

بررسی خواص مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی گرم با قیر حاوی خاکستر ساقه جو

مقاله علمی - پژوهشی

محدثه ابراهیمی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، گیلان، ایران
مهیار عربانی*، استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، گیلان، ایران
محمد یوسف پور طالقانی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، گیلان، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: arabani@guilan.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۱ - پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱

صفحه ۱۳۰-۱۱۳

چکیده

در سالهای اخیر تحقیقات زیادی به منظور استفاده از مواد تجدیدپذیر زیستی؛ مانند پسماندهای کشاورزی به عنوان اصلاح کننده قیر در روسازی‌های آسفالتی انجام شده است. سوزاندن زیست توده ها برای تأمین انرژی یا برای حذف آن‌ها، همواره با تولید پسماندی به شکل خاکستر همراه است. دفع خاکستر می‌تواند به مرور زمان به یک بحران زیست محیطی تبدیل شود. این مواد زیستی دارای خواص عالی برای اصلاح قیر، هزینه کم و سازگار با محیط زیست هستند. هدف از این مطالعه بررسی اثر افزودن خاکستر ساقه جو (BSA) بر خواص مکانیکی مخلوط آسفالتی است. قیر با ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ اصلاح کننده مخلوط شد. پس از بررسی خواص شیمیایی و مورفولوژی قیر و خاکستر، آزمایش‌های فیزیکی قیر، آزمایش بازگشت خزشی در چند سطح تنش (MSCR)، مقاومت مارشال، بارمحوری مکرر در دمای بالا و آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای در دمای میانی و دمای پایین انجام گرفت. نتایج نشان داد که BSA درجه نفوذ و شکل پذیری را کاهش و نقطه نرمی و سفتی قیر را افزایش می‌دهد. همچنین نتایج MSCR نشان داد قیر اصلاح شده تغییر شکل‌های دائمی کمتری را در دمای بالا تجربه می‌کند. نتایج آزمایش بار محوری مکرر نیز نشان داد BSA عملکرد دمای بالا مخلوط آسفالتی را بهبود بخشیده و آن را برای استفاده در مناطق گرمسیر مناسب‌تر می‌سازد. نتایج آزمایش خمش نیم دایره ای نشان داد که خاکستر ساقه جو اثر کاهنده بر مقاومت خستگی مخلوط آسفالتی در دمای میانی و ترک خوردگی دمای پایین دارد.

واژه‌های کلیدی: خواص مکانیکی، خاکستر ساقه جو، قیر اصلاح شده، مخلوط آسفالتی گرم

۱-مقدمه

مختلف عمل می‌کند. همچنین مصرف مواد معدنی و طبیعی را کاهش می‌دهد و تأثیرات منفی صنعت روسازی بر محیط زیست را به حداقل می‌رساند (Arabani et al., 2019; Arabani & Yousefpour Taleghani, 2017). همچنین با توسعه مفهوم پایداری زیست محیطی، جایگزینی انرژی‌های تجدیدپذیر با سوخت‌های فسیلی به دلیل کاهش ذخایر آن، افزایش مصرف انرژی و نیاز فوری به کاهش انتشار دی اکسید کربن، توجه زیادی را از سوی محققان به خود جلب کرده است (Rahimi et al.,

راه‌ها شریان‌های حیاتی جوامع هستند و بیش از ۹۰ درصد از کل جاده‌ها و بزرگراه‌ها از آسفالت ساخته شده‌اند. افزایش بارهای محوری، ترافیک سنگین و خرابی‌های روسازی منجر به تقاضا برای بهبود ویژگی‌های قیر و مخلوط‌های آسفالتی شده است. در این راستا محققان برای اصلاح خواص قیر و مخلوط‌های آسفالتی به بررسی اثرات افزودنی‌ها و اصلاح‌کننده‌ها در عملکرد قیر و مخلوط‌های آسفالتی پرداخته‌اند. اصلاح قیر با مواد زائد به عنوان راهی برای محدود کردن حجم عظیم زباله‌های تولید شده از منابع

در سال ۲۰۱۸ امیرجعفری و همکاران تأثیر قیر اصلاح شده با نانو خاکستر پسته نارگیل (NCA) بر خواص مخلوط‌های آسفالتی را بررسی کردند. بر اساس تجزیه و تحلیل مارشال، پایداری مخلوط‌های آسفالتی NCA بیشتر از مخلوط شاهد بود. تماس بین قیر اصلاح شده و ذرات سنگدانه به دلیل پیوند قوی و چسبندگی بالای NCA قوی‌تر شده و سفتی و کشش مخلوط آسفالتی را افزایش داد و منجر به بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی از نظر مقاومت در برابر شیار شدن و ترک‌خوردگی ناشی از خستگی گردید. ارزیابی شیارشدگی نشان داد مخلوط آسفالتی NCA در مقایسه با مخلوط آسفالتی شاهد تغییر شکل دائمی کمتری داشت و مخلوط آسفالتی اصلاح شده با ۶٪ NCA، کمترین کرنش و تغییر شکل را نشان داد. از این رو، عملکرد مخلوط آسفالتی به طور قابل توجهی از طریق ترکیب ۶٪ از NCA بهبود می‌یابد (Jeffrey et al., 2018). در سال ۲۰۱۹ عاملی و همکاران عملکرد مخلوط آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه ای (SMA) حاوی خاکستر ضایعات زغال‌سنگ (CWA) و خاکستر پسته برنج (RHA) را در درصد‌های وزنی (۰٪، ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪) به‌عنوان جایگزین پودر سنگ آهک (LP) ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که استفاده از RHA و CWA سبب بهبود خواص رئولوژیکی قیر می‌شود. استفاده از CWA منجر به افزایش ویسکوزیته شد اما مقادیر ویسکوزیته آن کمتر از قیرهای اصلاح شده با RHA است. با افزودن RHA و CWA مقادیر شاخص نفوذ (PI) افزایش یافت، بنابراین افزایش درصد RHA و CWA باعث کاهش حساسیت دمایی قیرها می‌شود. (Ameli et al., 2020). در سال ۲۰۱۹ ابوشنب و همکاران مخلوطی از سه ضایعات کشاورزی شامل خاکسترهای پسته برنج، ساقه ذرت، الیاف نیشکر را به‌عنوان اصلاح‌کننده زیستی، برای افزایش عملکرد قیر به میزان ۳، ۵، ۷ و ۱۰ درصد وزنی قیر استفاده کردند. مشاهده شد که افزودن اصلاح‌کننده های زیستی باعث کاهش نفوذ و افزایش دمای نقطه نرم شدن و ویسکوزیته قیر شده است. مقادیر PI با افزایش محتوای اصلاح‌کننده زیستی افزایش می‌یابد و مقدار آن برای قیر اصلاح شده با ۷ درصد اصلاح‌کننده به ۲/۸ می‌رسد که بیست برابر بزرگتر از قیر پایه است و سبب می‌شود در دماهای بالا تغییر شکل دائمی (پلاستیک) کمتری در سطح جاده تحت بارهای ترافیکی ظاهر شود. همچنین نتایج نشان داد که اصلاح‌کننده زیستی تأثیر واضحی در بهبود مقاومت خستگی قیر دارد (Abo-Shanab et al., 2021). در سال ۲۰۲۰ فرید و همکاران در مطالعه‌ای از سه نوع خاکستر پسماند کشاورزی نانو شامل خاکستر پسته برنج، خاکستر باگاس نیشکر و خاکستر کاه گندم برای اصلاح قیر و مخلوط آسفالتی استفاده کردند. نتایج نشان داد درجه نفوذ و شکل‌پذیری نمونه‌های اصلاح شده با افزایش محتوای اصلاح‌کننده در قیر کاهش یافت و مقادیر PI

(2022). زیست‌توده یک منبع تجدیدپذیر است و بخش کشاورزی یکی از صنایع اولیه تولید زیاله می باشد که مقادیر زیادی زیست‌توده در طول برداشت و فرآوری محصولات کشاورزی تولید می‌کند. همچنین سوزاندن آن‌ها برای حذف این ضایعات یا تولید انرژی به طور اجتناب‌ناپذیری با تولید خاکستر همراه است که دفع آن می‌تواند به مرور زمان به یک بحران زیست محیطی تبدیل شود. از این رو استفاده از این مواد زائد به‌عنوان اجزای مخلوط آسفالتی نه تنها می‌تواند دفع ایمن آنها را تضمین کند، بلکه صنعت روسازی را به مسیر ساخت و ساز پایدار سوق می‌دهد (Choudhary et al., 2020).

نتایج پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که بیشتر خاکسترهای زیست‌توده دارای عناصر مفیدی برای آسفالت هستند و تحقیقات عملکرد رضایت بخشی را نشان می‌دهند. در سال ۲۰۱۳ کای و همکاران از خاکستر پسته برنج به‌عنوان یک اصلاح‌کننده برای ارزیابی عملکرد آسفالت استفاده کردند. نتایج بررسی مورفولوژی خاکستر پسته برنج نشان داد که این نوع خاکستر دارای ساختاری متخلخل است که سبب جذب بالا و ایجاد پیوند قوی در آسفالت شده و باعث کاهش روانی آسفالت نیز می‌شود. با افزایش مقدار خاکستر پسته برنج، درجه نفوذ ۱۶/۴۸ درصد کاهش و نقطه نرمی ۵/۹۴ درصد افزایش یافته است، بنابراین سختی قیر افزایش یافته و رفتار آسفالت اصلاح شده در دمای بالا بهبود می‌یابد. همچنین با افزایش میزان خاکستر پسته برنج، ۵۸ درصد شکل‌پذیری کاهش یافت اما همچنان الزامات کاربرد را برآورده می‌کرد. نتایج آزمایشات بر روی قیر پیر شده نیز نتایج مشابهی نشان داد (Cai et al., 2013). در تحقیقی که در سال ۲۰۱۸ توسط عربانی و اسمعیلی انجام شد، تأثیر استفاده از خاکستر پسته بادام‌زمینی با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی قیر به‌عنوان یک اصلاح‌کننده در مخلوط آسفالتی گرم بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش مقدار خاکستر پسته بادام‌زمینی در قیر، درجه نفوذ و شکل‌پذیری کاهش و نقطه نرمی افزایش یافته است. این می‌تواند به دلیل بر همکنش بین مولکول‌های تشکیل‌دهنده قیر و ذرات افزودنی و ساختار متخلخل ذرات خاکستر پسته بادام‌زمینی (GSA) باشد. همچنین با افزایش محتوای خاکستر پسته بادام‌زمینی، ویسکوزیته قیر افزایش یافت و مدول پیچیده قیرهای آسفالت اصلاح شده در مقایسه با قیر پایه افزایش یافت. همچنین مشاهده شد که استفاده از GSA تا ۱۵ درصد باعث بهبود مقاومت در برابر خستگی مخلوط‌های آسفالتی و همچنین کاهش ایجاد ریزترک‌ها در مخلوط‌های آسفالتی شد. نتایج تست بار محوری مکرر تأیید کرد GSA باعث کاهش کرنش نهایی نمونه‌ها و بهبود مقاومت آنها در برابر شیارشدگی می‌شود (Arabani & Esmaaeli, 2020).

همچنین به منظور بررسی تأثیر این افزودنی بر عملکرد مخلوط آسفالتی آزمایش‌های مقاومت مارشال، بارمحروری مکرر در دمای بالا، و آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای در دمای میانی و دمای پایین انجام گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

مصالح مورد استفاده در این پژوهش شامل سنگدانه، قیر و خاکستر ساقه جو (به‌عنوان اصلاح‌کننده قیر) است که در ادامه به بررسی خصوصیات هر یک از این مصالح پرداخته شده است.

۲-۱-۱- مصالح سنگی

در این پژوهش سنگدانه‌های گرانیته از کارخانه آسفالت باهنر رشت واقع در استان گیلان تهیه شده‌اند. دانه‌بندی سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش، مطابق حد وسط دانه‌بندی شماره ۴ نشریه ۲۳۴ است. حداکثر اندازه و اندازه اسمی سنگدانه‌های این دانه‌بندی به ترتیب برابر ۱۹ و ۱۲/۵ میلی‌متر است. فیلر مورد استفاده در این پژوهش سیمان است.

۲-۱-۲- قیر

انتخاب قیر مناسب برای هر پروژه، به عوامل مختلفی مانند دانه‌بندی مصالح سنگی، شرایط آب و هوایی محل پروژه و میزان ترافیک بستگی دارد. در این پژوهش با در نظر گرفتن شرایط جوی گرم و معتدل ایران و ترافیک سنگین، از پالایشگاه نفت جی تهران قیر با درجه عملکرد PG¹⁶-۱۶ تهیه شده است. مشخصات قیر مصرفی در جدول (۱) ارائه شده است.

۲-۱-۳- خاکستر ساقه جو

در این پژوهش خاکستر ساقه جو به‌عنوان اصلاح‌کننده قیر پایه مورد استفاده قرار گرفته است. ساقه جو از یک مزرعه محلی از استان گیلان در شمال ایران جمع‌آوری شد. سپس به مدت ۲ ساعت در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد در کوره قرار گرفت تا تمام مواد فرار و کربن‌های خام حذف شود و وزن ثابتی حاصل شود (Arabani & Tahami, 2017; Bartoňová, 2015). خاکستر حاصل به‌صورت دستی آسیاب شد و سپس خاکستر آسیاب شده از الک ۰/۰۷۵ میلی‌متری عبور داده شد. زیرا ماهیت ریزتر اصلاح‌کننده باعث توزیع یکنواخت‌تر آن در قیر می‌شود. شکل (۱) ساقه جو و خاکستر آن که در این مطالعه استفاده شده است را نشان می‌دهد.

نمونه‌های اصلاح شده در مقایسه با قیر پایه بهبود یافته است. دمای شکست با افزودن نانو خاکستر پوسته برنج (RHA)، نانو خاکستر باگاس نیشکر (SCBA) و نانو خاکستر کاه گندم (WSA) تا چهار درصد در قیر افزایش یافت و نتایج نشان داد که RHA و WSA می‌توانند برای دستیابی به عملکرد بهتر روسازی در دماهای بالا استفاده شوند (Fareed et al., 2020). نورلیزا و همکاران در سال ۲۰۲۳ به بررسی تأثیر خاکستر روغن میوه نخل (OPFA) بر قیر پایه ۶۰/۷۰ و مخلوط آسفالتی پرداختند. نتایج نشان داد که OPFA به دلیل ویژگی‌های پوزولانی خود، رفتار رئولوژیکی مخلوط آسفالتی را بهبود می‌بخشد و چسبندگی قیر را افزایش می‌دهد. با توجه به یافته‌های آزمایش‌های قیر، افزودن OPFA به قیر سختی قیر و دمای نرم شدن را در مقایسه با نمونه شاهد افزایش داد. قیر اصلاح شده با OPFA عملکرد مخلوط آسفالتی را از نظر استحکام، سفتی و تغییر افزایش می‌دهد. همچنین در آب و هوای گرم می‌تواند در برابر شیار شدن و لغزش مقاومت کند به طوری که مقدار تغییر شکل آن در آزمایش خزش دینامیکی تنها ۰/۲۰ میلی‌متر بود (Bujanga et al., 2023). با توجه به بررسی مطالعات پیشین تاکنون مطالعه‌ای در رابطه با ارزیابی تأثیر استفاده از خاکستر ساقه جو بر اصلاح قیر انجام نشده است (Ebrahimi, 2023). تولید سالانه جو در سراسر جهان حدود ۱۵۲ میلیون تن است که منجر به تولید میلیون‌ها تن ساقه جو می‌شود. مقداری از این حجم ساقه جو تولید شده به‌عنوان خوراک دام استفاده می‌شود و بخش زیادی از آن سوزانده می‌شود. در نتیجه مقدار زیادی خاکستر تولید می‌شود که استفاده از آن در صنعت روسازی سبب کاهش اثرات مخرب آن بر محیط زیست می‌شود. همچنین از نظر اقتصادی می‌توان اشاره کرد که در بسیاری از مناطق، هزینه‌های مرتبط با اصلاح‌کننده‌های سنتی (مانند آهک، سیمان) ممکن است تا سه برابر هزینه‌های مواد بر پایه زیستی می‌باشد (Arabani et al., 2024). در این پژوهش خاکستر ساقه جو به‌عنوان اصلاح‌کننده قیر مورد استفاده قرار گرفته است و تأثیر آن بر خصوصیات قیر و خرابی‌های آسفالت ارزیابی می‌شود. به طور کلی اهداف این پژوهش، بررسی خواص رئولوژیکی قیر اصلاح شده با خاکستر ساقه جو و بررسی خصوصیات مکانیکی مخلوط آسفالتی حاوی قیر اصلاح شده با خاکستر ساقه جو است. سایر اهداف این مطالعه، کاهش اثرات زیست محیطی ناشی از انباشت مقدار انبوه ضایعات سالیانه ساقه جو و کاهش تولید و مصرف قیر با اصلاح خواص آن می‌باشد. برای انجام این پژوهش پس از بررسی خواص شیمیایی و مورفولوژی قیر و خاکستر ساقه جو، ابتدا قیر با ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ خاکستر ساقه جو مخلوط شد. سپس آزمایش‌های قیر شامل آزمایش درجه نفوذ، نقطه نرمی، شکل پذیری و آزمایش بازگشت خزشی در چند سطح تنش بروی قیر پایه و اصلاح شده انجام شد.

۳۰ دقیقه با همزن دور بالا با سرعت دوران rpm ۲۵۰۰ صورت گرفت تا از تعامل کافی بین خاکستر و قیر اطمینان حاصل شود. بدین ترتیب، قیر اصلاح شده با خاکستر ساقه جو تهیه شد.



شکل ۱. ساقه جو و خاکستر ساقه جو استفاده شده در این مطالعه

۲-۳- ساخت نمونه‌های آسفالتی

به منظور انجام آزمایش‌های مکانیکی ابتدا طرح اختلاط به روش مارشال بر اساس دستورالعمل ASTM D1559 انجام شد. درصد قیر بهینه برابر ۵٫۵ درصد بدست آمد. سپس در روش مارشال به منظور ساخت نمونه‌های استوانه شکل ۱۲۰۰ گرمی با قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۶٫۳۵ سانتی‌متر، ابتدا مصالح سنگی الک شده و مطابق دانه‌بندی شماره چهار آیین‌نامه ایران با یکدیگر مخلوط شدند. سپس مصالح سنگی از ۱۷۵ تا ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد و با ۵/۵ درصد قیر گرم شده از دمای ۱۲۱ تا ۱۳۸ درجه سانتی‌گراد مخلوط شدند (Kett, 1998). مخلوط حاصل داخل قالب‌ها ریخته شد و به کمک چکش مارشال با ۷۵ ضربه بر هر سمت نمونه متراکم شدند. نمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعت از قالب خارج شدند.

۲-۲- اصلاح قیر

برای تهیه قیر اصلاح شده، خاکستر با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی قیر ترکیب گردید (Arabani & Esmaeli, 2020; Xue et al., 2014). ابتدا خاکستر به صورت تدریجی در دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس به قیر افزوده شد. سپس اختلاط به مدت

جدول ۱. مشخصات فیزیکی قیر مصرفی

نتایج آزمایشگاهی	دستورالعمل آزمون	خصوصیات
۶۵	ASTM-D5	درجه نفوذ (۱۰۰g، ۰٫۵S، ۲۵ سانتی‌متر)، (۰/۱ میلی‌متر)
۵۰/۳	ASTM-D36	نقطه نرمی (سانتی‌متر)
۱۱۰	ASTM-D113	شکل‌پذیری (۲۵ درجه سانتی‌گراد)
۳۳۴	ASTM-D92	درجه اشتعال (°C)
۱/۰۳۲	ASTM-D70	چگالی (۲۵°C)، (گرم بر سانتی متر مکعب)

۲-۳-۲- آزمایش تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR³)

طبق ASTM E1252-98 تست FTIR برای شناسایی گروه‌های عاملی و بررسی ویژگی‌های شیمیایی خاکستر ساقه جو و قیر با طول موج‌های ۵۰۰ تا ۴۰۰۰ cm⁻¹ انجام شد. تحقیقات نشان می‌دهد که گروه سولفوکسید (S = O) و گروه کربونیل (C = O) بیشترین تأثیر را بر پیری قیر دارند و با افزایش سن قیر، مقدار آنها در قیر افزایش می‌یابد (Akarsh et al., 2022).

۲-۳- آزمایش‌ها

۲-۳-۱- آزمایش فلورسانس پرتو ایکس (XRF²)

آنالیز XRF یکی از روش‌های آنالیز عنصری است که تحت استاندارد ASTM E-1621-13 برای تعیین نوع عناصر موجود و درصد آن‌ها در خاکستر ساقه جو مورد استفاده قرار گرفت.

شد که میزان افزایش پارامتر Jnr را هنگامی که تنش از ۰/۱ به ۳/۲ کیلو پاسکال افزایش می‌یابد را نشان می‌دهد.

$$\%R = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2} \quad (1)$$

$$Jnr = \frac{\varepsilon_1}{\sigma} \quad (2)$$

در این معادله ε_2 کرنش ماکزیمم، ε_1 کرنش بازیابی نشده و σ تنش است.

$$Jnr-diff = \frac{Jnr_{3.2} - Jnr_{0.1}}{Jnr_{0.1}} \times 100 \quad (3)$$

۶-۳-۲- آزمایش تعیین استقامت مارشال و روانی نمونه‌ها

آزمایش مارشال بر اساس دستورالعمل ASTM D1559 انجام شد. برای تعیین استقامت مارشال و روانی آسفالت، نمونه‌های متراکم شده در حمام آب در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲۰ تا ۴۰ دقیقه غوطه‌ور شدند تا به دمای آزمایش برسند. سپس آنها در امتداد قطر با سرعت ثابت ۵۰ میلی‌متر در دقیقه تا مرحله شکست بارگذاری شدند. سختی مارشال یا ضریب مارشال (MQ) از تقسیم پایداری (کیلوگرم) بر جریان (mm) محاسبه شد. نمونه‌ی مارشال ساخته شده در آزمایشگاه در شکل (۲) آورده شده است.



شکل ۲. نمونه آسفالتی مارشال

۷-۳-۲- آزمایش بار محوری مکرر (RLA⁷)

آزمایش خزش دینامیکی یا بار محوری مکرر برای ارزیابی تأثیر متغیرهای مختلف مخلوط‌های آسفالتی بر مقاومت آن در برابر تغییر شکل دائمی انجام شد. آزمایش مذکور شامل اعمال بار محوری مکرر با فرکانس ثابت بر روی نمونه‌ها و اندازه‌گیری

(Fakhri & Norouzi, 2022). در این مطالعه، با استفاده از آزمون FTIR به تجزیه و تحلیل تغییرات سولفوکسیدها و کربونیل در قیر پایه نسبت به قیر اصلاح شده پرداخته شد.

۳-۳-۲- آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM⁴)

میکروسکوپ الکترونی روبشی برای بررسی ویژگی‌های سطحی و مورفولوژی خاکستر ساقه جو و بررسی چگونگی توزیع خاکستر در قیر مورد استفاده قرار گرفت.

۴-۳-۲- آزمایش های مرسوم قیر

خواص فیزیکی قیر پایه و اصلاح‌شده با درصد‌های مختلف BSA با آزمایش‌های مرسوم شامل آزمایش درجه نفوذ مطابق با ASTM-D36، آزمون نقطه نرم شدن مطابق با ASTM-D5 آزمایش شکل‌پذیری مطابق با دستورالعمل ASTM-D113 انجام شد. آزمایش نفوذ در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد برای تعیین سختی یا قوام قیرهای آسفالتی انجام شد. آزمایش تعیین نقطه نرمی به منظور بررسی حساسیت حرارتی قیر و آزمایش شکل‌پذیری برای بررسی ویژگی‌های کششی-چسبندگی قیرهای آسفالت انجام گردید. مقدار قابلیت شکل‌پذیری بیانگر نشانه‌ای از چسبندگی قیرهاست.

۵-۳-۲- آزمایش بازگشت خزشی در چند سطح تنش (MSCR⁵)

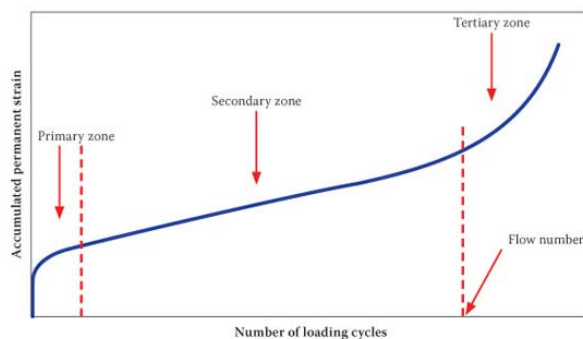
این آزمون امکان توصیف بهتر ویژگی‌های مربوط به عملکرد دمای بالا قیر را فراهم می‌کند. مطابق AASHTO T350-14 یک نمونه قیر به قطر ۲۵ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر در معرض ۱۰ سیکل بارگذاری با ۱ ثانیه بارگذاری خزشی و ۹ ثانیه استراحت در سطوح تنش ۱۰۰ و ۳۲۰۰ پاسکال در دمای ۶۴، ۷۰ و ۷۶ درجه‌ی سانتی‌گراد انجام شد. از آنجایی که شیار شدن در مراحل اولیه روسازی رخ می‌دهد، آزمایش با قیر پیر شده کوتاه مدت (RTFO⁶) انجام شد که نشان‌دهنده رویکرد واقعی‌تر در ارزیابی شیار شدگی است. شاخص‌های ارزیابی نهایی آزمون، درصد بازیابی کرنش (R%) و انطباق خزشی غیر قابل بازیافت (Jnr) در دو سطح تنش است که با معادلات (۱) و (۲) محاسبه می‌شوند. همچنین درجه حساسیت قیر به شیار شدن با استفاده از پارامتر Jnr-diff مطابق معادله (۳) اندازه‌گیری

شروع مرحله ی سوم با ورود مخلوط آسفالتی به ناحیه پلاستیک آغاز می‌شود و تغییر شکل دائمی رخ می‌دهد. مخلوط آسفالتی پس از گذراندن تعداد مشخصی سیکل بارگذاری وارد ناحیه سوم می‌شود. تعداد سیکل طی شده تا حداقل نرخ کرنش در شروع ناحیه سوم به‌عنوان عدد جریان گزارش می‌شود.

۲-۳-۸-آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای

آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای با هدف ارزیابی عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر ترک‌خوردگی در دمای پائین و ترک خستگی در دمای میانه مورد استفاده قرار گرفت. به منظور ارزیابی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر شروع ترک و توسعه‌ی آن، آزمون‌های متعددی وجود دارند. اساس این آزمایش‌ها بر پایه‌ی تئوری مکانیک شکست است. در اغلب این آزمون‌ها یک شیار اولیه موجود است و مود اول گسیختگی در آنها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای متمایز نمودن مؤلفه‌های تنش برای مودهای مختلف تغییر شکل، سه مود مختلف برای تغییر شکل نسبی سطوح ترک تعریف شده است. آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای یکی از مهمترین آزمایش‌ها برای پیش‌بینی خواص شکست مخلوط آسفالتی است. مود I یا مود باز شدگی از متداول‌ترین شکل گسیختگی در رشد ترک است. در این شکل از بارگذاری لبه‌های ترک فقط از یکدیگر باز می‌شوند و این بازشدگی بدون لغزش رخ می‌دهد.

مداوم کرنش قابل بازیافت و تغییر شکل دائمی با استفاده از دو سنسور می‌باشد. دو نتیجه مهم از آزمایش خزش دینامیکی، کرنش تجمعی نهایی و عدد جریان (FN^8) است. بارگذاری این آزمایش مطابق با دستورالعمل بریتانیا DD185 (BS) انجام شد (DD, 1990). قبل از انجام آزمایش دمای داخل محفظه به دمای آزمایش رسانده شد. هر نمونه نیز به مدت ۴ ساعت در دمای آزمون قرار گرفت. همچنین بعد از تنظیم حسگرها نمونه تحت بارگذاری قرار گرفت. در این پژوهش میزان خزش برای نمونه‌های مختلف با اعمال بار فشاری دینامیکی (بار محوری مکرر) با مقادیر ثابت ۳۰۰ کیلو پاسکال برای دماهای مختلف ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد توسط سنسورهای LVDT اندازه‌گیری شد. برای هر درصد افزودنی سه نمونه مشابه تهیه شد تا دقت اندازه‌گیری بالا رود. از آزمون RLA نمودار تغییرات کرنش تجمعی در برابر تعداد سیکل‌های بارگذاری بدست می‌آید. مقدار کرنش تجمعی در این نمودار مقاومت مخلوط آسفالتی را در برابر تغییر شکل نشان می‌دهد. در شکل (۳) نمونه‌ای از این منحنی آورده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، نمودار دارای سه جزء اصلی است: مرحله اول که در آن تغییر شکل نسبتاً زیادی در طول تعداد کمی از چرخه‌های بارگذاری رخ می‌دهد. مرحله دوم که در آن نرخ تجمع تغییر شکل دائمی ثابت نگه داشته می‌شود و مرحله سوم قبل از وقوع شکست کامل مقدار تغییر شکل سرعت می‌گیرد. تشکیل ترک‌ها عموماً در این مرحله صورت می‌گیرد (Shafabakhsh & Ani, 2015).



شکل ۳. نمودار کرنش تجمعی در برابر تعداد سیکل‌های بارگذاری

نرخ جابجایی ثابت ۵۰ میلی‌متر در دقیقه انجام شد. خروجی آزمایش، نمودار نیرو-جابجایی است که به کمک آن پارامترهای حداکثر نیروی لازم برای شکست نمونه‌ها (P_{cr})^{۱۰}، مقدار انرژی لازم برای شکست نمونه‌ها (G_f)^{۱۱} و چقرمگی شکست (K_{IC})^{۱۲} محاسبه می‌شود. شاخص G_f در آزمایش SCB مقدار کل انرژی لازم برای شکست مخلوط آسفالتی است که بر اساس رابطه ۴ از تقسیم سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی به سطح مقطع شکست محاسبه می‌شود.

$$G_f = \frac{W_f}{A} = P(du)/A \quad (4)$$

در این رابطه W_f کار لازم برای شکست نمونه برحسب ژول و A سطح مقطع شکست برحسب مترمربع است (TP105, 2013).

چقرمگی شکست، مقاومت نمونه را در برابر ترک‌خوردگی نشان می‌دهد که تابع تنش وارد شده به مخلوط آسفالتی و مشخصات هندسی آن است. چقرمگی شکست از رابطه ۵ محاسبه می‌شود.

$$K_{IC} = \frac{P_{CR}}{2Rt} \sqrt{\pi a Y_I} \quad (5)$$

در این رابطه R شعاع نمونه، t ضخامت آن، a طول ترک و Y_I ضریب بدون بعد شکل است که با توجه به شرایط هندسی و بارگذاری نمونه از طریق مدلسازی با استفاده از روش المان محدود و به کمک نرم افزار آباکوس ۴/۸۰۳ در نظر گرفته می‌شود (Saha & Biligiri, 2016; TP105, 2013).

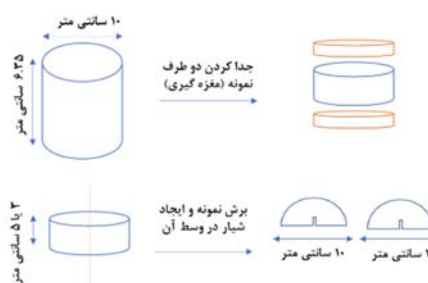
۳- بحث روی نتایج

۳-۱- بررسی خواص شیمیایی و مورفولوژی قیر و

خاکستر ساقه جو

به کمک آزمایش طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس (XRF) ترکیب شیمیایی اجزای اصلی خاکستر ساقه جو مشخص شدند. ترکیبات شیمیایی زیست‌توده‌ها به عوامل مختلفی از جمله نوع زیست‌توده، روند و شرایط رشد، سن گیاه، کود و سموم استفاده شده، فاصله گیاه تا منابع آلودگی، تکنیک جمع‌آوری و بسیاری از عوامل دیگر بستگی دارد (Mirkouei et al., 2017). نتایج آنالیز XRF خاکستر ساقه جو در جدول

نمونه‌های SCB^۹ به دلیل سادگی شکل هندسی در تهیه و ساخت آن و همچنین اقتصادی بودن روش، یکی از مناسب‌ترین روش‌های آزمایشگاهی برای بررسی مکانیسم شکست مخلوط‌های آسفالتی است. در این پژوهش، برای تهیه نمونه‌های SCB، نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد 100×635 میلی‌متر مغزه‌گیری شده و سطح بالا و پایین نمونه بریده شد تا احتمال وجود فضای خالی غیر یکنواخت واقع در سطوح از بین برود. سپس نمونه‌ی تهیه شده به دو نیمه برش داده شد و در وسط هریک، شیباری در راستای شعاع و مرکز نمونه با ابعادی به ضخامت ۲ میلی‌متر و طول ۱۰ میلی‌متر ایجاد گردید. در نهایت نمونه‌های SCB با قطر ۱۰ سانتی‌متر و ضخامت ۳ سانتی‌متر برای دمای پایین و نمونه‌های SCB با قطر ۱۰ سانتی‌متر و ضخامت ۵ سانتی‌متر برای دمای میانه تهیه شدند (Bui & Saleh, 2021). برای هر درصد افزودنی، سه نمونه SCB با ابعادی مشابه تهیه شد تا دقت اندازه‌گیری بالا رود. مراحل ساخت نمونه‌های SCB در شکل (۴) نشان داده شده است. برای ارزیابی مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر ترک‌های خستگی نمونه‌های SCB در دماهای میانی شامل دماهای ۵، ۱۵ و ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد ارزیابی شد. همچنین به منظور بررسی مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر ترک‌خوردگی در دمای پایین نمونه‌های SCB در دماهای ۶- و ۱۸- درجه سانتی‌گراد مورد ارزیابی قرار گرفت.



شکل ۴. مراحل آماده‌سازی نمونه‌های SCB

برای انجام آزمایش شکست، از دستگاه UTM استفاده شد. قبل از انجام آزمایش، نمونه‌ها به مدت ۴ ساعت در دمای آزمایش قرار گرفتند تا دمای نمونه‌ها به دمای آزمایش برسد. آزمایش SCB از طریق اعمال بار در امتداد محور عمودی به نمونه با

مخلوط های آسفالتی شود. همچنین از تصاویر می توان استنباط کرد ساختار این ذرات متخلخل، غیریکنواخت و نامنظم است که سبب ایجاد پیوند قوی در آسفالت شده و باعث کاهش روانی آسفالت می شود. در مطالعات پیشین بررسی تاثیر شکل اصلاح کننده ها بر عملکرد مخلوط آسفالتی نشان داده است که سطح غیر همسطح و زاویه دار بودن ذرات باعث اصطکاک بیشتر بین آنها و قیر می شود (Aboutalebi Esfahani, 2021).

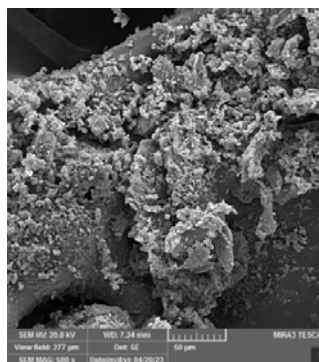
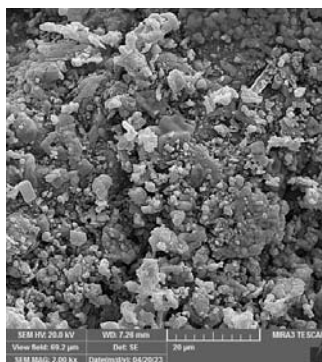
بررسی طیف FTIR برای شناسایی تغییرات در ترکیب شیمیایی قیر با BSA در شکل (۶) مشاهده می شود. مطابق این شکل، چندین پیک جذب وجود دارد که مربوط به گروه های عاملی متفاوتی است که ساختار مولکولی مشخصی دارند. طیف FTIR قیر در قله ۲۹۱۹ و ۲۸۵۲ cm^{-1} زنجیره C-H را نشان می دهد. قله در ۱۶۹۱ و ۱۵۹۷ زنجیره C=C و C=O هیدروکسل آروماتیک را نشان می دهد و قله ۱۳۷۴ و ۱۴۵۸ زنجیره CH_3 را اثبات می کند. قله ۱۰۳۲ گروه عاملی S=O کربوکسیلیک را نشان می دهد. پیک های ۸۷۳ و ۷۲۳ گروه های عاملی آروماتیک پارا و متا هستند. گروه های عاملی C=O و S=O سبب ایجاد پیروی در قیر هستند. مطابق نتایج گروه های عاملی سولفوکسید و کربونیل با افزایش خاکستر ساقه جو در تمامی نمونه ها کاهش می یابد که می تواند مؤید آن باشد که قیر اصلاح شده عملکرد بهتری را نسبت به قیر اصلاح نشده دارد و این کاهش در میزان ۲۰ درصد BSA به بیشترین میزان خود می رسد. همچنین افزودن خاکستر ساقه جو هیچ تغییر قابل توجهی در اکثر پیک های قیر اصلاح شده ایجاد نکرده است. بنابراین برهمکنش شیمیایی بین قیر اصلاح نشده و اصلاح کننده وجود ندارد.

(۲) آمده است. مشاهده شد که ترکیبات اصلی در BSA شامل SiO_2 و K_2O هستند که به ترتیب ۴۴/۹۱ و ۲۱/۶۳ درصد خاکستر را تشکیل می دهند. وجود درصد زیادی SiO_2 در خاکسترها سبب ایجاد پیوندهای قوی در نمونه های بتن آسفالتی می شود و می تواند نقش مهمی در پایداری شیمیایی و بهبود جذب آسفالت داشته باشد. همچنین اکسید کلسیم (CaO) می تواند چسبندگی بین قیر و سنگدانه را افزایش دهد.

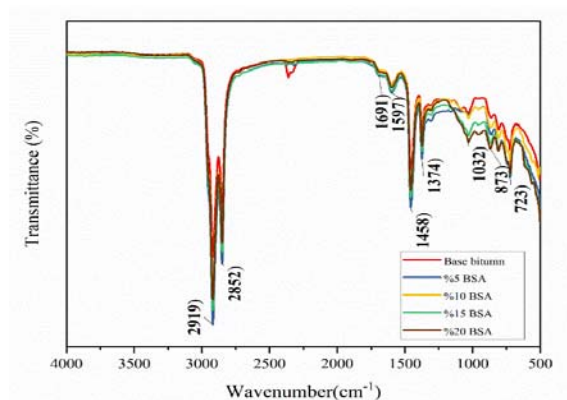
جدول ۲. خواص فیزیکی و ترکیبات شیمیایی خاکستر ساقه جو

خواص فیزیکی	
وزن مخصوص	۲/۲۲
ترکیبات شیمیایی	
سدیم اکسید (Na_2O)	۲/۱۷۲
منیزیم اکسید (MgO)	۴/۴۶۱
آلومینیوم اکسید (Al_2O_3)	۱/۹۵۲
سیلیسیم دی اکسید (SiO_2)	۴۴/۹۱۷
پتاسیم اکسید (K_2O)	۲۱/۶۳۱
کلسیم اکسید (CaO)	۴/۹۰۳
اکسید آهن (Fe_2O_3)	۱/۸۲۷
فسفر پنتا اکسید (P_2O_5)	۴/۴۳۲
دیگر محتویات	۱۳/۷۰۵

شکل (۵) تصویر میکروسکوپ الکترونی خاکستر ساقه جو را نشان می دهد. می توان مشاهده کرد خاکستر دارای ذرات ریز و غیر کروی است که می تواند سبب افزایش مقاومت و پایداری



شکل ۵. عکس SEM خاکستر ساقه جو با بزرگنمایی مختلف



شکل ۶. نتایج آزمایش تبدیل فوریه مادون قرمز

۲-۳- آزمایش های قیر

۳-۲-۱- آزمایش های فیزیکی قیر

خواص فیزیکی قیر خالص و اصلاح شده شامل درجه نفوذ، نقطه نرمی و شکل پذیری مورد ارزیابی قرار گرفت. طبق نتایج نشان داده شده در جدول (۳) افزودن خاکستر جو و افزایش مقدار آن در قیر باعث کاهش درجه نفوذ و افزایش نقطه نرم شدن قیر می شود. همچنین با افزایش میزان BSA شکل پذیری کاهش می یابد. اثرات سفت کنندگی این افزودنی در دوز پایین (۰.۵٪) کمتر است درحالی که این اثر در محتوای بالا (۲۰٪) آشکارتر است. این می تواند به دلیل بر همکنش بین مولکول های تشکیل دهنده قیر و ذرات افزودنی باشد. سفت شدن قیر استحکام آن در برابر آسیب های مکانیکی را بهبود می دهد. قیر با نقطه نرمی بالا کمتر مستعد تغییر شکل دائمی است، بنابراین می تواند عملکرد شیارشدگی بهتری داشته باشد. ذرات خاکستر پوشیده شده با یک لایه نازک آسفالتین پیوندهای جدیدی در سیستم ایجاد می کنند

و در نتیجه درجه نفوذ قیر اصلاح شده را کاهش می دهد. این ممکن است به دلیل وجود SiO_2 در BSA و ساختار متخلخل و غیرکروی این ذرات باشد که به شدت با قیر واکنش داده و یک ماده سخت و متراکم را تشکیل می دهد. مطابق نتایج قیر حاوی ۲۰ درصد افزودنی بیشترین کاهش درجه نفوذ و قیر حاوی ۱۵ درصد افزودنی بیشترین نقطه نرمی و قیر حاوی ۲۰ درصد افزودنی کمترین شکل پذیری را نسبت به قیر پایه نشان داده اند. با این حال شکل پذیری بسیار کم نمونه های قیر با درصد های بالای خاکستر ممکن است سبب شکنندگی بیشتر قیر در دمای پایین و میانه شود و مقاومت نمونه را کاهش دهد. نتایج مشابه در پژوهش های پیشین نشان می دهد که اصلاح قیر با خاکستر (برنج، چوب، بادام زمینی و مانند آنها) سبب افزایش سفتی قیرهای اصلاح شده و در نتیجه کاهش درجه نفوذ، شکل پذیری و افزایش نقطه نرمی قیر می شود (Arabani & Esmaeli, 2020; Fareed et al., 2020).

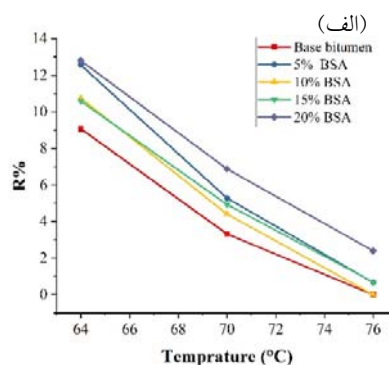
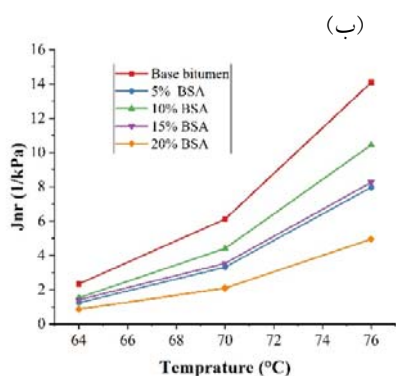
جدول ۳. خواص فیزیکی قیر اصلاح شده با خاکستر ساقه جو

شکل پذیری (سانتی متر)	نقطه نرمی (سانتی گراد)	درجه نفوذ (۰/۱ میلی متر)	نوع قیر
۱۱۰	۵۰/۳	۶۵	قیر پایه
۷۱	۵۲/۷	۵۹/۵	قیر اصلاح شده با ۰.۵٪ خاکستر BSA
۵۳/۶	۵۴	۵۵	قیر اصلاح شده با ۱۰٪ خاکستر BSA
۴۲	۵۵/۲	۵۲	قیر اصلاح شده با ۱۵٪ خاکستر BSA
۳۷	۵۶/۳	۴۸/۴	قیر اصلاح شده با ۲۰٪ خاکستر BSA

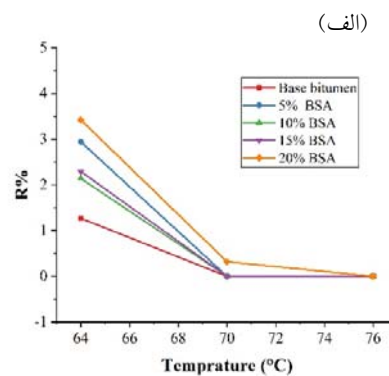
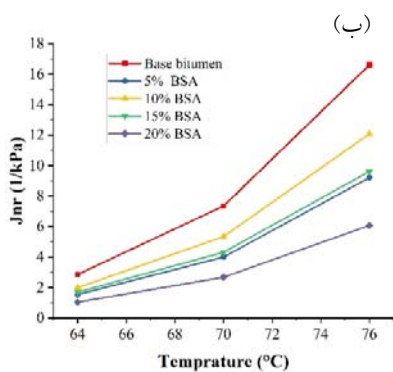
خاکسترها سبب بهبود مقاومت قیر در دمای بالا می‌شوند (Abdelmagid et al., 2023; Ameli et al., 2020). مقدار Jnr در ۳/۲ کیلو پاسکال نیز برای ارزیابی مناسب بودن قیر برای شرایط ترافیکی مختلف طبق دستورالعمل AASHTO T350 استفاده شد (AASHTO, 2014). طبق این دستورالعمل، حداکثر مقادیر Jnr در ۳/۲ کیلو پاسکال مربوط به شرایط ترافیک استاندارد (S)، سنگین (H)، بسیار سنگین (V) و شدید (E) به ترتیب ۴/۵، ۲، ۱ و ۰/۵ است. با توجه به شکل (۸ ب) در دمای ۶۴ درجه تمام نمونه‌های اصلاح شده با BSA برای شرایط ترافیکی سنگین مناسب هستند. همچنین در دمای ۷۰ درجه قیرهای اصلاح شده با ۵، ۱۵ و ۲۰ درصد BSA شرایط ترافیکی استاندارد را بدست آوردند. اما در دمای ۷۶ درجه هیچ یک از نمونه‌ها حتی شرایط ترافیکی استاندارد را بدست نیاوردند. نتایج در جدول (۴) خلاصه شده است.

۳-۲-۲-آزمایش بازگشت خزشی در چند سطح تنش قیر (MSCR)

تست MSCR خواص دمای بالای آسفالت را با تعیین تغییر شکل ویسکوالاستیک آن در دمای بالا تحت بار ارزیابی می‌کند. در شکل (۷ و ۸) مقادیر بازیابی کرنش (R%) و انطباق خزشی غیر قابل بازیافت (Jnr) در سطوح تنش ۰/۱ و ۳/۲ کیلو پاسکال ارائه شده است. قیر با درصد بازیابی بالاتر قادر است بخشی از کرنش کل خود را در پایان هر ۱۰ سیکل بازیابی کند. با افزودن BSA به قیر، مقدار R% در هر دما افزایش یافت در حالی که Jnr کاهش یافت. که نشان می‌دهد قیرهای حاوی BSA مقاومت بهتری در برابر شیار شدن دارند. این افزایش در قیر حاوی ۲۰ درصد BSA بیشتر قابل مشاهده است. این بهبود ناشی از اثر سفت کننده خاکستر است که باعث می‌شود قیر مقاومت کافی را در دماهای بالا حفظ کند و تغییر شکل‌های دائمی کمتری را تجربه کند. تحقیقات قبلی نیز نشان می‌دهد



شکل ۷. الف) مقادیر بازیابی کرنش (R%) و ب) انطباق خزشی غیر قابل بازیافت (Jnr) در سطح تنش ۰/۱ کیلو پاسکال

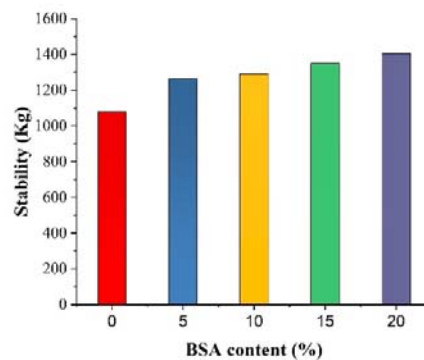


شکل ۸. الف) مقادیر بازیابی کرنش (R%) و ب) انطباق خزشی غیر قابل بازیافت (Jnr) در سطح تنش ۳/۲ کیلو پاسکال

۳-۳- خواص مکانیکی آسفالت

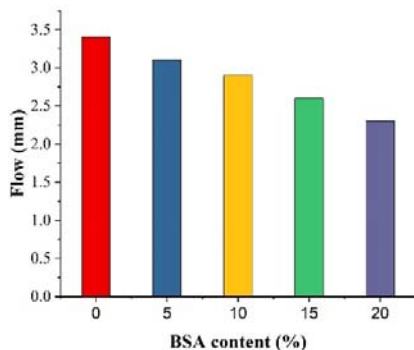
۳-۳-۱- نتایج آزمایش مارشال

استقامت و روانی مارشال نمونه‌های حاوی مقدار قیر بهینه با درصد افزودنی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر استقامت مارشال در شکل (۹) آمده است. این مقادیر میانگین سه تکرار هستند. واضح است BSA منجر به افزایش مقادیر پایداری مارشال شده است. در واقع اصلاح‌کننده چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی و سفتی قیرها را افزایش داده است. از این رو، پایداری مخلوط‌های حاوی BSA دارای مقادیر بالاتری نسبت به نمونه‌های شاهد هستند. حداقل مقدار مجاز استحکام مارشال برای ترافیک سنگین ۸۰۰ کیلوگرم است که در تمامی نمونه‌ها رعایت شده است.



شکل ۹. نتایج استقامت مارشال نمونه‌های مخلوط آسفالتی

همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، مقدار روانی نمونه شاهد در مقایسه با مخلوط آسفالتی اصلاح شده بیشتر است. سختی افزایش یافته در اثر افزودن BSA موجب کاهش میزان روانی در مخلوط آسفالتی اصلاح شده می‌گردد. قیر با ویسکوزیته بالاتر سبب افزایش مقاومت برشی آن شده و مقاومت مخلوط‌های آسفالتی را در برابر روانی افزایش می‌دهد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که در دماهای بالا، مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده در مقایسه با مخلوط آسفالتی کنترل بهتر می‌تواند در برابر تغییر شکل دائمی مقاومت کند و BSA عملکرد مخلوط آسفالتی اصلاح شده را بهبود داده است. نمونه‌ی حاوی ۲۰ درصد افزودنی بیشترین استقامت مارشال و کمترین روانی را دارا هستند. به طوری که استقامت آن نسبت به مخلوط آسفالتی شاهد ۲۳ درصد و روانی مارشال ۴۷ درصد بهبود را نشان می‌دهد. نتایج مشابهی در مطالعات انجام شده بر روی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با خاکستر زیست توده‌ها مشاهده شد (Ameli et al., 2020; Arabani & Esmaeili, 2020).



شکل ۱۰. نتایج روانی مارشال نمونه‌های مخلوط آسفالتی

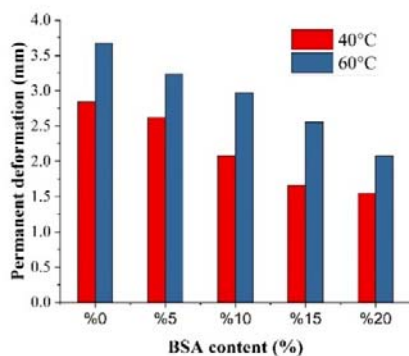
جدول ۴. شرایط ترافیکی قیرها

دما		نوع قیر
۷۰°C	۶۴°C	
-	S	قیر پایه
S	H	قیر اصلاح شده با ۵٪ خاکستر BSA
-	H	قیر اصلاح شده با ۱۰٪ خاکستر BSA
S	H	قیر اصلاح شده با ۱۵٪ خاکستر BSA
S	H	قیر اصلاح شده با ۲۰٪ خاکستر BSA

۳-۳-۳- نتایج آزمایش بار محوری مکرر

تحت شرایط بار مکرر، مخلوط آسفالتی تغییر شکل پلاستیک یا تغییر شکل دائمی را تجربه خواهد کرد. با استفاده از آزمایش بار محوری مکرر با اندازه‌گیری تغییر شکل دائمی به‌عنوان تابعی از تعداد سیکل بارگذاری به بررسی مقاومت مخلوط‌ها در برابر تغییر شکل در دمای بالا پرداخته شده است. آزمایش بار محوری مکرر بر روی نمونه‌های آسفالتی اصلاح شده با مقادیر مختلف BSA، در دمای ۴۰ و ۶۰ درجه سانتیگراد و تحت تنش ۳۰۰ کیلوپاسکال انجام شد. شکل (۱۱) عدد جریان نمونه‌های اصلاح شده را نشان می‌دهد. مطابق این شکل عدد جریان با افزایش مقدار اصلاح‌کننده افزایش می‌یابد. افزایش عدد جریان به دلیل افزایش سفتی مخلوط و ویسکوزیته قیر اصلاح شده است و عدد جریان بالاتر نشان‌دهنده مقاومت بیشتر مخلوط‌های آسفالتی در برابر شیار شدن است. بر اساس نتایج، استفاده از BSA عملکرد شیارشدگی نمونه‌ها را بهبود می‌بخشد.

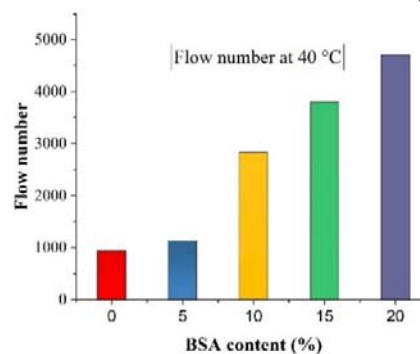
شکل (۱۲) تغییر شکل دائمی نمونه‌های اصلاح شده با درصد‌های مختلف BSA را در دمای ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد در ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری را نشان می‌دهد. مطابق نتایج قیر پایه تغییر شکل دائمی بیشتری را نسبت به مخلوط آسفالت اصلاح شده با خاکستر ساقه جو دارد. با افزایش محتوای BSA، تغییر شکل دائمی کاهش می‌یابد. دلیل این پدیده این است که هر چه مقدار اصلاح‌کننده در مخلوط بیشتر باشد، مخلوط حاصل سفت‌تر خواهد بود و در برابر تغییر شکل دائمی مقاوم‌تر است. با افزایش دما در همه‌ی نمونه‌ها تغییر شکل دائمی افزایش یافته است. در هر دو دما نمونه حاوی ۲۰ درصد BSA کمترین تغییر شکل را نشان می‌دهد. به طوری که در دمای ۴۰ درجه ۴۵ درصد و در دمای ۶۰ درجه ۴۳ درصد بهبود نسبت به نمونه شاهد نشان می‌دهد. همچنین، نتایج تست بار محوری مکرر با نتایج مطالعات قبلی در بهبود مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با خاکسترها مطابقت دارد (Ameli et al., 2020; Arabani & Esmaeli, 2020).



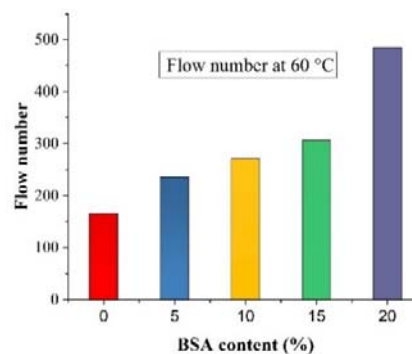
شکل ۱۲. تغییر شکل دائمی نمونه‌های مخلوط آسفالتی اصلاح شده در دمای ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد

باید توجه داشت در آزمایش بار محوری نمونه‌ها از شرایط مهار جانبی برخوردار نیستند و نسبت به واقعیت دچار تغییر شکل بیشتری می‌شوند. بنابراین تغییر شکل دائمی ایجاد شده عمق شیارشدگی را نشان نمی‌دهد و صرفاً برای مقایسه نمونه‌های مختلف کاربرد دارد.

(الف)



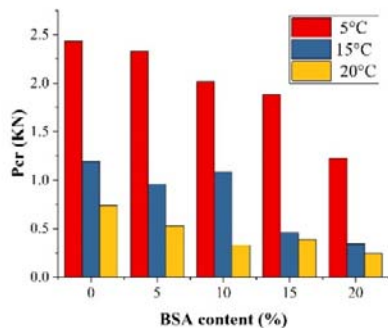
(ب)



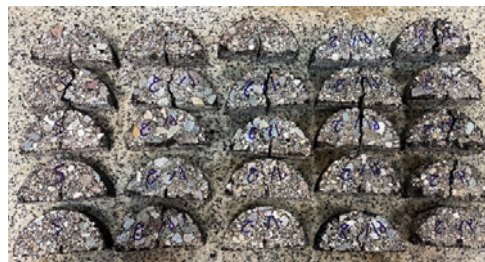
شکل ۱۱. نتایج عدد جریان نمونه‌های مخلوط آسفالتی در دمای (الف) ۴۰ و دمای (ب) ۶۰ درجه سانتی‌گراد

۳-۳-۴- نتایج آزمایش خمش نیم دایره‌ای بر روی نمونه‌های SCB

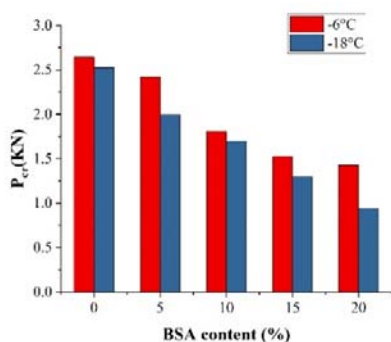
با انجام آزمایش‌های شکست نمونه‌های مخلوط آسفالتی، پارامترهای شکست شامل پارامترهای حداکثر نیروی لازم برای شکست نمونه‌ها، مقدار انرژی لازم برای شکست نمونه‌ها و چقرمگی شکست محاسبه شد. در ادامه، هر کدام از این پارامترها برای دمای میانه و دمای پایین مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه‌های SCB در شکل (۱۳) آورده شده است.



شکل ۱۴. بار بحرانی شکست نمونه‌های مخلوط آسفالتی در دمای میانه



شکل ۱۳. نمونه‌های SCB



شکل ۱۵. بار بحرانی شکست مخلوط‌های آسفالتی در دمای پایین

انرژی شکست نمونه‌های آسفالتی در دماهای پایین و متوسط، در شکل (۱۶) و (۱۷) ارائه شده است. انرژی شکست به ظرفیت باربری و مقدار جابه‌جایی بستگی دارد. بر اساس تئوری مکانیک شکست، ترک خوردن یک ماده فرایند مداوم مصرف انرژی است. هر چه انرژی شکست بیشتر باشد، احتمال ترک خوردن مواد کمتر می‌شود. مطابق شکل‌های زیر در دمای متوسط و پایین، با افزایش BSA در مخلوط‌های آسفالتی، مقدار انرژی شکست کاهش می‌یابد. می‌توان گفت BSA موجب تردشدگی و شکنندگی نمونه‌های آسفالتی شده و مقاومت آن‌ها را در برابر ترک خوردگی کاهش می‌دهد. یافته‌های تحقیقات قبلی نیز نشان می‌دهد که استفاده از انواع خاکستر در اصلاح قیر عمر خستگی و مقاومت در برابر ترک خوردگی دمای پایین مخلوط آسفالتی را کاهش می‌دهد (Arabani & Esmaeili, 2020; Meng et al., 2023).

۴- نتایج

نتایج مربوط به بار بحرانی شکست برای مخلوط‌های آسفالتی مورد مطالعه در این تحقیق در شکل (۱۴) و (۱۵) آورده شده است. P_{Cr} یا بار بحرانی حداکثر نیروی لازم برای شکست نمونه‌ها است. در واقع حداکثر نیرویی است که نمونه‌های آسفالتی می‌توانند قبل از ترک خوردگی تحمل کنند. اگر نیرویی بیش از P_{Cr} به نمونه وارد شود، شروع به ترک خوردگی خواهد کرد (Ayatollahi & Pirmohammad, 2013). مطابق شکل در دمای متوسط حداکثر نیروی لازم برای شکست مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده کاهش یافته است. در واقع در این حالت ریز ترک‌های بیشتری بر روی نمونه نسبت به نمونه شاهد ایجاد شده است و مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر تحمل بیشینه نیرو کاهش یافته است. بنابراین اصلاح کننده BSA مقاومت مخلوط آسفالتی را در دمای میانه و در برابر ترک‌های خستگی کاهش داده است. همچنین در دمای پایین اصلاح کننده شکنندگی مخلوط آسفالتی را افزایش داده و موجب کاهش مقدار حداکثر نیروی لازم برای شکست می‌شود. این کاهش مقاومت می‌تواند به دلیل کاهش زیاد شکل پذیری قیرهای اصلاح شده باشد که سبب شکنندگی بیشتر مخلوط‌های آسفالتی در دمای میانه و پایین شده است.

به‌عنوان نوعی از ضایعات کشاورزی برای اصلاح قیر و تأثیر آن بر خصوصیات عملکردی مخلوط آسفالتی پرداخته است. نتایج حاصل از آزمایشات انجام‌شده بر روی خاکستر ساقه جو، قیر و مخلوط آسفالتی را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه نمود:

خاکستر ساقه جو دارای ترکیبات شیمیایی مفیدی مانند SiO_2 است که ۴۴/۹۱ درصد آن را تشکیل می‌دهد. که سبب ایجاد پیوندهای قوی در نمونه‌های بتن آسفالتی می‌شود. خاکستر ساقه جو دارای ساختار متخلخل، غیریکنواخت و نامنظم است و باعث کاهش روانی آسفالت می‌شود. افزودن خاکستر جو و افزایش مقدار آن در قیر باعث کاهش درجه نفوذ و افزایش نقطه نرم‌شدن قیر می‌شود. همچنین با افزایش میزان BSA شکل‌پذیری کاهش یافته و سفتی قیر افزایش می‌یابد.

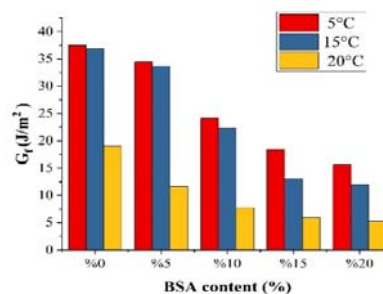
نتایج آزمایش MSCR روی قیر PAV نشان داد افزودن BSA به قیر سبب افزایش R٪ و کاهش Jnr در هر دو سطح تنش (۰/۱ و ۳/۲ کیلو پاسکال) شده و بازیابی الاستیک را افزایش می‌دهد بنابراین قیر اصلاح شده تغییر شکل‌های دائمی کمتری را تجربه می‌کند. سختی افزایش‌یافته در اثر افزودن BSA موجب کاهش میزان روانی در مخلوط آسفالتی اصلاح شده می‌گردد و منجر به افزایش مقادیر پایداری مارشال می‌شود.

به دلیل افزایش سفتی مخلوط، عدد جریان قیر اصلاح شده افزایش یافت که نشان‌دهنده مقاومت بیشتر مخلوط‌های آسفالتی در برابر شیار شدن است

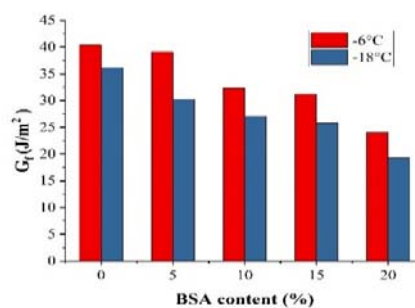
آسفالت پایه تغییر شکل دائمی بیشتری را نسبت به مخلوط آسفالت اصلاح شده با خاکستر ساقه جو نشان داد و با وجود BSA و افزایش مقدار آن، تغییر شکل دائمی کاهش یافت که نشان‌دهنده عملکرد خوب مخلوط آسفالتی اصلاح شده با BSA در دمای بالا است.

نتایج آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای نشان داد BSA سبب کاهش مقاومت مخلوط آسفالتی اصلاح شده در دمای متوسط و ترک‌خوردگی خستگی می‌شود. همچنین در دمای پایین مقاومت مخلوط آسفالتی را کاهش داده و سبب افزایش ترک‌خوردگی دمای پایین می‌شود.

باتوجه به نتایج آزمایشات و بررسی تأثیر مقادیر مختلف BSA بر خصوصیات قیر و عملکردی مخلوط‌های آسفالتی، استفاده از ۲۰ درصد وزنی قیر BSA بمنظور اصلاح قیر بهترین نتیجه را در بهبود خصوصیات عملکردی مخلوط آسفالتی در

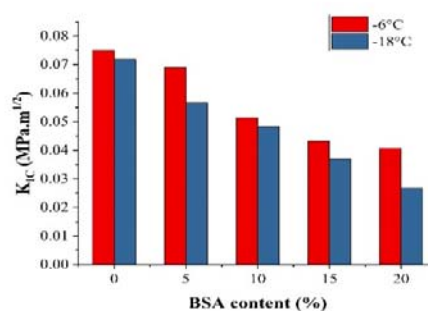


شکل ۱۶. انرژی شکست نمونه‌های مخلوط آسفالتی در دمای میانی



شکل ۱۷. انرژی شکست نمونه‌های مخلوط آسفالتی در دمای پایین

شکل (۱۸) نتایج چقرمگی شکست نمونه‌های آسفالتی را در دمای پایین نشان می‌دهد. مطابق شکل زیر با افزایش میزان BSA میزان چقرمگی شکست کاهش یافته است و این نتایج مجدداً تأیید می‌نماید که نمونه‌های آسفالتی اصلاح شده نسبت به نمونه‌ی شاهد مقاومت کمتری در برابر ترک‌خوردگی دمای پایین داشته و نمی‌توانند در برابر رشد ترک مقاومت کنند.



شکل ۱۸. چقرمگی شکست نمونه‌های مخلوط آسفالتی در دمای پایین

۵- نتیجه‌گیری

با هدف بکارگیری بالقوه رویکردهای پایدارتر و سازگار با محیط‌زیست این تحقیق به بررسی تأثیر خاکستر ساقه جو

matrix asphalt (SMA) mixture. *Construction and Building Materials*, 236, 117557.

-Arabani, M., Ebrahimi, M., Shalchian, M. M., & Majd Rahimabadi, M. (2024). Influence of Biomass-Modified Asphalt Binder on Rutting Resistance. *Advances in Civil Engineering*, 2024.

-Arabani, M., & Esmaaeli, N. (2020). Laboratory evaluation on effect of groundnut shell ash on performance parameters of asphalt binder and mixes. *Road Materials and Pavement Design*, 21(6), 1565–1587.

-Arabani, M., Shabani, A., & Hamedi, G. H. (2019). Experimental investigation of effect of ceramic fibers on mechanical properties of asphalt mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(9), 4019203.

-Arabani, M., & Tahami, S. A. (2017). Assessment of mechanical properties of rice husk ash modified asphalt mixture. In *Construction and Building Materials*, Vol. 149, 350–358.

doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.127

-Arabani, M., & Yousefpour Taleghani, M. (2017). Rutting behavior of hot mix asphalt modified by polyvinyl chloride powder. *Petroleum Science and Technology*, 35(15), 1621–1626.

-Ayatollahi, M.-R., & Pirmohammad, S. (2013). Temperature effects on brittle fracture in cracked asphalt concretes. *Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal*, 45(1), 19–32.

-Bartoňová, L. (2015). Unburned carbon from coal combustion ash: An overview. *Fuel Processing Technology*, 134, 136–158.

-Bui, H. H., & Saleh, M. (2021). Effects of specimen size and loading conditions on the fracture behaviour of asphalt concretes in the SCB test. *Engineering Fracture Mechanics*, 242, 107452.

-Bujanga, M., Bakiea, N., Bujanga, U. H., Kiana, L. S., Juslia, E. A., & Azahara, W. N. A. W. (2023). Characteristics of Oil Palm Fruit Ash as Binder in Asphaltic Concrete. *Jurnal Kejuruteraan*, 35(4), 913–921.

-Cai, J., Xue, Y. J., Wan, L., Wu, S. P., & Jenkins, K. (2013). Study on basic properties and high-temperature performance of rice-husk-ash-modified-asphalt. *Applied Mechanics and Materials*, 333, 1889–1894.

-Choudhary, J., Kumar, B., & Gupta, A. (2020).

دمای بالا داشته و افزودن ۵ درصد وزنی قیر BSA برای اصلاح قیر کمترین آسیب را در ترک خوردگی دمای پایین و میانی سبب می‌شود.

۶- پی‌نوشت‌ها

1. Performance Graded
2. X-ray fluorescence spectrometry
3. Fourier transform Infrared Spectroscopy
4. Scanning Electron Microscope
5. Multiple Stress Creep Recovery test
6. Rolling Thin Film Oven (RTFO) test
7. Repeated load axial test
8. Flow number
9. Semi-Circular Bend (SCB)
10. Critical Load
11. Fracture Energy
12. Fracture Toughness

۷- مراجع

-AASHTO. (2014). AASHTO T 350: Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR). *American Association of State Highway and Transportation Officials*.

-Abdelmagid, A. A. A., Qiu, Y., & Yang, E. (2023). Laboratory investigation of the impact of peanut husk ash as an asphalt binder modifier on physical and rheological properties. *Construction and Building Materials*, 401, 132920.

-Abo-Shanab, Z. L., Ragab, A. A., & Naguib, H. M. (2021). Improved dynamic mechanical properties of sustainable bio-modified asphalt using agriculture waste. *International Journal of Pavement Engineering*, 22(7), 905–911.

-Aboutalebi Esfahani, M. (2021). Influence of herbal and mineral fillers on physical and rheological properties of bitumen. *Australian Journal of Civil Engineering*, 19(1), 35–45.

-Akarsh, P. K., Ganesh, G. O., Marathe, S., & Rai, R. (2022). Incorporation of Sugarcane Bagasse Ash to investigate the mechanical behavior of Stone Mastic Asphalt. *Construction and Building Materials*, 353, 129089.

-Ameli, A., Babagoli, R., Norouzi, N., Jalali, F., & Mamaghani, F. P. (2020). Laboratory evaluation of the effect of coal waste ash (CWA) and rice husk ash (RHA) on performance of asphalt mastics and Stone

- Meng, Y., Kong, W., Gou, C., Deng, S., Hu, Y., Chen, J., & Fan, L. (2023). A review on evaluation of crack resistance of asphalt mixture by semi-circular bending test. *Journal of Road Engineering*.
- Mirkouei, A., Haapala, K. R., Sessions, J., & Murthy, G. S. (2017). A review and future directions in techno-economic modeling and optimization of upstream forest biomass to bio-oil supply chains. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 15–35.
- Rahimi, Z., Anand, A., & Gautam, S. (2022). An overview on thermochemical conversion and potential evaluation of biofuels derived from agricultural wastes. *Energy Nexus*, 100125.
- Saha, G., & Biligiri, K. P. (2016). Homothetic behaviour investigation on fracture toughness of asphalt mixtures using semicircular bending test. *Construction and Building Materials*, 114, 423–433.
- Shafabakhsh, G. H., & Ani, O. J. (2015). Experimental investigation of effect of Nano TiO₂/SiO₂ modified bitumen on the rutting and fatigue performance of asphalt mixtures containing steel slag aggregates. *Construction and Building Materials*, 98, 692–702.
- TP105, A. (2013). Standard method of test for determining the fracture energy of asphalt mixtures using the semicircular bend geometry (SCB). *AASHTO, Washington DC*.
- Xue, Y., Wu, S., Cai, J., Zhou, M., & Zha, J. (2014). Effects of two biomass ashes on asphalt binder: Dynamic shear rheological characteristic analysis. *Construction and Building Materials*, 56, 7–15.
- Utilization of solid waste materials as alternative fillers in asphalt mixes: A review. *Construction and Building Materials*, 234, 117271.
- DD, B. S. (1990). 185. *Method for the Determination of Creep Stiffness of Bituminous Aggregate Mixtures Subject to Unconfined Uniaxial Loading*, British Standards Institution, Draft for Development DD-185.
- Ebrahimi, M. (2023). *Investigation of Mechanical Properties of Asphalt Mixtures Containing Barley Stalk Ash*. Master thesis of Highway and Transportation Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.
- Fakhri, M., & Norouzi, M. A. (2022). Rheological and ageing properties of asphalt bio-binders containing lignin and waste engine oil. *Construction and Building Materials*, 321, 126364.
- Fareed, A., Zaidi, S. B. A., Ahmad, N., Hafeez, I., Ali, A., & Ahmad, M. F. (2020). Use of agricultural waste ashes in asphalt binder and mixture: A sustainable solution to waste management. *Construction and Building Materials*, 259, 120575.
- Jeffry, S. N. A., Jaya, R. P., Hassan, N. A., Yaacob, H., & Satar, M. K. I. M. (2018). Mechanical performance of asphalt mixture containing nano-charcoal coconut shell ash. *Construction and Building Materials*, 173, 40–48.
- Kett, I. (1998). Marshall Method of Mix Design: Reference—ASTM Designation: D 1559. *Asphalt Materials & Mix Design Manual*; Elsevier Inc.: Amsterdam, The Netherlands, 102–119.

Investigation of Mechanical Properties of Asphalt Mixtures Containing Barley Stalk Ash

*Mohadeseh Ebrahimi, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering,
University of Guilan, Rasht, Iran.*

*Mahyar Arabani, Professor, Department of Civil Engineering,
University of Guilan, Rasht, Iran.*

*Mohammad Yousefpour Taleghani, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering,
University of Guilan, Rasht, Iran.*

E-mail:arabani@guilan.ac.ir

Received: November 2024- Accepted: February 2025

ABSTRACT

In recent years, much research has been conducted on using bio-renewable materials. For instance, agricultural residues are used as a bitumen modifier in asphalt pavements. Burning biomass to provide energy or to remove it is always associated with waste production in the form of ash. Ash disposal can become an environmental crisis over time. These natural materials exhibit outstanding characteristics for enhancing bitumen, while being cost-effective and environmentally friendly. The present research investigates the effect of adding barley stalk ash (BSA) on the mechanical properties of asphalt mixture. To this end, bitumen was mixed with 5%, 10%, 15%, and 20% modifier. After examining the chemical properties and morphology of bitumen and ash, conventional asphalt binder tests, multiple stress creep recovery test (MSCR), Marshall Resistance, repeated load axial test (RLA) at high temperatures, and semi-circular bend test at intermediates and low temperatures were conducted. The results showed that BSA reduces the degree of penetration and plasticity and increases the softening point and hardness of bitumen. MSCR results also showed that modified bitumen experiences fewer permanent deformations at high temperatures. Furthermore, the repeated axial load test results revealed that BSA improves the high-temperature performance of the asphalt mixture and makes it more suitable for use in tropical regions. The results of the semi-circular bending test showed that barley stalk ash lowers the fatigue resistance of asphalt mixture at intermediate temperatures and cracking at low temperatures.

Keywords: Mechanical Properties, Barley Stalk Ash, Modified Bitumen, Hot Mix Asphalt