



بررسی تاثیر استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی و جوان ساز بر رفتار شکست مخلوط آسفالتی گرم

سجاد پیرمحمد*^۱، سعید صبحی^۲، افشار یوسفی^۳

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
۲- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران
۳- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۱۳
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۴/۰۱
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۲۵
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۵/۲۸

کلمات کلیدی:

آزمایش خمش نیم دایره ای
آسفالت گرم
تراشه آسفالت بازیافتی
جوان ساز
مقاومت در برابر ترک خوردگی

خلاصه: بازیافت آسفالت یا به عبارت دیگر استفاده مجدد از روسازی ساخته شده، یکی از تکنولوژی های جدید در حوزه راه سازی است که در حال حاضر مقبولیت بیشتری نسبت به روش های دیگر بهسازی روسازی دارد. این تکنولوژی علاوه بر حفظ بهتر محیط زیست، کاهش هزینه قابل ملاحظه ای را به دنبال دارد. اما یکی از نگرانی های عمده استفاده بیشتر از آن، ایجاد ویژگی های ناخواسته در مخلوط آسفالتی از قبیل پیرشدگی قیر و کاهش مقاومت در برابر ترک خوردگی مخلوط های آسفالتی است. از راه حل های بهبود این مشکل، استفاده از افزودنی های گرم و اصلاح کننده های جوان ساز است. از این رو، در این پژوهش به منظور ارزیابی تأثیر استفاده از آسفالت بازیافتی در مقاومت شکست مخلوط های آسفالتی گرم، از تراشه های آسفالتی بازیافتی با دو مقدار مختلف ۲۵ و ۵۰ درصد، یک نوع جوان ساز به عنوان عامل بازیافت و ساسوبیت به عنوان افزودنی گرم استفاده شده است. برای بررسی مقاومت شکست این مخلوط های آسفالتی از آزمایش خمش نیم دایره ای در دو دمای $15^{\circ}C$ و $25^{\circ}C$ تحت مود بارگذاری I استفاده شد و پارامترهای شکست شامل حداکثر بار شکست، انرژی شکست، شاخص انعطاف پذیری، نشانه مقاومت در برابر ترک خوردگی و چقرمگی شکست محاسبه شدند. نتایج به دست آمده نشان داد که اضافه کردن تراشه های آسفالتی به مخلوط های آسفالتی در دماهای مختلف تأثیر منفی بر پارامترهای شکست داشته و باعث کاهش آن ها شد. در حالی که نمونه های آسفالتی حاوی جوان ساز نسبت به نمونه های بدون جوان ساز حالت الاستیک تر داشته و بنابراین، جوان ساز مقادیر پارامترهای شکست مخلوط های آسفالتی را بهبود بخشیده است.

۱- مقدمه

امروزه افزایش قیمت مصالح و انرژی باعث شده است که از مصالح تراشه آسفالتی به عنوان جایگزینی برای مصالح سنگی و قیر جدید در تهیه مخلوط های آسفالتی استفاده شود. طبق مطالعات پیشین، هر ساله بیش از ۱۰۰ میلیون تن مصالح خرده آسفالت از سطح راه ها تراشیده و برداشت می شود که استفاده مجدد از این مصالح می تواند به طور قابل ملاحظه ای در کاهش هزینه های تولید مخلوط های آسفالتی و همچنین اثرات زیست محیطی مؤثر واقع

شود [۱]. استفاده از درصد های کمتر از ۱۵ درصد تراشه آسفالت^۱ تأثیرات به خصوصی در مخلوط آسفالتی ایجاد نمی کند. بنابراین درصد های بالاتر (۳۰ درصد به بالا) مورد پذیرش پژوهشگران قرار گرفته و اخیراً در بیشتر پروژه های تحقیقاتی درصد بین ۱۵ الی ۴۰ به عنوان محدوده استفاده از تراشه آسفالت به کار گرفته می شود [۱]. اگر چه استفاده گسترده از تراشه آسفالت در تولید مخلوط های آسفالتی، مزایای اقتصادی و زیست محیطی قابل توجهی را داشته است، اما مهم ترین مانع در استفاده از مخلوط های آسفالتی با درصد تراشه آسفالت بالا، سفتی بیش از حد در این مخلوط ها است که

1 Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)

* نویسنده عهده دار مکاتبات: s_pirmohammad@uma.ac.ir



غیرمستقیم^۳، آزمایش تیر خمشی، آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای^۴ و آزمایش کشش فشرده دیسکی^۵ استفاده می‌گردد [۱۴-۱۲]. از میان آزمایش‌های یاد شده، آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای به علت سادگی ساخت نمونه و سهولت انجام آزمایش، یکی از آزمایش‌های رایج در بحث ارزیابی مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی است.

در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی در خصوص رفتار شکست مواد آسفالتی تحت مدهای مختلف بارگذاری انجام شده است [۱۵-۱۸]. برای مثال، آیت‌اللهی و پیرمحمد در سال ۲۰۱۳ رفتار شکست مخلوط آسفالتی داغ را با استفاده از نمونه آزمایشگاهی SCB تحت شرایط مدهای بارگذاری خالص کششی و برشی در دماهای مختلف انجام دادند. مطابق نتایج آن‌ها، چقرمگی شکست مخلوط آسفالتی داغ تا حد قابل توجهی وابسته به دما است. به طوری که با کاهش دما، میزان استحکام شکست تا حد مشخصی افزایش و سپس کاهش می‌یابد [۱۹]. در تحقیقی دیگر، پیرمحمد و آیت‌اللهی در سال ۲۰۱۵ به بررسی تأثیر نوع قیر، دانه‌بندی و فضای خالی بر روی استحکام شکست مخلوط آسفالتی داغ با استفاده از آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای تحت مدهای خالص I، II و ترکیبی I/II در دمای ۱۰- درجه سلسیوس پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از قیر نرم‌تر نسبت به سایر قیرها منجر به افزایش مقاومت شکست مخلوط آسفالتی می‌شود [۲۰]. شو و همکاران در تحقیقی با عنوان ارزیابی مقاومت در برابر ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی مصالح تراشه آسفالت با استفاده از آزمایش SCB دریافتند که استفاده از مصالح تراشه آسفالت مقاومت کششی مخلوط آسفالتی را افزایش داد و همچنین باعث کاهش پایداری و مقاومت در برابر ترک خوردگی شد [۲۱]. سینک و همکارانش در سال ۲۰۱۷ عملکرد مخلوط‌های آسفالتی حاوی مصالح تراشه آسفالت مخلوط شده با افزودنی شیمیایی را با استفاده از آزمایش SCB و محاسبه [J-انتگرال در دمای متوسط مورد مطالعه قرار دادند. مطابق نتایج آن‌ها، افزایش درصد مصالح تراشه آسفالت باعث سفتی بیشتر مخلوط آسفالتی و بهبود مقاومت شکست مخلوط‌ها شد و اضافه کردن افزودنی شیمیایی، مقاومت در برابر شکست را کاهش داده و تأثیر منفی بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها داشته است [۲۲]. محمد علیها و همکاران در سال ۲۰۱۷ به بررسی

کارایی کمتری را به همراه دارد [۲]. این مخلوط‌های آسفالتی از تراکم مناسب در محل برخوردار نبوده و در نهایت می‌تواند منجر به پیدایش ترک‌های ریز و شکست زودرس روسازی شود [۳]. با این وجود، جوان‌ساز به عنوان اصلاح‌کننده‌های مخلوط آسفالتی با بازیابی خواص فیزیکی و شیمیایی قیر پیر شده می‌تواند به طور مؤثری مقاومت در برابر ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقدار زیاد تراشه آسفالت را بهبود دهد [۴ و ۱]. جوان‌ساز دارای نسبت بالایی از رزین بوده و در واقع قیرهای پیر شده که رزین خود را از دست داده‌اند را متعادل کرده و عمری دوباره به قیرهای مصرفی شده می‌دهد [۵]. تأثیر استفاده از جوان‌ساز بر روی خواص مکانیکی و عملکرد مخلوط‌های آسفالتی و قیرها توسط پژوهشگران زیادی مورد بحث و بررسی قرار گرفته و نتایج حاکی از تأثیر قابل توجه آن‌ها است [۶ و ۷]. در کنار استفاده از تراشه آسفالت، بهره‌گیری از تکنولوژی آسفالت گرم^۱ نیز گام مؤثری در کاهش تخریب زیست محیطی و کاهش مصرف سوخت و انرژی است. استفاده از مخلوط آسفالتی داغ^۲ به علت بالا بودن دمای تراکم و اختلاط، مقدار انرژی و سوخت مصرفی را افزایش داده و با انتشار آلاینده‌ها و گازهای سمی، محیط زیست را با خطر جدی روبه‌رو می‌کند. با افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از تولید روسازی مخلوط آسفالتی داغ و افزایش قیمت سوخت و انرژی، گرایش به سمت استفاده از مخلوط‌های آسفالتی گرم بیشتر شده و در سراسر دنیا مقبولیت بیشتری پیدا کرده است [۸]. مخلوط آسفالتی گرم در مقایسه با مخلوط آسفالتی داغ، مزایا و معایب مختلفی دارد که مهم‌ترین مزیت این تکنولوژی نو، کاهش دمای تولید آسفالت به میزان ۴۰-۲۰ درجه سانتی‌گراد است و این کاهش دما به عنوان راهکاری مؤثر در کاهش آلودگی هوا به حساب می‌آید [۹ و ۱۰]. ترک خوردگی یکی از خرابی‌های مهم در روسازی آسفالتی است که به دلیل تکرار بارگذاری ناشی از عبور و مرور وسایل نقلیه در زیر لایه آسفالتی ایجاد گردیده و با گذر زمان به سطح روسازی گسترش می‌یابد. این ترک‌ها با ایجاد راهی برای نفوذ رطوبت به داخل روسازی، به طور قابل توجهی دوام و مقاومت روسازی آسفالتی را کاهش داده و باعث ایجاد خرابی‌های دیگر در روسازی می‌گردند [۱۱]. برای ارزیابی مکانیزم رشد ترک و شکست مخلوط‌های آسفالتی از آزمایش‌های مختلفی مانند آزمایش کشش

3 Indirect Tensile Test (IDT)

4 Semi-circular Bend (SCB)

5 Disc-shaped Compact Tension (DCT)

1 Warm Mix Asphalt (WMA)

2 Hot Mix Asphalt (HMA)

جدول ۱. مشخصات مصالح سنگی
Table 1. Properties of aggregates

مصالح	نوع آزمایش	روش استاندارد	حدود مجاز	نتیجه آزمایش
مصالح سنگی درشت‌دانه	سایش لس آنجلس (درصد)	ASTM C535	حداکثر ۳۰	۱۴
	درصد شکستگی در یک وجه (درصد)	ASTM-D5821	حداقل ۹۵	۹۷
	درصد شکستگی در دو وجه (درصد)	ASTM-D5821	حداقل ۹۰	۹۳
	وزن مخصوص درشت‌دانه (gr/cm^3)	ASTM D127	-	۲/۵۱
	افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (درصد)	AASHTO T104	حداکثر ۸	۶/۲
مصالح سنگی ریزدانه	ذرات سوزنی و پولکی شکل (درصد)	AASHTO T4791	حداکثر ۱۰	۰/۴
	افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (درصد)	AASHTO T104	حداکثر ۸	۱
	وزن مخصوص ریزدانه (gr/cm^3)	ASTM D128	-	۲/۶۷
	درصد شکستگی مصالح ریزدانه (درصد)	ASTM C1252	حداقل ۴۵	۵۲
	ارزش ماسه‌ای (درصد)	ASTM D2419	حداقل ۴۵	۶۷

نیازمند مطالعات و تحقیقات بیشتر در این زمینه می باشد. با توجه به اینکه تاکنون تحقیقی در خصوص رفتار شکست مخلوط های آسفالتی گرم حاوی مواد بازیافتی در کنار مواد جوان ساز صورت نگرفته است، لذا در این پژوهش مقاومت در برابر شکست و ترک خوردگی مخلوط آسفالتی مذکور در دمای پایین مورد ارزیابی قرار گرفته است تا به شناخت هر چه بیشتر این مخلوط آسفالتی کمک کرده و درک صحیحی از مکانیزم رشد ترک داشت.

۱-۱ اهداف پژوهش

با توجه به اینکه استفاده گسترده از تراشه آسفالت در تولید مخلوط های آسفالتی، مزایای اقتصادی و زیست محیطی قابل توجهی را داشته است، اما مهم ترین مانع در استفاده از مخلوط های آسفالتی با درصد بالای تراشه آسفالت، سفتی بیش از حد این مخلوط ها است که کارایی کمتری را به همراه دارد. استفاده از مخلوط آسفالتی حاوی مصالح بازیافتی در مناطق سردسیر با مشکل عمده ترک خوردگی مواجه است که بدین منظور در این پژوهش به بررسی دو موضوع زیر پرداخته شده است:

(۱) تأثیر استفاده از دو درصد ۲۵ و ۵۰ تراشه آسفالت بازیافتی در مخلوط آسفالتی گرم و بررسی پارامترهای مختلف مقاومت مخلوط

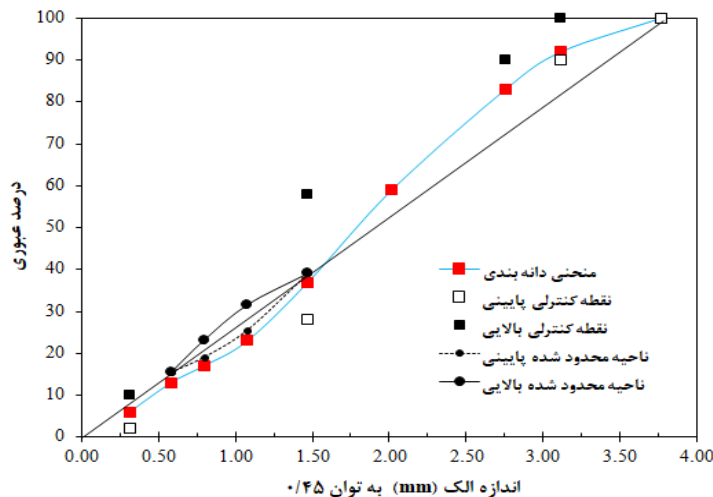
مقاومت در برابر ترک خوردگی مخلوط های گرم حاوی فیبر جوت و پلیئولفین آرامید پرداختند. نتایج نشان داد که فیبرهای استفاده شده باعث افزایش مقاومت مخلوط ها در برابر ترک در دمای پایین شده و عملکرد مخلوط های گرم را بهبود می بخشد [۲۳]. کوالی و همکاران در سال ۲۰۱۸ به بررسی تأثیر جوان ساز پایه زیستی 'بر خواص مکانیکی و مهندسی مخلوط آسفالتی پرداختند و نشان دادند که اضافه کردن جوان ساز به مخلوط آسفالتی باعث بهبود خواص مکانیکی در دمای پایین می شود و همچنین باعث بازیابی مدول و زاویه اختلاف فاز قیر پیر شده به قیر خالص می شود. ضمن اینکه چقرمگی شکست نمونه ها حدود ۵ درصد کاهش می یابد [۲۴].

در سال های اخیر، از تلفیق تکنولوژی آسفالت گرم و مصالح تراشه آسفالت به منظور کاهش هر چه بیشتر هزینه بهسازی روسازی و حفظ محیط زیست استفاده شده و به عنوان یک روسازی دوستدار طبیعت معرفی شده است. در این راستا مطالعات گسترده ای در رابطه با تأثیر استفاده از تراشه آسفالت در روسازی گرم انجام شده است و نتایج نشان می دهد که استفاده از تراشه آسفالت موجب ارتقای عملکرد روسازی شده و کاهش خرابی متداول روسازی گرم را به دنبال دارد. البته در کنار فواید چشم گیر، معایبی نیز به همراه دارد که

جدول ۲. مشخصات شیمیایی مصالح سنگی مورد استفاده

Table 2. Chemical compositions of the aggregates used in this research

LOI	MnO	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	ترکیبات شیمیایی
۲/۶	۰/۳	۱/۰	۲/۸	۲/۴	۷/۴	۰/۸	۱۲/۲	۶۸/۱	درصد وزنی (/.)



شکل ۱. دانه بندی مصالح سنگی برای ساخت مخلوط آسفالتی

Fig. 1. Aggregate gradation for the asphalt mixtures

دست آمده و در ساخت روسازی بازیافتی استفاده شده است. مصالح آسفالت بازیافتی استفاده شده در این پژوهش از تراشیدن روسازی بزرگراه همت در تهران با زمان ساخت ۱۵ سال تهیه شده است. مشخصات قیر به دست آمده از آسفالت بازیافتی در جدول ۳ ارائه شده است. درصد قیر آسفالت بازیافتی طبق استاندارد ASTM D2172 و روش استخراج قیر از مصالح سنگی برابر ۴/۹ درصد وزن کل مخلوط آسفالتی تعیین گردید.

۲-۳- قیر

به منظور تهیه نمونه های مخلوط آسفالتی مورد نیاز از قیر خالص با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ استفاده شده است. مشخصات قیر در جدول ۴ ارائه شده است.

۲-۴- جوان ساز^۱

جوان ساز با بازیابی خواص فیزیکی و شیمیایی قیر پیر شده مصالح تراشه آسفالتی می تواند نقش تأثیرگذاری در برابر ترک خوردگی

آسفالتی در برابر ترک خوردگی در دمای پایین ($15^{\circ}C$) و دمای متوسط ($25^{\circ}C$).

۲) بررسی تأثیر استفاده از جوان ساز در مخلوط های آسفالتی حاوی تراشه های آسفالتی بازیافتی در دو دمای پایین و متوسط و نقش آن در بهبود استحکام شکست مخلوط آسفالتی.

۲- مصالح مصرفی

۲-۱- مصالح سنگی

در این پژوهش از مصالح سنگی رودخانه ای تهیه شده از کارخانه آسفالت شرکت آسفالت هادپی واقع در شرق تهران با درصد بالای سیلیس و حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلی متر استفاده شده است. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی سنگ دانه ها به ترتیب در جدول ۱ و جدول ۲ آمده است. دانه بندی مصالح سنگی با توجه به استاندارد و محدودیت های طرح اختلاط حجمی روسازی ممتاز در شکل ۱ آورده شده است.

۲-۲- مصالح تراشه آسفالتی

مصالح تراشه آسفالتی از تراشیدن سطح روسازی خراب شده به

جدول ۳. مشخصات قیر بازیافتی از مصالح تراشه آسفالتی

Table 3. Specifications of the binder obtained from the RAP material

نوع آزمایش	روش استاندارد	نتیجه آزمایش
درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد (۰/۱ میلی متر)	ASTM D5	۲۱
نقطه نرمی (درجه سانتی گراد)	ASTM D36	۶۱/۵
ویسکوزیته در دمای ۱۳۵ درجه سانتی گراد (میلی پاسکال تائیه)	ASTM D113	۲۸۸۳

جدول ۴. مشخصات قیر مصرفی ۶۰/۷۰

Table 4. Specifications of the binder 70/60

نوع آزمایش	روش استاندارد	حدود مجاز	نتیجه آزمایش
درجه نفوذ در دمای ۲۵ سانتیگراد (۰/۱ میلی متر)	ASTM D5	۶۰-۷۰	۶۲
نقطه نرمی (درجه سانتیگراد)	ASTM D36	۴۹-۵۶	۴۸/۵
شکل پذیری در دمای ۲۵ سانتیگراد (سانتیگراد)	ASTM D113	حداقل ۱۰۰	۱۳۰
درجه اشتعال (سانتیگراد)	ASTM D92	حداقل ۲۳۲	۲۹۰
چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)	ASTM D70	-	۱/۰۱۸

۱۶ و ۲ ساعت در دمای اختلاط 135°C قرار گرفتند. سپس (برای مخلوط آسفالتی حاوی جوان ساز)، جوان ساز مورد استفاده در این تحقیق به طور مستقیم به تراشه های آسفالت بازیافتی افزوده شد. در نهایت، با ترکیب تراشه آسفالت بازیافتی با مخلوط مصالح سنگی خالص و قیر خالص، مخلوط آسفالتی تهیه گردید. در ادامه، مخلوط تهیه شده به مدت ۲ ساعت در دمای تراکم 115°C به منظور عمل آوری مخلوط آسفالتی قرار داده شد و در پایان، مخلوط های آسفالتی عمل آوری شده، به وسیله دستگاه تراکم دورانی (ژیراتوری) متراکم گردید. لازم به ذکر است که نمونه های به دست آمده از دستگاه تراکم دورانی به شکل استوانه هستند.

پنج مخلوط آسفالتی مختلف (شامل یک مخلوط آسفالتی گرم، دو مخلوط آسفالتی گرم حاوی تراشه آسفالت با درصد های ۲۵ و ۵۰ و همچنین دو مخلوط آسفالتی گرم حاوی تراشه آسفالت با درصد های ۲۵ و ۵۰ اصلاح شده با یک نوع جوان ساز) مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای تهیه این مخلوط های آسفالتی از روش طرح اختلاط روسازی ممتاز با سطح ۱ و برای ترافیک سنگین (با تعداد چرخش ۱۲۱ و فضای خالی برابر ۴ درصد) استفاده شده است که پارامترهای

مخلوط های آسفالتی حاوی تراشه آسفالت داشته باشد. از این رو در این پژوهش به منظور بازگرداندن خواص فیزیکی و شیمیایی قیر پیر شده موجود در آسفالت بازیافتی، از پگنوفالت ۵۰۰ (مطابق شکل ۲) به عنوان یک نوع جوان ساز پایه گیاهی استفاده شد و به تراشه آسفالت اضافه گردید. به منظور تعیین میزان استفاده جوان ساز، درصد های مختلف از جوان ساز به قیر به دست آمده از آسفالت بازیافتی اضافه گردید و با انجام آزمایش های درجه نفوذ و نقطه نرمی، در نهایت مقدار ۱۰/۵ درصد از این جوان ساز باعث شد که درجه نفوذ و نقطه نرمی قیر اصلاح شده با جوان ساز مطابق شکل ۳ به نقطه نرمی و درجه نفوذ قیر ۶۰/۷۰ برسد. در نتیجه، مقدار ۱۰/۵ درصد جوان ساز نسبت به وزن قیر پیر شده موجود در تراشه آسفالت به عنوان درصد بهینه جوان ساز انتخاب گردید. مشخصات شیمیایی جوان ساز مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۵ نشان داده شده است.

۳- ساخت نمونه های آسفالتی نیم دایره ای

در این پژوهش، برای تهیه مخلوط های آسفالتی، مصالح سنگی خالص و تراشه های آسفالت بازیافتی قبل از ساخت به ترتیب به مدت

جدول ۵. مشخصات جوان‌ساز مورد استفاده در این پژوهش

Table 5. Specifications of the rejuvenator used in this research

نتیجه آزمایش	روش استاندارد	نوع آزمایش
۱/۰۱۶	ASTM D70	وزن مخصوص در دمای ۲۵ سانتی‌گراد (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
۲۸۳	ASTM D92	درجه اشتعال (روباز-کلوند)
۸۹	ASTM D2170	کندروانی کینماتیکی در دمای ۶۰ سانتی‌گراد (سانتی استوکس)
۱۶	ASTM D2170	کندروانی کینماتیکی در دمای ۱۲۰ سانتی‌گراد (سانتی استوکس)
۸	ASTM D2170	کندروانی کینماتیکی در دمای ۱۳۵ سانتی‌گراد (سانتی استوکس)
۶	ASTM D2170	کندروانی کینماتیکی در دمای ۱۶۰ سانتی‌گراد (سانتی استوکس)
۱/۸	ASTM D1754	لعاب نازک قیر (۱۶۰-پنج ساعت) افت حرارتی (درصد)
۸	ASTM D2170	کندروانی کینماتیکی در ۱۶ درجه سانتی‌گراد بعد از افت (سانتی استوکس)

جدول ۶. پارامترهای حجمی مخلوط آسفالتی

Table 6. Volumetric parameters of the asphalt mixtures

نوع مخلوط	فضای خالی (%)	قیر بهینه (%)	فضای خالی موجود در سنگ‌دانه (%)	فضای پر شده با قیر (%)	حداکثر وزن مخصوص آسفالت (gr/cm ³)	نسبت مقدار قیر در تراشه آسفالت به کل قیر در مخلوط آسفالتی (%)
آسفالت گرم	۴	۵/۶۳	۱۶/۱۰	۷۴/۹۸	۲/۳۲۸	۰
آسفالت گرم + ۲۵٪ تراشه آسفالت	۴	۶/۱۰	۱۵/۳۰	۷۲/۰۷	۲/۳۴۵	۱۹/۸۰
آسفالت گرم + ۵۰٪ تراشه آسفالت	۴	۶/۳۰	۱۶/۳۸	۷۵	۲/۳۴۲	۳۹/۰۳
آسفالت گرم + ۲۵٪ تراشه آسفالت + جوان‌ساز	۴	۵/۴۰	۱۵/۱۰	۶۸/۴۰	۲/۳۸۹	۲۲/۵۵
آسفالت گرم + ۵۰٪ تراشه آسفالت + جوان‌ساز	۴	۵/۵۰	۱۵/۴۵	۷۴/۵۸	۲/۳۴۱	۴۴/۲۷
معیار	۴	-	حداقل ۱۳٪	۶۵-۷۵	-	-

می‌گردد. با توجه به در نظر گرفتن ترافیک بیش از ۱۰ میلیون و کمتر از ۳۰ میلیون (سطح ۵ از سطوح ترافیک) و حداکثر دمای ۳۹-۴۱ درجه سانتی‌گراد در این تحقیق، طبق جدول ۷ مقدار دوران طرح برابر ۱۲۱ به دست می‌آید.

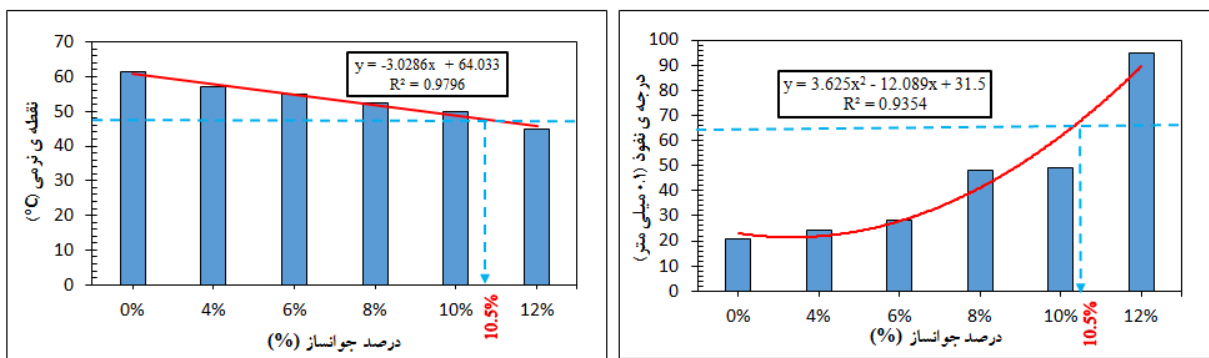
علت به کارگیری تراشه آسفالت با درصدهای ۲۵ و ۵۰ می‌توان گفت که به طور کلی تحقیقات زیادی در زمینه ارزیابی امکان استفاده از تراشه آسفالتی در مخلوط‌های آسفالتی انجام گرفته است

حجمی برای مخلوط‌های مورد نظر در جدول ۶ آمده است. لازم به ذکر است که درصد قیر بهینه ارائه شده در جدول ۶ برای هر نوع مخلوط آسفالتی، برای کل مخلوط بوده و شامل درصد قیر موجود در تراشه‌های آسفالت نیز هست.

در خصوص انتخاب تعداد دوران (چرخش) ۱۲۱ لازم است توضیح داده شود که همواره مقدار دوران طرح (N_d) بر اساس سطح ترافیک و حداکثر دمای هفت روز در محل اجرای پروژه روسازی انتخاب



شکل ۲. ماده جوانساز
Fig. 2. Rejuvenation agent



شکل ۳. درصد بهینه و تأثیر جوانساز بر خصوصیات فیزیکی قیر پیر شده
Fig. 3. Optimum percentage and effect of rejuvenator on the physical properties of the aged binder

به تحقیقات [۲۹-۲۵] مراجعه شود).

قابل ذکر است که همواره یکی از مشکلات تولید مخلوط‌های آسفالتی داغ حاوی تراشه بازیافت، دمای بالای تولید آن‌ها می‌باشد که پیر شدگی ثانویه و همچنین ترد و شکننده شدن مخلوط‌های آسفالتی را به دنبال دارد. بدین منظور برخی از پژوهشگران برای رفع این مشکل، استفاده از تکنولوژی آسفالت گرم را پیشنهاد داده‌اند. در واقع، افزودنی‌های گرم مانند ساسوبیت با کاهش ویسکوزیته قیر اصلاح شده با این افزودنی منجر به کاهش دمای اختلاط و تراکم مخلوط آسفالتی شده و از تردی و شکنندگی مخلوط‌های آسفالتی می‌کاهد. البته این نکته نیز لازم به ذکر است که استفاده همزمان

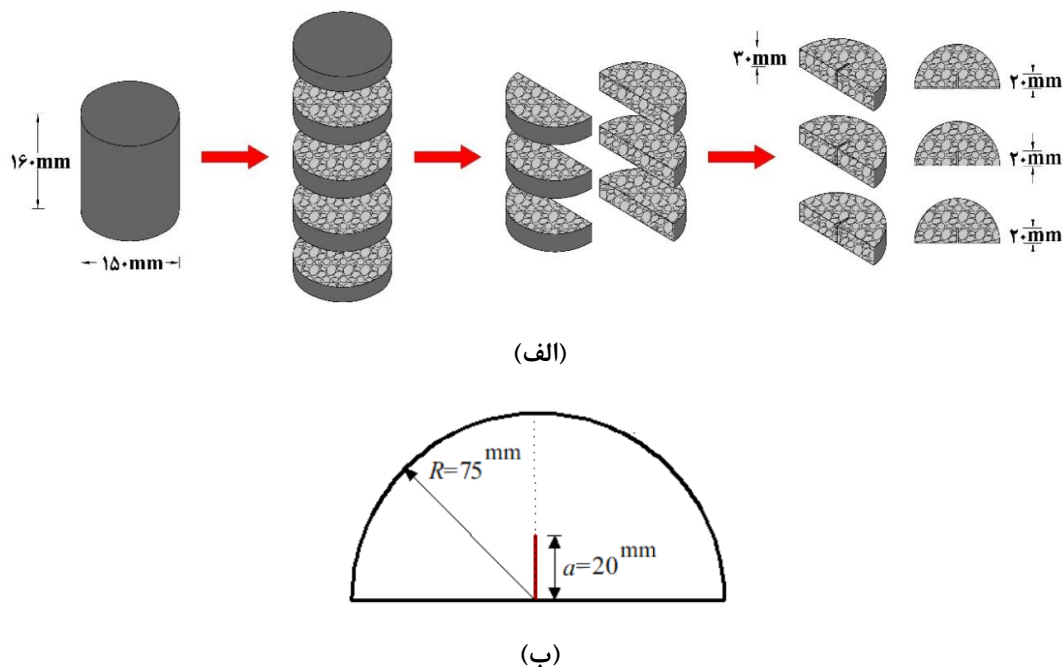
و پژوهشگران زیادی به موضوع میزان درصد استفاده از مصالح آسفالت بازیافتی پرداخته‌اند. در این راستا، مرکز ملی تکنولوژی آسفالت^۱ میزان ۲۰ درصد استفاده از تراشه آسفالت را در مخلوط‌های آسفالتی مجاز دانسته و برای به کارگیری بیشتر از این درصد، استفاده از تکنولوژی آسفالت گرم و جوانساز را پیشنهاد داده است که در تحقیق حاضر درصدهای ۲۵ و ۵۰ تراشه آسفالت با به کارگیری تکنولوژی آسفالت گرم و جوانساز مورد استفاده قرار گرفته است. ضمن اینکه بسیاری از مطالعات دیگر در زمینه تراشه‌های آسفالتی با همین درصدهای انتخاب شده در این تحقیق، انجام گرفته است (برای مثال

1 National Center for Asphalt Technology

جدول ۷. راهنمای انتخاب تعداد دوران (N_d) برحسب دما و ترافیک

Table 7. Guidelines for selection of the gyration number (Nd) in terms of temperature and traffic level

ترافیک هم ارز طرح (۱۰ ^۶)	C° حداکثر دمای هوا در مدت ۷ روز											
	۳۹ <			۳۹-۴۱			۴۱-۴۲			۴۳-۴۴		
	N_i	N_d	N_m	N_i	N_d	N_m	N_i	N_d	N_m	N_i	N_d	N_m
<۰,۳	۷	۶۸	۱۰۴	۷	۷۴	۱۱۴	۷	۷۸	۱۲۱	۷	۸۲	۱۲۷
<۱	۷	۷۶	۱۱۷	۷	۸۳	۱۲۹	۷	۸۸	۱۳۸	۸	۹۳	۱۴۶
<۳	۷	۸۶	۱۳۴	۸	۹۵	۱۵۰	۸	۱۰۰	۱۵۸	۸	۱۰۵	۱۶۷
<۱۰	۸	۹۶	۱۵۲	۸	۱۰۶	۱۶۹	۸	۱۱۳	۱۸۱	۹	۱۱۹	۱۹۲
<۳۰	۸	۱۰۹	۱۷۴	۹	۱۲۱	۱۹۵	۹	۱۲۸	۲۰۸	۹	۱۳۵	۲۲۰
<۱۰۰	۹	۱۲۶	۲۰۴	۹	۱۳۹	۲۲۸	۹	۱۴۶	۲۴۰	۱۰	۱۵۳	۲۵۳
>۱۰۰	۹	۱۴۳	۲۳۳	۱۰	۱۵۸	۲۶۲	۱۰	۱۶۵	۲۷۵	۱۰	۱۷۲	۲۸۸



شکل ۴. الف) مراحل آماده سازی نمونه های SCB، ب) نمونه SCB دارای ترک مستقیم
Fig. 4. a) Steps of production of SCB specimens, b) SCB specimen containing a straight crack

به منظور ساخت نمونه های نیم دایره ای (SCB)، ابتدا نمونه های استوانه ای (به قطر ۱۵ سانتی متر و ارتفاع ۱۶ سانتی متر) به دست آمده از دستگاه تراکم دورانی، مطابق شکل ۴ به نمونه های دیسکی به ضخامت ۳۰ میلی متر برش داده شدند و سپس با نصف کردن این نمونه های دیسکی، نمونه های نیم دایره ای حاصل شد. در پایان، یک ترک مصنوعی به طول ۲۰ میلی متر با استفاده از یک تیغه با ضخامت ۰/۳ میلی متر در وسط نمونه های نیم دایره ای ایجاد شد.

جوان ساز (به عنوان نرم کننده و بازگرداننده خواص فیزیکی و شیمیایی قیر پیر شده) و افزودنی ساسوبیت (به عنوان کاهش دهنده آلودگی زیست محیطی و پیر شدگی ثانویه مخلوط آسفالتی) می تواند درصد استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی را افزایش داده و یکی از تکنولوژی های دوست دار محیط زیست و مقرون به صرفه به شمار آید. جهت اطلاعات بیشتر در خصوص استفاده همزمان تراشه آسفالت و افزودنی ساسوبیت به مطالعات [۲۹-۳۲] مراجعه شود.

جدول ۸. مشخصه اختصاری نوع مخلوط آسفالتی و درصد تراشه آسفالت و اصلاح کننده استفاده شده در مخلوط‌های آسفالتی

Table 8. Labels and ingredients of the mixtures

مشخصه اختصاری نوع مخلوط آسفالتی	نوع مخلوط آسفالتی	ساسوبیت (%)	تراشه آسفالت (%)	جوان‌ساز (%)
CW	آسفالت گرم	۳	۰	۰
25RW	آسفالت گرم + ۲۵٪ تراشه آسفالت	۳	۲۵	۰
50RW	آسفالت گرم + ۵۰٪ تراشه آسفالت	۳	۵۰	۰
25RRW	آسفالت گرم + ۲۵٪ تراشه آسفالت + جوان‌ساز	۳	۲۵	۱۰/۵
50RRW	آسفالت گرم + ۵۰٪ تراشه آسفالت + جوان‌ساز	۳	۵۰	۱۰/۵



شکل ۵. نمای دستگاه آزمایش یونیورسال جهت انجام آزمایش‌های شکست بر روی نمونه‌های SCB

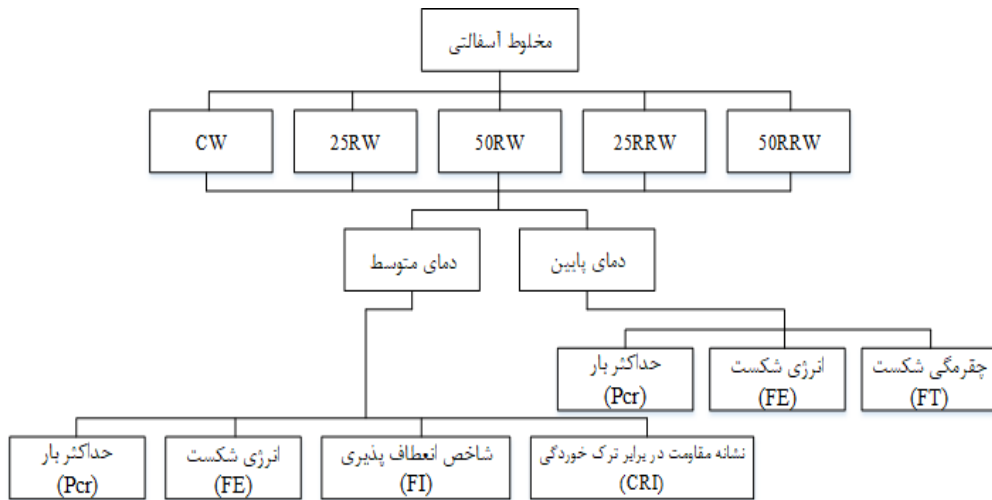
Fig. 5. Schematic of universal test machine for performing fracture tests on SCB specimens

است. لازم به ذکر است که در مجموع، ۳۰ نمونه آزمایشگاهی SCB (۵ نوع مخلوط آسفالتی \times ۲ دمای آزمایش \times ۳ بار تکرار آزمایش) جهت انجام آزمایش‌ها در تحقیق حاضر مورد استفاده قرار گرفت. جهت انجام آزمایش‌های شکست بر روی نمونه‌های SCB از دستگاه آزمایش یونیورسال نشان داده شده در شکل ۵ استفاده شد. به این صورت که پس از قرار دادن نمونه‌ها در شرایط دمایی مورد نظر، نمونه SCB (حاوی ترک در وسط نمونه) بر روی دو تکیه‌گاه ثابت (به فاصله ۱۲۰ میلی‌متر از یکدیگر) قرار گرفت و سپس تکیه‌گاه بالایی با نرخ جابجایی ۱ میلی‌متر در دقیقه به سمت پایین حرکت داده شد تا نمونه را تحت بارگذاری مود I خالص قرار دهد. در نهایت، نمودار نیرو-جابجایی حاصل از انجام آزمایش‌ها در یک کامپیوتر

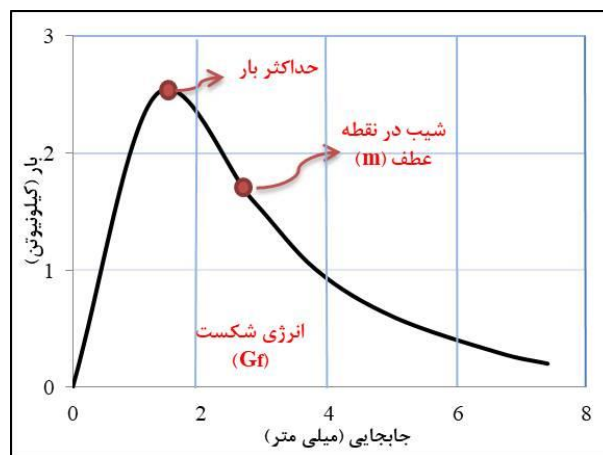
در شکل ۴ مراحل ساخت نمونه‌های SCB به همراه نمای نمونه SCB ترک‌دار نشان داده شده است.

۴- برنامه آزمایشگاهی

همان‌طور که در بخش ۳ ذکر گردید، در این پژوهش پنج نوع مخلوط آسفالتی مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است و برای ساخت آن‌ها از یک افزودنی گرم (ساسوبیت)، دو درصد تراشه آسفالت و یک اصلاح کننده جوان‌ساز به عنوان عامل بازیافت در نظر گرفته شده است. در جدول ۸ اجزای تشکیل دهنده هر نوع مخلوط آسفالتی به اختصار نشان داده شده است. میزان ساسوبیت استفاده شده در این تحقیق برابر ۳٪ (نسبت به کل قیر موجود در مخلوط آسفالتی) بوده



شکل ۶. فلوجارت آزمایشگاهی
Fig. ۶. Flowchart of experiments



شکل ۷. منحنی بار-جابجایی به دست آمده از آزمایش SCB (شامل پارامترهای حداکثر بار، شیب در نقطه عطف و انرژی شکست) [۳۴]
Fig. 7. Load-displacement curve obtained from the SCB test (including parameters of the peak load, slope at the inflection point and fracture energy) [34]

است که آزمایش های شکست انجام شده در این تحقیق با دقت مناسبی صورت گرفته است.

مطابق فلوجارت آزمایشگاهی نشان داده شده در شکل ۶، برای ارزیابی مقاومت شکست مخلوط های آسفالتی تهیه شده در این پژوهش از پارامترهای مختلف مکانیک شکست شامل حداکثر نیروی لازم برای شکست نمونه ها^۱، مقدار انرژی لازم برای شکست نمونه ها^۲، نشانه انعطاف پذیری^۳، نشانه مقاومت در برابر ترک خوردگی^۴ و

شخصی ثبت گردید. لازم به ذکر است که به منظور بالا بردن دقت اندازه گیری پارامترهای شکست بررسی شده در این تحقیق، برای هر نوع آزمایش شکست سه نمونه SCB مشابه تهیه شد و مورد آزمایش شکست قرار گرفت. همچنین به منظور ارزیابی پراکندگی داده ها و نحوه توزیع داده های حاصله حول میانگین داده ها از شاخص های ضریب تغییرات و انحراف معیار به عنوان شاخص های آمار توصیفی برای مقایسه و تحلیل هر چه بهتر داده های حاصل از آزمایش ها استفاده گردید. به طوری که مقادیر کمتر شاخص های مذکور، پراکندگی کمتر داده ها از میانگین داده های جامعه آماری را نشان می دهد و بیانگر این

1 Critical Load (P_{cr})
2 Fracture Energy (FE)
3 Flexibility Index (FI)
4 Cracking Resistance Index (CRI)

جدول ۹. مقادیر بار بحرانی شکست مخلوط های آسفالتی در دو دمای پایین و متوسط
Table 9. Values of the fracture load for the mixtures at - 15°C and 25°C

دمای آزمایش	نوع مخلوط آسفالتی	CW	25RW	50RW	25RRW	50RRW
۲۵ °C	۱	۰/۶۳۳	۰/۷۹۰	۰/۸۲۰	۰/۷۴۴	۰/۶۲۴
	۲	۰/۷۱۷	۰/۶۷۰	۰/۶۹۹	۰/۶۵۲	۰/۷۸۰
	۳	۰/۶۸۷	۰/۷۲۳	۰/۷۳۴	۰/۶۸۸	۰/۷۰۷
	میانگین	۰/۶۷۹	۰/۷۳۸	۰/۷۵۱	۰/۶۹۴	۰/۷۰۴
	انحراف معیار ^۱	۰/۰۴۳	۰/۰۶۰	۰/۰۶۳	۰/۰۴۶	۰/۰۷۸
	ضریب تغییرات ^۲ (%)	۶/۲۹۴	۸/۲۶۴	۸/۳۲۱	۶/۶۷۳	۱۱/۱۴۱
-۱۵ °C	۱	۳/۸۲۸	۲/۹۸۲	۳/۱۲۶	۳/۶۴۱	۳/۸۲۴
	۲	۳/۹۴	۲/۹۹۸	۲/۹۶۲	۳/۲۶۱	۳/۴۳۷
	۳	۳/۵۶۵	۳/۰۴۲	۲/۷۵۴	۳/۹۲۸	۳/۸۷۲
	میانگین	۳/۷۹۲	۳/۰۰۷	۲/۹۴۷	۳/۶۱	۳/۷۱۱
	انحراف معیار	۰/۱۹۳	۰/۰۳۱	۰/۱۸۶	۰/۳۳۵	۰/۲۳۴
	ضریب تغییرات (%)	۵/۰۷۶	۱/۰۳۴	۶/۲۰۲	۱۱/۱۳۰	۷/۹۳۴

^۱ Standard Deviation

^۲ Coefficient of Variation

آسفالتی برحسب ژول بر متر مربع، W_f مقدار کار لازم برای شکست مخلوط آسفالتی برحسب ژول و A سطح مقطع شکست برحسب متر مربع است.

چقرمگی شکست^۱ استفاده شد.

۴-۱- پارامترهای مختلف مکانیک شکست

۴-۱-۱- بار بحرانی

حداکثر نیروی قابل تحمل نمونه های مخلوط آسفالتی قبل از ترک خوردگی، بار بحرانی نمونه تعریف می شود که با رسیدن بار به این مقدار، نمونه شروع به ترک خوردگی از نقطه تجمع تنش می کند [۱۹].

۴-۱-۲- انرژی لازم برای شکست نمونه ها

در آزمایش SCB، مقاومت ترک خوردگی مخلوط آسفالتی نشان دهنده ظرفیت کلی مخلوط آسفالتی برای مقاومت در برابر شکست است. این شاخص مطابق رابطه (۱) از تقسیم سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی به سطح مقطع شکست به دست می آید [۳۳ و ۲۱].

$$G_f = \frac{W_f}{A} = \int (P) du / A \quad (1)$$

که در این رابطه G_f مقدار کل انرژی لازم برای شکست مخلوط

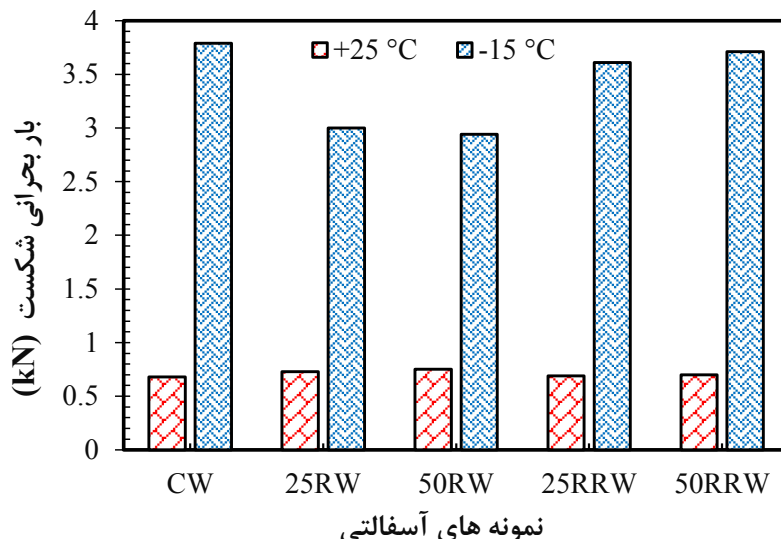
۴-۱-۳- نشانه انعطاف پذیری

نشانه انعطاف پذیری، پارامتری برای تشخیص مخلوط های آسفالتی ترد است که به ترک های زودرس حساس هستند. مطالعات اوزر و همکاران نشان داد که انرژی لازم برای شکست نمونه های آسفالتی در دمای متوسط به تنهایی شاخص مناسبی برای اندازه گیری مقاومت ترک خوردگی نیست. بنابراین این شاخص به منظور ارزیابی مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر ترک خوردگی در دمای متوسط مورد استفاده قرار می گیرد [۳۵ و ۳۴] که از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$FI = A * \frac{G_f}{|m|} \quad (2)$$

در این رابطه، G_f برابر مقدار کل انرژی لازم برای شکست مخلوط های آسفالتی برحسب ژول بر متر مربع، $|m|$ برابر شیب

1 Fracture Toughness (FT)



شکل ۹. میزان انرژی لازم برای شکست مخلوطهای آسفالتی در دو دمای پایین و متوسط
 Fig. 9. Fracture energy of asphalt mixtures at -15 °C and 25 °C

مواد بوده که تابع تنش وارده به نمونه و مشخصات هندسی آن است [۳۷ و ۳۳]. چقرمگی شکست در واقع بیان کننده مقاومت مواد در برابر ترک خوردگی و شکست است و از رابطه زیر برای نمونه‌های SCB قابل محاسبه است.

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

که در این رابطه، R شعاع نمونه‌ها، a طول ترک و t ضخامت نمونه‌ها بوده و مقادیر آن‌ها در تحقیق حاضر به ترتیب عبارت‌اند از ۷۵ میلی‌متر، ۲۰ میلی‌متر و ۳۰ میلی‌متر. همچنین، Y_I پارامتری بعد ضریب شکل بوده که مطابق مطالعات قبلی پیرمحمد و شعبانی [۳۸] مقدار آن برابر ۴/۸ است. ضمناً، P_{cr} بار بحرانی شکست بوده که از آزمایش SCB به دست می‌آید.

۵- نتایج و بحث

با انجام آزمایش‌های شکست بر روی پنج مخلوط مختلف آسفالتی (شامل یک مخلوط آسفالتی گرم، دو مخلوط آسفالتی گرم حاوی تراشه آسفالت با درصد‌های ۲۵ و ۵۰ و همچنین دو مخلوط آسفالتی گرم حاوی تراشه آسفالت با درصد‌های ۲۵ و ۵۰ اصلاح شده با یک نوع جوان‌ساز)، منحنی‌های نیرو-جابجایی به دست آمدند. با

در نقطه عطف قسمت دوم منحنی نیرو-جابجایی (مطابق شکل ۷) برحسب کیلو نیوتن بر میلی‌متر و A ضریب تبدیل واحد و ضریب مقیاس گذاری تعریف می‌شود که در این مطالعه برابر ۰/۰۱ است.

۴-۱-۴- نشانه مقاومت در برابر ترک خوردگی

در سال ۲۰۱۸، کاسر و همکارانش به منظور ارزیابی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر ترک خوردگی در دمای متوسط، شاخص انعطاف پذیری را توسعه داده و از یک شاخص جدیدی با عنوان نشانه مقاومت در برابر ترک خوردگی استفاده کردند [۳۶] که در این رابطه به جای شیب در نقطه عطف ($|m|$) مقدار P_{max} جایگذاری شده و طبق رابطه (۳) محاسبه می‌گردد.

$$CRI = \frac{G_f}{P_{max}} \quad (3)$$

که در این رابطه G_f برابر مقدار کل انرژی لازم برای شکست مخلوط‌های آسفالتی برحسب ژول بر متر مربع بوده و P_{max} حداکثر نیروی وارده بر نمونه برحسب کیلو نیوتن است.

۴-۱-۵- چقرمگی شکست

چقرمگی شکست یکی از پارامترهای مهم در تحلیل رفتار شکست

جدول ۱۰. مقادیر انرژی لازم برای شکست مخلوط های آسفالتی در دو دمای پایین و متوسط
Table 10. Values of the fracture energy for the mixtures at -15 °C and 25 °C

دمای آزمایش	نوع مخلوط آسفالتی	CW	25RW	50RW	25RRW	50RRW
۲۵ °C	۱	۰/۸۰۰	۰/۷۷۲	۰/۵۲۵	۰/۹۴۱	۰/۶۲۶
	۲	۰/۷۹۱	۰/۵۸۹	۰/۵۷۲	۰/۷۵۲	۰/۷۶۷
	۳	۰/۷۵۶	۰/۶۷۳	۰/۶۴۶	۰/۹۲۹	۰/۶۸۷
	میانگین	۰/۷۸۲	۰/۶۷۸	۰/۵۸۱	۰/۸۷۴	۰/۶۹۳
	انحراف معیار	۰/۰۲	۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۱	۰/۰۷
	ضریب تغییرات (%)	۲/۹۸	۱۳/۵۰	۱۰/۴۸	۱۲/۱۲	۱۰/۱۸
	۱	۰/۸۳۷	۰/۷۸۸	۰/۸۳۸	۱/۱۲۸	۰/۸۸۲
-۱۵ °C	۲	۰/۷۷۸	۰/۷۴۸	۰/۸۲۸	۱/۰۸۹	۰/۹۸۸
	۳	۰/۷۹۸	۰/۷۳۸	۰/۸۰۸	۱/۱۱۱	۰/۹۳۵
	میانگین	۰/۸۰۴	۰/۷۵۸	۰/۸۲۴	۱/۱۰۹	۰/۹۳۵
	انحراف معیار	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۵
	ضریب تغییرات (%)	۳/۷۲	۱/۵۲	۱/۸۵	۱/۷۳	۵/۶۵

بازیابی خواص قیرهای پیر شده تراشه آسفالت، خاصیت نرم شدگی به مخلوط آسفالتی داده و در نتیجه در نمونه های حاوی جوان ساز حداکثر نیروی لازم برای شکست نمونه های SCB در دو دمای پایین و متوسط مقداری کمتر است.

۵-۲- انرژی لازم برای شکست مخلوط های آسفالتی در دمای پایین و متوسط

انرژی شکست مخلوط های مختلف آسفالتی در دماهای پایین و متوسط که با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شده است، در جدول ۱۰ ارائه شده است. مقدار انرژی لازم برای شکست مخلوط های آسفالتی تابع ظرفیت باربری و مقدار جابجایی است. مطابق نتایج به دست آمده از آزمایش های شکست در دمای متوسط، با افزایش درصد خرده های آسفالتی در مخلوط های آسفالتی، حداکثر مقدار نیروی لازم برای شکست مخلوط آسفالتی افزایش می یابد. در حالی که مقدار جابجایی لازم برای شکست مخلوط کاهش می یابد. بنابراین با افزایش درصد خرده های آسفالتی، مقدار نیروی لازم برای شکست افزایش و مقدار جابجایی کاهش یافته است که این افزایش نیرو نمی تواند کاهش جابجایی (ناشی از افزایش سفتی حاصل از اضافه کردن تراشه های آسفالتی) را جبران نماید. بدین ترتیب مطابق شکل ۹، مقدار انرژی شکست با افزایش درصد تراشه های آسفالتی کاهش می یابد. با

استفاده از این منحنی ها، پارامترهای شکست شامل حداکثر نیروی لازم برای شکست نمونه ها، مقدار انرژی لازم برای شکست نمونه ها، نشانه انعطاف پذیری، نشانه مقاومت در برابر ترک خوردگی و چقرمگی شکست محاسبه شدند که در ادامه، هر کدام از این پارامترها برای مخلوط های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

۵-۱- حداکثر نیروی لازم برای شکست مخلوط های آسفالتی در دماهای پایین و متوسط

نتایج مربوط به بار بحرانی شکست برای مخلوط های آسفالتی مورد مطالعه در این تحقیق در جدول ۹ آورده شده است. مطابق شکل ۸ مشاهده می شود که وجود تراشه آسفالت در مخلوط آسفالتی گرم به علت داشتن قیرهای پیر شده، حداکثر نیروی لازم برای شکست مخلوط های آسفالتی را در دمای متوسط افزایش داده و همواره با افزودن بیشتر مقدار تراشه آسفالت این مقدار نیرو به نسبت کمتری افزایش می یابد. در حالی که در دمای پایین وجود تراشه آسفالت شکنندگی مخلوط آسفالتی را افزایش داده و موجب کاهش مقدار حداکثر نیروی لازم برای شکست می شود. قابل ذکر است که در دمای پایین وجود قیر پیر شده در تراشه آسفالتی، چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی را کاهش داده و موجب کاهش حداکثر نیروی لازم برای شکست می شود. همچنین نتایج نشان می دهد که جوان ساز به علت

جدول ۱۱. مقادیر نشانه انعطافپذیری مخلوطهای آسفالتی در دمای متوسط
Table 11. Values of the flexibility index for the mixtures at 25 °C

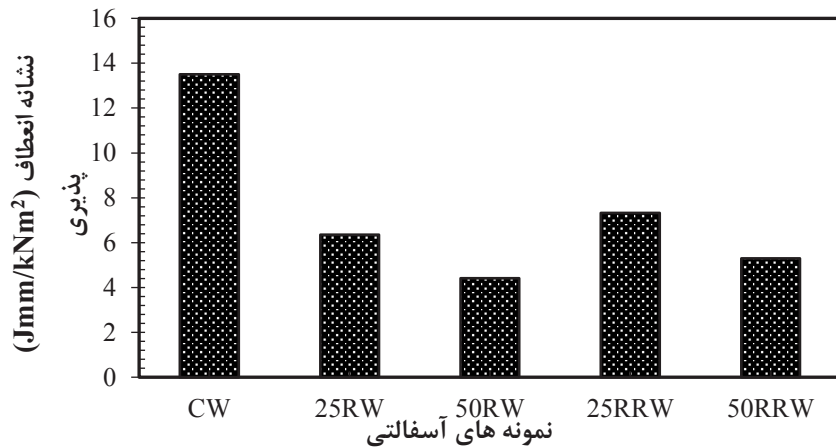
نوع مخلوط آسفالتی	CW	25RW	50RW	25RRW	50RRW
۱	۱۴/۰۷	۶/۹۶	۵/۰۳	۸/۶۴	۴/۹۴
۲	۱۴/۷۴	۵/۷۲	۳/۶۶	۶/۶۶	۶/۹۳
۳	۱۱/۶۸	۶/۴۱	۴/۵۳	۶/۶۹	۴/۰۳
میانگین	۱۳/۵۰	۶/۳۶	۴/۴۱	۷/۳۳	۵/۳۰
انحراف معیار	۱/۶۱	۰/۶۲	۰/۶۹	۱/۱۴	۱/۴۸
ضریب تغییرات (%)	۱۱/۹۱	۹/۷۳	۱۵/۷۴	۱۵/۵۱	۲۷/۹۹

جدول ۱۲. مقادیر نشانه مقاومت در برابر ترکخوردگی مخلوطهای آسفالتی
Table 12. Values of the crack resistance index (CRI) for the mixtures

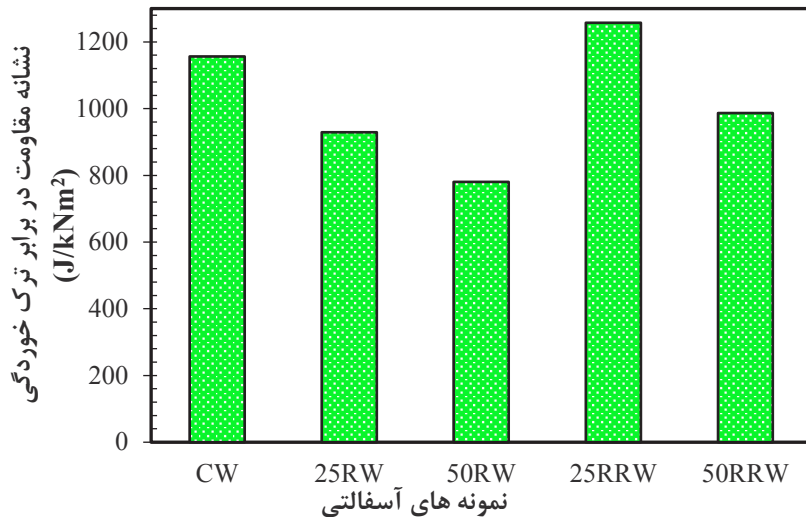
نوع مخلوط آسفالتی	CW	25RW	50RW	25RRW	50RRW
۱	۱۲۶۵/۰۹	۹۷۷/۵۲	۶۴۰/۲۴	۱۲۶۶/۳۹	۱۰۰۴/۱۲
۲	۱۱۰۲/۹۸	۸۷۹/۵۳	۸۱۹/۴۲	۱۱۵۴/۲۴	۹۸۲/۹۲
۳	۱۱۰۱/۱۵	۹۳۰/۹۴	۸۸۰/۵۲	۱۳۵۱/۹۹	۹۷۱/۹۳
میانگین	۱۱۵۶/۴۰	۹۲۹/۳۳	۷۸۰/۰۶	۱۲۵۷/۵۴	۹۸۶/۳۲
انحراف معیار	۹۴/۱۳	۴۹/۰۱	۱۲۴/۸۸	۹۹/۱۷	۱۶/۳۶
ضریب تغییرات (%)	۸/۱۴	۵/۲۷	۱۶/۰۱	۷/۸۹	۱/۶۶

به همین دلیل، مقدار انرژی لازم برای شکست مخلوط های آسفالتی در دمای پایین بیشتر تحت تأثیر مقدار تنش وارده قرار می گیرد و مقدار جابجایی تأثیر زیادی بر مقدار انرژی شکست ندارد. در دمای پایین، ظرفیت باربری نمونه های آسفالتی به خاطر افزایش سفتی مخلوط آسفالتی افزایش یافته است و بدین ترتیب با اضافه کردن خرده های آسفالتی مقدار انرژی لازم برای شکست مخلوط های آسفالتی افزایش یافته است (مطابق شکل ۹). همان طور که در شکل ۹ مشاهده می شود، افزودن جوان ساز با نرم کردن قیرهای پیر شده تراشه های آسفالتی و همچنین با افزایش چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی، تأثیر به سزایی در افزایش مقدار انرژی لازم برای شکست مخلوط های آسفالتی حاوی تراشه های آسفالتی داشته است. نکته مهم دیگر در شکل ۹، تأثیر مثبت جوان ساز در به کارگیری تراشه های آسفالتی با درصد های بالاتر از ۲۵ هست. بنابراین برخلاف نمونه های

افزودن جوان ساز به خرده های آسفالتی، مخلوط آسفالتی نرم تر شده است و با افزایش نرمی مخلوط های آسفالتی هر چند حداکثر مقدار نیروی لازم برای شکست مخلوط های آسفالتی کمتر شده است ولی از طرف دیگر جابجایی ناشی از بارگذاری بیشتر شده است که این مقدار افزایش، خیلی بیشتر از کاهش مقدار نیروی لازم برای شکست بوده است و در نتیجه مقدار انرژی لازم برای شکست مخلوط احیا شده با جوان ساز بیشتر از مخلوط بدون جوان ساز است (شکل ۹). در حالت کلی می توان گفت که افزودن تراشه آسفالتی موجب ترد شدگی و شکنندگی مخلوط می شود و در نتیجه، مقاومت در برابر ترک خوردگی کاهش می یابد. ولی با استفاده از مواد جوان ساز می توان میزان مقاومت در برابر ترک خوردگی را در مخلوط های حاوی تراشه آسفالتی بهبود داد. رفتار ترد مخلوط های آسفالتی در دمای پایین باعث شده که نمونه های آسفالتی در برابر بارگذاری تغییر مکان زیادی نداشته باشد.



شکل ۱۰. نشانه انعطاف‌پذیری مخلوط‌های آسفالتی در دمای متوسط
 Fig. 10. Flexibility index of asphalt mixtures at 25 °C



شکل ۱۱. نشانه مقاومت در برابر ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی در دمای متوسط
 Fig. 11. Cracking resistance index of asphalt mixtures at 25 °C

آسفالت به مخلوط آسفالتی مقدار شاخص انعطاف پذیری را به میزان بیشتر از ۲ برابر کاهش می‌دهد. با افزایش بیشتر تراشه آسفالت، میزان کاهش همچنان ادامه دارد به طوری که مخلوط حاوی ۵۰ درصد تراشه آسفالت شاخصی برابر ۴/۴۱ دارد. ولی اصلاح کننده جوان‌ساز با توجه به خصوصیات شیمیایی خود، میزان انعطاف پذیری مخلوط حاوی تراشه آسفالت را افزایش داده به طوری که میزان شاخص برای مخلوط حاوی ۲۵ درصد تراشه آسفالت از ۶/۴۱ به مقدار ۷/۳۳ افزایش پیدا می‌کند. این افزایش شاخص حاکی از نقش مثبت

بدون جوان‌ساز، می‌توان با اضافه کردن جوان‌ساز از درصدهای بالاتر تراشه‌های آسفالتی برای ساخت مخلوط‌های آسفالتی بهره گرفت.

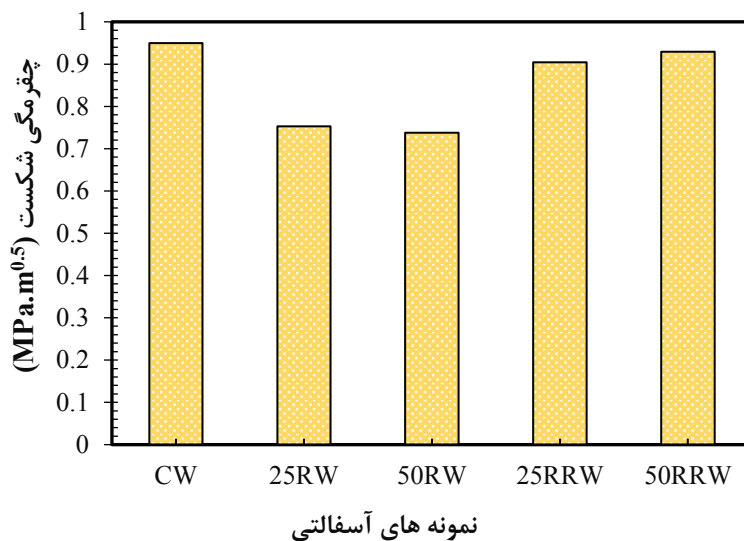
۵-۳-نشانه انعطاف پذیری مخلوط‌های آسفالتی

نشانه انعطاف‌پذیری جهت بررسی پتانسیل ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی در دمای متوسط مورد استفاده قرار می‌گیرد که مقادیر آن با استفاده از رابطه (۲) برای مخلوط‌های آسفالتی در جدول ۱۱ آورده شده است. مطابق شکل ۱۰، افزودن ۲۵ درصد تراشه

جدول ۱۳. چقرمگی شکست مخلوطهای آسفالتی در دمای پایین

Table 13. Fracture toughness of mixtures at -15 °C

نوع مخلوط آسفالتی	CW	25RW	50RW	25RRW	50RRW
۱	۰/۹۵۹	۰/۷۴۷	۰/۷۸۳	۰/۹۱۲	۰/۹۵۸
۲	۰/۹۸۷	۰/۷۵۱	۰/۷۴۲	۰/۸۱۷	۰/۸۶۱
۳	۰/۸۹۳	۰/۷۶۲	۰/۶۹۰	۰/۹۸۴	۰/۹۷۰
میانگین	۰/۹۵۰	۰/۷۵۳	۰/۷۳۸	۰/۹۰۴	۰/۹۲۹
انحراف معیار	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۸	۰/۰۵
ضریب تغییرات (%)	۵/۰۸۸	۱/۰۱۰	۶/۳۱۲	۹/۲۴۶	۶/۴۲۹



شکل ۱۲. چقرمگی شکست مخلوطهای آسفالتی در دمای پایین

Fig. 12. Fracture toughness of asphalt mixtures at -15 °C

۵-۵- چقرمگی شکست مخلوط های آسفالتی در دمای پایین مقادیر چقرمگی شکست مخلوط های آسفالتی محاسبه شده با استفاده از رابطه (۴) در جدول ۱۳ ارائه شده است. در دمای ۱۵- درجه سانتی گراد مخلوط های آسفالتی دارای خاصیت ترد و شکننده بوده و بنابراین سفتی بیشتری دارند که منجر به افزایش چقرمگی شکست آنها می شود. اما با توجه به شکل ۱۲ می توان گفت که هر چند با افزایش درصد تراشه آسفالت و در نتیجه افزایش سفتی مخلوط های آسفالتی، بایستی چقرمگی شکست مخلوط آسفالتی افزایش یابد، ولی وجود قیر پیر شده در تراشه آسفالت و عدم چسبندگی مناسب بین مصالح باعث کاهش چقرمگی شکست مخلوط های آسفالتی شده است.

جوان ساز در بهبود مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر ترک خوردگی است.

۵-۴- نشانه مقاومت در برابر ترک خوردگی مخلوط های آسفالتی مقادیر نشانه مقاومت در برابر ترک خوردگی مخلوط های آسفالتی در دمای متوسط با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شد و در جدول ۱۲ آورده شده است. با توجه به شکل ۱۱، می توان دید که روند تغییرات این شاخص همانند شاخص انعطاف پذیری بوده و افزودن تراشه آسفالت، کاهش این شاخص را به دنبال داشته و افزودن جوان ساز در کنار تراشه آسفالت تأثیر منفی سفت شدگی مخلوط را کاهش داده و موجب افزایش نشانه مقاومت در برابر ترک خوردگی شده است.

جدول ۱۴. هزینه احداث روسازی برای دو نوع مخلوط آسفالتی
Table 14. Production costs of pavements with two different asphalt mixtures

هزینه کل	هزینه قیر برای یک کیلومتر	هزینه جوان‌ساز برای یک کیلومتر	هزینه ساسوبیت برای یک کیلومتر	هزینه (میلیون تومان) نوع مخلوط
۷۷۴/۹	۳/۵×۰/۰۶۱×۳۶۰۰*	-	-	آسفالت داغ
۱۱۷۱/۸	۳/۵×۰/۰۵۷×۳۶۰۰	۳۰×۰/۰۰۱۳۵×۳۶۰۰	۵۰×۰/۰۰۱۷۱×۳۶۰۰	آسفالت گرم حاوی جوان‌ساز و ۲۵ درصد تراشه آسفالت

*مقدار آسفالت مورد نیاز بر حسب تن برای یک کیلومتر با ضخامت ۱۵ سانتی متر

کیلوگرم جوان‌ساز لازم می‌باشد. با فرض اینکه قیمت مواد مورد نیاز بر حسب تن به صورت: قیر معمولی ۳/۵ میلیون تومان، ساسوبیت ۵۰ میلیون تومان و جوان‌ساز ۳۰ میلیون تومان باشد، هزینه مربوط به احداث روسازی با دو نوع آسفالت مختلف داغ و گرم مطابق جدول ۱۴ خواهد بود.

مطابق جدول ۱۴ و با توجه به فرضیات در نظر گرفته شده، مقدار هزینه آسفالت گرم حاوی ۲۵ درصد تراشه آسفالتی بیشتر از مقدار آسفالت متداول (داغ) می‌باشد که البته در این تحلیل اقتصادی، کاهش هزینه استفاده از تراشه آسفالت به جای مصالح و قیر جدید و همچنین کاهش هزینه انرژی به واسطه استفاده از تکنولوژی گرم به علت عدم اطلاعات کافی در نظر گرفته نشده است که در صورت دسترسی به اطلاعات جامع، هزینه احداث آسفالت گرم حاوی تراشه آسفالت قابل رقابت با آسفالت متداول خواهد بود.

۷- نتیجه گیری

ترک خوردگی روسازی آسفالتی به ویژه در مناطق سردسیر از شایع‌ترین خرابی‌ها در این مناطق است. یکی از روش‌های بررسی نحوه رشد و گسترش ترک و رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی استفاده از آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای است. در این پژوهش، به منظور بررسی تأثیر آسفالت بازیافتی و جوان‌ساز بر روی رفتار شکست مخلوط آسفالتی گرم در دو دمای پایین و متوسط تحت بارگذاری مود I خالص، پارامترهای مکانیک شکست مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن به شرح زیر است:

۱- وجود تراشه آسفالت در مخلوط آسفالتی موجب رفتار متفاوت مخلوط آسفالتی در دو دمای پایین و متوسط شد. به طوری که قیرهای

مطابق شکل ۱۲، با افزایش درصد مصالح بازیافتی در مخلوط‌های آسفالتی، چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی کاهش یافته است که بیشترین کاهش مربوط به مخلوط حاوی ۵۰ درصد آسفالت بازیافتی است. افزودن جوان‌ساز که باعث نرم شدن قیر پیر شده موجود در مصالح تراشه آسفالتی و همچنین باعث افزایش چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی شده، در نهایت منجر به بهبود چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی به خصوص برای نمونه‌های حاوی ۵۰ درصد تراشه آسفالت شده است. بنابراین با به کارگیری جوان‌ساز می‌توان درصد بالایی از تراشه آسفالت را به مخلوط آسفالتی اضافه کرد بدون اینکه چقرمگی شکست مخلوط کاهش قابل توجهی از خود نشان دهد.

۶- تحلیل اقتصادی

هزینه احداث روسازی یکی از پارامترهای مهم در انتخاب نوع روسازی محسوب می‌شود. به منظور بررسی فنی اقتصادی مخلوط آسفالتی مورد بحث، به طور پیش فرض هزینه احداث یک کیلومتر روسازی در نظر گرفته شده است. سایر پارامترهای موثر از جمله کاهش هزینه استفاده از تراشه آسفالت، کاهش هزینه انرژی مصرفی، هزینه اصلاح و حمل مصالح و هزینه تعمیر و نگهداری لحاظ نشده است.

بر اساس نتایج آزمایش‌ها، مقدار درصد قیر بهینه مخلوط آسفالتی گرم حاوی ۲۵ درصد تراشه آسفالتی با ۱۰/۵ درصد جوان‌ساز و ۳ درصد ساسوبیت برابر ۵/۴ بوده و درصد قیر بهینه آسفالت داغ برابر ۵/۶ فرض می‌شود که در یک تن مخلوط آسفالتی داغ مقدار ۶۱/۵ کیلوگرم قیر معمولی و در یک تن مخلوط آسفالتی گرم اصلاح شده مقدار ۵۷ کیلوگرم قیر معمولی، ۱/۷۱ کیلوگرم ساسوبیت و ۱/۳۵

شده در خود و عدم چسبندگی مناسب بین مصالح دارای نشانه مقاومت در برابر ترک خوردگی و چقرمگی شکست کمتری بود. به عبارت دیگر، افزودن ۲۵ و ۵۰ درصد تراشه آسفالت به ترتیب باعث کاهش نشانه مقاومت در برابر ترک خوردگی به میزان ۲۰ و ۳۳ درصد و همچنین کاهش چقرمگی شکست به میزان ۲۱ و ۲۲ درصد شد. افزودن جوان‌ساز به مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالت، ضعف پیرشدگی قیر در خرده‌های آسفالتی را برطرف نمود و باعث بهبود هر دو شاخص مقاومت در برابر ترک خوردگی و چقرمگی شکست شد. به طوری که افزودن جوان‌ساز به مخلوط حاوی ۲۵ و ۵۰ درصد تراشه آسفالت به ترتیب باعث بهبود ۳۵ و ۲۶ درصدی مقاومت در برابر ترک خوردگی و همچنین باعث افزایش ۲۰ و ۲۶ درصدی چقرمگی شکست شد.

سپاس‌گزاری

نویسندگان لازم می‌دانند از حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی به عنوان حامی مالی این تحقیق، تشکر و قدردانی نمایند.

مراجع

- [1] H. Haghshenas, H. Nabizadeh, Y.R. Kim, K. Santosh, Research on high-RAP asphalt mixtures with rejuvenators and WMA additives, Nebraska Department of Transportation, Research Report No.: SPR-P1(15)M016, (2016).
- [2] M. Zaumanis, R.B. Mallick, R. Frank, Evaluation of different recycling agents for restoring aged asphalt binder and performance of 100% recycled asphalt, *Materials and Structures*, 48(8) (2015) 2475-2488.
- [3] M. Elkashef, R.C. Williams, E. Cochran, Investigation of fatigue and thermal cracking behavior of rejuvenated reclaimed asphalt pavement binders and mixtures, *International Journal of Fatigue*, 108 (2018) 90-95.
- [4] Z. Lei, H. Bahia, T. Yi-qiu, Effect of bio-based and refined waste oil modifiers on low temperature performance of asphalt binders, *Construction and Building Materials*, 86 (2015) 95-100.
- [5] M. Zaumanis, R.B. Mallick, L. Poulidakos, R. Frank, Influence of six rejuvenators on the performance

پیر شده در تراشه آسفالت در دمای پایین باعث شکنندگی مخلوط شد و مقدار نیروی لازم برای شکست مخلوط آسفالتی را کاهش داد. به عبارت دیگر، افزودن ۲۵ و ۵۰ درصد تراشه آسفالت به ترتیب باعث کاهش نیروی شکست برابر ۳ و ۲۲ درصد شد. همچنین به کارگیری همزمان جوان‌ساز با ۲۵ و ۵۰ درصد تراشه آسفالت به ترتیب موجب کاهش ۵ و ۲ درصدی نیروی شکست آسفالت شد. در حالی که در دمای متوسط، افزودن تراشه آسفالت، افزایش نیروی لازم جهت شکست مخلوط را به دنبال داشت. به طوری که افزودن ۲۵ و ۵۰ درصد تراشه آسفالت به ترتیب باعث افزایش نیروی شکست برابر ۹ و ۱۱ درصد شد. همچنین به کارگیری هم‌زمان جوان‌ساز با ۲۵ و ۵۰ درصد تراشه آسفالت به ترتیب موجب افزایش ۲ و ۴ درصدی نیروی شکست آسفالت شد.

۲- در دو دمای پایین و متوسط، با افزایش سفتی مخلوط آسفالتی (افزودن تراشه آسفالت)، شکنندگی مخلوط بیشتر شد و در نتیجه مقاومت در برابر ترک خوردگی کاهش یافت. برای مثال، افزودن ۲۵ و ۵۰ درصد تراشه آسفالت به مخلوط آسفالت گرم در دمای متوسط، به ترتیب باعث کاهش ۱۳ و ۲۶ درصدی انرژی شکست شد. ضمناً، استفاده از مواد جوان‌ساز میزان مقاومت در برابر ترک خوردگی را در مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالتی بهبود داد. به طوری که افزودن جوان‌ساز به مخلوط حاوی ۲۵ و ۵۰ درصد تراشه آسفالت در دمای پایین، به ترتیب باعث افزایش ۲۹ و ۱۹ درصدی انرژی شکست شد. این بهبود در مقدار انرژی شکست برای شرایط دمایی متوسط به ترتیب برابر ۴۶ و ۱۴ درصد بود.

۳- وجود و افزایش تراشه آسفالت در مخلوط آسفالتی باعث کاهش چشم‌گیر شاخص انعطاف‌پذیری شد. به عبارت دیگر، افزودن ۲۵ و ۵۰ درصد تراشه آسفالت به ترتیب باعث کاهش این شاخص به میزان ۵۱ و ۶۶ درصد شد. ولی اصلاح‌کننده جوان‌ساز با نرم کردن قیر پیر شده تراشه آسفالتی باعث نرمی مخلوط شد و میزان انعطاف‌پذیری مخلوط حاوی تراشه آسفالت را افزایش داد که حاکی از نقش مثبت آن در بهبود مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر ترک خوردگی است. به طوری که افزودن جوان‌ساز به مخلوط حاوی ۲۵ و ۵۰ درصد تراشه آسفالت به ترتیب باعث بهبود ۱۵ و ۲۰ درصدی شاخص انعطاف‌پذیری شد.

۴- مخلوط آسفالتی حاوی تراشه آسفالت به علت وجود قیر پیر

- Structures, 90 (2016) 167-177.
- [15] S. Pirmohammad, A. Bayat, Characterizing mixed mode I/III fracture toughness of asphalt concrete using asymmetric disc bend (ADB) specimen, *Construction and Building Materials*, 120 (2016) 571-580.
- [16] S. Pirmohammad, Y. Majd-Shokorlou, B. Amani, Experimental investigation of fracture properties of asphalt mixtures modified with Nano Fe_2O_3 and carbon nanotubes, *Road Materials and Pavement Design*, (2019) 1-23.
- [17] S. Pirmohammad, A. Kiani, Effect of temperature variations on fracture resistance of HMA mixtures under different loading modes, *Materials and Structures*, 49 (2016), 3773-3784.
- [18] S. Pirmohammad, A. Kiani, Impact of temperature cycling on fracture resistance of asphalt concretes, *Computers and Concrete*, 17 (2016), 541-551.
- [19] M.R. Ayatollahi, S. Pirmohammad, Temperature effects on brittle fracture in cracked asphalt concretes, *Structural Engineering and Mechanics*, 45(1) (2013) 19-32.
- [20] S. Pirmohammad, M. Ayatollahi, Asphalt concrete resistance against fracture at low temperatures under different modes of loading, *Cold Regions Science and Technology*, 110 (2015) 149-159.
- [21] X. Shu, B. Huang, D. Vukosavljevic, Evaluation of cracking resistance of recycled asphalt mixture using semi-circular bending test, in: *Paving Materials and Pavement Analysis*, (2010) 58-65.
- [22] D. Singh, S.F. Chitragar, P.K. Ashish, Comparison of moisture and fracture damage resistance of hot and warm asphalt mixes containing reclaimed pavement materials, *Construction and Building Materials*, 157 (2017) 1145-1153.
- [23] M. Aliha, A. Razmi, A. Mansourian, The influence of natural and synthetic fibers on low temperature mixed mode I+ II fracture behavior of warm mix asphalt (WMA) materials, *Engineering Fracture Mechanics*, 182 (2017) 322-336.
- [24] M.C. Cavalli, M. Zaumanis, E. Mazza, M.N. Partl, L.D. Poulidakos, Aging effect on rheology and cracking properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures, *Construction and Building Materials*, 71 (2014) 538-550.
- [6] M.A. Farooq, M.S. Mir, A. Sharma, Laboratory study on use of RAP in WMA pavements using rejuvenator, *Construction and Building Materials*, 168 (2018) 61-72.
- [7] H. Haghshenas, Y.R. Kim, M.D. Morton, T. Smith, M. Khedmati, D.F. Haghshenas, Effect of softening additives on the moisture susceptibility of recycled bituminous materials using chemical-mechanical-imaging methods, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(9) (2018) 04018207.
- [8] W. Song, B. Huang, X. Shu, Influence of warm-mix asphalt technology and rejuvenator on performance of asphalt mixtures containing 50% reclaimed asphalt pavement, *Journal of Cleaner Production*, 192 (2018) 191-198.
- [9] A. Khodaii, H. Haghshenas, H.K. Tehrani, Effect of grading and lime content on HMA stripping using statistical methodology, *Construction and Building Materials*, 34 (2012) 131-135.
- [10] S. Sobhi, A. Yusefi, S. Hesami, M. Ameri, An investigation of factors affecting the moisture sensitivity of warm mix asphalt (WMA), *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, (2018) (in Persian).
- [11] G. Nsengiyumva, T. You, Y.R. Kim, M. Beran, Investigation of testing variables of semicircular bending test for asphalt concrete mixtures: experimental-statistical approach, *Transportation Research Board 95th Annual Meeting*, Washington DC, United States, (2016).
- [12] L. Chen, Z. Qian, J. Wang, Multiscale numerical modeling of steel bridge deck pavements considering vehicle-pavement interaction, *International Journal of Geomechanics*, 16(1) (2015) B4015002.
- [13] M. Wagnoner, W.G. Buttlar, G. Paulino, Disk-shaped compact tension test for asphalt concrete fracture, *Experimental mechanics*, 45(3) (2005) 270-277.
- [14] M. Aliha, A. Bahmani, S. Akhondi, A novel test specimen for investigating the mixed mode I+ III fracture toughness of hot mix asphalt composites-Experimental and theoretical study, *International Journal of Solids and*

- Science and Technology, 35(2017) 890-895.
- [32] H. Behbahani, M.J. Ayazi, A. Moniri, Laboratory investigation of rutting performance of warm mix asphalt containing high content of reclaimed asphalt pavement, *Petroleum Science and Technology*, 35(2017) 1556-1561.
- [33] AASHTO TP 105, Standard Method of Test for Determining the Fracture Energy of Asphalt Mixtures Using the Semicircular Bend Geometry (SCB), (2013).
- [34] H. Ozer, I.L. Al-Qadi, P. Singhvi, T. Khan, J. Rivera-Perez, A. El-Khatib, Fracture characterization of asphalt mixtures with high recycled content using Illinois semicircular bending test method and flexibility index, *Transportation Research Record*, 2575(1) (2016) 130-137.
- [35] AASHTO TP 124, Standard Method of Test for Determining the Fracture Potential of Asphalt Mixtures Using the Flexibility Index Test (FIT), (2018).
- [36] F. Kaseer, F. Yin, E. Arámbula-Mercado, A.E. Martin, J.S. Daniel, S. Salari, Development of an index to evaluate the cracking potential of asphalt mixtures using the semi-circular bending test, *Construction and Building Materials*, 167 (2018) 286-298.
- [37] G. Saha, K.P. Biligiri, Homothetic behaviour investigation on fracture toughness of asphalt mixtures using semicircular bending test, *Construction and Building Materials*, 114 (2016) 423-433.
- [38] S. Pirmohammad, H. Shabani, Mixed Mode I/II Fracture Strength of Modified HMA Concretes Subjected to Different Temperature Conditions, *Journal of Testing and Evaluation*, 47(5) (2019) 3355-3371.
- behaviour of reclaimed binder with bio-based rejuvenators, *Journal of Cleaner Production*, 189 (2018) 88-97.
- [25] H. Ziari, A. Moniri, P. Bahri, Y. Saghafi, Y. (2019). Evaluation of performance properties of 50% recycled asphalt mixtures using three types of rejuvenators, *Petroleum Science and Technology*, 37(2019) 2355-2361.
- [26] P. Shirodkar, Y. Mehta, A. Nolan, K. Sonpal, A. Norton, C. Tomlinson, R. Sauber, A study to determine the degree of partial blending of reclaimed asphalt pavement (RAP) binder for high RAP hot mix asphalt, *Construction and Building Materials*, 25(2011) 150-155.
- [27] W. Mogawer, A. Austerman, L. Mohammad, M.E. Kutay, Evaluation of high RAP-WMA asphalt rubber mixtures, *Road Materials and Pavement Design*, 14(2013) 129-147.
- [28] D. Singh, D. Sawant, F. Xiao, High and intermediate temperature performance evaluation of crumb rubber modified binders with RAP, *Transportation Geotechnics*, 10 (2013) 13-21.
- [29] H. Goli, M. Latifi, Evaluation of the effect of moisture on behavior of warm mix asphalt (WMA) mixtures containing recycled asphalt pavement (RAP), *Construction and Building Materials*, 247 (2020), 118526.
- [30] D. Singh, P.K. Ashish, S.F. Chitragar, Laboratory performance of recycled asphalt mixes containing wax and chemical based warm Mix additives using semi circular bending and tensile strength ratio tests. *Construction and Building Materials*, 158(2018) 1003-1014.
- [31] M.J. Ayazi, A. Moniri, P. Barghabany, Moisture susceptibility of warm mixed-reclaimed asphalt pavement containing Sasobit and Zycotherm additives, *Petroleum*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Pirmohammad, S. Sobhi, A. Yousefi, Study on the effect of reclaimed asphalt pavement and rejuvenator on fracture behavior of WMA, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(10) (2022) 4413-4432.

DOI: [10.22060/ceej.2020.18351.6842](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18351.6842)

