

ارزیابی خصوصیات فیزیکی و رئولوژیکی قیر مصالح خرده آسفالتی حاوی ضایعات روغن و خرده لاستیک

مقاله علمی - پژوهشی

حامین چویدار، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران
امین فرج اللهی، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران
علیرضا عاملی*، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: ameli@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۱۲ - پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۵

صفحه ۳۵۶-۳۴۱

چکیده

روسازی آسفالت بازیافت شده^۱ (RAP) به یک روش معمولی در اکثر کشورها تبدیل شده است. از این رو، استفاده از مواد جوان ساز به همراه RAP عمدتاً به دلیل افزایش هزینه‌های مواد خام، در تولیدکنندگان آسفالت محبوبیت پیدا کرده است. در این مطالعه، خرده لاستیک (CR)^۲ و روغن سرخ کردنی ضایعاتی (WFO)^۳ جهت بازیابی خواص و افزایش مقاومت شیارشدگی RAP استفاده شد. چندین ویژگی فیزیکی و رئولوژیکی قیر مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد که نمونه قیر RAP حاوی WFO و CR نقطه نرمی را کاهش داده و درجه نفوذ را افزایش می‌دهند. این به افزایش شاخص نفوذ مربوط می‌شود. علاوه بر این، ویسکوزیته قیر بازیافت شده ترکیبی WFO/CR کارایی و سختی بهتری را نشان داد و همچنین دمای پایداری ذخیره سازی پایین (کمتر از ۲،۲ درجه سانتیگراد) با کاهش قابل قبول در هنگام گرم شدن را نشان داد. خواص رئولوژیکی WFO/CR همراه با قیر احیا شده با نمونه کنترل قابل مقایسه بود. ادغام CR با WFO به عنوان یک جوان کننده هیبریدی مقاومت شیارشدگی را افزایش داد. بنابراین، حضور WFO/CR تاثیر قابل توجهی بر خواص قیر RAP دارد و در عین حال محیط بهتری را ایجاد کرده و آلودگی زیست محیطی را با استفاده مجدد از مواد زائد کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: مخلوط، شیارشدگی، قیر، قیر اصلاح شده

۱- مقدمه

عمده دارند. در طول عمر روسازی آسفالت، قیر از شرایط محیطی و بار ترافیکی آسیب می‌بیند که سبب می‌گردد یک قیر ویسکوالاستیک، به شدت اکسید شده و به طور فزاینده‌ای پیر شود. این عوامل به طور مستقیم بر رفتار قیر روسازی تاثیر می‌گذارد. RAP قیر سفت‌تری تولید می‌کند که ممکن است سبب مشکلات کارایی و کاهش کیفیت روسازی آسفالت شود. جهت

اخیراً قیر آسفالت بازیافت شده (RAP) در تولید مخلوط‌های آسفالتی محبوبیت پیدا کرده و به روشی مقرون به صرفه برای ساخت و بازسازی روسازی تبدیل شده است. RAP از دیدگاه فنی، اقتصادی و زیست محیطی سودمند است. سن مخلوط آسفالت معمولاً بین ۷ تا ۱۵ سال است، اما بسیاری از مخلوط‌های آسفالتی کمتر از ۱۰ سال پس از ساخت نیاز به تعمیر و نگهداری

افزایش می‌دهد (Milad et al, 2020; Bilema et al, 2021). روغن ضایعات سرخ کردنی (WFO) نوعی ماده قابل دستیابی برای استفاده مجدد است. زیرا به دلیل مسائل حذف و آلودگی بالقوه منابع آب می‌تواند به یک آلاینده زیست محیطی تبدیل شود. اخیراً، مطالعات متعددی برای بررسی استفاده از WFO در RAP انجام شده است. گارسیا و همکاران (Garcia et al, 2011) ویژگی‌های مخلوط آسفالتی حاوی کپسول آفتابگردان را بررسی کرد. آنها به این نتیجه رسیدند که کپسول‌های روغن آفتابگردان استحکام کششی غیرمستقیم و مدول سفتی مخلوط آسفالت را کاهش می‌دهند. ون و همکاران (Wen et al, 2013) تحقیقات آزمایشی را برای بررسی ضایعات روغن پخت و پز به عنوان یک منبع ضایعات جایگزین برای افزایش عملکرد مخلوط آسفالت انجام دادند، آنها به این نتیجه رسیدند که ویژگی‌های فیزیکی WFO می‌تواند بر عملکرد قیر موجود در مخلوط بازیافت شده تأثیر بگذارد. برخی از محققین نشان دادند که روغن‌های ضایعات پخت و پز ویژگی‌های قیر را افزایش داده و کیفیت روسازی آسفالت را افزایش می‌دهد (Asli et al, 2012). افزایش سفتی قیر و به دست آوردن کارایی مناسب قیر در دماهای بالا در مخلوط‌های آسفالتی مطلوب است. چندین اصلاح‌کننده برخی از خواص مخلوط‌های آسفالتی مانند خرده لاستیک (CR) را بهبود می‌بخشد [۲۰]. CR یک جایگزین برای بهبود مخلوط‌های آسفالتی با ایجاد مخلوط‌های سفت‌تر در دمای سرویس بالا است (Abdul et al, 2018). در مقابل، استفاده از CR در صنعت روسازی آسفالت راه حلی جایگزین برای کاهش موضوع آلودگی محیط زیست و در عین حال بهبود خواص مخلوط آسفالتی در نظر گرفته می‌شود. با این حال، استفاده از CR تأثیر قابل توجهی بر قیر دارد و می‌تواند رفتار روسازی آسفالت را از نرم به سخت تغییر دهد، نفوذ را کاهش دهد و نقطه نرمی را افزایش دهد. با استفاده از CR در اختلاط آسفالت، مشکل دفن زباله لاستیک‌های خودرو به عنوان لاستیک‌های لاستیکی زباله را می‌توان کاهش داد. مطالعات Serval به این نتیجه رسیدند که افزودن CR منجر به بهبود مقاومت شیارشدگی، استحکام کششی غیرمستقیم و مدول ارتجاعی می‌شود (Moreno et al, 2013; Bilema et al, 2021; Bilema et al, 2021). بر اساس ادبیات ذکر شده در بالا، چند

بهبود رئولوژی قیر، روغن سرخ کردنی زباله (WCO) می‌تواند به عنوان یک جوان‌کننده در قیر از طریق درصد روغن کم ویسکوزیته برای طبقه بندی ساختار شیمیایی و نسبت آن برای تولید یک قیر استفاده شود. استفاده از روغن زباله به عنوان یک جوان‌کننده به طور گسترده‌ای استفاده می‌شود. بنابراین، یک جایگزین مناسب برای کاهش این مشکل می‌باشد (Mills-Beale et al, 2010; Hamim et al, 2013). معیارهای تعیین یک جوان‌کننده قیر باید مطابق و ظرفیت کافی از مواد RAP را پوشش دهد، در قیر پیر شده نفوذ کند و دسته‌ای قوی تر و منسجم‌تر تولید کند تا به همان سطح مخلوط آسفالتی معمولی برسد. مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۱۵ درصد RAP یا کمتر از نظر مقاومت کششی غیرمستقیم، حساسیت به رطوبت، تغییر شکل دائمی و خستگی عملکرد مشابهی دارند. استفاده مجدد از آسفالت بازیافتی می‌تواند رفتار رئولوژی قیر را با بهبود ویسکوزیته و افزایش سفتی برای افزایش عملکرد روسازی افزایش دهد. در فرآیند اختلاط، قیر پایه قرار است قیر RAP را جوان کند تا ویسکوزیته هدف را ایجاد کند. با این حال، هنگامی که قیر RAP و قیر پایه، هم در کارخانه‌های آسفالت و هم در طول عمر روسازی، ترکیب می‌شوند، ساختار شیمیایی و شکل‌گیری مربوط به گروه‌های عملکردی در قیر را تغییر می‌دهند. این موضوع بسیار نگران‌کننده است زیرا قیر RAP به راحتی در اثر پیری اکسید می‌شود و به طور فزاینده‌ای شکننده می‌شود. متعاقباً چسبندگی کمتری پیدا می‌کند، اما منسجم‌تر می‌شود و مستعد از دست دادن ظرفیت چسبندگی خود است. خواص شیمیایی و فیزیکی قیر به دلیل تغییرات اکسیداسیون در گروه‌بندی ساختاری و عملکردی که بر تعامل قیر و سنگدانه تأثیر می‌گذارد، پیری است. بین رفتار عملکرد مخلوط‌های آسفالتی و ترکیب شیمیایی قیر رابطه وجود دارد. قیر شامل چهار بخش است: آسفالتین، آروماتیک، رزین و اشباع. با پیری قیر، محتوای آسفالتین و رزین افزایش می‌یابد، در حالی که محتوای اشباع کاهش می‌یابد. علاوه بر این، ویسکوزیته و خواص نقطه نرمی پس از فرآیند پیری افزایش می‌یابد، در نتیجه شکل‌پذیری و نفوذ را نسبت به قیر پایه کاهش می‌دهد. بنابراین، پیرشدگی عملکرد قیر را کاهش می‌دهد و شرایط ضعیفی ایجاد می‌کند که بر عمر سرویس روسازی تأثیر می‌گذارد و متعاقباً هزینه نگهداری را

سنگدانه‌های آسفالت احیا شده استخراج شدند. در این فرآیند استخراج و بازیابی، تری کلرواتیلن کلرید برای استخراج قیر از روسازی آسفالت احیا شده با مخلوط کردن تری کلرواتیلن کلرید با روسازی آسفالت احیا شده و سپس حرارت داده شد تا زمانی که تری کلرواتیلن کلرید از مخلوط تبخیر شود. طبق استاندارد ASTM D5404، فرآیند بازیابی RAP با استفاده از یک تبخیرکننده چرخشی انجام شد، جایی که قیرهای RAP از حلال جدا شدند. به دنبال آن، تست نفوذ برای تعیین درجه بندی RAP انجام شد. WFO از سه رستوران مختلف در تهران جمع‌آوری شد. WFO در معرض یک فرآیند فیلتر ساده با استفاده از کاغذ فیلتراسیون با قطر ۱۵۰ میلی متر قرار گرفت. نوردیانا و همکاران (Nordiana et al, 2018) گزارش کردند که روغن عمل‌آوری شده می‌تواند ویژگی‌های رئولوژیکی قیر پیرشده را افزایش دهد. CR که در الک ۰,۱۵ میلی‌متری (مش ۴۰) استفاده شد. این مطالعه آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی، شکل‌پذیری و ویسکوزیته را برای تعیین محتوای WFO و CR انجام داد (Bilema et al, 2021).

مطالعه بر WFO و CR به عنوان جوان‌کننده‌های ترکیبی برای بازگرداندن ویژگی‌های قیر RAP و جلوگیری از مشکل شیار شدگی ناشی از افزودن WFO تاکید کردند. بنابراین، مطالعه حاضر برای ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی، رئولوژیکی و شیمیایی قیر RAP با و بدون جوان‌کننده هیبریدی انجام شد. دو دلیل برای افزودن RAP و WFO همراه با CR در مخلوط آسفالت وجود دارد. تا استفاده از منابع طبیعی را کاهش دهد و جایگزینی روسازی پایدار را آشکار نماید.

۲- مواد و مصالح

۲-۱- مواد

قیر معمولی با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ به عنوان قیر پایه با چگالی و نقطه اشتعال به ترتیب برابر با ۱,۰۲ گرم بر سانتی متر مکعب و ۲۴۰ درجه سانتی گراد استفاده شد. RAP از شهرداری تهران جمع‌آوری شد، RAP در معرض فرآیند استخراج و بازیابی قرار گرفت تا قیر روسازی آسفالت احیا شده برای آزمایش‌های قیر استخراج شود. طبق استاندارد ASTM D2172، قیر RAP از

جدول ۱. خصوصیات قیر خالص استفاده‌شده

خصوصیات	قیر ۶۰/۷۰	روش آزمایش
وزن مخصوص در ۲۵ درجه سانتی‌گراد	۱/۰۱۴۲	ASTM D-70
درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی‌گراد	۶۵	ASTM D-5
نقطه نرمی (درجه سانتی‌گراد)	۵۲,۵	ASTM D-36
انگمی در ۲۵ درجه سانتی‌گراد	+۱۰۰	ASTM D-113
نقطه اشتعال	۲۷۰	ASTM D-92
ویسکوزیته	۲۶۵	-

۲-۲- آماده سازی نمونه‌های قیر

قیرهای RAPB+WFO+CR/۲۵ و RAPB+WFO+CR/۴۰ طبق مراحل زیر تولید شدند. ابتدا قیرهای پایه و پیرشده به ترتیب در دمای ۱۱۰ و ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت حرارت داده شدند و سپس در ظرفی ریخته و درون ظرف داغی قرار داده شدند. متعاقباً ۱,۵ درصد CR به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۱۷۷

تحقیق حاضر از قیر با درجه نفوذ ۷۰/۶۰ و درصد‌های مختلف RAP، WFO و ۱,۵ درصد CR به عنوان افزودنی استفاده کرد. RAP^۴ و قیرهای خالص در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ دقیقه مخلوط شدند.

۳- روش آزمایشگاهی

۳-۱- آزمایش قیر

آزمایش های درجه نفوذ، شکل پذیری و نقطه نرمی قیر به ترتیب بر اساس ASTM D5، ASTM D113، ASTM D36 مورد آزمایش قرار گرفتند. ویژگی رئولوژیکی بایندر آسفالت با استفاده از DSR^۱ بر اساس ASTM D7552 مورد آزمایش قرار گرفت.

درجه سانتیگراد به قیر اضافه شد. سپس دمای ظرف داغ برای افزودنی بعدی به ۱۵۰ درجه سانتیگراد تنظیم شد. ۵ دقیقه در نظر گرفته شد تا ظرف داغ به دمای مورد نظر برسد. سپس مقدار مورد نیاز WFO در دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲۰ دقیقه اضافه شد تا قیر به اندازه کافی مایع شود و از یکنواختی و همگنی اطمینان حاصل شود (Bilema et al, 2018; ilema et al, 2019). در نهایت، قیر اصلاح شده در ظروف ریخته شد تا برای آزمایش زیر مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۱. آزمایشات فیزیکی و رئولوژیکی قیر

روش آزمایش	مشخصات	خصوصیات
ASTM D5	۶۰-۷۰	درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتیگراد
ASTM D36	۵۲-۴۸	نقطه نرمی (درجه سانتیگراد)
ASTM D113	حداقل ۱۰۰	انگمی در ۲۵ درجه سانتیگراد
AASHTO T201	-	ویسکوزیته در دمای ۱۳۵
-	کمتر از ۲,۲	پایداری ذخیره سازی
-	۰-۲۱	قیرزدگی
	۲-الی ۲	شاخص نفوذ
AASHTO T240	ماکزیمم ۱۰۰	افت وزنی
AASHTO T315	-	رئومتر برش دینامیکی
-	-	طیف سنجی مادون قرمز فوریه

۴- بحث

۴-۱- خصوصیات روغن سرخ کردنی ضایعاتی

۴-۱-۱- خصوصیات فیزیکی روغن سرخ کردنی ضایعاتی

یافت. همچنین، دمای نقطه اشتعال پایین برای منبع ۳، که می تواند به کیفیت ساخت روغن یا فرآیند سرخ کردن مربوط باشد. از سوی دیگر، نتیجه نقطه اشتعال برای نمونه روغن منبع ۱ برای استفاده به عنوان یک جوان کننده در قیر RAP مناسب بود. آزمایش افت وزنی، اتلاف جرم روغن را پس از قرار گرفتن در معرض فشار و دمای بالا اندازه گیری می کند. حتی پس از فرآیند فیلتراسیون، ذرات ریز در روغن باقی می ماند که منجر به عدم کیفیت می شود. روغن منابع ۲ و ۳ به دلیل درصد کاهش وزن بالا و همچنین ویسکوزیته کم در مقایسه با روغن منبع ۱ برای استفاده با قیر ناکافی است.

جدول ۲ ویژگی های فیزیکی WFO را نشان می دهد. سه منبع WFO از روغن پالم فرآوری شدند. نتیجه نشان می دهد که منبع ۲ WFO مقدار بالایی از وزن مخصوص، رطوبت و اتلاف حرارت را نشان می دهد. اما نقطه اشتعال و ویسکوزیته پایینی را نشان می دهد. نتیجه نقطه اشتعال برای روغن یک مشخصه حیاتی برای بازیابی قیر RAP می باشد. زیرا زمانی که روغن با یک قیر مخلوط می شود، به دمای اختلاط بالا تا ۱۶۵ درجه سانتیگراد نیاز دارد. نتیجه نقطه اشتعال قابل قبول برای جوان کننده ها باید بیش از ۱۸۰ درجه سانتیگراد باشد تا الزامات ایمنی در منطقه ساخت و ساز برآورده شود. نمونه روغن منبع ۲ با افزایش دما به موم تبدیل شد و آزمایش در دمای ۱۱۰ درجه سانتیگراد خاتمه

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی منابع WFO مختلف

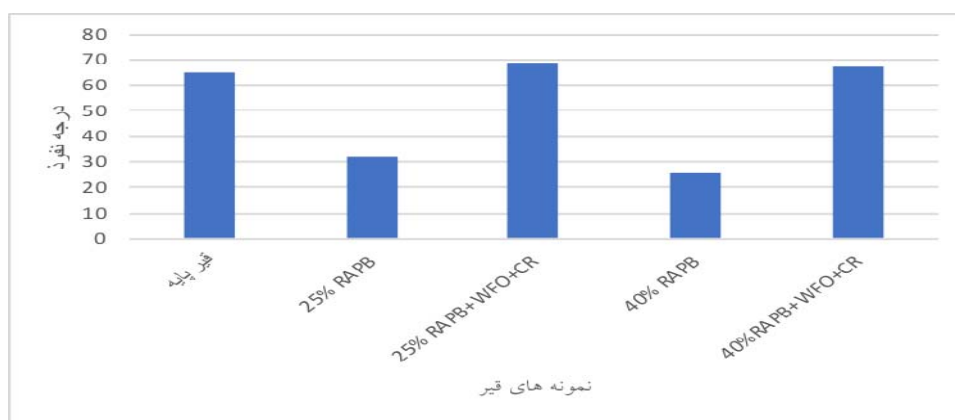
نتایج			خصوصیات فیزیکی
منبع ۳	منبع ۲	منبع ۱	
۰,۹۹۱	۰,۹۹۷	۰,۹۴۳	وزن مخصوص
۴,۶	۴,۴	۳,۳	PH
۰,۲۲	۰,۳	۰,۱۵	درصد رطوبت
۱۴۰	۱۰۹	۲۲۱,۱	نقطه اشتعال
۴۸,۳	۴۶,۱	۵۸,۱	ویسکوزیته
۰,۷۸	۰,۹۲	۰,۱۳	افت وزن

۴-۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی قیر

۴-۲-۱- درجه نفوذ

پایه نشان دادند. مقدار زیاد روغن، سختی قیر و درصد CR کوچک را کاهش می‌دهد و نرمی قیر را متعادل می‌کند. همچنین، ترکیب CR با WFO در قیرهای قدیمی با مقادیر ۲۵ و ۴۰ درصد RAPB، مقادیر نفوذ به ترتیب ۷۲ PEN و ۷۰ PEN را به دست می‌دهد. جدول ۴ تفاوت‌های قابل توجه قیر را برای نتایج نفوذ نشان می‌دهد. از نتایج آزمون t زوجی نشان داده شده در جدول ۴، تفاوت معنی‌داری بین قیر و RAPB با $(p \geq 0,05)$ وجود دارد که نشان می‌دهد افزودن RAPB تأثیر قابل توجهی بر سفتی قیر دارد.

شکل ۱ نتیجه نفوذ را در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد برای همه قیرها نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، به ترتیب با ۲۵ و ۴۰ درصد از قیر احیا شده بازیافتی (RAPB) در قیر، می‌تواند قیر سفت‌تری تولید کند و با افزایش RAPB، مقادیر نفوذ را افزایش دهد. همچنین مقادیر نفوذ کمتری در قیرها با ۲۵ و ۴۰ درصد RAPB نسبت به نمونه شاهد نشان می‌دهد که مربوط به پیری اکسیداسیون در طول عمر روسازی آسفالتی است. قیر پیر شده استخراج شده از RAP حاوی درصد بالایی از آسفالتین است که منجر به افزایش سفتی قیر می‌شود. از سوی دیگر، قیرهای با ۲۵ و ۴۰ درصد محتوای RAPB که دارای WFO/CR هستند، مقادیر نفوذ قابل مقایسه‌ای را با قیر



شکل ۱. آزمایش درجه نفوذ قیر

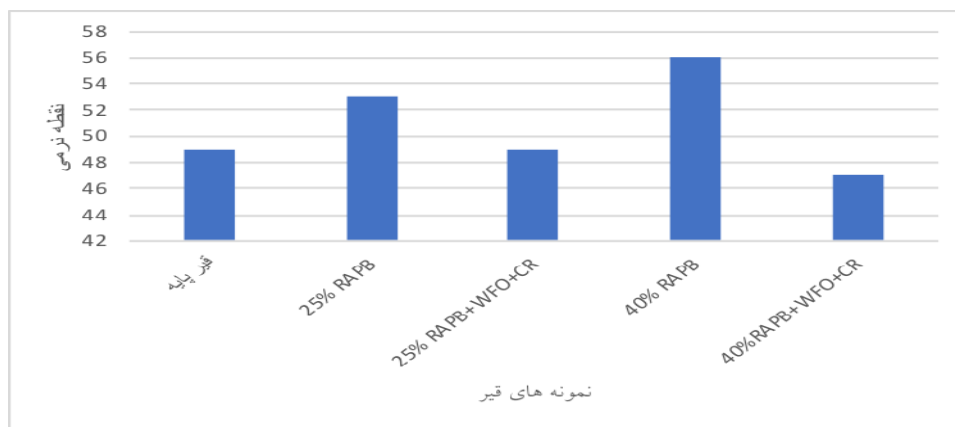
جدول ۳. مقایسه تفاوت معنی دار میانگین های گروه برای نتیجه درجه نفوذ

نمونه	میانگین	انحراف معیار	میانگین خطا	۹۵٪ اطمینان از اختلاف	
				پایین تر	بالا تر
25% RAPB	۳۶,۱۲	۱,۴۳۶۴۳	۰,۷۳۱	۳۲,۵۱۲۳۵	۳۷,۴۵۹۸۳
25% RAPB+WFO+CR	-۰,۸۶	۱,۰۸۹۹	۰,۴۷۲	-۲,۲۴۵۶	۰,۶۲۹۳۵
40% RAPB	-۰,۸۷	۰,۸۲۳	۰,۳۶	-۱,۹۵۴۳۱	۰,۱۲۹۳۵۷
40%RAPB+WFO+CR	۳۹,۶۳۴	۰,۴۱۳	۰,۱۷۲	۳۹,۲۷۶۹۸	۴۰,۱۲۴۳۸۷

۴-۲-۲- نقطه نرمی

دلیل سختی قیر قدیمی است. افزایش سختی قیر به دمای بالاتر برای نرم شدن قیر نیاز دارد. همچنین، آسفالتین با وزن مولکولی بالاتر، قیر سخت تری را نیز تولید می کند. این یافته ها با مطالعه قبلی (Abdullahi et al, 2016) مطابقت دارد.

نتیجه آزمایش نقطه نرم شدن در شکل ۲ نشان داده شده است. نقطه نرم شدن درجه دمایی را نشان می دهد که قیر از حالت نیمه جامد به حالت نرم منتقل می کند. نتایج نشان می دهد که قیر با محتوای 25 RAPB و ۴۰ درصد، به ترتیب با دمای ۵۵ و ۵۷ درجه سانتیگراد بالاترین نقطه نرمی را نشان می دهند. این به



شکل ۲. نقطه نرمی قیر

آزمون t زوجی برای مقایسه تفاوت های معنی دار همه نمونه ها با قیر خالص ارزیابی شد. جدول ۴ مقایسه ای از تفاوت های قابل توجه بین قیر خالص، RAPB و RAPB را نشان می دهد. تفاوت معنی داری بین قیر خالص، RAPB و RAPB وجود دارد. تفاوت معنی داری بین قیر خالص و قیر حاوی ۲۵ و ۴۰ درصد RAPB با $p = 0.028$ و $p = 0.037$ وجود دارد. تجزیه و تحلیل نشان داد که تفاوت معنی داری جزئی بین قیر پایه و قیر مصالح خرده آسفالتی حاوی روغن سرخ کردنی ضایعاتی و پودر لاستیک وجود ندارد.

در مقابل، ترکیب WFO و CR تاثیر مثبتی بر نقطه نرم شدن دارد. همانطور که در نتایج قیر با ۲۵ و ۴۰ درصد محتوای RAPB حاوی WFO/CR نشان داده شده است که هر دو به مقدار نقطه نرمی ۴۸ درجه سانتیگراد می رسند، این مقدار نقطه نرمی مناسب برای مخلوط معمولی با قیر خالص است. قیر با ۲۵ و ۴۰ درصد RAPB که ترکیبی از WFO و CR را در خود جای داده است، نتایج نرمی را با قیر خالص مقایسه می کند. این مربوط به اثر قابل توجه و توانایی WFO برای نرم کردن قیر پیرشده است. میانگین نتایج با استفاده از

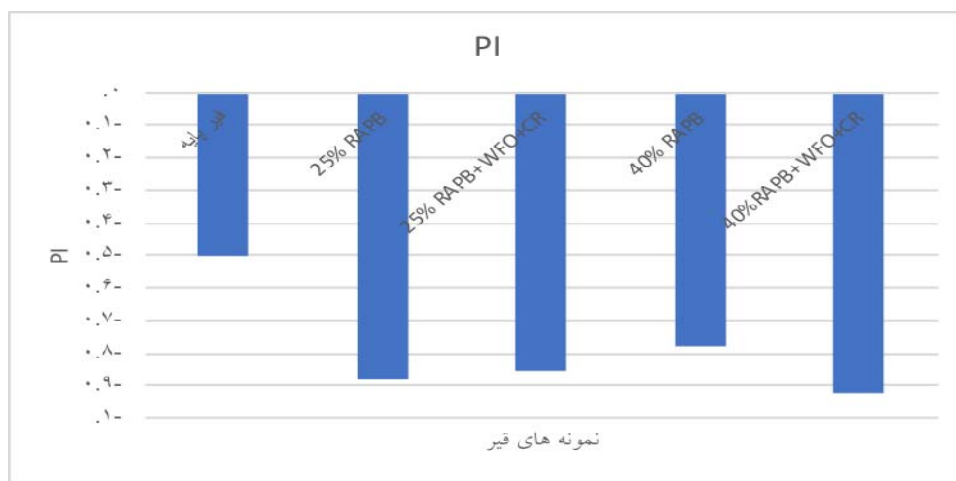
جدول ۴. مقایسه تفاوت معنی دار میانگین های گروه برای نتیجه نقطه نرمی

نمونه	میانگین	انحراف معیار	میانگین خطا	۹۵٪ اطمینان از اختلاف	
				پایین تر	بالا تر
25% RAPB	-۵,۶۴	۰,۳۴۶۷۳	۰,۲۴	-۸,۹۳۴۷۶	-۲,۶۹۵۴۲
25% RAPB+WFO+CR	۰,۷۳	۱,۰۷۲	۰,۷۴	-۸,۷۸۴۳	۱۰,۳۸۵۴۰
40% RAPB	-۸,۴	۰,۷۱۳	۰,۵۲	-۱۴,۹۵۴۷۹	-۲,۲۴۶۵۳۲
40%RAPB+WFO+CR	۱,۲۴	۱,۷۷۶	۱,۲۶	-۱۴,۸۳۴۲۲	۱۸,۳۴۵۶۱

۴-۲-۳- شاخص نفوذ

مورد استفاده در صنعت روسازی را تعیین کند. شکل ۴ نتیجه PI را برای قیرهای مختلف نشان می‌دهد.

شاخص نفوذ (PI) برای طبقه بندی نوع قیر به دست آمد. شاخص نفوذ برای محاسبه PI نیاز به دو متغیر دارد که عبارتند از نقطه نرم شدن و نفوذ. این ویژگی می‌توانست مناسب بودن قیر



شکل ۳. شاخص نفوذ

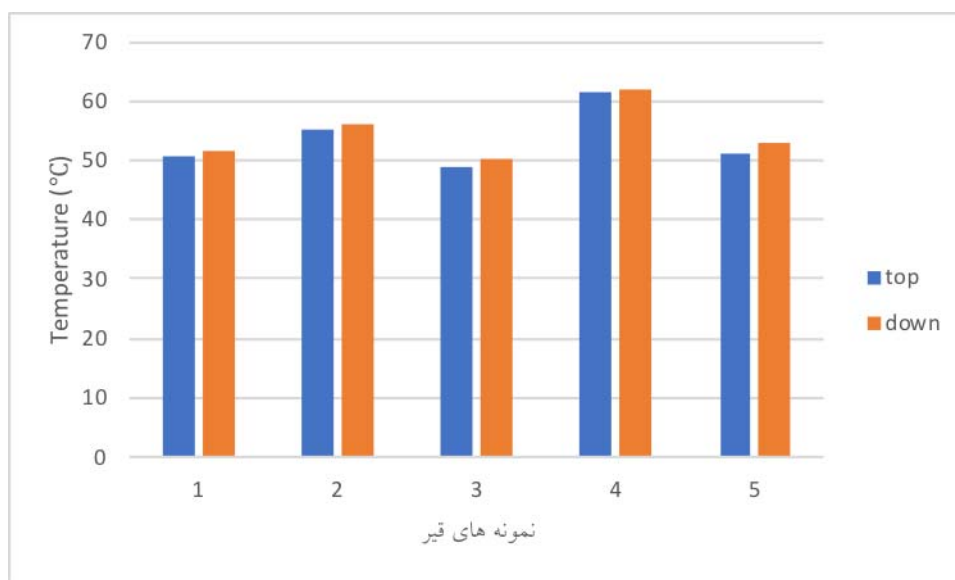
۴-۲-۴- پایداری ذخیره سازی

تست پایداری ذخیره سازی برای تعیین اینکه آیا قیر در طول دوره ذخیره سازی پایدار است یا ناپایدار، انجام شد. اختلاف دمای بالا و پایین نباید از ۲,۲ درجه سانتی‌گراد تجاوز کند. شکل ۵ نتیجه پایداری ذخیره سازی را بر اساس تفاوت بین مقادیر نقطه نرم شدن دمای بالا و پایین نشان می‌دهد. در شکل ۴ مشاهده می‌شود که تمامی قیرها در این مطالعه پایدار و مناسب برای نگهداری بدون جداسازی قابل توجه بودند.

می‌توان مشاهده کرد که نتیجه همه نمونه‌ها در محدوده قیر معمولی بود که بین ۲- تا ۲+ است. علاوه بر این، قیرهای با محتوای ۲۵ و ۴۰٪ RAPB به طور قابل توجهی بر نتیجه PI تأثیر می‌گذارد که باعث می‌شود قیر حساسیت حرارتی کمتری داشته باشد. همچنین، قیرهایی با ۲۵ و ۴۰ درصد RAPB که ترکیبی از WFO و CR را شامل می‌شوند، نتیجه‌ای قابل مقایسه با قیر خالص دارند، زیرا ترکیب WFO و CR سبب متعادل شدن قیر می‌گردند. در نتیجه، همه قیرها از نظر میزان حساسیت به دما، در یک دسته بندی مانند قیر خالص در نظر گرفته می‌شوند. نتایج PI با استفاده از آزمون t زوجی برای مقایسه تفاوت‌های معنی‌داری در نتایج پی مورد تحلیل قرار گرفت.

جدول ۵. مقایسه تفاوت معنی دار میانگین های گروه برای نتیجه شاخص نفوذ

نمونه	میانگین	انحراف معیار	میانگین خطا	۹۵٪ اطمینان از اختلاف	
				پایین تر	بالا تر
25% RAPB	۰,۳۷۶	۰,۰۰۸	۰,۰۰۵	۰,۳۲۶	۰,۴۳۲
25% RAPB+WFO+CR	۰,۳۱۶	۰,۰۳۷	۰,۰۲۶	-۰,۰۰۳	۰,۶۳۵
40% RAPB	۰,۲۶۸	۰,۰۰۷	۰,۰۰۶	۰,۲۱۴	۰,۳۲۹
40%RAPB+WFO+CR	۰,۳۷۸	۰,۰۴۹	۰,۰۳۶	-۰,۰۶۹	۰,۱۲۳



شکل ۴. نتایج حساسیت حرارتی قیرها

۴-۲-۵- ویسکوزیته قیر

تست ویسکوزیته چرخشی در دمای ۱۳۵ و ۱۶۵ درجه سانتیگراد برای ارزیابی کارایی قیر تعیین شد. شکل ۵ نتیجه ویسکوزیته قیرها را برای ترکیبات مختلف WFO و CR روی قیرهای قدیمی نشان می دهد. افزایش دمای آزمایش از ۱۳۵ به ۱۶۵ درجه سانتیگراد منجر به کاهش ویسکوزیته همه قیرها می شود. با این حال، هنگامی که دمای اختلاط و تراکم را کاهش می دهد، با در نظر گرفتن کارایی قیر نیز به انرژی و هزینه کمتری برای ساخت روسازی های آسفالتی نیاز است. ویسکوزیته قیر، با افزایش طول عمر و دوره پیری مخلوط آسفالتی افزایش می یابد. نتیج در شکل ۵ نشان می دهد که قیرهایی با ۲۵ و ۴۰

همانطور که در شکل ۴ مشاهده می شود، با مقادیر درصد CR کمتر از ۱,۵٪ نسبت به قیر، نمی تواند بر پایداری ذخیره سازی قیر تأثیر بگذارد. به همین ترتیب، WFO با ۲,۷ و ۴,۶ درصد (از نظر وزنی قیر پایه)، بر پایداری ذخیره سازی قیر تأثیری نمی گذارد. در مقابل، با افزودن مقدار زیادی CR در قیر می تواند بر پایداری ذخیره سازی قیر تأثیر منفی بگذارد. قیرهای حاوی ۲۵ و ۴۰ درصد RAPB دارای کمترین میزان پایداری ذخیره سازی هستند. این می تواند مربوط به فرآیند دوباره در طول عمر مفید آسفالت باشد. در نتیجه، تمام قیرها در این مطالعه کمتر از ۲,۲ درجه سانتیگراد هستند. بنابراین، تمام قیرها پایدار هستند.

لاستیک اثر کمی بر روی ویسکوزیته دارد. به همین دلیل است که از پودر لاستیک به عنوان افزودنی استفاده می‌گردد. زیرا سبب افزایش سختی قیر می‌گردد در صورتیکه بر روی ویسکوزیته اثر چندانی ندارد. این یافته مربوط به اضافه کردن جزء سبک، ممکن است سبب تعامل مولکولی در قیر پیرشده را کاهش دهد. اضافه کردن WFO سبب کاهش ویسکوزیته در دماهای مختلف می‌گردد. خلاصه نتایج حاصل از آزمون t مقایسه بین متیج ویسکوزیته قیر خالص و قیر حاوی RAPB در جدول ۶ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد تمامی قیرهای حاوی RAPB نتایج متفاوت قابل توجهی در مقایسه با قیرهای کنترلی نشان دادند. از طرف دیگر، تفاوت معنادار آماری بین قیر خالص و قیر حاوی ۲۵ و ۴۰ درصد RAPB به همراه پودرلاستیک و WFO مشاهده نشده است.

درصد RAPB دارای مقادیر ویسکوزیته بالایی هستند. این مربوط به تبخیر ذرات روغنی در طول عمر روسازی آسفالت است که نشان دهنده ویسکوزیته بالا در قیرها با ۲۵ و ۴۰ درصد RAPB است. همچنین، مقادیر ویسکوزیته بالا در قیر پیرشده می‌تواند منجر به عدم کارایی در مخلوط آسفالتی شود. عدم کارایی باعث از دست رفتن انسجام و چسبندگی بین سنگدانه و قیر می‌شود. همانطور که سنگوز و ایسیکاکار بحث کردند. افزایش ویسکوزیته راحت نیست زیرا قیر با درجه ویسکوزیته بالا نیاز به گرمای جهت اجرا، تراکم و مخلوط کردن بالاتری دارد که به معنای مصرف بیش از حد انرژی است. از طرف دیگر، هر دو قیر حاوی ۲۵ و ۴۰ درصد RAPB شامل پودرلاستیک و ضایعات روغن سرخ کردنی نتایج مشابه قابل توجهی مانند قیر پایه دارند. به این دلیل که ضایعات روغن سرخ کردنی سبب کاهش ویسکوزیته قیر پیر شده می‌گردد. از طرف دیگر، پودر

جدول ۶. مقایسه تفاوت معنی دار میانگین‌های گروه برای نتیجه ویسکوزیته در دمای ۱۳۵

نمونه	میانگین	انحراف معیار	میانگین خطا	۹۵٪ اطمینان از اختلاف	
				پایین تر	بالا تر
25% RAPB	-۳۹۱,۶۰۰	۳,۸۴۶	۱,۶۷۹	-۳۸۶۵۴۰,۰۰۰	-۳۹۲,۷۰۱
25% RAPB+WFO+CR	-۳,۷۷۰	۴,۶۷۳	۱,۹۸۶	-۹,۸۷۳	-۹,۲۴۶
40% RAPB	-۷۷۴,۸۰۰	۴,۵۳۰	۱,۹۳۷	-۷۶۵,۳۲۲	-۷۹۷,۳۴۰
40%RAPB+WFO+CR	-۱۹,۲۰۰	۱۸,۸۶۵	۷,۹۵۴	-۳۹,۸۴۷	۳,۶۸۳

در دمای ۱۶۵ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که بین قیر پایه و قیر حاوی ۲۵ و ۴۰ درصد RAPB تفاوت معنی‌داری وجود دارد.

علاوه بر این، با توجه به نتایج ویسکوزیته در دمای ۱۶۵ درجه سانتی‌گراد، نتایج آزمون با استفاده از آنالیز آماری آزمون t زوجی برای مقایسه سطح تفاوت معنی‌دار قیر پایه و RAPB مقایسه شد. جدول ۷ تفاوت قابل توجهی را در نتایج ویسکوزیته

جدول ۷. مقایسه تفاوت معنی دار میانگین‌های گروه برای نتیجه ویسکوزیته در دمای ۱۶۵

نمونه	میانگین	انحراف معیار	میانگین خطا	۹۵٪ اطمینان از اختلاف	
				پایین تر	بالا تر
25% RAPB	-۸۸,۴۴۰	۷,۸۳۲	۴,۵۳۲	-۱۰۷,۴۳۰	-۶۹,۴۳۲
25% RAPB+WFO+CR	-۳۴,۲۷۸	۳۵,۶۷۸	۱۹,۹۹۳	-۱۱۹,۳۴۰	۵۳,۸۷۳
40% RAPB	-۱۸۵,۰۰۰	۴,۶۷۰	۲,۴۵۷	-۱۸۸,۴۳۰	-۱۶۴,۲۳۰
40%RAPB+WFO+CR	-۳۶,۸۰۰	۳۱,۳۴۹	۱۸,۲۳۸	-۱۱,۵۶۰	۳۸,۴۵۷

۴-۲-۶- شکل پذیری

دمای پایین و عملکرد کلی قیر می‌شود. قیرهای حاوی ۲۵ و ۴۰ درصد RAPB حاوی قیر کنترلی و پیرشده می‌باشد. قیر حاوی ۲۵ درصد RAPB میزان محدودیت ۱۰۹ سانتیمتر را پاس نمود.

شکل ۵ نتیجه آزمایش شکل پذیری را برای قیرهای مختلف نشان می‌دهد. در شکل ۵ مشاهده می‌شود، افزودن WFO مقادیر شکل‌پذیری را افزایش می‌دهد. همچنین، افزایش مقدار شکل‌پذیری منجر به بهبود مقاومت در برابر ترک، حساسیت به



شکل ۵. شکل پذیری قیرها

۱۲۰ و ۱۰۲ سانتی‌متر مقادیر قابل قبولی را ارائه کردند. بنابراین، نتیجه شکل‌پذیری برای ترکیب WFO و CR از مشخصات Superpave عبور می‌کند که مقدار نتیجه بیش از ۱۰۰ سانتی‌متر را به دست می‌دهد. جدول ۸ تفاوت معنی دار میانگین گروه بین پایه و RAP و RAPB را برای نتیجه شکل‌پذیری نشان می‌دهد. جدول ۸ تفاوت‌های آماری معنی داری را بین قیر خالص و ۲۵ و ۴۰ درصد قیر RAPB با (p < ۰/۰۵) نشان می‌دهد. در مقابل، تفاوت معنی داری بین قیر خالص و ۲۵ و ۴۰ درصد RAP با WFO و CR با $p = ۰,۱۰۴$ و $p = ۰,۰۸۰$ وجود ندارد.

در مقابل، قیر با ۴۰ درصد RAPB با ۹۰ سانتی‌متر، الزامات حداقل مورد نیاز تست شکل‌پذیری را پاس نمی‌کند. بنابراین، قیر پیرشده، هنگامی که با یک قیر خالص مخلوط می‌شود، مقادیر شکل‌پذیری را کاهش می‌دهد. همراه با این، کاهش شکل‌پذیری قیر حاوی ۴۰ درصد RAPB با مقدار بالای قیر قدیمی به شدت قابل توجه است که منجر به عدم انعطاف‌پذیری و مقاومت در برابر ترک خوردگی می‌شود. از سوی دیگر، قیرهای با ۲۵٪ و ۴۰٪ RAPB با ترکیب WFO و CR الزامات شکل‌پذیری را پشت سر گذاشتند و به ترتیب با

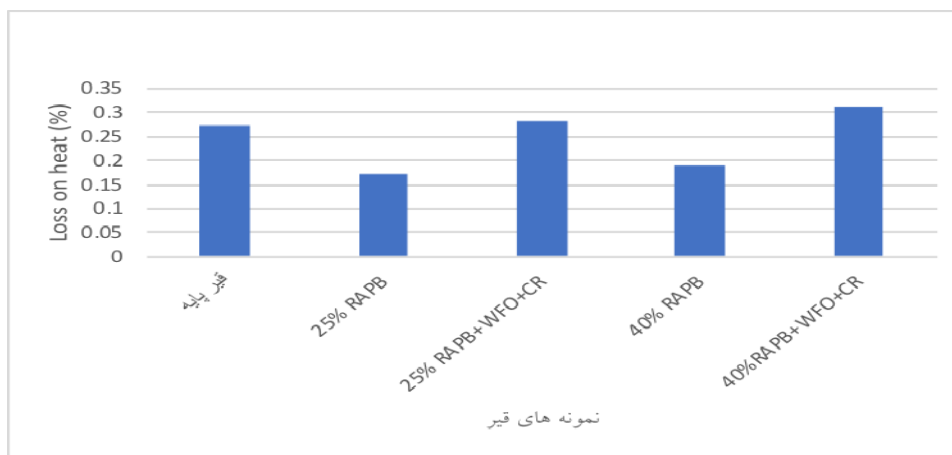
جدول ۸. مقایسه تفاوت معنی دار میانگین‌های گروه برای نتیجه شکل‌پذیری

نمونه	میانگین	انحراف معیار	میانگین خطا	۹۵٪ اطمینان از اختلاف	
				پایین تر	بالا تر
25% RAPB	۲۸,۸۶۰	۱۰,۱۴۳	۵,۸۱۲	۴,۶۵۱	۵۵,۳۱۸
25% RAPB+WFO+CR	۴۱,۴۵۷	۲۵,۶۷۸	۱۵,۳۲۹	-۲۱,۷۸۳	۱۰۳,۲۱۷
40% RAPB	۶۳,۰۰۰	۱۱,۲۳۷	۶,۲۳۷	۳۶,۲۳۶	۸۵,۳۴۱
40% RAPB+WFO+CR	۵۱,۰۰۰	۲۷,۳۲۵	۱۵,۷۸۳	-۱۵,۳۱۳	۱۱,۳۴۹

۴-۷-آزمایش افت وزنی قیر

می‌شوند. در نتیجه، وزن قیری کاهش می‌یابد. محدوده معمول تلفات حرارتی ۰,۰۵-۰,۰۵٪ و حداکثر درصد تلفات در گرمایش ۱,۰٪ است.

آزمایش افت وزنی قیر با استفاده از آزمایش لعاب نازک چرخشی^۷ (RTFO) انجام شد. افت وزنی قیر پس از قرار گرفتن در معرض دما و فشار بالا محاسبه گردید. در دماهای بالا، ناخالصی‌ها و ذرات موجود در قیر فرار شده و در هوا آزاد



شکل ۶. افت وزنی قیرها

بر اساس نتیجه در شکل ۶، تمام قیرهای موجود در مشخصات و از دست دادن جرم همه قیرها به عنوان مقادیر قابل قبول در نظر گرفته می‌شود. همچنین تمام مقادیر قیر مشابه قیر خالص یا کمتر از آن بود. قیرهای با ۲۵٪ و ۴۰٪ RAPB کمترین کاهش را در مقادیر نتیجه حرارت دارند. به همین دلیل، قیر پیر شده ناخالصی و ذرات خود را در طول عمر روسازی آسفالت از دست می‌دهد. همچنین افت مقادیر حرارتی در قیر با ۲۵٪ و ۴۰٪ RAPB در مقایسه با سایر قیرها کمی کمتر است. قیرهایی با ۲۵٪ و ۴۰٪ RAPB که ترکیبی از WFO و CR را در خود جای داده‌اند، دارای مقادیر نتیجه قابل مقایسه با قیر خالص هستند. بر اساس نتایج، همه قیرها در این مطالعه در محدوده مشخصات

اتلاف وزن در آزمون حرارت بودند که بین ۰,۰۵ تا ۰,۵ درصد است. برای مقایسه تفاوت معنی‌دار قیر خالص با RAP و RAPB از آزمون t زوجی استفاده شد. جدول ۹ تفاوت‌های قابل توجهی از قیرها را برای اتلاف وزن ناشی از حرارت نشان می‌دهد. مشخص شد که تفاوت آماری معنی‌داری بین قیر خالص و ۲۵ و ۴۰ درصد از قیر RAPB با (P ≤ ۰/۰۵) وجود دارد. در این میان، بین قیر خالص با ۲۵ درصد RAPB با WFO و CR و ۴۰ درصد RAPB با WFO و CR به ترتیب با ۰/۱۸۴/p و ۰/۶۲۲/p تفاوت معنی‌داری وجود ندارد.

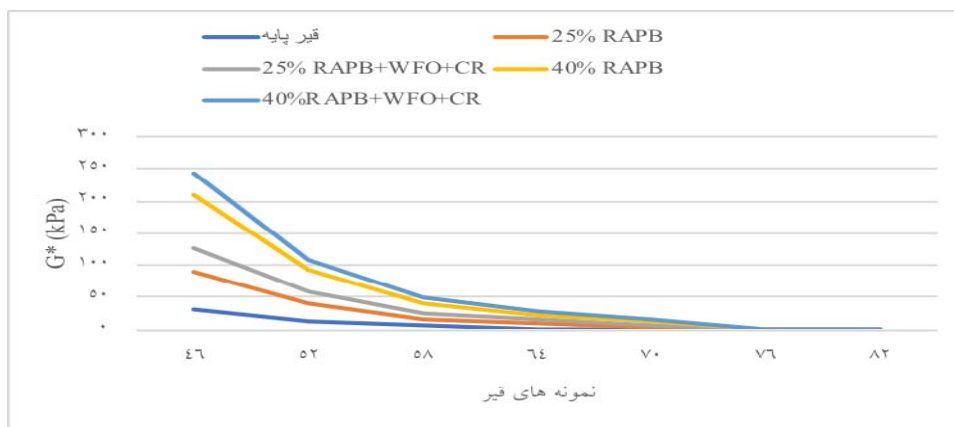
جدول ۹. مقایسه تفاوت معنی‌دار میانگین‌های گروه برای نتیجه افت وزنی قیر

نمونه	میانگین	انحراف معیار	میانگین خطا	۹۵٪ اطمینان از اختلاف	
				پایین تر	بالا تر
25% RAPB	۰,۱۴۰	۰,۰۴۰	۰,۰۱۹	۰,۰۵۷	۰,۳۱۸
25% RAPB+WFO+CR	۰,۰۳۰	۰,۰۱۸	۰,۰۱۶	-۰,۰۲۴	۰,۰۷۲
40% RAPB	۰,۱۲۰	۰,۰۱۸	۰,۰۱۶	۰,۰۶۸	۰,۱۷۹
40% RAPB+WFO+CR	-۰,۰۱۵	۰,۰۴۰	۰,۰۱۹	-۰,۰۸۳	۰,۰۷۲

۴-۲- نتایج آزمایش DSR

قیرهای حاوی ۲۵ و ۴۰ درصد RAP دارای مقادیر G^* برابر با ۵۸،۵ و ۸۲،۳ می‌باشند. در مقابل، قیرهای حاوی ۲۵ و ۴۰ درصد RAP حاوی پودر لاستیک و روغن ضایعاتی سرخ کردنی مشابه با قیر خالص می‌باشد. همچنین قیرهای حاوی ۲۵ و ۴۰ درصد RAP دارای مقادیر G^* ۳۸،۴ و ۳۳،۶ می‌باشند.

یک قیر با مدول پیچیده بزرگ (G^*) مقاومت بیشتری در برابر تغییر شکل دارد. شکل ۷ مدول پیچیده به دست آمده برای قیرها را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که افزودن ۴۰ درصد RAP در قیر باعث افزایش مقدار G^* و سفت شدن قیر می‌شود G^* بالا با ۴۰ RAP % به دلیل فرآیند پیری در طول عمر آسفالت است.



شکل ۷. نتایج مدول برشی مختلط نمونه‌ها

بین قیر خالص و قیر حاوی ۲۵٪ و ۴۰٪ RAP با $p = 0.022$ و $p = 0.011$ تفاوت معنی داری وجود دارد. در همین حال، بین قیر خالص و RAPB با WFO و CR تفاوت معنی داری وجود ندارد ($p > 0.05$). ارزش CR و WFO از G^* را زمانی که به RAPB اضافه شد کاهش داد.

نتایج با استفاده از آزمون t زوجی برای مقایسه تفاوت‌های معنی‌دار همه قیرها با قیر خالص مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. جدول ۱۰ مقایسه ای از تفاوت‌های قابل توجه بین قیر خالص و درصد قیر RAPB و RAPB را نشان می‌دهد.

جدول ۱۰. مقایسه تفاوت معنی دار میانگین‌های گروه برای نتیجه مدول مختلط

نمونه	میانگین	انحراف معیار	میانگین خطا	۹۵٪ اطمینان از اختلاف	
				پایین تر	بالا تر
25% RAPB	-۲۷،۹۰۰	۱،۴۶۰	۰،۹۶۰	-۳۹،۸۷۰	-۱۶،۸۵۰
25% RAPB+WFO+CR	-۴،۵۴۰	۴،۰۶۰	۲،۹۴۱	-۴۱،۵۴۰	۳۲،۸۳۰
40% RAPB	-۵۲،۶۵۰	۱،۳۴۷	۰،۸۸۰	-۶۳،۵۲۰	-۴۱،۵۹۰
40% RAPB+WFO+CR	-۱،۷۵۰	۱،۷۲۰	۱،۱۴۰	-۱۷،۸۷۳	۱۳،۹۳۲

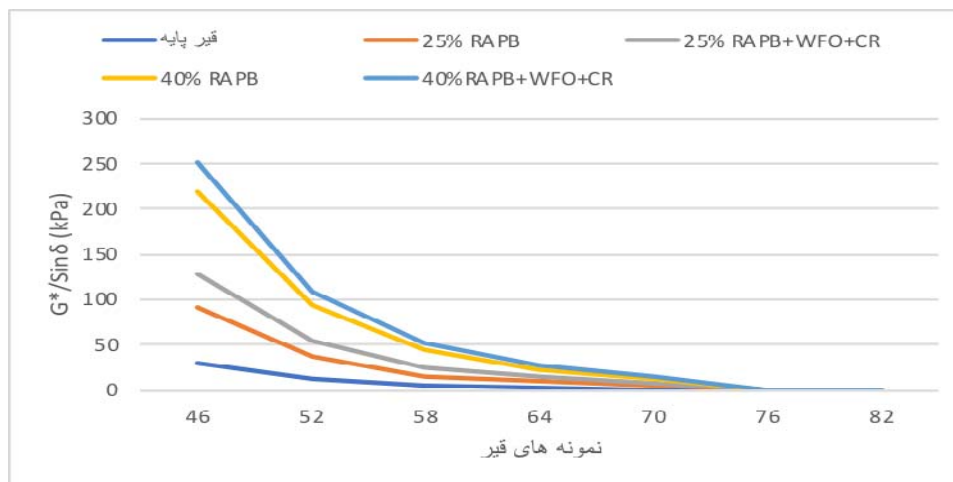
به ابزار ارزشمندی در توصیف عملکرد قیر در دمای بالا تبدیل شده است. معیار $G^*/\sin \delta$ مقاومت شیارشدگی است که طبق

کلید افزایش مقاومت در دمای بالا در برابر تغییر شکل قیر، ارزیابی عملکرد قیر در دمای بالا است. در نتیجه، رئولوژی

شکل ۸ همچنین نشان می‌دهد که قیرهای با ۲۵٪ و ۴۰٪ RAP که ترکیبی از WFO و CR را در خود جای داده‌اند، مقاومت شیارشدگی را در مقایسه با نمونه شاهد بهبود بخشیده‌اند. همان نتیجه توسط Sun و همکاران به دست آمد (Sun et al, 2016)، که به این نتیجه رسیدند که افزودن روغن برخی از زنجیره‌های با جرم مولکولی بالاتر را در قیر کاهش می‌دهد که باعث می‌شود قیر سفت‌تر شود.

علاوه بر این، قیرهای حاوی ۲۵٪ و ۴۰٪ RAP که ترکیبات WFO و CR را در خود جای داده‌اند، به ترتیب مقادیر مقاومت شیارشدگی ۳۵/۰۲ و ۳۳/۴۷ کیلو پاسکال را در دمای ۴۶ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهند.

استاندارد Superpave باید بیش از ۱۰ کیلو پاسکال برای نمونه پیر نشده باشد. قیرهایی با مقدار $G^*/\sin \delta$ بالا اما تغییر شکل جریان کم در دماهای بالا به عنوان مقاومت شیاردار بالا در نظر گرفته می‌شوند، پارامتر مقاومت شیاردار می‌تواند مستقیماً مقاومت در برابر تغییر شکل در دماهای بالا را منعکس کند. شکل ۸ نتیجه پارامتر شیارشدگی را برای قیر خالص، RAP و RAPB نشان می‌دهد. مشاهده شده که افزایش دما منجر به کاهش مقاومت شیاردار برای همه قیرها شد. شکل ۸ نشان می‌دهد که قیرهای با محتوای RAP 25% و ۴۰٪ در مقایسه با نمونه شاهد در دمای ۴۶ درجه سانتیگراد مقاومت شیارشدگی بالایی دارند که با نتایج نفوذ و ویسکوزیته مطابقت دارد. قیرها با ۲۵٪ و ۴۰٪ RAP مقادیر مقاومت شیارشدگی را به ترتیب با ۶۰٫۸۷ و ۸۶٫۶۱ کیلو پاسکال در دمای ۴۶ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهند.



شکل ۸. نتایج پارامتر شیارشدگی قیرها

۵- نتیجه گیری

هدف اولیه این مطالعه به دست آوردن کارایی مناسب و بازاییی خواص RAPB با افزودن WFO و CR در قیر RAP بود. افزودن مقدار زیادی از WFO برای بازاییی تمام خصوصیات فیزیکی RAPB ضروری است، و مسئله نرمی را می‌توان با افزودن مقدار کمی CR کنترل کرد و تنها تأثیر کمی بر کارایی دارد. ترکیب CR و WFO در RAPB نتایج مشابهی از نفوذ، نقطه نرم شدن و افت وزنی ناشی از حرارت را در مقایسه با قیر خالص نشان می‌دهد. در همین حال، ترکیب هر دو ماده همچنین کارایی RAPB و پایداری ذخیره سازی را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، ترکیب WFO/CR نتیجه دمای شکست مشابهی را در مقایسه با قیر خالص به دست می‌دهد و متعاقباً مقاومت شیارشدگی را بهبود می‌بخشد. به طور خلاصه، ترکیبی از WFO/CR ممکن است با موفقیت برای بازاییی RAPB. به ویژه در ۲۵ و ۴۰٪ استفاده شود.

هدف اولیه این مطالعه به دست آوردن کارایی مناسب و بازاییی خواص RAPB با افزودن WFO و CR در قیر RAP بود. افزودن مقدار زیادی از WFO برای بازاییی تمام خصوصیات فیزیکی RAPB ضروری است، و مسئله نرمی را می‌توان با افزودن مقدار کمی CR کنترل کرد و تنها تأثیر کمی بر کارایی دارد. ترکیب CR و WFO در RAPB نتایج مشابهی از نفوذ، نقطه نرم شدن و افت وزنی ناشی از حرارت را در مقایسه با قیر خالص نشان می‌دهد. در همین حال، ترکیب هر دو ماده همچنین کارایی RAPB و پایداری ذخیره سازی را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، ترکیب WFO/CR نتیجه دمای شکست مشابهی را در مقایسه با قیر خالص به دست می‌دهد و متعاقباً مقاومت شیارشدگی را بهبود می‌بخشد. به طور خلاصه، ترکیبی از WFO/CR ممکن است با موفقیت برای بازاییی RAPB. به ویژه در ۲۵ و ۴۰٪ استفاده شود.

۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Reclaimed Asphalt Pavement
- 2- Crumb Rubber
- 3- Waste Fried Oil
- 4- Reclaimed Asphalt Pavement Bitumen
- 5- Dynamic Shear Rheometer
- 6- Penetration Index
- 7- Rolling Thin Film Oven

۷- مراجع

containing warm mix asphalt additive. In Lecture Notes in Civil Engineering; Springer, Singapore.

-Bilema, M. Aman, M.; Hassan, N. Haloul, M. Modibbo, S. (2021). Influence of crumb rubber size particles on moisture damage and strength of the hot mix asphalt. *Mater. Today Proc.* 42, 2387–2391.

-Bilema, M.A. Yusri Aman, M. Abdul Hassan, N. Al-Saffar, Z. Rogo, K. Azila Abdullah, N.F. (2021). Influence of crumb rubber incorporating different warm mix asphalt additives on the mechanical performance of the WMA mixture. *J. Rehabil. Civ. Eng.*

-Bilema, M.A. Aman, M.Y. Hassan, N.A. Ahmad, K.A. Elghatas, H.M. Radwan, A.A. Shyaa, A.S. (2018). Moisture Sensitivity of Crumb Rubber Modified Modifier Warm Mix Asphalt Additive for Two Different Compaction Temperatures. In Proceedings of the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, *IOP Publishing: Kuantan, Malaysia.*

-Bilema, M.A. Aman, M.Y. Hassan, N.A. Abdullah, N.F.A. (2019). Investigation on rheology and physical properties of asphalt binder blended with waste cooking oil. In Proceedings of the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; *IOP Publishing: Kuala Lumpur, Malaysia, Vol. 527.*

-García, Á. Schlangen, E. (2011). Van De Ven, M. Properties of capsules containing rejuvenators for their use in asphalt concrete. *Fuel*, 90, 583–591.

-Abdul Hassan, N. Abdulhussein Abdulridha Almusawi, A. Zul Hanif Mahmud, M. Asniza Mohamed Abdullah, N. Athma Mohd Shukry, N. Mashros, N. Putra Jaya, R. Md Yusoff, N.I. (2018). Engineering properties of crumb rubber modified dense-graded asphalt mixtures using dry process. In Proceedings of the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science; *Institute of Physics Publishing: Johor, Malaysia, Vol. 220.* [CrossRef]

-Abdullahi Ahmad, K. Ezree Abdullah, M. Abdul Hassan, N. Usman, N.; Ambak, K. (2016). Investigating the Feasibility of Using Jatropha Curcas Oil (JCO) as Bio Based Rejuvenator in Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). In *Proceedings of the MATEC Web of Conferences*, Melaka, Malaysia, 5–6 December.

-Asli, H. Ahmadinia, E. Zargar, M. Karim, M.R. (2012). Investigation on physical properties of waste cooking oil—Rejuvenated bitumen binder. *Constr. Build. Mater.* 37, 398–405. [CrossRef]

-Bilema, M. Bin Aman, Y. Hassan, N.A. Al-Saffar, Z. Ahmad, K. Rogo, K. (2021). Performance of Aged Asphalt Binder Treated with Various Types of Rejuvenators. *Civ. Eng. J.* 7, 502–517.

-Bilema, M. Aman, M.Y. Hassan, N.A. Memon, Z.A. Omar, H.A. Izzi, N. Yusoff, M. Milad, A. (2021). Mechanical Performance of Reclaimed Asphalt Pavement Modified with Waste Frying Oil and Crumb Rubber. *Materials*, 14, 2781.

-Bilema, M.A.M. Aman, M.Y. Ahmad, K.A. (2019). Investigating the rheological and physical properties for unaged of crumb rubber- modified binders

- Milad, A. Ali, A.S.B. Yusoff, N.I.M. (2020). A review of the utilisation of recycled waste material as an alternative modifier in asphalt mixtures. *Civ. Eng. J. (Iran)*, 6, 42–60.
- Mills-Beale, J. You, Z. (2010). The mechanical properties of asphalt mixtures with Recycled Concrete Aggregates. *Constr. Build. Mater.*
- Nordiana, M.; Nur Aifa, W.A.W. Hainin, M.R. Naquiuddin, M.W.M. Norhidayah, A.H. Haryati, Y. Juraidah, A. Ramadhansyah, P.J. (2018). Rutting resistance of untreated and treated waste cooking oil in bitumen after aging condition. In Proceedings of the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science; *IOP Publishing*: Kuantan, -Malaysia.
- Wen, H.;Bhusal, S. Wen, B. (2013). Laboratory evaluation of waste cooking oil-based bio asphalt as an alternative binder for hot mix asphalt. *J. Mater. Civ. Eng.*
- Hamim, A. Md Yusoff, N.I. (2013). The Use of Stabilisation Materials in Cold-in Place Recycling of Flexible Pavement. *J. Kejuruter. (J. Eng.)* 25, 1–9.
- Mills-Beale, J. You, Z. (2010).The mechanical properties of asphalt mixtures with Recycled Concrete Aggregates. *Constr. Build. Mater.*
- Milad, A. Ali, A.S.B. Yusoff, N.I.M. (2020). A review of the utilisation of recycled waste material as an alternative modifier in asphalt mixtures. *Civ. Eng. J. (Iran)*, 6, 42–60.
- Moreno, F. Sol, M. Martín, J. Pérez, M. Rubio, M.C. (2013). The effect of crumb rubber modifier on the resistance of asphalt mixes to plastic deformation. *Mater. Des.* 47, 274–280.
- Milad, A. Ahmeda, A.G.F. Taib, A.M.; Rahmad, S. Solla, M. Yusoff, N.I.M. (2020). A review of the feasibility of using crumb rubber derived from end-of-life tire as asphalt binder modifier. *J. Rubber Res.* 23, 203–216.

Evaluation of Physical and Rheological Properties of Reclaimed Asphalt Pavement Binder Containing Ground Tire Rubber and Waste Oil

Hamin Chobdar, Department of Civil Engineering, Malard Branch, Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.

Amin Farajollahi, Department of Civil Engineering, Malard Branch, Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.

Alireza Ameli, Department of Civil Engineering, Malard Branch, Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.

E-mail: ameli@gmail.com

Received: June 2023- Accepted: February 2024

ABSTRACT

Recycled asphalt pavement (RAP) has become a common practice in most countries. Hence, the use of rejuvenators along with RAP has become popular with asphalt producers, mainly due to rising raw material costs. In this study, crumb rubber (CR) 2 and waste frying oil (WFO) 3 were used to restore the properties and increase the rutting resistance of RAP. Several physical and rheological properties of bitumen were tested. The results showed that the RAP bitumen samples containing WFO and CR reduce the softening point and increase the degree of penetration. This is related to increasing penetration index. In addition, the viscosity of WFO/CR composite recycled bitumen showed better workability and hardness, as well as low storage stability temperature (less than 2.2 °C) with an acceptable decrease during heating. The rheological properties of WFO/CR with regenerated bitumen were comparable to the control sample. The incorporation of CR with WFO as a hybrid rejuvenator increased the rutting resistance. Therefore, the presence of WFO/CR has a significant effect on the properties of RAP bitumen, while creating a better environment and reducing environmental pollution by reusing waste materials.

Keywords: Mixture, Waste Oil, Rutting, Bitumen, Modified Binder