
- Bhasin, A. 2006. "Development of methods to quantify bitumen-aggregate adhesion and loss of adhesion due to water". Texas A&M University.
- Bhasin, A., Masad, E., Little, D. and Lytton, R. 2006. "Limits on adhesive bond energy for improved resistance of hot-mix asphalt to moisture damage". Transport. Res. Record: J. Transport. Res. Board, 1970: 3-13.
- Bhasin, A., Little, D. N., Vasconcelos, K. L. and Masad, E. 2007. "Surface free energy to identify moisture sensitivity of materials for asphalt mixes". Transport. Res. Record, 2001(1): 37-45.
- Brown, E., Kandhal, P. S., Roberts, F. L., Kim, Y. R., Lee, D. Y. and Kennedy, T. W. 2009. "Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction". NAPA Research and Education Foundation, Lanham, MD.
- Cheng, D. 2002. "Surface free energy of asphalt-aggregate system and performance analysis of asphalt concrete". PhD Dissertation, Civil Engineering, Texas A&M University.
- Cheng, D., Little, D. N., Lytton, R. L. and Holste, J. C. 2003. "Moisture damage evaluation of asphalt mixtures by considering both moisture diffusion and repeated-load conditions". Transport. Res. Record, 1832(1): 42-49.
- Christensen, D. W. and Bonaquist, R. F. 2006. "Volumetric requirements for Superpave mix design". Transport. Res. Board, 567.

- Esmaeili, N., Hamed, G. H. and Khodadadi, M. 2019. "Determination of the stripping process of asphalt mixtures and the effective mix design and SFE parameters on its different phases". *Constr. Build. Mater.*, 213: 167-181.
- Golchin, B., Hekmat, A. and Hamed, G. H. 2022. "Effects of metallic nano materials on the cohesion and adhesion properties of asphalt binders and aggregates using surface free energy method". *J. Civ. Environ. Eng.*, 52(108): 117-126.
- Hamed, G. H. and Moghadas Nejad, F. 2016. "Evaluating the effect of mix design and thermodynamic parameters on moisture sensitivity of hot mix asphalt". *J. Mater. Civ. Eng.*, 29(2): 04016207.
- Hefer, A. W. 2004. "Adhesion in bitumen-aggregate systems and quantification of the effects of water on the adhesive bond". Texas A&M University.
- Jenks, C. W., Jencks, C. F., Harrigan, E. T., Adcock, M., Delaney, E. P. and Freer, H. 2011. "NCHRP Report 673: A manual for design of hot mix asphalt with commentary". Transport. Res. Board, Washington, DC.
- Jung, D. H., and Vinson, T. S. 1994. Low-temperature cracking: Test selection (No. SHRP-A-400).
- Kringos, N., Scarpas, A., Copeland, A. and Youtcheff, J. 2008. "Modelling of combined physical-mechanical moisture-induced damage in asphaltic mixes, Part 2: moisture susceptibility parameters". *Int. J. Pavement Eng.*, 9(2): 129-151.
- Li, X. and Marasteanu, M. O. 2006. "Investigation of low temperature cracking in asphalt mixtures by acoustic emission". *Road Mater. Pavement Design*, 7(4): 491-512.
- Mallick, R. B. and El-Korchi, T. 2017. "Pavement engineering: principles and practices". CRC Press.
- Marasteanu, M., Li, X., Clyne, T., Voller, V., Timm, D. and Newcomb, D. 2004. "Low temperature cracking of asphalt concrete pavement". Center for Transportation Studies.
- Marasteanu, M., Zofka, A., Turos, M., Li, X., Velasquez, R., Li, X. and Dave, E. 2007. "Investigation of low temperature cracking in asphalt pavements national pooled fund study 776". Center for Transportation Studies.
- Ofori-Abebresse, E. K. 2006. "Fatigue resistance of hot-mix asphalt concrete (HMAC) mixtures using the calibrated mechanistic with surface energy (CMSE) measurements approach". Texas A&M University.
- Xiao, R., Ding, Y., Polaczyk, P., Ma, Y., Jiang, X. and Huang, B. 2022. "Moisture damage mechanism and material selection of HMA with amine antistripping agent". *Mater. Design*, 220: 110797.
- Xu, Y., Zhang, E. and Shan, L. 2019. "Effect of SARA on rheological properties of asphalt binders". *J. Mater. Civ. Eng.*, 31(6): 04019086.
- Yang, T., Jia, Y., Pan, Y. and Zhao, Y. 2022. "Evaluation of the low-temperature cracking performance of recycled asphalt mixture: A development of equivalent fracture temperature". *Build.*, 12(9): 1366.
- Yalghouzaghaj, M. N., Sarkar, A., Hamed, G. H. and Hayati, P. 2021. "Evaluation of the effect of UHMWPE on the low-temperature cracking of hot-mix asphalt". *J. Mater. Civ. Eng.*, 33(3): 04020488.