

بررسی خواص قیر و مخلوط آسفالت اصلاح شده با پلیمر SBS و خاکستر پوسته برنج

مقاله علمی - پژوهشی

سارا چوبدار*، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: sara_choubdar@civileng.iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۰ - پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۲۵

صفحه ۳۷۲-۳۵۷

چکیده

مصالح پایدار در زمینه روسازی راه‌ها در سال‌های اخیر به یک جهت تحقیقاتی تبدیل شده است. در این مطالعه، خاکستر پوسته برنج با درصد کمی از استایرن-بوتادین-استایرن^۱ (SBS) به عنوان یک افزودنی زیستی به آسفالت پایه اضافه شد تا خواص آن اصلاح شود. درصد‌های مختلف (۰، ۲، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد) خاکستر پوسته برنج^۲ (RHA) و ۱ درصد SBS برای تهیه قیر اصلاح شده انتخاب شد. نفوذ، نقطه نرم شدن، شکل‌پذیری، تست ویسکوزیته چرخشی و آزمون جاروب دما برای بررسی خواص اصلاح‌شده با SBS/RHA انجام شد. برای ارزیابی عملکرد مخلوط آسفالتی اصلاح شده با SBS/RHA از آزمون شیارگی، حساسیت به رطوبت و ترک خوردگی در دمای پایین استفاده شد. نتایج نشان داد که نفوذ کاهش یافت و نقطه نرمی و ویسکوزیته چرخشی افزایش یافت در حالی که شکل‌پذیری با ادغام خاکستر پوسته برنج اندکی کاهش یافت. مخلوط آسفالت اصلاح شده با SBS/RHA عملکرد بهتری در دمای بالا نسبت به مخلوط آسفالتی شاهد داشت، اما پایداری رطوبت کمی پایین‌تر و عملکرد دمای پایین‌تر بود. نسبت استحکام کششی مخلوط آسفالتی شاهد و اصلاح شده الزامات مشخصات را برآورده می‌کند. کرنش کششی مخلوط SR15 کمتر از نیاز مخلوط آسفالتی بر اساس مشخصات بود. برای قیر اصلاح شده با SBS/RHA بر اساس خواص جامع، درصد خاکستر پوسته برنج نباید بیشتر از ۱۵ درصد باشد.

واژه‌های کلیدی: پلیمر، شیارشدگی، قیر، خاکستر پوسته برنج، حساسیت رطوبتی

۱-مقدمه

شده توسط محصول جانبی، مواد زائد مانند پوسته ریک بازیافت مواد جاده را بهبود می‌بخشد، و بسیاری از محققان در جهان بر روی هدف استفاده از محصول جانبی به عنوان مواد بازیافتی و بازیافتی مواد روسازی در زمینه مهندسی تمرکز می‌کنند (Abdelmagid et al, 2019). ویتینگ و همکاران ساختار خاکستر پوسته برنج را از سطح نانو و ریز بررسی کرد، منشا فعالیت پوزولانی بالا و سطح ویژه را نشان داد، و دمای احتراق بهینه را برای RHA بسیار واکنش پذیر به دست آورد (xu et al, 2012). RHA برای جایگزینی نانو SiO2 به منظور افزایش عملکرد بتن ژئوپلیمری بازیافتی توسط Nuaklong et al, و همکاران استفاده شد (Nuaklong et al,

برنج منبع اصلی مصرف غذا در جهان است. هر ساله در مقادیر زیادی در سراسر جهان تولید می‌شود. چین بزرگترین تولید کننده برنج در جهان است و میانگین تولید سالانه برنج در چین حدود ۲۰۰ میلیون تن است. یک محصول جانبی به نام خاکستر پوسته برنج توسط آسیاب برنج تولید می‌شود. میانگین ضریب پوسته برنج حدود ۰،۱۸ است، به این معنی که حدود ۳۶ میلیون تن پوسته برنج را می‌توان از شالیزارها تولید کرد (Han et al, 2017). رایج‌ترین راه مقابله با پوسته برنج در کشورهای در حال توسعه سوزاندن یا ریختن در مزرعه است که باعث نگرانی زیادی از آلودگی محیط زیست می‌شود (Han et al, 2020). برای حل مشکلات اکولوژیکی تولید

آسفالت را نسبت می دهد (Mistry et al, 2019). رامدانسیاه و همکاران RHA را روی ذرات ریز با اندازه کمتر از ۷۵ میکرومتر آسیاب کرده و عملکرد مخلوط آسفالتی با محتویات مختلف RHA را با آزمون مارشال و تست چگالی ارزیابی کرد. بر اساس نتایج، RHA می تواند به طور رضایت بخشی به عنوان نوعی پرکننده برای افزایش عملکرد مخلوط آسفالتی استفاده شود (Jaya et al, 2018). تهامی و همکاران از دو نوع خاکستر زیست توده، RHA و خاکستر دانه خرما، به عنوان پرکننده برای جایگزینی پرکننده معمولی در مخلوط آسفالت داغ استفاده کرد و عملکرد مکانیکی مخلوط های آسفالتی را آزمایش کرد. نتایج نشان داد که در مقایسه با مخلوط آسفالت شاهد، مخلوط آسفالتی با RHA و خاکستر دانه خرما از پایداری و مدول سفتی بالاتری برخوردار بود (Romastarika et al, 2017). از تحقیقات قبلی در مورد RHA می توان نتیجه گرفت که RHA می تواند به عنوان نوعی پرکننده برای اصلاح مصالح راه و به عنوان یک نوع اصلاح کننده برای اصلاح آسفالت پایه استفاده شود. با این حال، بیشتر مطالعات روی RHA بر روی ویژگی های مرسوم قیر متمرکز شده اند و ارزیابی سیستماتیک تر در مورد عملکرد جامع بر روی پایبند و مخلوط آسفالت اصلاح شده به ندرت یافت می شود. علاوه بر این، بیشتر تحقیقات قبلی بین المللی هستند. هدف این تحقیق ارزیابی عملکرد جامع چسب و مخلوط آسفالت اصلاح شده با خاکستر SBS/پوسته برنج بر اساس مشخصات بین المللی در جهان است. هدف کلی این مطالعه بررسی خواص پلی استایرن-بوتادین-استایرن (SBS) و قیر و مخلوط آسفالت اصلاح شده با RHA بود. اهداف مشخص تر به شرح زیر بود: -برای بررسی اثر افزودن SBS/RHA بر خواص رئولوژیکی قیر. -برای ارزیابی عملکرد در دمای بالا و دمای پایین و حساسیت به رطوبت مخلوط آسفالت اصلاح شده با SBS/RHA.

۲- مواد و مصالح

۲-۱- قیر

در این تحقیق قیر ۶۰/۷۰ به عنوان قیر شاهد انتخاب شد. شاخص های فنی قیر شاهد در جدول ۱ نشان داده شده است.

2020). راتاناچو و همکاران خاکستر پوسته را به اندازه ۲۳۵ و از آن برای جایگزینی جزئی سیمان با وزن ۲۰ تا ۵۰ درصد برای ریخته گری سیمان استفاده کرد و عمق نفوذ کلرید و خوردگی فولاد را بررسی کرد (Rattanachu et al, 2020). حسین و همکاران از خاکستر پوسته برنج به عنوان جایگزینی برای منابع سیلیس برای تهیه دوغاب ریخته گری استفاده کرد و خواص نمونه های فوم مانند چگالی، تخلخل، هدایت حرارتی و مقاومت مکانیکی را بررسی کرد (Hossein et al, 2020). Holzschuh و همکاران RHA را در آلومینیوم مذاب وارد کرد و ترکیبات شیمیایی را با تجزیه و تحلیل چگالی، آزمایش نیروهای ضربه چارپی و سختی برینل تجزیه و تحلیل کرد (Holzschuh et al, 2020). زاهدی و همکاران ملات را با RHA تهیه کرد و اثر خاکستر پوسته برنج را بر نفوذپذیری کلرید، مقاومت فشاری و جذب مویرگی ملات های ترکیبی تک و دوتایی بررسی کرد (Zahedi et al, 2020) anh و Ludwig واکنش پذیری سیلیس قلیایی RHA در خمیر سیمان را با میکروسکوپ الکترونی روبشی و طیف سنجی اشعه ایکس ارزیابی کردند (anh et al, 2020). در زمینه روسازی آسفالت، خاکستر پوسته برنج نیز به عنوان نوعی پرکننده یا افزودنی برای بهبود خواص مواد آسفالتی وارد شد. برخی از مطالعات توسط محققان در این زمینه انجام شده است (Shatarat et al, 2018). عبدالمجید و همکاران RHA و پودر لاستیک خرد شده (CRP)^۳ را به قیر درجه بندی شده با نفوذ ۸۰/۶۰ برای تهیه قیر اصلاح شده اضافه کرد. نتیجه گرفت که افزودن RHA و CRP بر عملکرد قیر در دمای بالا تأثیر می گذارد (Abdelmagid et al, 2019). زاگوزدا و همکاران استفاده از خاکستر زیستی را خلاصه کرد و دیدگاهی پژوهشی از جنبه های مختلف برای مطالعه خاکستر زیستی در ساخت و ساز جاده ارائه کرد (Zagvozda et al, 2018). عاملی و همکاران خواص ماستیک و مخلوط آسفالت ماتریکس سنگ با RHA و خاکستر زباله زغال سنگ (CWA)^۴ را ارزیابی کرد. دریافتند که جایگزینی RHA با پرکننده معمولی، پایداری مارشال مخلوط های آسفالتی را بهبود می بخشد (Ameli et al, 2020). نتایج نشان داد که خواص رئولوژیکی آسفالت با ادغام RHA بهبود یافته است. میستری و همکاران از RHA و خاکستر بادی به عنوان جایگزین آهک هیدراته به عنوان پرکننده در مخلوط آسفالتی استفاده کرد و عملکرد مخلوط آسفالت را با RHA و خاکستر بادی آزمایش کرد. دریافتند که RHA تمایل بیشتری به آسفالت دارد که بیشترین تأثیر سفت شدن قطرات ماستیک

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی قیر

| نتایج | استاندارد | خصوصیات |
|-------|------------|-----------------------|
| ۴۸,۲ | ASTM D36 | نقطه نرمی |
| ۲۵,۵ | ASTM D113 | شکل پذیری در ۱۰ درجه |
| ۶۷,۳ | ASTM D5 | درجه نفوذ |
| ۱۹۸ | ASTM D4124 | ویسکوزیته در دمای ۶۰ |
| ۲,۸۳۱ | | ویسکوزیته در دمای ۱۳۵ |

جدول ۲. خصوصیات مصالح درشت دانه

| الزامات | ۳-۵ میلی متر | ۵-۱۰ میلی متر | ۱۰-۲۰ میلی متر | خصوصیات |
|---------|--------------|---------------|----------------|----------------------------|
| - | ۲/۶۸۸ | ۲/۶۵۷ | ۲/۶۲۴ | وزن مخصوص نسبی |
| ۰/۲ | ۰/۴ | ۰/۹ | ۰/۹ | جذب آب |
| ۰/۱ | ۰/۲ | ۰/۲ | ۰/۲ | درصد کمتر از ۰/۷۵ میلی متر |
| <۱۸ | - | - | ۲۲/۱ | درصد تطویل |
| <۲۸ | - | - | ۱/۲۲ | درصد شکستگی |

جدول ۳. مشخصات مصالح ریزدانه

| الزامات | نتایج | خصوصیت |
|---------|-------|---------------------------|
| | | مصالح ریزدانه |
| >۲,۵ | ۲,۶۲۱ | وزن مخصوص نسبی |
| ۶۰ < | ۷۰ | هم ارز ماسه ای |
| ۱۰ > | ۸,۵ | درصد مصالح ریزتر از ۰,۰۷۵ |
| | | فیلر |
| ۲,۵ < | ۲,۶۰۳ | وزن مخصوص نسبی |
| ۱ > | ۰,۷ | ضریب ابدوستی |
| ۱ > | ۰,۳۳ | درصد آب |
| ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۰,۶ میلی متر |
| ۱۰۰-۹۰ | ۹۴,۶ | ۰,۱۵ میلی متر |
| ۱۰۰-۷۵ | ۷۹,۲ | ۰,۰۷۵ میلی متر |

۲-۳- مصالح سنگی و فیلر

سنگدانه سنگ آهک و پرکننده نیز از سنگ آهک ساخته شده است. مشخصات فنی به ترتیب در جداول ۲ و ۳ نشان داده شده است.

۲-۲- افزودنی پلیمر SBS

پلی استایرن-بوتادین-استایرن (SBS) ساختار خطی ۱-۱۳۰۱ بود. وزن مولکولی نسبی بزرگتر از ۱۰۰۰۰، چگالی در ۲۵ درجه سانتی گراد ۰,۸ ~ ۳۱,۰ g·cm⁻³ بود، و ویسکوزیته در ۱۶۰ °C ۱۰۰۰۰~۵۰۰ Pa·s بود.

۲-۴- تهیه خاکستر پوسته برنج

در این مطالعه، RHA از پوسته برنج غنی با احتراق در یک کوره صدا خفه کن به دست آمد. پوسته برنج برای سوزاندن در ۷۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲ ساعت در کوره صدا خفه کن قرار داده شد. پس از سوزاندن، RHA مستقیماً از کوره گرفته شد و در سینی پراکنده شد تا در دمای اتاق خنک شود. RHA سرد شده به مدت ۱۵ دقیقه در آسیاب گلوله‌ای مربعی شکل مرطوب آسیاب شد و خاکستر پوسته برنج فعال بالا بدست آمد. RHA مورد استفاده در این مطالعه سپس توسط الک با اندازه دهانه ۰,۰۷۵ میلی متر الک شد. سطح ویژه ۰,۶۱ m²/g و محتوای سیلیس فعال ۸۸,۳٪ بود.

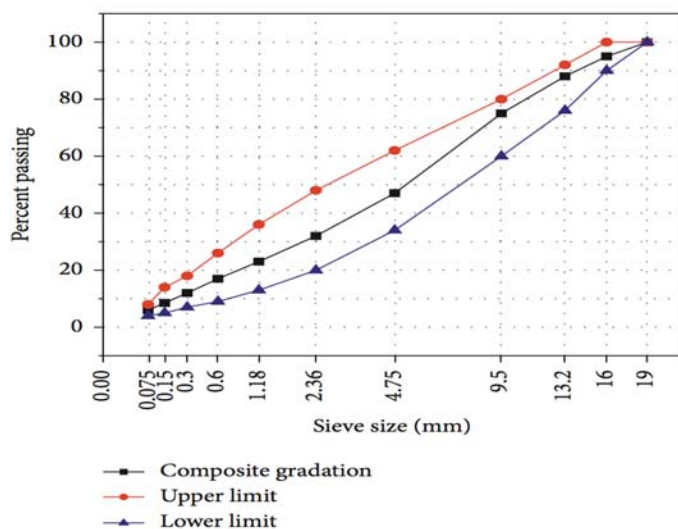
یک همزن برشی با سرعت بالا با سرعت چرخش ۳۰۰۰ دور در دقیقه در ۱۸۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱۵ دقیقه مخلوط شد. خاکستر پوسته برنج با فعال بالا آماده شده به قیر اصلاح شده با SBS اضافه شد و آنها در دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱۰ دقیقه توسط میکسر برشی با سرعت چرخشی ۵۰۰۰ دور در دقیقه مخلوط شدند. قیر مخلوط آسفالت به مدت ۱ ساعت در فر با دمای ۱۳۵ درجه سانتیگراد قرار داده شد. با توجه به قیمت SBS، غلظت کم، ۱٪ وزن کل قیر، در این مطالعه انتخاب شد. محتوای خاکستر پوسته برنج ۰٪، ۲٪، ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ از کل قیر بر اساس وزن بود. قیر اصلاح شده با SBS/RHA به ترتیب به عنوان SR0، SR2، SR5، SR10 و SR15 نشان داده شد.

۲-۵- آماده سازی قیر اصلاح شده با SBS/RHA

آماده سازی قیر اصلاح شده با SBS/RHA و پارامترهای آماده سازی بر اساس مطالعات قبلی (Kang et al, 2019) تعیین شد و به دو بخش تقسیم شد: آماده سازی قیر اصلاح شده با SBS و اصلاح شده با SBS/RHA. برای ایجاد سازگاری بهتر، قیر خالص تا ۱۸۰ درجه سانتیگراد گرم شد و SBS به قیر خالص قابل روان اضافه شد و توسط

۲-۶- دانه بندی برای مخلوط آسفالت و درصد قیر بهینه

برای تهیه مخلوط آسفالتی و ارزیابی عملکرد جامع مخلوط آسفالتی، AC-16 انتخاب شد و دانه بندی سنگدانه در شکل ۱ نشان داده شده است. درصد بهینه قیر با آزمون مارشال و ۴,۴ درصد تعیین شد.



شکل ۱. دانه بندی مصالح سنگی

۳- روش آزمایشگاهی

۳-۱- آزمایشات قیر

و پیرشده^۰ (RTFO) بر اساس آزمایش‌های مختلف پیر شد. تست ویسکوزیته چرخشی با استفاده از ویسکومتر چرخشی بروکفیلد انجام شد، دماهای تست ۹۰، ۱۳۵، ۱۵۰ و ۱۷۵ درجه سانتیگراد و سرعت‌های چرخشی ۱۰، ۲۰ و ۵۰ دور در دقیقه

آزمایش‌های قیر شامل آزمایش‌های قیر معمولی، آزمایش ویسکوزیته چرخشی و آزمایش جارو دما است. تست‌های مرسوم، نفوذ، نقطه نرم شدن و شکل‌پذیری بر اساس روش‌های تست استاندارد قیر و مخلوط‌های قیری انجام شد. قیر پیر نشده

خالص دارد. در این میان، زمانی که میزان خاکستر پسته برنج از صفر به ۵ درصد افزایش یافت، میزان نفوذ کمی کاهش یافت و زمانی که میزان آن ۱۰ و ۱۵ درصد بود، میزان نفوذ کاهش یافت. به عنوان مثال، نفوذ قیر 0.1 (SR0 70.3 میلی متر)، نفوذ SR5 و SR15 به ترتیب ۶۸،۲ (۰،۱ میلی متر) و ۵۸،۶ (۰،۱ میلی متر) و کاهش SR5 و SR15 2.9 درصد و ۱۶،۶ درصد در مقایسه با SR0. زمانی که SBS/RHA اضافه شد، برای پیرشده RTFO، همان قانون را نشان دادند ناشی از پراکنندگی خاکستر پسته برنج در قیر و اختلاط فیزیکی بین خاکستر پسته برنج و قیر باشد.

دمای تعیین شده توسط نقطه نرمی، تغییر فاز را برای قیر نشان می‌دهد. شکل ۳ نقطه نرمی قیر بدون پیری و RTFO و قیر اصلاح شده با SBS/RHA را نشان می‌دهد. برای قیرهای پیر نشده و با سن RTFO، اختلاط SBS/RHA نقطه نرمی قیر خالص را افزایش داد. به عنوان مثال، در مقایسه با SR0، نقطه نرمی قیرهای اصلاح شده با SR2، SBS/RHA SR5، SR10 و SR15 به ترتیب ۴،۷، ۶،۰، ۸،۳ و ۹،۳ درصد افزایش یافت. به این معنی است که توانایی قیرهای اصلاح شده برای تغییر شکل در شرایط دمای بالا بهبود یافته است. با یافته‌های آزمون نفوذ همخوانی داشت. شکل پذیری قیر خالص بدون پیری و RTFO و قیر اصلاح شده با SBS/RHA در شکل ۴ توضیح داده شده است. نشان داده شده است که شکل پذیری قیر اصلاح شده بدون پیری با درصد RHA از ۲٪ اندکی کاهش یافته است.

به ۱۰٪ و هنگامی که درصد RHA 15% بود به طور چشمگیری کاهش یافت. کاهش شکل پذیری SR5 و SR15 در مقایسه با قیر خالص 1.6% SR0 و ۲۲،۴٪ بود. برای قیر با پیرشدگی RTFO، آنها همان قانون را با ادغام SBS/RHA نشان دادند. علاوه بر این، نسبت‌های شکل‌پذیری باقی‌مانده SR0، SR2، SR5، SR10 و SR15 به ترتیب ۳۲،۲، ۳۲،۴، ۳۱،۸، ۳۱،۹، ۲۹،۳ درصد بود. نشان داده شده است که پیری RTFO با افزودن خاکستر پسته برنج تقریباً هیچ تأثیری بر قیر پایه نداشت. علاوه بر این، معیارهای شکل‌پذیری در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد برای نمونه پیر نشده و RTFO-سال حداقل ۱۰ سانتی‌متر و ۴ سانتی‌متر است و شکل‌پذیری قیرهای اصلاح‌شده با SBS/RHA می‌تواند معیارها را برآورده کند. شکل ۵ کاهش جرم قیرهای اصلاح شده با SBS/RHA را از

بود. تست‌های جارو دمایی قیر اصلاح‌شده با SBS با محتوای ۲٪، ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ خاکستر پسته برنج انجام شد. قیر اصلاح شده با SBS/RHA بدون پیری و RTFO پیرشده بود. برای قیر پیر نشده، کرنش کنترل شده ۱۲ درصد بود در حالی که برای قیر پیرشده با RTFO 10 درصد بود. قطر فیکسچر نمونه برای قیر پیر نشده و RTFO ۲۵ میلی‌متر بود و فاصله بین فیکسچر نمونه بالایی و فیکسچر پایینی ۱ میلی‌متر بود. برای جاروی دما در این مطالعه، دماهای آزمایش ۵۲، ۵۸، ۶۴، ۷۰، ۷۶ و ۸۲ درجه سانتیگراد بودند. فرکانس آزمایش ۱۰ راد بر ثانیه (یعنی ۱،۵۹ هرتز) بود. مدول پیچیده G^* ، زاویه فاز δ و فاکتورهای شیارش $G^*/\sin\delta$ از قیر اصلاح شده SBS/RHA به دست آمد و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

۳-۲- آزمایش عملکرد مخلوط مخلوط آسفالتی

خصوصیات در دمای بالا در این مطالعه با آزمون شیارشدگی مورد ارزیابی قرار گرفت. نمونه‌های دال برای استفاده از چرخ در محفظه قرار داده شد. دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد بود. عملکرد مخلوط آسفالتی در دمای پایین در این مطالعه با آزمایش تیر خمشی در دمای پایین مورد بررسی قرار گرفت. اندازه تیر خمشی ۲۵۰ میلی‌متر \times ۳۰ میلی‌متر \times ۳۵ میلی‌متر بود. دمای آزمایش 10 ± 0.5 درجه سانتی‌گراد است. حداکثر کرنش کششی خمشی، استحکام کششی خمشی و مدول سفتی خمشی برای ارزیابی مقاومت ترک در دمای پایین مخلوط آسفالتی تعیین شد. حساسیت به رطوبت مخلوط در این مطالعه توسط آزمون تقسیم انجماد- ذوب انجام شد.

۴- بحث

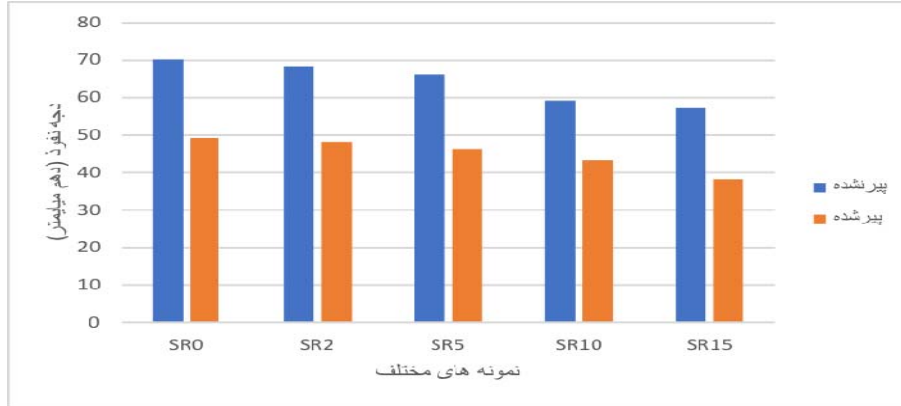
۴-۱- خصوصیات قیر اصلاح شده با SBS/RHA

۴-۱-۱- خصوصیات فیزیکی قیر

آزمایش‌های مرسوم، نفوذ، نقطه نرمی، شکل‌پذیری و کاهش جرم انجام شد. برای تست‌های نفوذ، نقطه نرمی، شکل‌پذیری، قیر که در این آزمایش‌ها استفاده شد، قیر پیر نشده و پیرشده RTFO بود. تست نفوذ، قوام قیر روسازی را اندازه‌گیری می‌کند. نتایج نفوذ قیر در شکل ۲ نشان داده شده است. برای قیرهای پیر نشده، می‌توان دریافت که افزودن SBS/RHA ارزش نفوذ قیر خالص را کاهش داد. نشان داده شده است که قیر اصلاح شده قوام سخت‌تری نسبت به قیر

با افزودن خاکستر پوسته برنج روند افزایشی داشت، از دست دادن جرم تمام قیرهای اصلاح شده، نیاز ارزش مشخصات را برآورده می‌کرد که بیش از ۰٫۸- نیست.

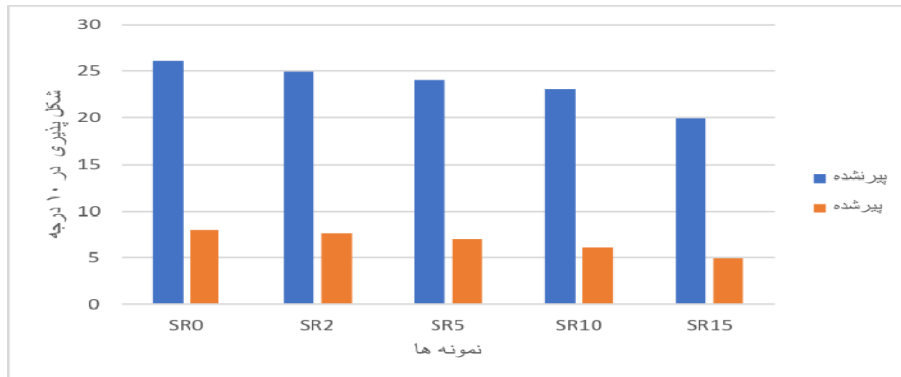
طریق پیری RTFO نشان می‌دهد. از دست دادن جرم SR0، SR5، SR10، SR15 به ترتیب ۰/۲۷۶-، ۰/۲۷۶-، ۰/۳۰۹- و ۰/۳۲۱-٪ بود. اگرچه ارزش تلفات جرم



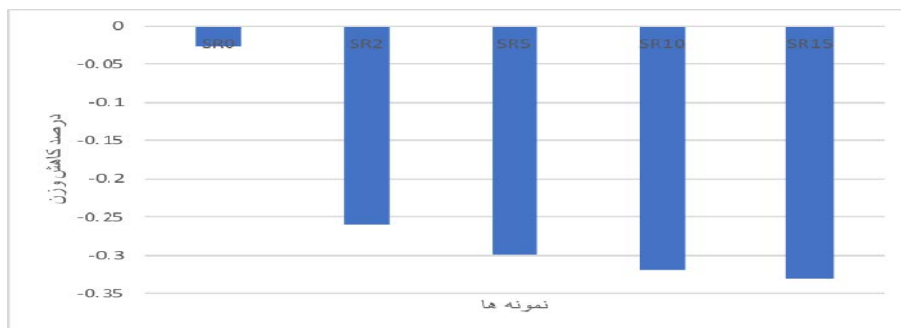
شکل ۲. نتایج درجه نفوذ قیر



شکل ۳. نقطه نرمی نمونه‌ها



شکل ۴. شکل پذیری در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد

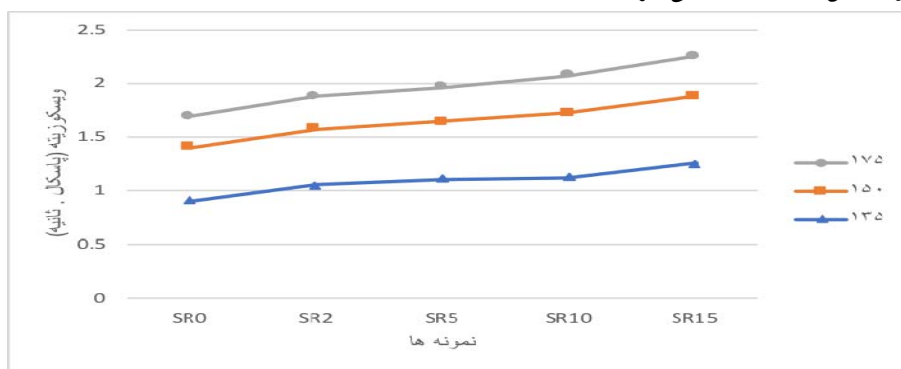


شکل ۵. درصد کاهش وزن

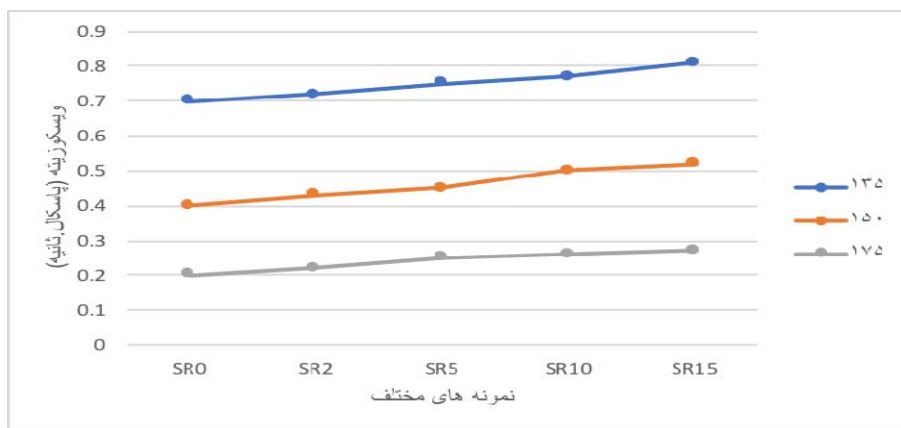
۴-۲-۱- ویسکوزیته قیر

سانتی‌گراد $0.298 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ بود. در عین حال، ادغام SBS/RHA ویسکوزیته قیر پایه را افزایش داد، و ویسکوزیته با افزایش محتوای RHA بدون توجه به سرعت چرخش افزایش یافت. نشان داده شده است که افزودن RHA قیر خالص را سخت کرده است. ویسکوزیته را با سرعت چرخش ۲۰ دور در دقیقه در ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد به عنوان مثال در نظر بگیرید. افزایش ویسکوزیته SR5، SR2، SR10 و SR15 به ترتیب ۱، ۱، ۱، ۳، ۹، ۷، ۴ درصد و ۲۰، ۸ درصد بود. شکل ۷ ویسکوزیته SR0 و قیر اصلاح شده با SBS/RHA را در سرعت‌های چرخشی مختلف در ۹۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. شکل ۷ نشان می‌دهد که ویسکوزیته قیرهای مختلف آسفالت در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد نیز با افزایش محتوای خاکستر پسته برنج افزایش می‌یابد. در همین حال، افزایش سرعت چرخش به کاهش ویسکوزیته کمک کرد. نشان داده شده است که تمام قیر اصلاح شده با SBS/RHA ویژگی یک سیال غیر نیوتنی را نشان می‌دهد که با مطالعه قبلی مطابقت دارد.

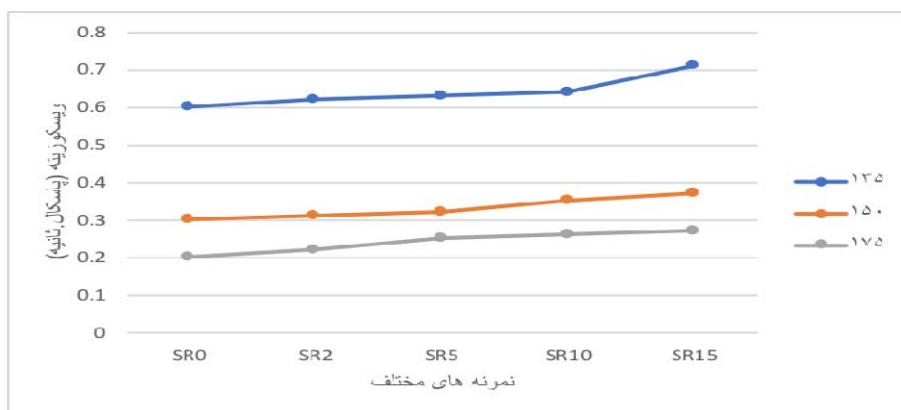
چسب آسفالت دارای ویسکوزیته است. ویسکوزیته به توانایی آسفالت در مقاومت در برابر تغییر شکل تحت تأثیر نیروهای خارجی اشاره دارد. یک مشخصه جریان داخلی آسفالت را منعکس می‌کند تا از جریان نسبی آن جلوگیری کند. ویسکوزیته آسفالت SR0 و قیر اصلاح شده با SBS/RHA در سرعت‌های چرخشی مختلف (۱۰، ۲۰ و ۵۰ دور در دقیقه) و دماهای مختلف (۱۳۵، ۱۵۰ و ۱۷۵ درجه سانتی‌گراد) در شکل ۶ ارائه شده است. شکل‌های ۶(c)-6(a) نشان می‌دهند که ویسکوزیته تمامی قیرهای اصلاح شده در دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد کمتر از $3,00 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ بود که بر اساس مشخصات مورد نیاز است. ویسکوزیته قیرهای با افزایش دمای آزمایش کاهش یافت و مقدار کاهشی ویسکوزیته بین ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و ۱۷۵ درجه سانتی‌گراد بیشتر از بین ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد و ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد بود. به عنوان مثال، در ۲۰ دور در دقیقه، تغییر ویسکوزیته بین ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و ۱۷۵ درجه سانتی‌گراد $0,220 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ بود، در حالی که تغییر ویسکوزیته بین ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد و ۱۵۰ درجه



(الف)

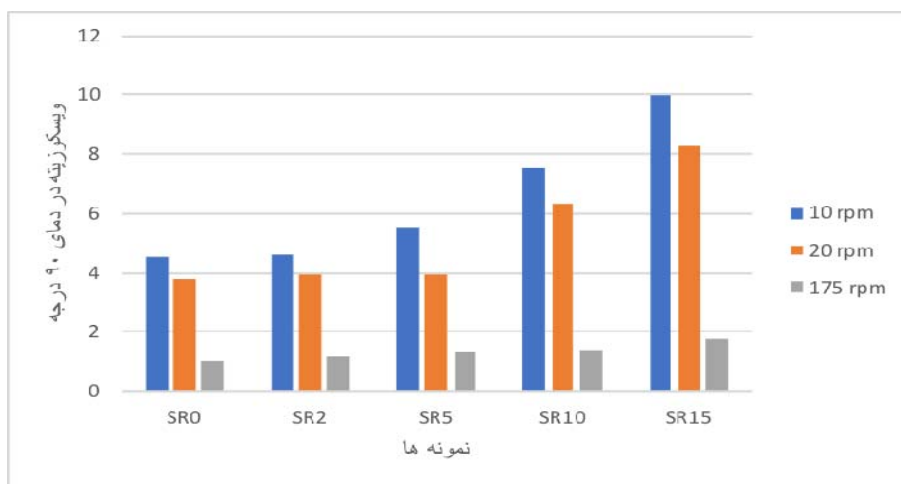


(ب)



(ج)

شکل ۶. ویسکوزیته قیرهای مختلف الف) ۱۰ دور در دقیقه



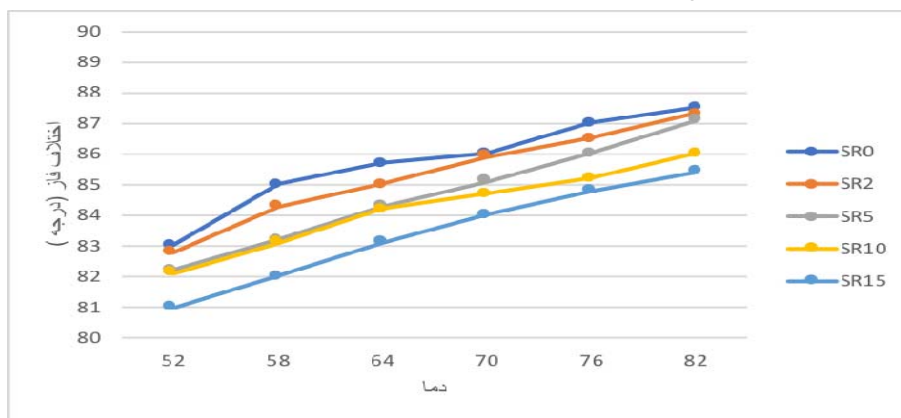
شکل ۷. ویسکوزیته قیرهای مختلف در سرعت‌های مختلف در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد

۴-۳-۱- آزمایش جاروب دما

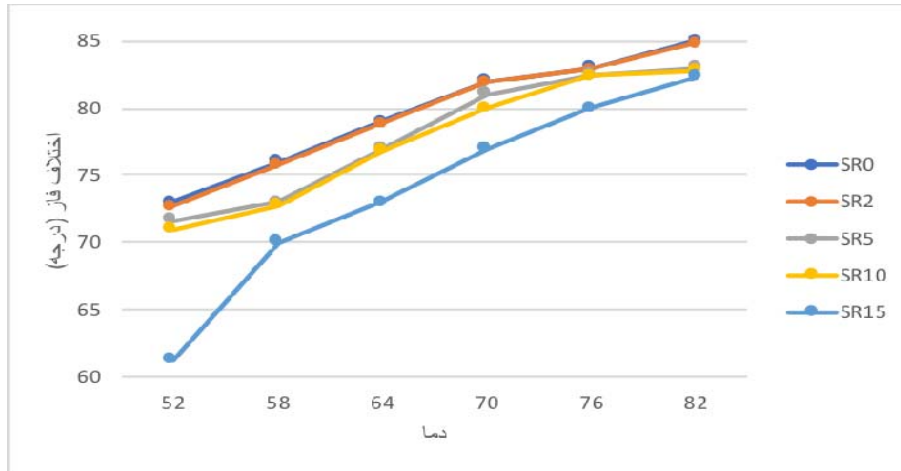
برای بررسی خواص ویسکوالاستیک و ارزیابی عملکرد ضد خراشیدگی قیر، آزمون جارو دما توسط DSR^1 انجام شد. زوایای فاز چسبنده آسفالت بکر بدون پیری و RTFO و قیرهای اصلاح شده با SBS/RHA در شکل ۸ ارائه شده است. همانطور که در شکل ۸ (الف) نشان داده شده است، برای قیر پیر نشده، زاویه فاز با افزایش دمای آزمایش افزایش می‌یابد. به این معنی است که دمای بالاتر منجر به کاهش بخش الاستیک در قیر می‌شود. در همین حال، RHA نیز به کاهش زاویه فاز کمک کرد. هنگامی که دما ۶۴ درجه سانتی‌گراد بود، زوایای فاز SR5، SR2، SR10 و SR15 به ترتیب ۸۴،۳۶ درجه، ۸۴،۳۶ درجه، ۸۴،۱۵ درجه و ۸۳،۳۶ درجه بود که به ترتیب ۰،۸٪، ۱،۵٪، ۱،۷٪ و ۲،۶٪ کاهش یافت. از شکل ۸ (ب) می‌توان دریافت که برای قیر پیر شده RTFO، تغییر زاویه فاز با تغییر دما و محتوای خاکستر پسته برنج روند مشابهی را نشان می‌دهد. در شکل‌های ۸(a) و ۸(b)، زاویه فاز SR15 کمترین مقدار بود، به این معنی که محتوای ۱۵٪ خاکستر پسته برنج، قیر را سخت‌تر از سایر قیرهای اصلاح شده در این مطالعه می‌کند. ضریب شیارشدگی شاخصی برای ارزیابی عملکرد ضد شیار شدن قیر است. ضریب شیارشدگی بالاتر عملکرد بهتر ضد شیار شدن را نشان می‌دهد. شکل ۹ فاکتورهای شیارشدن قیرهای اصلاح شده با SBS/RHA را نشان می‌دهد. از شکل ۹ (الف) می‌توان دریافت که ضریب شیار با افزایش دما کاهش می‌یابد و هنگامی که دمای آزمایش بالاتر از ۶۴ درجه سانتی‌گراد بود، روند کاهشی کند شد. این نشان داد که توانایی قیر برای مقاومت در

برابر شیار شدن به طور چشمگیری از ۵۲ درجه سانتی‌گراد به ۶۴ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته و زمانی که دما بالاتر از ۶۴ درجه سانتی‌گراد بود کندتر کاهش می‌یابد. در همین حال، با افزودن RHA و SBS، فاکتور شیارشدگی اندکی بهبود یافت. هر چه مقدار خاکستر پسته برنج بیشتر باشد، ضریب شیارشدگی آن بیشتر است. به عنوان مثال، زمانی که دما ۶۴ درجه سانتی‌گراد بود، فاکتورهای شیاردار SR10 و SR15 $2.671kPa$ و $3.453kPa$ بود و نسبت به SR0 به ۱۲،۹٪ و ۴۶،۰٪ افزایش یافت. شکل ۹(b) نشان می‌دهد که تغییر ضریب شیار شدن قیر با پیرشدگی RTFO اصلاح شده توسط SBS/RHA با تغییر دما و محتوای خاکستر پسته برنج در مقایسه با قیر اصلاح شده پیر نشده است. نشان داده شده است که افزودن SBS/RHA عملکرد قیر پایه را در دمای بالا افزایش می‌دهد.

برای تجزیه و تحلیل بیشتر اثر دمای آزمایش بر ضریب شیارشدگی آسفالت اصلاح شده با SBS/RHA، یک تحلیل واریانس تک عاملی انجام شد. نتایج در جدول ۴ نشان داده شده است. از جدول، سطح معنی داری قیر پیر نشده و RTFO کهنه شده اصلاح شده توسط SBS/RHA زیر ۰،۰۵ بود. این نشان داد که دمای آزمایش می‌تواند به طور قابل توجهی بر فاکتور شیارشدن در دمای بالا قیر اصلاح شده با SBS/RHA تأثیر بگذارد. مقدار $e F$ برای قیر RTFO کهنه شده بالاتر از غیر قدیمی بود، بنابراین دمای آزمایش تأثیر بیشتری بر ضریب شیار شدن قیر اصلاح شده با SBS/RHA داشت.



(الف)

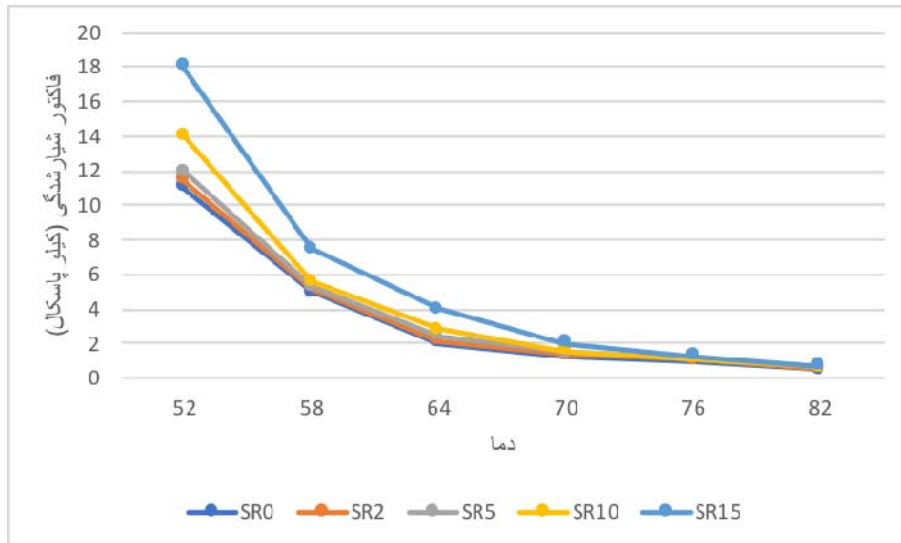


(ب)

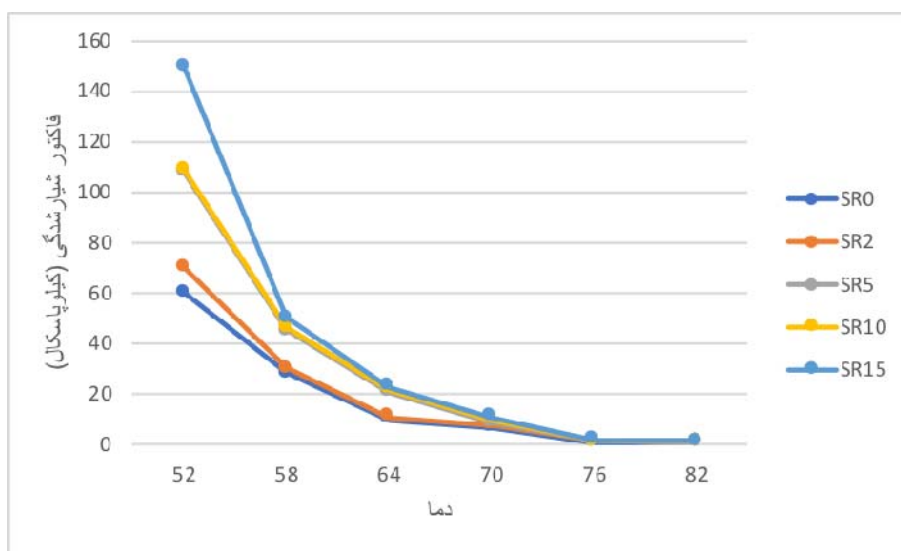
شکل ۸. اختلاف فاز : الف) قیر پیرنشده ب) قیر پیرشده

جدول ۴: آنالیز تک عاملی تاثیر دما بر فاکتور شیارشدگی

| Asphalt aged | Item | Sum of squares | df | Mean square | F | Sig |
|--------------|----------------|----------------|----|-------------|-----------|-------|
| Asphalt aged | Between groups | 298.031 | 5 | 59.396 | 48989.897 | 0.002 |
| | Within groups | 0.014 | 12 | 0.001 | - | - |
| The unaged | Total | 298.034 | 17 | - | - | - |
| | Between groups | 2397.324 | 5 | 4895.795 | 1099924 | 0 |
| RTFO aged | Within groups | 0.42 | 12 | 0.039 | - | - |
| | Total | 23971.764 | 17 | - | - | - |



(الف)



(ب)

شکل ۹. فاکتور شیار شدگی: الف) پیرنشد. ب) پیرشده

۲-۴- بررسی خصوصیات عملکردی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با SBS/RHA

۱-۲-۴- خصوصیات عملکردی دمای بالا

تست شیار شدگی عمق شیارهای ایجاد شده بر روی سطح نمونه آزمایشی را تحت عمل مکرر چرخ اندازه گیری می‌کند. عمق شیار برای ارزیابی عملکرد دمای بالا مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۱۰ عمق شیار مخلوط آسفالتی شاهد و اصلاح شده با SBS/RHA نشان می‌دهد. ترکیب SBS/RHA عمق شیار را کاهش داد. هنگامی که محتوای RHA از ۵٪ به ۱۵٪ افزایش یافت، پایداری دینامیکی به طور چشمگیری در مقایسه با مخلوط SR0 افزایش یافت. به عنوان مثال، افزایش پایداری دینامیکی مخلوط SR10 و SR15 به ترتیب ۲۴،۲۳٪ و ۳۴،۸۴٪ در مقایسه با مخلوط آسفالتی شاهد SR0 بود. عمق شیار همان قانون را با ادغام RHA نشان داد. نشان داده شده است که ترکیب خاکستر پسته برنج می‌تواند مقاومت مخلوط‌های آسفالتی را افزایش دهد. مخلوط آسفالت اصلاح شده عملکرد دمای بالایی داشت.

در شکل ۱۱ نشان داده شده است. روند نزولی دو منحنی با افزایش خاکستر پسته برنج ارائه شد که نشان داد عملکرد دمای پایین کمی با افزودن SBS/RHA کاهش یافت. در حالی که وقتی مقدار RHA بالاتر از ۲ درصد بود، حداکثر کرنش کششی بیشتر از مخلوط آسفالتی شاهد کاهش یافت. نتایج به دست آمده از آزمایش تیر خمشی در دمای پایین با نتایج به دست آمده از آزمایش شکل پذیری در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد سازگار بود. با این حال، کرنش کششی مخلوط $1948.33 \mu\epsilon$ SR15 بود که کمتر از نیاز (نه کمتر از $2000 \mu\epsilon$) برای مخلوط‌های آسفالتی بر اساس مشخصات بود. ما، درصد خاکستر پسته برنج نباید بیشتر از ۱۵٪ باشد.

۲-۴- حساسیت رطوبتی

حساسیت به رطوبت مخلوط آسفالتی توانایی مقاومت در برابر لایه برداری و شل شدن لایه آسفالتی در اثر فرسایش آبی است. شکل ۱۲ استحکام شکافتگی قبل و بعد از انجماد - ذوب و نسبت استحکام کششی (TSR)^۷ مخلوط آسفالت بکر و مخلوط آسفالت اصلاح شده با SBS/RHA را نشان می‌دهد. استحکام شکافت قبل از انجماد و ذوب مخلوط آسفالت اصلاح شده با SBS/RHA با افزایش محتوای

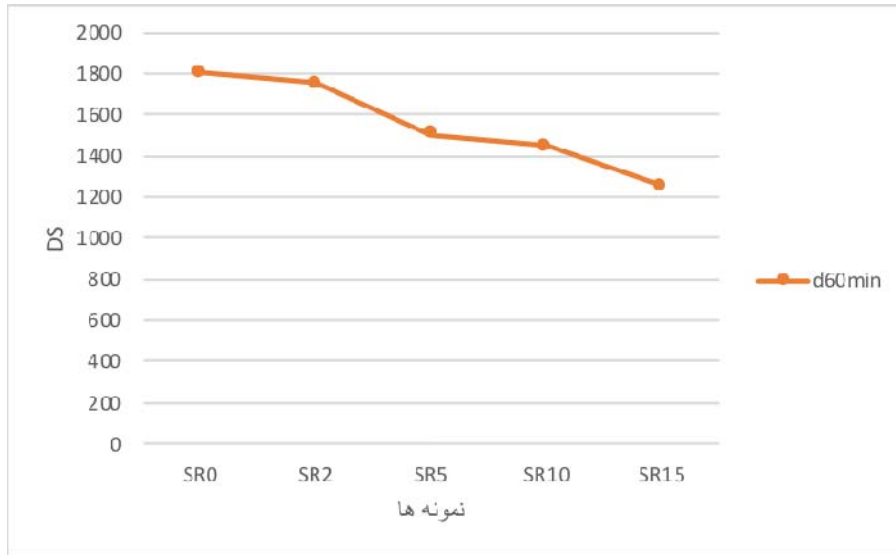
۲-۲-۴- مقاومت ترک خوردگی دمای پایین

حداکثر کرنش کششی و استحکام کششی در این مطالعه برای ارزیابی مقاومت به ترک عملکرد در دمای پایین مورد آزمایش و محاسبه قرار گرفت. حداکثر کرنش کششی و استحکام کششی مخلوط‌های آسفالتی شاهد و اصلاح شده با

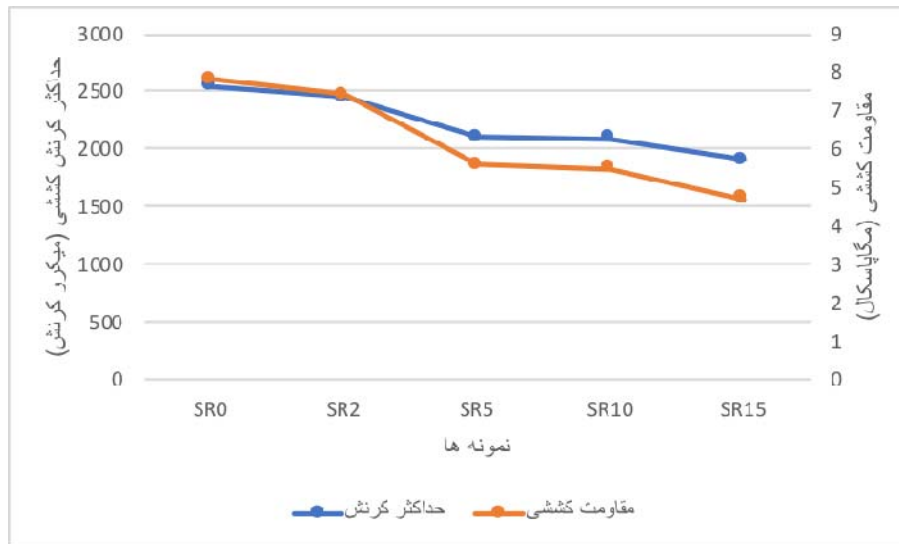
۳۶۷

پایداری رطوبت کمی کاهش یافته است. با این حال، نسبت استحکام کششی مخلوط آسفالت بکر و مخلوط آسفالت اصلاح شده الزامات مشخصات را برآورده می‌کند که نباید کمتر از ۷۵٪ باشد.

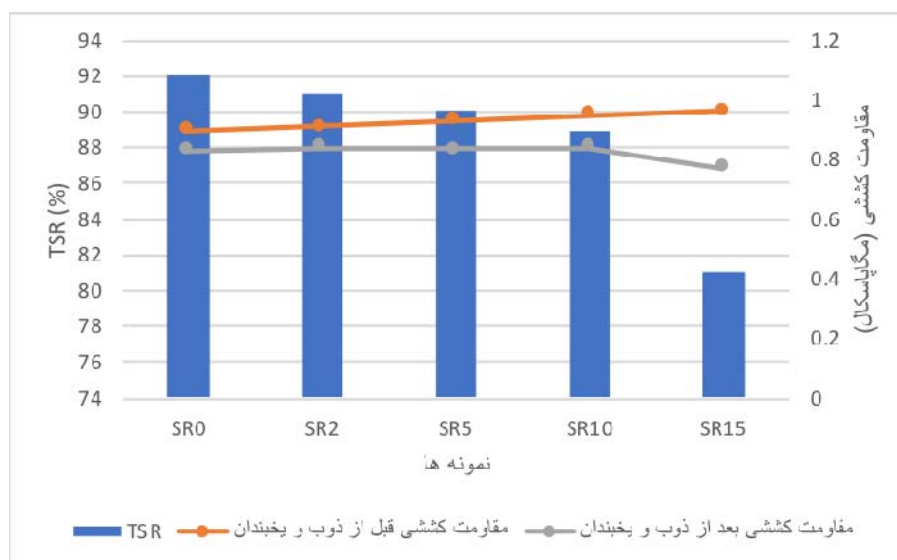
خاکستر پوسته برنج کمی افزایش یافت. استحکام شکافتن مخلوط SR15 پس از انجماد و ذوب به طور قابل توجهی کاهش یافت و این ممکن است به دلیل این واقعیت باشد که محتوای ۱۵ درصد خاکستر پوسته برنج سفتی قیر را بیش از سایر محتویات افزایش داده است. نسبت استحکام کششی با افزودن خاکستر پوسته برنج اندکی کاهش یافت، که نشان داد



شکل ۱۰. عمق شیار مخلوط های مختلف



شکل ۱۱. حداکثر کرنش کششی و مقاومت کششی نمونه ها



شکل ۱۲. نتایج آزمایش ذوب و یخبندان

۵- نتیجه گیری

قیرهای اصلاح شده با SBS/RHA ویژگی یک سیال غیر نیوتنی را نشان دادند. (۳) برای قیرهای اصلاح شده با SBS/RHA با سن اولیه و RTFO، زاویه فاز با افزایش دمای آزمایش افزایش می‌یابد و RHA به کاهش زاویه فاز کمک می‌کند. ضریب شیار شدگی با افزایش دما کاهش یافت و هنگامی که دمای آزمایش بالاتر از ۶۴ درجه سانتی‌گراد بود، روند کاهش می‌کند شد. با افزودن خاکستر پوسته برنج و SBS، فاکتور شیارشدن اندکی بهبود یافت. (۴) ادغام SBS/RHA عمق شیار را کاهش داد، که به این معنی بود که عملکرد دمای بالا مخلوط با ادغام SBS/RHA بهبود یافت. افزودن SBS/RHA کمی پایداری رطوبت و عملکرد دمای پایین را کاهش داد. کرنش کششی مخلوط SR15 کمتر از نیاز مخلوط آسفالتی بر اساس مشخصات بود. نسبت استحکام کششی (TSR) مخلوط آسفالتی شاهد و اصلاح شده می‌تواند نیاز مشخصات را برآورده کند. برای قیر اصلاح شده با SBS/RHA بر اساس خواص جامع، درصد خاکستر پوسته برنج نباید بیشتر از ۱۵ درصد باشد.

این تحقیق خواص قیر اصلاح شده با SBS/RHA را با آزمایش قیر معمولی، تست ویسکوزیته چرخشی و تست جارو دما بررسی کرد و عملکرد مخلوط آسفالت اصلاح شده با SBS/RHA را با شیار شدن، حساسیت به رطوبت و ترک خوردن دمای پایین ارزیابی کرد. نتایج اصلی به شرح زیر بدست آمد. (۱) افزودن SBS/RHA ارزش نفوذ و شکل پذیری قیر شاهد را کاهش داد و نقطه نرمی قیر پایه را افزایش داد. زمانی که میزان خاکستر پوسته برنج از ۰ تا ۵ درصد افزایش یافت، میزان نفوذ کمی کاهش یافت و زمانی که میزان آن ۱۰ و ۱۵ درصد بود، نفوذ کاهش بیشتری یافت. شکل پذیری قیر اصلاح شده پیر نشده با محتوای RHA از ۲٪ به ۱۰٪ کاهش یافت و زمانی که محتوای RHA ۱۵٪ بود به طور چشمگیری کاهش یافت. از دست دادن جرم تمام قیرهای اصلاح شده می‌تواند نیاز ارزش مشخصات را برآورده کند. (۲) ویسکوزیته قیر با افزایش دمای آزمایش کاهش یافت. ادغام SBS/RHA ویسکوزیته قیر را افزایش داد و ویسکوزیته با افزایش درصد خاکستر پوسته برنج افزایش یافت. تمام

۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Styrene Butadine Styrene
- 2- Rice Husk Ash
- 3- Crumb Rubber Powder

- 4- Coal Waste Ash
- 5- Rolling Thin Film Oven
- 6- Dynamic Shear Rheometer
- 7- Tensile Strength Ratio

۷- مراجع

- Kang. Z., (2019). Study on the Effect of Rice Husk Ash on the Performance of Asphalt and Asphalt Mixture, 56, Department of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, China.
- Mistry. R., S. Karmakar, and T. Kumar Roy (2019). Experimental evaluation of rice husk ash and fly ash as alternative fillers in hot-mix asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 20, No. 4, 979–990.
- Nuaklong. P., P. Jongvivatsakul, T. Pothisiri, V. Sata, and P. Chindaprasirt, (2020). Influence of rice husk ash on mechanical properties and fire resistance of recycled aggregate high-calcium fly ash geopolymer concrete. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 252.
- Rattanachu. P., P. Toolkasikorn, W. Tangchirapat, P. Chindaprasirt, and C. Jaturapitakkul (2020). Performance of recycled aggregate concrete with rice husk ash as cement binder. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 108.
- Romastarika. R., R. P. Jaya, H. Yaacob, F. M. Nazri, I. Agussabti, and D. S. Jayanti (2017). Effect of black rice husk ash on the physical and rheological properties of bitumen. in *Proceedings of the International Conference on Applied Physics and Engineering 2017*, Shanghai, China, November.
- Shatarat. N.K., H.N. Katkhuda, K.H. Hyari, and I. Asi, (2018). Effect of using recycled coarse aggregate and recycled asphalt pavement on the properties of pervious concrete. *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 67, No. 3, 283–290.
- Shadmani. A., B. Tahmouresi, A. Saradar, and E. Mohseni (2018). Durability and microstructure properties of SBR-modified concrete containing recycled asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, Vol. 185, 380–390.
- Suksiripattanapong. C., T. A. Kua, A. Arulrajah, F. Maghool, and S. Horpibulsuk (2017). Strength and microstructure properties of spent coffee grounds stabilized with rice husk ash and slag geopolymers.
- Abdelmagid. A. A. A. and C. P. Feng (2019). Evaluating the effect of rice-husk ash and crumb-rubber powder on the high-temperature performance of asphalt binder. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 31, No. 12.
- Anh. L. H. and H.-M. Ludwig (2020). Alkali silica reactivity of rice husk ash in cement paste, *Construction and Building Materials*, Vol. 243, Article ID 118145.
- Ameli. A., R. Babagoli, N. Norouzi, F. Jalali, and F. P. Mamaghani (2020). Laboratory evaluation of the effect of coal waste ash (CWA) and rice husk ash (RHA) on performance of asphalt mastics and Stone matrix asphalt (SMA) mixture. *Construction and Building Materials*, Vol. 236.
- Gomes. C. M., A.-L. Garry, E. Freitas, C. Bertoldo, and G. Siqueira (2020). Effects of rice husk silica on microstructure and mechanical properties of magnesium-oxychloride fiber cement (MOFC). *Construction and Building Materials*, Vol. 241.
- Hossain. S. K. S., R. Pyare, and P. K. Roy, (2020). Synthesis of in-situ mullite foam using waste rice husk ash derived sol by slip-casting route. *Ceramics International*, Vol. 46, No. 8, 10871–10878.
- Han. Z., A. Sha, Z. Tong et al., (2017). Study on the optimum rice husk ash content added in asphalt binder and its modification with bio-oil. *Construction and Building Materials*, Vol. 147, 776–789.
- Holzschuh. G. G., D. S. Dorr, J. A. R. Moraes, and S. B. Garcia, (2020). Metal matrix production: casting of recycled aluminum cans and incorporation of rice husk ash and magnesium. *Journal of Composite Materials*, Vol. 54, No. 22, 3229–3241.
- Jaya. R. Putra, M. Rosli Hainin, N. Abdul Hassan et al., (2018). Marshall stability properties of asphalt mixture incorporating black rice husk ash. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, No. 10, 22056–22062.

-Zagvozda. M., S. Dimter, T. Rukavina, and I. N. Grubesa (2018). Possibilities of bioash application in road building. *Gra- devinar*, Vol. 70, No. 5, 393–402.

Construction and Building Materials, Vol. 146, 312–320.

-Xu. W., T. Y. Lo, and S. A. Memon (2012). Microstructure and reactivity of rich husk ash. *Construction and Building Materials*, Vol. 29, 541–547.

-Zahedi. M., A. A. Ramezaniapour, and A. M. Ramezaniapour (2015). Evaluation of the mechanical properties and durability of cement mortars containing nanosilica and rice husk ash under chloride ion penetration, Vol. 78, 354.

Investigating the Properties of Bitumen and Asphalt Mixture Modified with SBS Polymer and Rice Husk Ash

Sara Choubdar, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Email: sara_choubdar@civileng.iust.ac.ir

Received: June 2023- Accepted: February 2024

ABSTRACT

Sustainable materials in the field of road paving have become a research direction in recent years. In this study, rice husk ash with a small percentage of styrene-butadiene-styrene-1 (SBS) was added to base asphalt as a bio-additive to improve its properties. Different percentages (0, 2, 5, 10 and 15%) of rice husk ash 2 (RHA) and 1% SBS were selected to prepare modified bitumen. Penetration, softening point, ductility, rotational viscosity test and temperature sweep test were performed to investigate the properties of modified with SBS/RHA. To evaluate the performance of asphalt mixture modified with SBS/RHA, rutting, moisture sensitivity and low temperature cracking tests were used. The results showed that the penetration decreased and the softening point and rotational viscosity increased while the ductility decreased slightly with the incorporation of rice husk ash. The SBS/RHA modified asphalt mixture had better high temperature performance than the control asphalt mixture, but slightly lower moisture stability and lower temperature performance. The tensile strength ratio of the control and modified asphalt mixture meets the specification requirements. The tensile strain of the SR15 mixture was lower than the specification asphalt mixture requirement. For bitumen modified with SBS/RHA based on comprehensive properties, the percentage of rice husk ash should not be more than 15%.

Keywords: Polymer, Rutting, Bitumen, Rice Husk Ash, Moisture Sensitivity