

بهینه‌سازی و تقویت مخلوط‌های آسفالتی گرم: اثرات ترکیبی پودر لاستیک و ساسوبیت بر دوام و مقاومت

مقاله علمی - پژوهشی

*امیر امینی (نویسنده مسئول)، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: amiramini@iau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۰ - پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۰۵

صفحه ۱۲۴-۱۰۹

چکیده

تغییر در مشخصات فنی قیر آسفالتی و دانه‌بندی مصالح سنگی نقش اساسی در بهبود عملکرد و دوام روسازی‌های آسفالتی دارد. در این مطالعه، اثر هم‌افزایی پودر لاستیک بازیافتی (GTR) و افزودنی ساسوبیت بر ویژگی‌های مکانیکی و دوام مخلوط‌های آسفالت گرم لاستیکی مورد بررسی قرار گرفت. هدف اصلی تحقیق، ارتقای مقاومت در برابر خزش، شیارشدگی و افزایش عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی بود. آزمایش‌های جامعی شامل تعیین ویسکوزیته چرخشی قیرها، ارزیابی رده عملکردی در دماهای بالا و پایین، آزمون‌های خزش و بازگشت چندگانه، جاروب دامنه خطی، خزش دینامیکی و خمشی چهار نقطه‌ای روی مخلوط‌ها و قیرها انجام شد. نتایج نشان داد که ترکیب هم‌زمان GTR و ساسوبیت باعث افزایش چشمگیر مقاومت در برابر خزش، طول عمر خستگی و مقاومت در برابر شیارشدگی در مخلوط‌های SMA و قیر اصلاح شده می‌شود. با بهره‌گیری از روش بهینه‌سازی سطح پاسخ (RSM)، ترکیب بهینه شامل ۱۴.۷٪ GTR، ۱.۸۶٪ ساسوبیت، دمای اختلاط ۱۶۷.۸ درجه سانتی‌گراد و ۶.۹۰٪ قیر مشخص شد. این ترکیب نه تنها عملکرد بهینه در مقاومت به خزش، افزایش عمر خستگی و بهبود مقاومت حرارتی ارائه داد، بلکه موجب کاهش تغییر شکل پلاستیک مخلوط‌ها نیز شد. علاوه بر بهبود خواص فنی، کاهش دمای اختلاط باعث صرفه‌جویی انرژی و کاهش آلایندگی‌های زیست‌محیطی گردید. در نهایت، مدل RSM توانست خواص مخلوط‌های اصلاح شده را با دقت بالا پیش‌بینی و بهینه‌سازی کند، و راهکاری مؤثر و اقتصادی برای تولید آسفالت‌های با دوام و دوستدار محیط زیست ارائه داد. این یافته‌ها چشم‌انداز جدیدی برای استفاده از مواد بازیافتی و افزودنی‌های پلیمری در بهبود کیفیت روسازی‌های آسفالتی فراهم می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: روسازی پایدار، آسفالت گرم لاستیکی، مشخصات عملکردی، روش بهینه‌سازی پاسخ سطح، اثر هم‌افزایی

۱-مقدمه

کاهش دوام و کیفیت لایه‌های رویه می‌شوند (Amini, 2026; Amini & Soltanian, 2025). از سوی دیگر، شیارشدگی که به عنوان یک تغییر شکل دائمی در نظر گرفته می‌شود، بیشتر در دماهای بالا و تحت فشارهای مکرر تاپرها ایجاد می‌شود و می‌تواند عملکرد سطح راه را به طور قابل توجهی کاهش دهد. عوامل متعددی در تشدید این نوع خرابی‌ها نقش دارند، از جمله دانه‌بندی مصالح، کیفیت و مقدار قیر، فشار تماس تاپر، نوع

یکی از مسائل کلیدی در مهندسی روسازی، بروز خرابی‌های زودهنگام سطح راه‌ها است که شامل ترک‌های خستگی و شیارشدگی می‌شود. این خرابی‌ها علاوه بر افزایش چشمگیر هزینه‌های نگهداری، می‌توانند ایمنی کاربران جاده را نیز به خطر بیندازند. ترک‌های ناشی از خستگی معمولاً در دماهای متوسط و تحت بارهای تکراری ترافیکی شکل می‌گیرند. این ترک‌ها در اثر تنش‌های کششی و خمشی به وجود آمده و به تدریج موجب

Hashemifar, & Goli, 2021; Hasan Ziari, Goli, & Amini, 2016).

برای کاهش این مشکلات، ترکیب پودر لاستیک بازیافتی با افزودنی‌هایی مانند ساسویت که در فناوری آسفالت گرم (WMA) کاربرد دارند، پیشنهاد شده است. تعامل بین قیر و افزودنی‌هایی مانند پودر لاستیک بازیافتی و ساسویت نقش مهمی در بهبود خواص مکانیکی و رئولوژیکی آسفالت ایفا می‌کند. ساسویت، یک ماده اصلاح‌کننده مبتنی بر موم، در آسفالت WMA ساختار سه‌بعدی شبکه‌ای ایجاد می‌کند که موجب بهبود پایداری حرارتی و رفتار رئولوژیکی مخلوط می‌شود. با این حال، استفاده بیش از حد از ساسویت می‌تواند این اثرات مثبت را کاهش دهد. (Amini & Hajian, 2025; Amini & Parvizi, 2024). با این حال، استفاده بیش از حد از ساسویت می‌تواند این اثرات مثبت را کاهش دهد.

در مقابل، تأثیر پودر لاستیک بازیافتی عمدتاً فیزیکی است؛ ذرات لاستیک با جذب اجزای آروماتیک قیر باعث تورم آن می‌شوند. این فرآیند تحت تأثیر عواملی مانند محتوای آروماتیک، دما و سطح ویژه ذرات لاستیک قرار دارد و ویسکوزیته قیر اصلاح‌شده را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به طور کلی، هر یک از این افزودنی‌ها از طریق مکانیزم متفاوتی قیر را اصلاح می‌کنند: ساسویت با ایجاد ساختار شبکه‌ای و پودر لاستیک بازیافتی با تعامل فیزیکی و جذب اجزای قیر، خواص مکانیکی و رئولوژیکی مخلوط آسفالتی را بهبود می‌بخشند (Amini & Akbari, 2025; Amini & Imaninasab, 2018; Hasan Ziari et al., 2016).

استفاده از WMA به جای آسفالت HMA می‌تواند مصرف انرژی را ۱۸ تا ۳۰ درصد، مصرف سوخت فسیلی را ۱۸ درصد، آلودگی هوا را ۲۴ درصد و مصرف سوخت را ۲۰ تا ۲۵ درصد کاهش دهد. همچنین فناوری WMA فرآیند اجرای آسفالت را با بهبود کارکرد، تسریع جریان ترافیک در محل پروژه، کاهش دمای اختلاط و تراکم و بهبود عملیات پخش و متراکم‌سازی آسان‌تر می‌کند (Jamshidi, Golchin, Hamzah, & Turner, 2015). فخری و آزامی (Fakhri & Azami, 2017) نشان دادند افزودنی ساسویت خواص مکانیکی آسفالت مانند حساسیت به رطوبت، ترک‌های خستگی و تغییر شکل دائمی را بهبود می‌بخشد. هم‌افزایی فناوری WMA و قیر لاستیکی، روشی موثر برای مقابله با گرمایش جهانی و بازیافت لاستیک‌های فرسوده است. یانگ و همکاران (Yang et al., 2017) گزارش دادند که WMA مصرف سوخت را ۱۳ درصد کاهش و مقاومت در برابر شیارشدگی را افزایش می‌دهد. کانستری و همکاران (Canestrari, Graziani, & Bahia, 2013) دریافتند ساسویت مقاومت خزشی را افزایش، مقاومت ترک خوردگی را کاهش و دمای

بارگذاری و شرایط محیطی. شناسایی و کنترل این عوامل برای طراحی و نگهداری مؤثر روسازی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. (Ameri, Mirzaiyan, & Amini, 2018; Hassan Ziari, & Nasiri, Amini, & Ferdosian, 2019).

آسفالت با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای (SMA) به‌عنوان یکی از فناوری‌های پیشرفته در طراحی مخلوط‌های آسفالتی شناخته می‌شود و به دلیل ویژگی‌هایی مانند قفل‌شدگی بهتر سنگدانه‌ها، استفاده بیشتر از مصالح درشت‌دانه و بافت سطحی زیر، عملکرد مناسبی در برابر بارگذاری‌های سنگین ارائه می‌دهد. SMA به علت مقاومت بالایش در برابر شیارشدگی، دوام طولانی، کاهش ترک‌های انعکاسی و کاهش نویز، به‌ویژه در جاده‌های پرتراфик، مورد توجه قرار گرفته است (Brown, Mallick, Haddock, & Bukowski, 1997; Qiu, Lum, & KM, 2006; S. Wu, Xue, Ye, & Chen, 2007). SMA در دهه ۱۹۶۰ این مخلوط در دهه ۱۹۶۰ در آلمان برای مقابله با آسیب‌های ناشی از لاستیک‌های زنجیردار طراحی شد. در SMA، شبکه‌ای متراکم از سنگدانه‌های درشت در ملات قیر غنی ایجاد می‌شود که مقاومت بالایی در برابر شیارشدگی فراهم می‌کند. عملکرد برتر این مخلوط ناشی از تماس مستقیم سنگدانه‌ها با یکدیگر است که باعث توزیع یکنواخت بار و کاهش تغییر شکل دائمی می‌شود. بهبود عملکرد SMA نیازمند توجه ویژه به بسته‌بندی و قفل‌شدگی سنگدانه‌ها است. با بهینه‌سازی اندازه و چینش سنگدانه‌ها، می‌توان دوام و پایداری آسفالت را در شرایط محیطی مختلف افزایش داده و به استفاده پایدارتر از مخلوط‌های آسفالتی دست یافت (S. Wu et al., 2007; Zakerzadeh, Shahbodagh, Ng, & Khalili, 2024). با این حال، درصد بالای قیر و افزایش خلل و فرج در این نوع مخلوط‌ها می‌تواند منجر به جداشدگی قیر و کاهش مقاومت مکانیکی در برابر بارهای ترافیکی شود. برای غلبه بر این محدودیت، استفاده از افزودنی‌های اصلاح‌کننده مانند پودر لاستیک و مواد الیافی به‌عنوان راهکاری مؤثر پیشنهاد شده است (Amjadian, Ziari, Sharifi Moghaddam Kakhki, & Abbaspoor, 2022).

در سال‌های اخیر، به دلایل زیست‌محیطی و اقتصادی، استفاده از پودر لاستیک بازیافتی حاصل از تایرهای فرسوده، توجه قابل توجهی در صنعت آسفالت به خود جلب کرده است. این افزودنی با ایجاد شبکه‌های پلیمری درون قیر، می‌تواند خواص مهمی از جمله مقاومت در برابر خستگی و شیارشدگی را بهبود دهد. با وجود این مزایا، افزایش ویسکوزیته و کاهش قابلیت تراکم‌پذیری قیر اصلاح‌شده با پودر لاستیک بازیافتی، چالش‌هایی در فرآیند تولید و اجرای مخلوط آسفالتی ایجاد می‌کند (Amini, Ziari, & Goli, 2018; Amini, Ziari, Saadatjoo, & Goli, 2021).

تدریجی به این مخلوط افزوده و عملیات اختلاط اولیه به مدت ۳۰ دقیقه با سرعت ۶۰۰ دور بر دقیقه انجام شد. پس از آن، با افزایش دما به ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد، مخلوط نهایی با استفاده از میکسر برشی با سرعت ۴۰۰۰ دور بر دقیقه و به مدت ۹۰ دقیقه تهیه گردید. سپس ساسوبیت به مخلوط قیر لاستیکی اضافه شد و در حدود ۳۰ دقیقه در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد اختلاط نهایی انجام شد.

پس از تهیه قیرهای اصلاح شده، طراحی مخلوط‌های آسفالتی با رعایت دستورالعمل ASTM D6926 صورت گرفت. در این فرایند، میزان بهینه قیر با در نظر گرفتن الزامات مکانیکی و حجمی برای مخلوط‌های SMA تعیین شد. درصد قیر در بازه ۶ تا ۷٫۵ درصد و با گام ۰٫۵ درصد بررسی گردید. معیارهای تعیین OBC شامل فضای خالی هوایی ۴٪، فضای خالی در مصالح معدنی حداقل ۱۷٪ و پایداری مارشال بیش از ۶٫۲ کیلو نیوتن بود. برای آماده‌سازی نمونه‌ها، مصالح سنگی به مدت ۱۲ ساعت در دمای ۱۶۵ درجه سانتی‌گراد گرم شده و سپس با قیر اصلاح شده مخلوط شدند. دمای اختلاط و تراکم با استفاده از ویسکومتر چرخشی و بر پایه دامنه ویسکوزیته مشخص شده در ASTM-D2493 (۰٫۱۷) پاسکال‌ثانیه برای اختلاط و ۰٫۲۸ پاسکال‌ثانیه برای تراکم تعیین شد. برای بررسی رفتار خستگی، نمونه‌های تیر خمشی با فضای خالی هوایی $4,0\% \pm 0,5\%$ و با استفاده از کامپکتور چرخ غلتکی و برای آزمون‌های خزش دینامیکی از کامپکتور چرخشی سوپریو استفاده شد. بر اساس ویسکوزیته قیرها، دمای ساخت و تراکم مخلوط‌های آسفالتی HMA و WMA مطابق با جدول ۱ تعیین شد.

۲-۳- آزمایش‌های عملکردی

در این مطالعه، برای ارزیابی خواص رئولوژیکی و ویسکوالاستیک قیرهای اصلاح شده، چندین آزمون استاندارد انجام شد. ابتدا آزمون رئومتر برشی دینامیکی (DSR) مطابق با استاندارد AASHTO T315 به منظور بررسی مقاومت قیر در دماهای بالا و شرایط بارگذاری سنگین انجام گردید. برای ارزیابی رفتار قیر در دماهای پایین و مقاومت آن در برابر ترک‌های سرمای، آزمون رئومتر تیر خمشی (BBR) بر روی نمونه‌های پیر شده در دستگاه PAV انجام شد. همچنین، برای تعیین پتانسیل شیارشدگی قیر، آزمون خزش و بازگشت در چند سطح تنش (MSCR) مطابق استاندارد D7405 اجرا شد (Hassan Ziari, Amini, & Goli, 2020b; Hassan Ziari, Nasiri, et al., 2019). این آزمون شامل اعمال ۱۰ سیکل بارگذاری به نمونه قیر پیر شده کوتاه‌مدت بود. علاوه بر این، آزمون جاروب دامنه خطی AASHTO TP101 برای بررسی رفتار خستگی قیرهای پیر شده

اختلاط آسفالت را ۲۵ تا ۳۵ درصد پایین می‌آورد. صبحی و همکاران (Sobhi, Yousefi, & Behnood, 2020) با وجود افزایش مقاومت مکانیکی با ساسوبیت، کاهش مقاومت در برابر رطوبت را نیز گزارش کردند.

بنابراین، فناوری WMA با کاهش دمای اختلاط و تراکم آسفالت، علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، موجب کاهش پیرشدگی قیر و بهبود شرایط اجرایی پروژه‌های روسازی می‌شود. در این فناوری، ساسوبیت به‌عنوان یک افزودنی مبتنی بر موم، با کاهش ویسکوزیته قیر، امکان تولید و پخش مخلوط آسفالتی در دماهای پایین‌تر را فراهم می‌کند (Hurley & Prowell, 2005; Rubio, Martínez, Baena, & Moreno, 2012).

مطالعات متعدد نشان داده‌اند که استفاده همزمان از پودر لاستیک بازیافتی (GTR) و ساسوبیت می‌تواند مقاومت حرارتی آسفالت را افزایش داده، طول عمر در برابر خستگی را بهبود بخشد و تغییر شکل دائمی سطح راه را کاهش دهد. با این حال، تعیین نسبت بهینه این ترکیبات برای دستیابی به عملکرد مکانیکی و دوام مطلوب، نیازمند تحقیقات دقیق و داده‌محور است. هدف اصلی این تحقیق، بررسی اثر ترکیبی GTR و ساسوبیت بر عملکرد مکانیکی، دوام حرارتی، مقاومت در برابر خستگی و شیارشدگی قیر اصلاح شده و مخلوط‌های آسفالت با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای (SMA) با استفاده از فناوری WMA است. همچنین، با بهره‌گیری از روش پاسخ سطحی (RSM)، تلاش شده است تا مقادیر بهینه این افزودنی‌ها و شرایط اختلاط برای دستیابی به بهترین عملکرد مخلوط‌های آسفالتی تعیین شود.

۲-۲- مصالح آزمایشگاهی و روش تحقیق

۲-۱- قیر و مواد آزمایشگاهی

در این پژوهش از قیر ۷۰-۶۰ و ساسوبیت تولیدی شرکت پلیمر پیشرفته دانا استفاده شده است. با توجه به مطالعات گذشته (Jamshidi, Hamzah, & You, 2013; Li, Zhou, & You, 2016)، محدوده مناسب برای استفاده از ساسوبیت در مخلوط آسفالتی، حدود ۱ تا ۳ درصد وزن قیر می‌باشد که در این تحقیق بر اساس ملاحظات فنی و اقتصادی مقدار ۱، ۲ و ۳ درصد وزنی از ساسوبیت استفاده شده است. همچنین از ۸، ۱۲ و ۱۶ درصد GTR عبوری از الک شماره ۴۰ استفاده شده است.

۲-۲- روند تهیه قیر و مخلوط‌های آسفالتی

برای تولید قیر اصلاح شده با ترکیب GTR و ساسوبیت، ابتدا قیر پایه تا دمای ۱۴۵ درجه سانتی‌گراد گرم شد و GTR به‌صورت

۳-ارائه و تفسیر نتایج

۳-۱- خصوصیات عملکردی

در شکل های ۱ تا ۳ خواص عملکردی قیرها نشان داده شده است. تأثیر افزودن ساسوبیت بر خواص قیر لاستیکی در دمای بالا به طور قابل توجهی مثبت است؛ به طوری که با افزایش درصد ساسوبیت، پارامتر $G^*/\sin\delta$ افزایش یافته و مقاومت قیر در برابر تغییر شکل های دائمی و خزش بهبود می یابد. این افزایش مقاومت به دلیل تشکیل شبکه بلوری در ساختار ساسوبیت و تقویت رفتار الاستیک قیر رخ می دهد که در دماهای بالاتر تأثیر بیشتری دارد (Gong et al., 2020; Gong et al., 2021). اما در دماهای پایین، ساسوبیت تأثیر منفی بر عملکرد قیر دارد. نتایج نشان می دهد که با افزایش مقدار ساسوبیت، سختی قیر افزایش و m-value کاهش می یابد که این موضوع مقاومت قیر را در برابر ترک خوردگی ناشی از تنش های انقباضی کاهش می دهد. این ضعف بیشتر در نمونه هایی که بیش از ۲ درصد ساسوبیت دارند دیده می شود و علت آن به ساختار صفحات خالی در ماتریس هیدروکربنی ساسوبیت نسبت داده شده است (Harooni, Jamaloei, Aboutalebi Esfahani, & Filvan Torkaman, 2019). در مجموع، افزودن ساسوبیت باعث بهبود عملکرد قیر در دمای بالا و افزایش مقاومت خزش می شود، ولی مقاومت قیر در دمای پایین را کاهش می دهد. بنابراین، تعیین مقدار بهینه ساسوبیت برای ایجاد تعادل بین این دو اثر، اهمیت زیادی دارد تا خواص عملکردی قیر در شرایط مختلف دمایی حفظ شود. در بررسی عملکرد قیرهای اصلاح شده در شکل ۳ مشاهده می شود که افزودن ساسوبیت باعث افزایش مقاومت در دماهای بالا و کاهش مقاومت در دماهای پایین می شود. به طور خاص، با افزایش مقدار ساسوبیت از ۰ به ۱٪ در نمونه GTR12، درجه عملکرد (PG) از PG76-16 به PG76-10 تغییر می یابد. سپس با افزایش ساسوبیت از ۱ به ۲٪، درجه مقاومت در دمای بالا یک درجه افزایش یافته و به PG82-10 می رسد، اما افزایش ساسوبیت به ۳٪ تغییری در این درجه ایجاد نمی کند و همان PG82-10 باقی می ماند. از نظر اقتصادی و فنی، افزایش ساسوبیت بیش از ۲٪ تأثیر قابل توجهی روی مقاومت دمایی ندارد و توصیه پذیر نیست. از طرف دیگر، افزودن ساسوبیت باعث کاهش ویسکوزیته قیر و دمای اختلاط و اجرای آسفالت می شود. بنابراین با در نظر گرفتن شرایط فنی و عملیاتی، ترکیب GTR12/S2 به عنوان طراحی بهینه برای اصلاح قیر معرفی می شود.

بلندمدت در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد انجام گرفت. برای ارزیابی عملکرد مخلوط های آسفالتی، آزمون خزش دینامیکی مطابق با استاندارد استرالیا AS 2891.12.1 در دمای ۵۰ درجه سانتی گراد و تحت بارگذاری سینوسی با تنش ۴۰۰ کیلو پاسکال انجام شد تا میزان تغییر شکل های دائمی مخلوط در برابر سیکل های بارگذاری تعیین شود. جهت بررسی رفتار خستگی مخلوط ها، آزمون خمشی چهار نقطه ای بر اساس استاندارد AASHTO T321-07 در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد و با کرنش ۶۰۰ میکرو استرین و فرکانس ۱۰ هرتز انجام شد. معیار پایان عمر خستگی کاهش ۵۰ درصدی سختی اولیه در نمونه ها در نظر گرفته شد (Hassan Ziari, Amini, & Goli, 2020a; Hassan Ziari, Divandari, Hajiloo, & Amini, 2019).

۲-۴- طراحی آزمایش های با استفاده از RSM

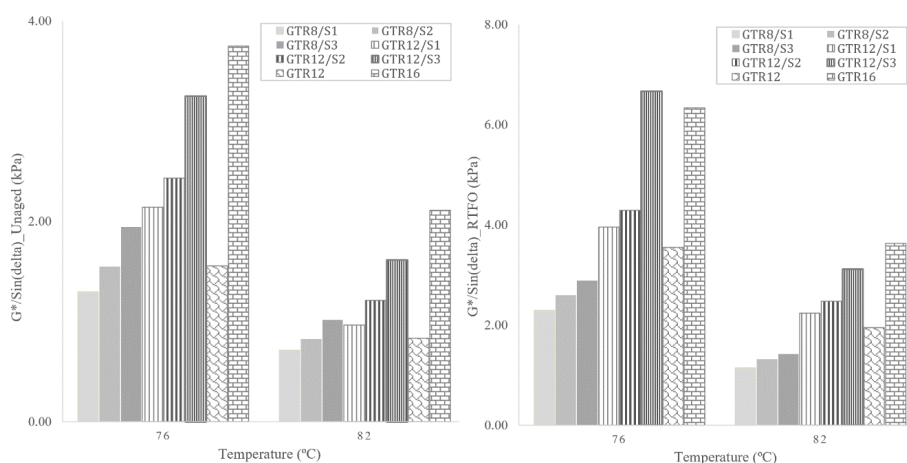
روش سطح پاسخ (RSM) یک تکنیک تحلیلی ترکیبی ریاضی و آماری است که به طور گسترده برای طراحی آزمایش های تجربی، مدل سازی روابط بین متغیرهای مستقل و پاسخ، بهینه سازی شرایط عملیاتی و اعتبارسنجی نتایج مطالعات استفاده می شود. در این تحقیق، RSM برای توسعه یک مدل سطح پاسخ دقیق به منظور بررسی تأثیر چهار عامل کلیدی شامل محتوای پودر لاستیک بازیافتی، میزان ساسوبیت، درصد قیر و دمای اختلاط مخلوط های آسفالتی به کار گرفته شد. این مدل اجازه می دهد تا اثرات هر یک از عوامل به صورت مجزا و همچنین تعاملات پیچیده بین آنها بر خواص عملکردی و مکانیکی قیرها و مخلوط های گرم لاستیکی مورد ارزیابی قرار گیرد. استفاده از RSM همچنین امکان پیش بینی خواص مخلوط های اصلاح شده تحت شرایط مختلف آزمایشی و کاهش نیاز به آزمایش های گسترده و پرهزینه را فراهم می سازد و روشی مؤثر برای بهینه سازی همزمان چندین ویژگی مکانیکی و عملکردی مخلوط های آسفالتی ارائه می کند.

مدل شماره ۱ معادله RSM به کار رفته را نشان می دهد که در آن Y متغیر پاسخ، X_i و X_j متغیرهای مستقل و ضرایب b_0 ، b_i ، b_{ij} و b_{ii} به ترتیب نمایانگر ضریب ثابت، ضریب خطی، ضریب درجه دوم و ضریب اثرات متقابل هستند.

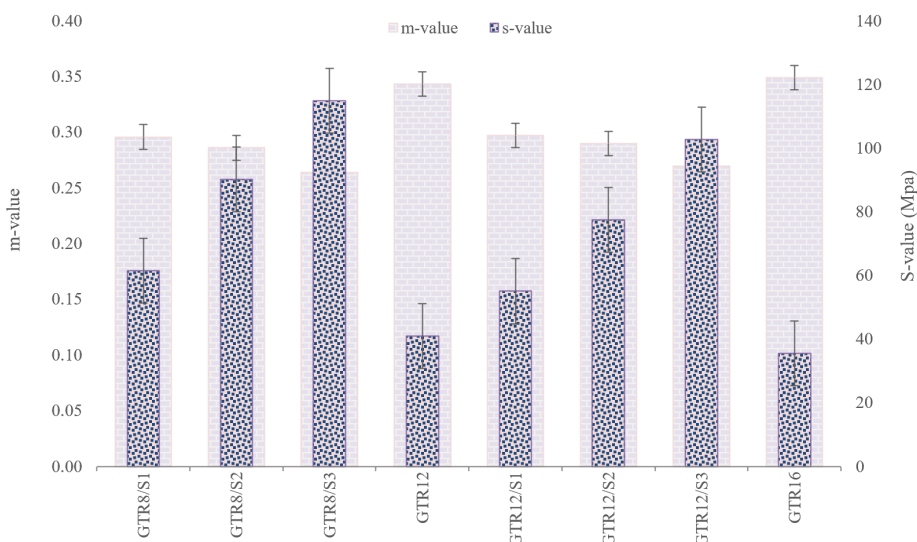
$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i X_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n b_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

جدول ۱. دمای تولید و تراکم

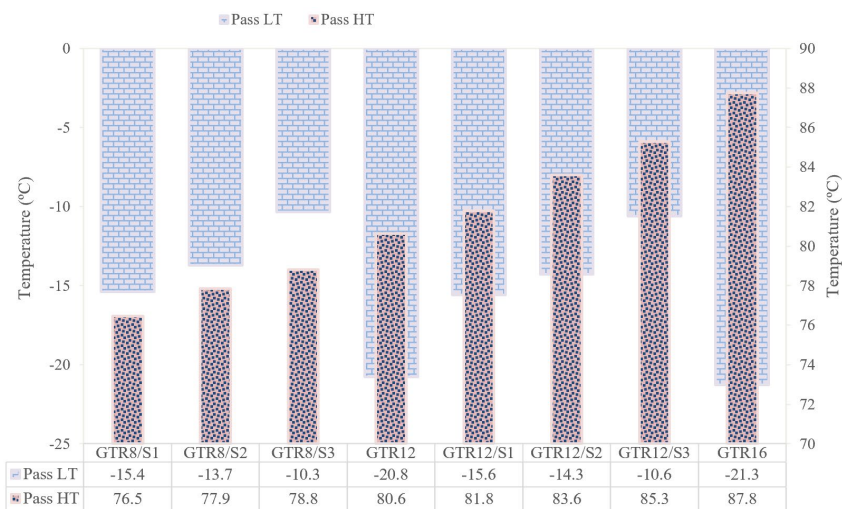
Mixture type	Penetration (25 °C; 0.1 mm)	Softening Point (°C)	Mixing temp. (°C)	Compaction temp. (°C)	OBC (%)
GTR8/S1	42.9	63.7	160-165	143-148	6.4
GTR8/S2	38.5	74.2	157-163	140-146	6.4
GTR8/S3	30.9	78.6	155-160	138-143	6.4
GTR12	39.0	63.2	175-180	158-163	6.4
GTR12/S1	36.0	66.4	165-170	148-153	6.4
GTR12/S2	31.3	77.8	162-167	145-150	6.4
GTR12/S3	26.6	83.2	160-165	143-148	6.4
GTR16	36.5	65.6	180-185	163-168	6.4



شکل ۱. بررسی نتایج آزمایش مقاومت دمای بالا با دستگاه DSR



شکل ۲. بررسی خواص دمای پایین قیرها در دمای ۶- درجه سانتی گراد



شکل ۳. تعیین رده عملکردی قیرهای اصلاح شده

۳-۲- مقاومت شیارشدگی قیرها و مخلوط‌های آسفالتی

با افزایش سطح تنش از ۰٫۱ به ۳٫۲ کیلوپاسکال، تأثیر مثبت افزودنی‌های GTR و ساسوبیت در بهبود مقاومت خزش و کاهش تغییرشکل‌های پلاستیک بیشتر مشخص می‌شود. در تنش‌های پایین‌تر، تغییرشکل‌ها عمدتاً الاستیک هستند، اما با افزایش تنش، درصد بازیابی کاهش یافته و رفتار قیر به سمت پلاستیک شدن متمایل می‌شود. در این شرایط، اصلاح همزمان با GTR و WMA موجب تقویت خاصیت الاستیک و کاهش اثرات منفی دما و تنش می‌گردد. شاخص بازیابی (R) نیز تأیید می‌کند که نمونه‌های حاوی GTR16، GTR12/S2 و GTR12/S1 بیشترین میزان بازیابی را در دمای ۷۰ درجه و تنش ۳٫۲ کیلوپاسکال داشته و بهترین مقاومت در برابر تغییرشکل‌های دائم را نشان می‌دهند. این نتایج نشان‌دهنده اهمیت ترکیب همزمان GTR و ساسوبیت در بهبود خواص عملکردی قیرهای اصلاح شده است. نتایج ارائه شده در شکل ۶ نشان می‌دهد که استفاده از قیرهای اصلاح شده به طور قابل توجهی تغییر شکل‌های دائم را کاهش داده و مقاومت در برابر شیارشدگی را بهبود می‌بخشد. بر اساس نمودار خزش دینامیکی، کمترین مقادیر کرنش مربوط به نمونه‌های حاوی قیرهای GTR12/S2، GTR8/S3 و GTR16 بوده است. بررسی تأثیر درصد ساسوبیت در مخلوط‌ها نشان می‌دهد که افزایش میزان ساسوبیت مستقیماً مقاومت آسفالت را در برابر آسیب شیارشدگی افزایش می‌دهد. نرخ کرنش در بازه بین ۱۸۰۰ تا ۳۶۰۰ سیکل در نمونه کنترل حدود ۸۸٪ است، در حالی که

نتایج حاصل از آزمایش MSCR در شکل‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهد که افزودن ساسوبیت به قیرهای لاستیکی موجب کاهش تغییرشکل‌های پلاستیک و افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی می‌شود. این اثر در دماهای بالاتر و با افزایش استحکام قیر بیشتر نمایان می‌شود. بررسی شاخص J_{nr} در دمای بین ۶۴ تا ۸۲ درجه سانتی‌گراد نشان داد که نمونه‌های حاوی ۱۶٪ GTR عملکرد بهتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارند که این به دلیل افزایش چشمگیر ویسکوزیته، جذب مواد سبک و افزایش درصد آسفالتن‌ها در ساختار قیر است که منجر به افزایش سختی و مقاومت به شیارشدگی می‌شود (W. Wang, Cheng, Sun, & Xu, 2023; Hassan Ziari et al., 2020b). همچنین، کاهش مقدار J_{nr} به ترتیب ۸۴، ۸۵ و ۹۰ درصد با افزودن ۱، ۲ و ۳ درصد ساسوبیت به نمونه‌های حاوی ۸٪ GTR مشاهده شد که بیانگر تأثیر مثبت ساسوبیت در بهبود مقاومت به خزش است.

مقایسه نمونه‌ها نشان می‌دهد که ترکیب‌های GTR16، GTR12/S2 و GTR8/S3 بهترین عملکرد را در برابر تغییرشکل‌های پلاستیک و مقاومت به شیارشدگی از خود نشان داده‌اند. به طور کلی، افزایش ۴ درصدی GTR تأثیر بیشتری نسبت به افزایش ۱ درصدی ساسوبیت دارد، اما نمونه‌های حاوی ترکیب همزمان GTR و ساسوبیت عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌های فقط حاوی GTR12 دارند.

کاهش عمر خستگی و تأثیر منفی بر روند بهبود مقاومت خستگی می‌شود که نتایج مشابهی در مطالعات پیشین نیز گزارش شده است (Liu et al., 2021; Wasiuddin, Selvamohan, Zaman, & Guegan, 2007).

بررسی عمر خستگی قیرها نشان می‌دهد که افزایش درصد لاستیک نیز موجب افزایش عمر خستگی می‌شود، به طوری که افزایش GTR از ۸ به ۱۲ درصد عمر خستگی را حدود ۸۷٪ افزایش داده است. همچنین، نمونه‌های حاوی GTR12/S2 بهترین عملکرد و بیشترین عمر خستگی را نشان داده‌اند. این موضوع حاکی از اثر مثبت ترکیبی استفاده از GTR و ساسویت در افزایش عمر خستگی است که احتمالاً به دلیل شکل‌گیری شبکه پلیمری در قیر ناشی از حضور ذرات لاستیک و کاهش پیری قیر به علت کاهش دمای اختلاط در حضور ساسویت می‌باشد. با افزایش میزان کرنش، اثر مثبت ساسویت بر عمر خستگی کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، نسبت عمر خستگی GTR12/S2 به GTR16 در کرنش ۲٫۵٪ برابر با ۱٫۵۵ است، در حالی که این نسبت در کرنش‌های ۵٪ و ۱۰٪ به ترتیب به ۱٫۱۵ و ۰٫۸۵ کاهش می‌یابد. این نشان می‌دهد که با افزایش کرنش، عملکرد خستگی نمونه GTR16 به تدریج بهتر از GTR12/S2 می‌شود. این پدیده می‌تواند ناشی از تأثیرات متفاوت شبکه پلیمری سه‌بعدی تشکیل شده توسط ترکیب GTR و ساسویت و اثرات افزایش کرنش باشد؛ به گونه‌ای که در کرنش‌های پایین، شبکه پلیمری قدرتمند در GTR12/S2 عمر خستگی را افزایش می‌دهد، اما با افزایش کرنش، این شبکه لغزش پیدا کرده و نهایتاً می‌شکند که منجر به کاهش عمر خستگی می‌شود (H. Wang, Dang, Li, & You, 2013; S.-p. Wu, Pang, Mo, Chen, & Zhu, 2009).

در کرنش ۲٫۵٪ نمونه‌های GTR12/S2، GTR16 و GTR8/S2 بهترین عمر خستگی و عملکرد را نشان می‌دهند، در حالی که در کرنش ۵٪ نمونه‌های GTR12/S2، GTR16 و GTR12 بیشترین مقاومت در برابر بارهای ترافیکی مکرر را دارند. این روند نشان می‌دهد که افزودن ساسویت به قیر لاستیکی در سطوح کرنش پایین‌تر تأثیر بیشتری دارد و باعث بهبود قابل توجه خواص خستگی و عملکردی قیرها می‌شود.

شکل ۸ به بررسی تأثیر درصدهای مختلف GTR و افزودنی ساسویت بر عملکرد خستگی مخلوط‌های SMA از طریق

این مقدار به ترتیب برای مخلوط‌های حاوی قیرهای اصلاح شده با GTR8/S1، GTR8/S2 و GTR8/S3 به ۶۷٫۷٪، ۵۶٫۷٪ و ۳۹٫۸٪ کاهش یافته است. این نتایج حاکی از آن است که استفاده همزمان از افزودنی‌های لاستیکی و ساسویت در قیرهای اصلاح شده باعث کاهش چشمگیر نرخ تخریب و شیارشدگی آسفالت می‌شود. تحلیل عملکرد نمونه‌ها نشان می‌دهد که مخلوط‌های دارای قیر GTR12/S2، GTR8/S3 و GTR16 بیشترین مقاومت را در برابر آسیب شیارشدگی دارند. مقایسه تأثیر دو افزودنی نشان می‌دهد که افزایش درصد GTR از ۱۲٪ به ۱۶٪ تأثیر بیشتری نسبت به افزودن ۱٪ ساسویت دارد؛ به طوری که نرخ شیارشدگی مخلوط حاوی GTR12 برابر ۶۴٫۴٪ بوده که با افزایش ۴٪ GTR در نمونه GTR16 به ۴۸٫۷٪ کاهش یافته است، در حالی که افزودن ۱٪ ساسویت نرخ شیارشدگی را در نمونه GTR12/S1 به ۵۵٫۱٪ کاهش داده است. از سوی دیگر، افزایش درصد ساسویت از ۱٪ به ۲٪ باعث بهبود قابل توجه مقاومت در برابر شیارشدگی شده است. به عنوان نمونه، نرخ کرنش در بازه ۱۸۰۰ تا ۳۶۰۰ سیکل برای مخلوط GTR12/S2 به ۳۱٫۴٪ کاهش یافته که کمترین مقدار در میان تمام نمونه‌ها و بهترین عملکرد را نشان می‌دهد. دلیل عملکرد مطلوب ترکیبات حاوی GTR در بهبود ویژگی‌های شیارشدگی می‌تواند به علت تشکیل شبکه پلیمری و لاستیک مصنوعی در ساختار پودر لاستیک باشد که به بهبود خواص مکانیکی و مقاومت آسفالت کمک می‌کند (Mashaan, Ali, Karim, & Abdelaziz, 2011).

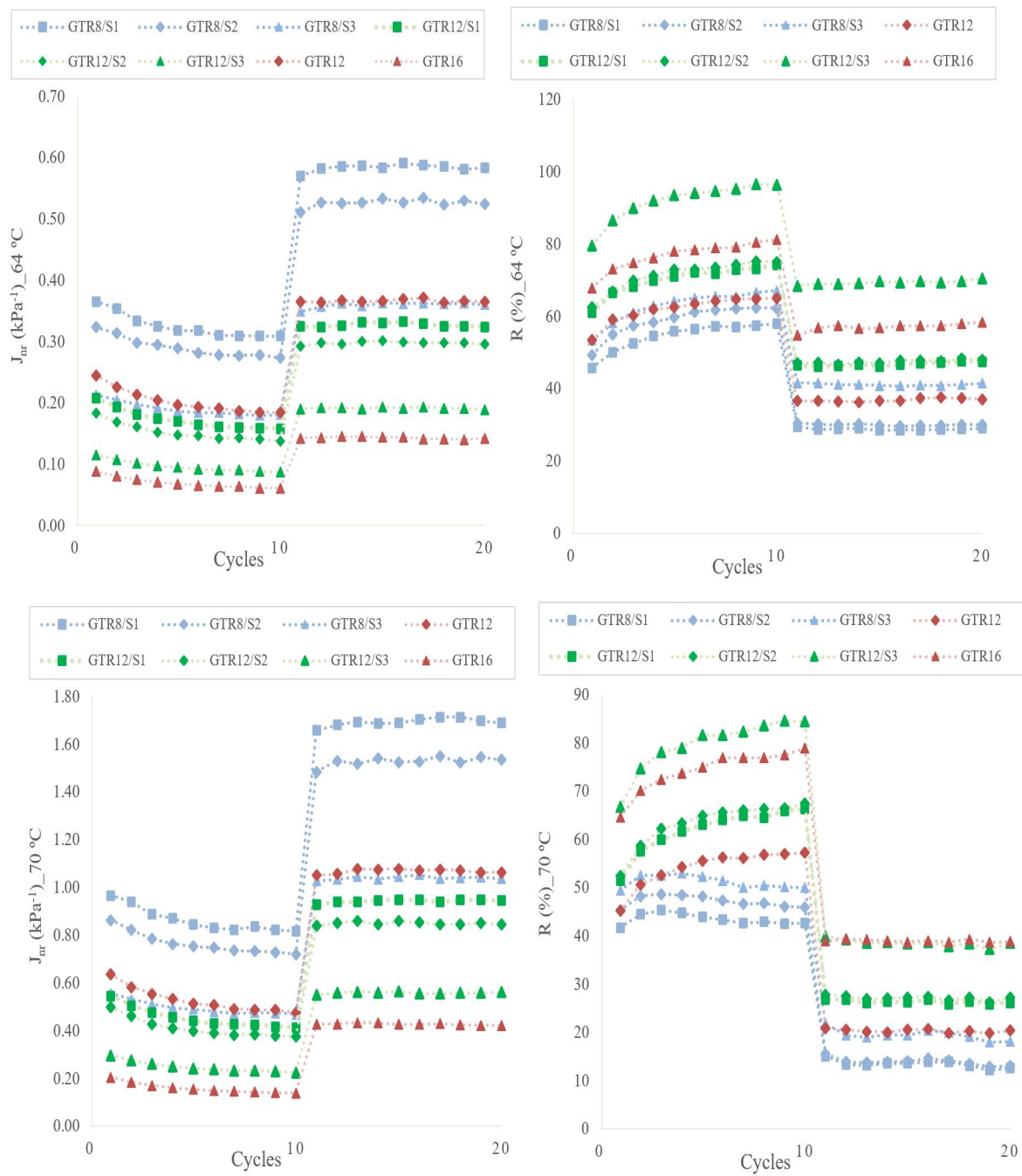
۳-۳- عمر خستگی قیرها و مخلوط‌های آسفالتی

براساس نتایج ارائه شده در شکل ۷، مقایسه عمر خستگی قیرها در میزان کرنش ۲٫۵٪ نشان می‌دهد که افزودن ساسویت عمر خستگی را بهبود بخشیده و مقاومت در برابر بارهای ترافیکی را افزایش می‌دهد. به طور مشخص، افزودن ۱٪، ۲٪ و ۳٪ ساسویت، عمر خستگی را به ترتیب ۲٫۸، ۶٫۱ و ۵٫۷ برابر افزایش داده است. روند مشاهده شده نشان می‌دهد که افزایش درصد ساسویت تا ۲٪ رابطه مستقیمی با افزایش عمر خستگی دارد، اما با افزایش درصد آن به ۳٪، عمر خستگی کاهش می‌یابد که این امر به دلیل افزایش سختی و کاهش انعطاف‌پذیری قیر بر اثر ساسویت است. افزایش سختی باعث

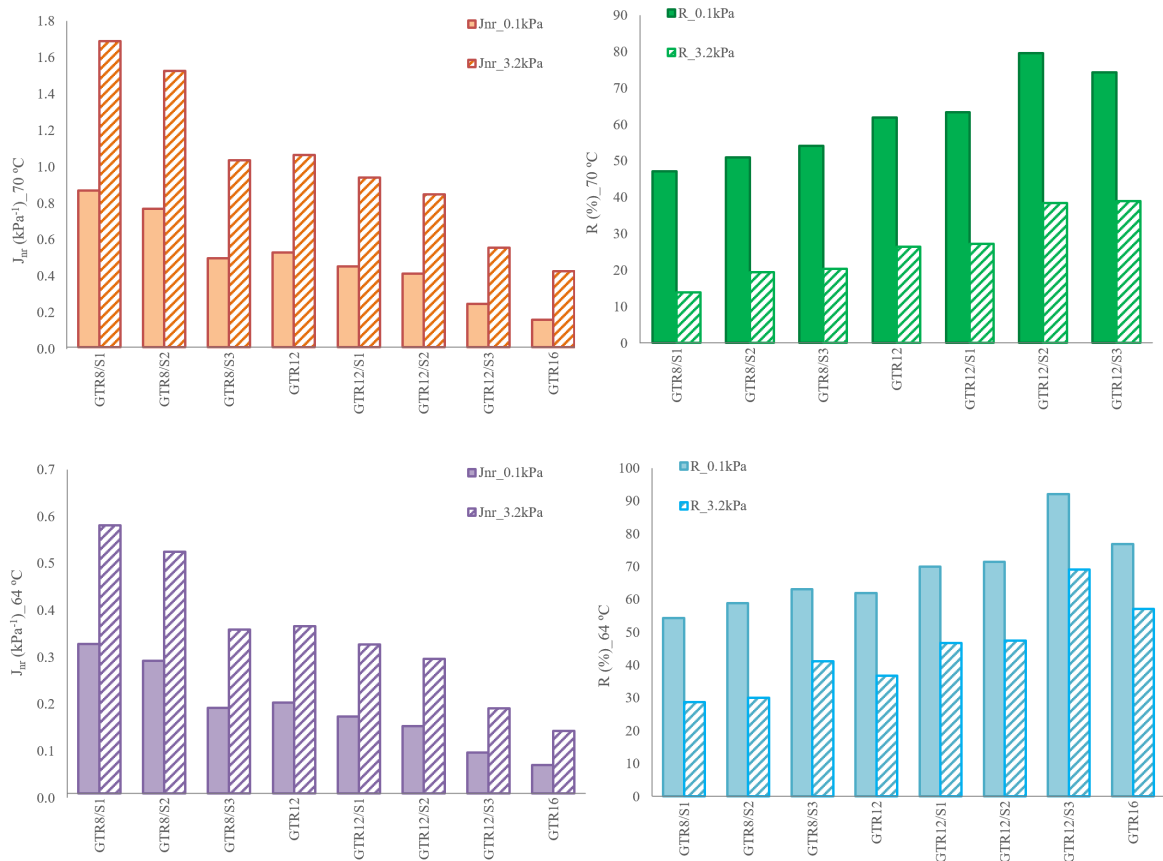
۳-۴- نتایج تحلیل ANOVA

نتایج تحلیل آماری نتایج آزمایش‌های مربوط به عمر خستگی در جدول ۱ نشان داد که مدل‌های پیش‌بینی این پارامترها معنادار بوده و قابلیت اطمینان بالایی دارند. با این حال، در آزمون LAS، هیچ‌یک از عوامل مستقل) شامل درصد GTR، ساسویت، دمای اختلاط و مقدار قیر بهینه (به صورت منفرد تأثیر آماری معناداری بر طول عمر خستگی نداشتند، که بیانگر پیچیدگی مکانیزم خستگی و نقش مهم تعامل بین متغیرها است. در مقابل، نتایج آزمون خستگی چهار نقطه‌ای نشان داد که افزایش درصد GTR به طور معنادار باعث افزایش چرخه‌های شکست (N_f) شده و تأثیر مثبت آن در بهبود عملکرد خستگی مخلوط به وضوح قابل مشاهده است. از سوی دیگر، بررسی مقاومت در برابر شیارشدگی از طریق آزمون عدد خزش نهایی (FN) و شاخص تغییر شکل غیرقابل بازیابی (J_{nr}) نیز به نتایج قابل توجهی منجر شد. مدل پیش‌بینی برای FN معنادار بوده و تحلیل ANOVA نشان داد که تنها افزودنی ساسویت نقش مؤثری در افزایش FN و کاهش نرخ خزش دارد. این یافته نشان می‌دهد که ساسویت به دلیل ویژگی‌های کریستالی خود موجب بهبود رفتار ویسکوالاستیک قیر در دماهای بالا شده و در نتیجه، مقاومت مخلوط در برابر شیارشدگی افزایش می‌یابد. با این حال، اثر سایر متغیرها مانند GTR و OBC در این شاخص معنادار نبوده است. از سوی دیگر، با وجود معناداری مدل J_{nr} ، هیچ‌یک از عوامل مستقل به‌تنهایی تأثیر آماری معناداری بر این شاخص نداشتند، که حاکی از تأثیر هم‌افزایی و ترکیبی بین GTR و ساسویت در کاهش تغییر شکل دائمی آسفالت است. در مجموع، نتایج حاصل از تحلیل‌های آزمایشگاهی و آماری نشان می‌دهد که افزودن GTR نقش کلیدی در افزایش دوام مخلوط در برابر بارهای تکراری ایفا می‌کند، در حالی که ساسویت عملکرد قابل توجهی در بهبود مقاومت شیارشدگی دارد. از آنجا که اثر ترکیبی این دو افزودنی در برخی پارامترها از اثر جداگانه آنها فراتر رفته، استفاده هم‌زمان از GTR و ساسویت می‌تواند رویکردی مؤثر برای طراحی مخلوط‌های آسفالتی با عملکرد بالا باشد. بنابراین، انتخاب درصد بهینه این مواد بر اساس ویژگی‌های مورد نیاز عملکردی، نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش طول عمر و کاهش خرابی‌های معمول روسازی دارد.

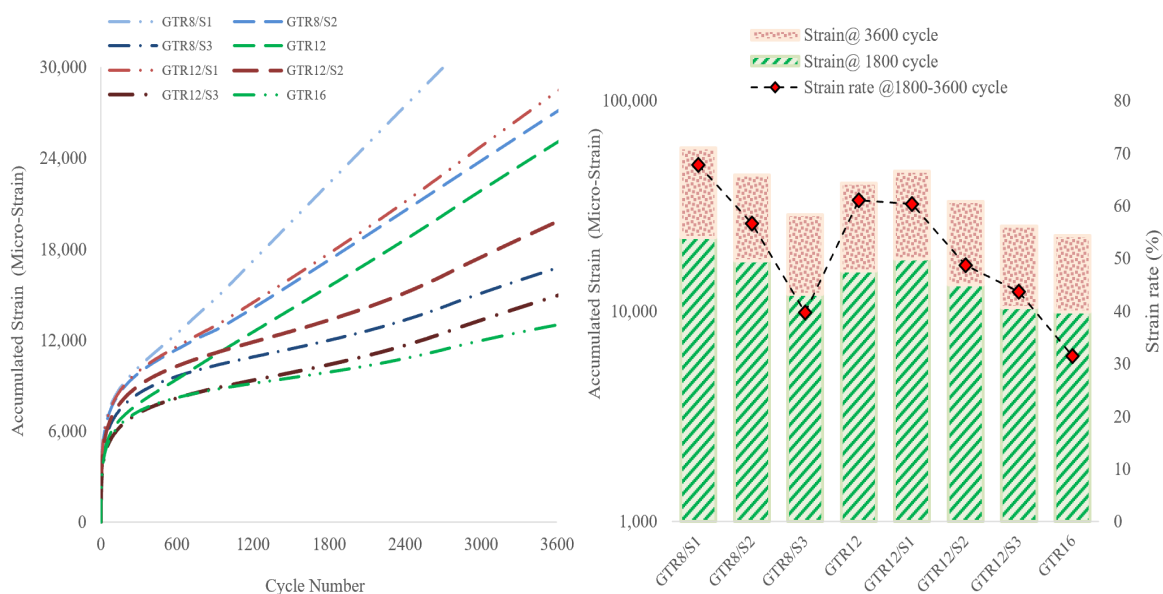
آزمون تیر خمشی چهار نقطه‌ای می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد که کاهش شیب سختی در مخلوط‌های اصلاح‌شده با قیر لاستیکی اصلاح شده گرم میکس (GTR-WMA) به طور قابل توجهی کمتر از نمونه‌های حاوی GTR تنها است. این موضوع به این معنی است که کاهش سریع سختی در نمونه‌های حاوی GTR منجر به شیب نزولی بیشتر و افت سریع‌تر سختی مخلوط‌ها در چرخه‌های اولیه شده است. با استفاده از GTR همراه با ساسویت، رفتار خستگی به طور کلی بهبود یافته و عمر بارگذاری مخلوط‌ها افزایش یافته است. تحلیل دقیق‌تر نتایج نشان می‌دهد که افزودن ۱٪، ۲٪ و ۳٪ ساسویت به مخلوط حاوی ۸٪ GTR، عمر خستگی را به ترتیب به میزان ۸۱٪، ۱۳۱٪ و ۱۰۶٪ افزایش داده است که بیانگر اثر مثبت ساسویت بر پاسخ خستگی مخلوط‌های SMA است. این اثر در نمونه‌های حاوی ۲٪ ساسویت به وضوح بیشتر مشاهده شده است. از سوی دیگر، با افزایش درصد GTR به ۱۲٪، مخلوط‌های SMA حاوی ترکیبات GTR12/S1 و GTR12/S2 عملکرد بهتری در مقاومت به خستگی از خود نشان داده‌اند. ترکیب GTR و ساسویت به صورت هم‌زمان اثر قابل توجهی در بهبود رفتار آسفالت و مقاومت در برابر خستگی ایجاد کرده است. رتبه‌بندی نتایج عمر خستگی نشان می‌دهد که مخلوط‌های SMA حاوی GTR12/S2، GTR12/S1 و GTR16 به ترتیب بیشترین مقاومت را در برابر بارهای ترافیکی دارند. با این حال، اگرچه GTR با درصد ۱۶٪ به دلیل قیمت مناسب به عنوان یک اصلاح‌کننده مناسب برای خستگی شناخته می‌شود، افزایش سختی و ویسکوزیته بالا در این ترکیب، عملکرد آن را محدود کرده و نمی‌تواند گزینه برتری از نظر عملکرد ارائه دهد. در مقابل، مخلوط‌های حاوی قیرهای اصلاح‌شده GTR-WMA به دلیل شرایط عملیاتی بهتر، عملکرد برتری داشته و گزینه‌های مناسب‌تری نسبت به مخلوط‌های حاوی تنها GTR محسوب می‌شوند. در نتیجه، این تحلیل نشان می‌دهد که استفاده هم‌زمان از GTR و ساسویت ضمن بهبود خواص فنی و عملکردی، می‌تواند به افزایش عمر خستگی و مقاومت مخلوط‌های SMA کمک کرده و شرایط اجرایی مطلوب‌تری را فراهم آورد.



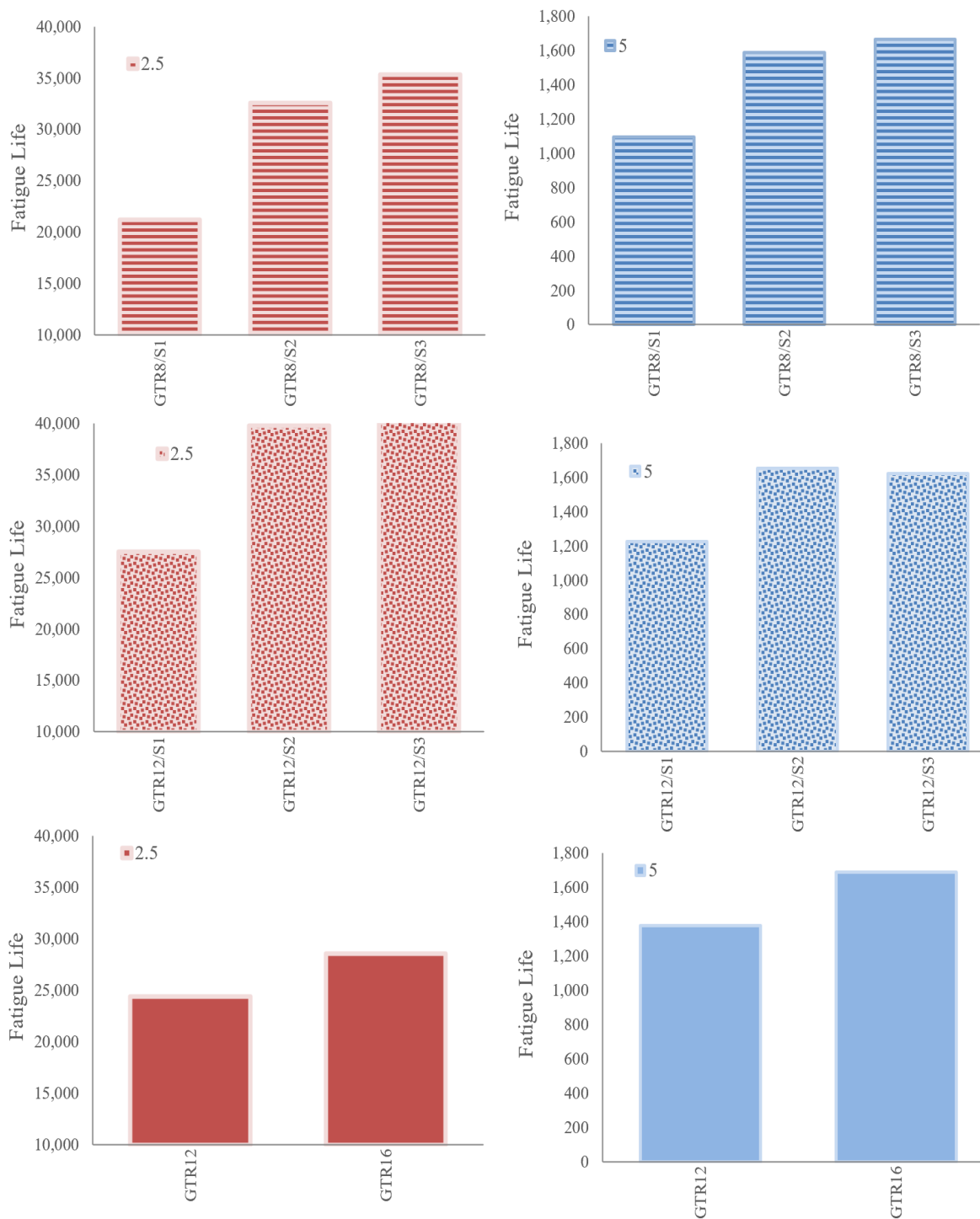
شکل ۴. بررسی روند تغییرات کرنش در برابر تعداد سیکل های ناشی از بارگذاری در دماهای ۶۴ و ۷۰ درجه سانتی گراد



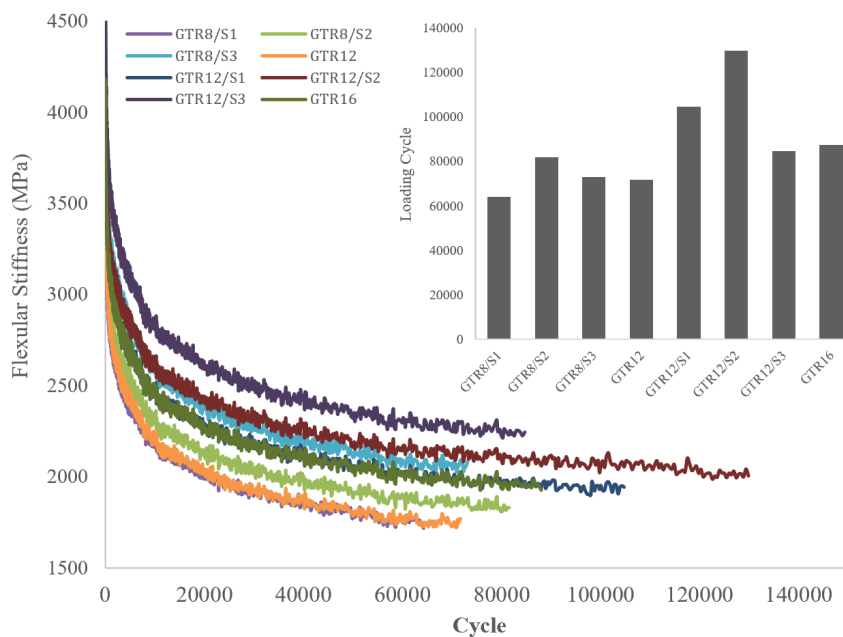
شکل ۵. مقاومت شیارشدگی قیرها با توجه به نتایج خروجی آزمایش MSCR



شکل ۶. مقاومت شیارشدگی مخلوط های آسفالتی اصلاح شده بر اساس آزمایش خزش دینامیکی



شکل ۷. ارزیابی عمر خستگی قیرهای اصلاح شده در آزمایش LAS



شکل ۸. مقایسه عمر خستگی مخلوط های آسفالتی

جدول ۲. نتایج تحلیل ANOVA

Source	Sum of Squares	Mean Square	F- Value	p-value Prob > F	
Response 4: FN					
Model	3.65E+06	9.13E+05	19.58	0.0069	significant
A-GTR	34139	34139	0.73	0.4404	Insig.
B- ساسویت	4.95E+05	4.95E+05	10.61	0.0312	Sig.
C-Mixing temperature	1.17E+05	1.17E+05	2.5	0.1891	Insig.
D-OBC	52976.1	52976.1	1.14	0.3465	Insig.
Response 6: Fatigue life					
Model	4.97E+09	1.24E+09	6.89	0.0441	significant
A-GTR	2.16E+08	2.16E+08	1.2	0.3351	Insig.
B- ساسویت	2.63E+08	2.63E+08	1.46	0.2934	Insig.
C-Mixing temperature	1.05E+09	1.05E+09	5.83	0.0733	Insig.
D-OBC	2.66E+08	2.66E+08	1.48	0.2912	Insig.
Response 9: J_{nr,3.2}					
Model	16.57	4.14	16.99	0.0089	significant
A-GTR	0.5	0.5	2.07	0.2238	Insig.
B- ساسویت	0.086	0.086	0.35	0.5838	Insig.
C-Mixing temperature	8.01E-04	8.01E-04	3.29E-03	0.957	Insig.
D-OBC	1.54E-03	1.54E-03	6.31E-03	0.9405	Insig.
Response 10: N_f					
Model	7.13E+08	1.78E+08	81.52	0.0004	significant
A-GTR	3.52E+07	3.52E+07	16.09	0.016	Sig.
B- ساسویت	6.46E+06	6.46E+06	2.95	0.1608	Insig.
C-Mixing temperature	97411.3	97411.3	0.045	0.8432	Insig.
D-OBC	1.52E+07	1.52E+07	6.94	0.0579	Insig.

۴- تعیین ترکیب بهینه

۲ و شکل ۹، چهار عامل کلیدی شامل GTR، مقدار ساسویت، دمای اختلاط و درصد قیر بهینه (OBC) به عنوان متغیرهای

در بخش تعیین ترکیب بهینه، با توجه به نتایج حاصل از بهینه‌سازی روش سطح پاسخ و داده‌های ارائه شده در جدول

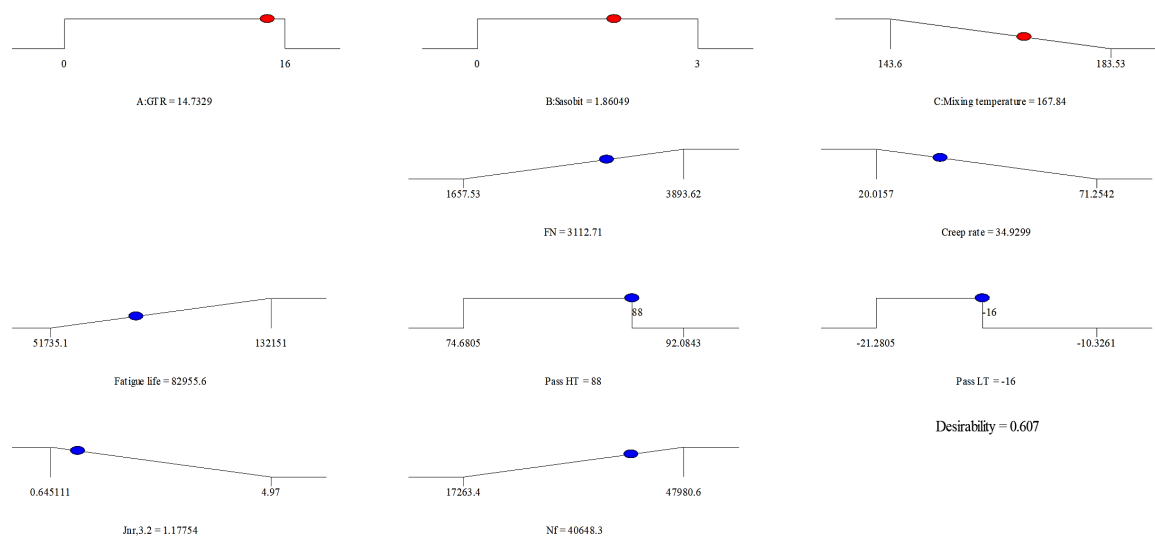
است. پارامتر J_{nr} تأیید کننده مقاومت مطلوب در برابر شیارشدگی است. همچنین تعداد چرخه شکست برابر با ۴۰۶۴۸ سیکل است که نشان دهنده پایداری و عملکرد بهینه مخلوط در برابر خستگی است.

با توجه به نتایج فوق، می توان نتیجه گرفت که تعیین دقیق درصد های GTR و ساسوبیت، همراه با کنترل دمای اختلاط و مقدار قیر بهینه، نقش حیاتی در بهبود عملکرد کلی آسفالت گرم میکس لاستیکی دارد. این ترکیب بهینه علاوه بر ارتقای خواص فنی، امکان کاهش مصرف انرژی و کاهش آلاینده های زیست محیطی را نیز فراهم می آورد، که همگام با اهداف بهینه سازی چندهدفه در این تحقیق است. بنابراین، مدل RSM به عنوان ابزاری کارآمد برای پیش بینی و بهینه سازی عملکرد آسفالت های اصلاح شده با GTR و ساسوبیت، قابلیت اعتماد و دقت بالایی را نشان داده است.

مستقل انتخاب شدند. هدف اصلی، بهبود ویژگی های عملکردی و مکانیکی آسفالت گرم میکس لاستیکی از جمله مقاومت در برابر خزش، عمر خستگی، مشخصات دمای بالا و پایین قیر و همچنین پارامترهای مربوط به شیارشدگی مانند J_{nr} و تعداد چرخه های شکست بود. نتایج بهینه شده نشان می دهد که ترکیب ۱۴٫۷ GTR %، ۱٫۸۶٪ ساسوبیت، دمای اختلاط ۱۶۷٫۸ درجه سانتی گراد و ۶٫۹۰٪ قیر بهینه، بهترین عملکرد را به لحاظ دوام و مقاومت ارائه می دهد. به عنوان مثال، میزان تغییر شکل پلاستیک در این ترکیب به ۳۴٫۹ سیکل کاهش یافته که نشانگر بهبود مقاومت در برابر خزش و کاهش شیارشدگی است. همچنین عمر خستگی به ۸۲۹۵۶ سیکل افزایش یافته که بیانگر دوام بالاتر در برابر بارهای ترافیکی مکرر است. دمای عملکرد بالا در سطح ۸۸ درجه سانتی گراد و دمای عملکرد پایین برابر با منفی ۱۶ درجه سانتی گراد نشان دهنده توانایی آسفالت در تحمل شرایط حرارتی مختلف

جدول ۲. مقادیر بهینه متغیرهای مستقل و پاسخ متغیرهای خروجی در حالت بهینه سازی شده

Factors				Responses						
A: GTR	B: ساسوبیت	C: Mixing Temp	D: OBC	FN	Creep rate	Fatigue life	HT	LT	$J_{nr,3.2}$	N_f
%	%	°C	%	Cycle	%	Cycle	°C	°C	kPa^{-1}	Cycle
14.7	1.86	167.8	6.90	3113	34.9	82956	88.0	-16.0	1.178	40648



شکل ۶. مطلوبیت متغیرها و پاسخها برای راه حل بهینه

۵- نتیجه گیری

بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، جمع‌بندی‌های اصلی به شرح زیر ارائه می‌شود:

- استفاده هم‌زمان از پودر لاستیک بازیافتی (GTR) و افزودنی ساسویت باعث افزایش چشمگیر مقاومت در برابر خزش، عمر خستگی و مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط‌های SMA و قیر اصلاح‌شده شد، که این امر نشان‌دهنده اثر هم‌افزایی مثبت این دو ماده در تقویت عملکرد مکانیکی و دوام مخلوط‌های آسفالتی است.

- با بهره‌گیری از روش بهینه‌سازی سطح پاسخ (RSM)، ترکیب بهینه شامل ۱۴٫۷٪ GTR، ۱٫۸۶٪ ساسویت، دمای اختلاط ۱۶۷٫۸ درجه سانتی‌گراد و ۶٫۹۰٪ قیر تعیین شد که بیشترین عملکرد مکانیکی و دوام را در مخلوط‌ها فراهم می‌آورد.

- افزودن ساسویت موجب کاهش دمای اختلاط آسفالت شد که علاوه بر صرفه‌جویی انرژی، منجر به کاهش انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی و ارتقای پایداری فرآیند تولید شد.

- مدل بهینه‌سازی سطح پاسخ (RSM) با خطای کمتر از ۱۰٪ توانست خواص عملکردی مخلوط‌های اصلاح‌شده را به‌طور دقیق پیش‌بینی کند و به عنوان یک ابزار مؤثر و کم‌هزینه برای طراحی مخلوط‌های آسفالتی بهینه معرفی شد.

- نتایج پژوهش نشان می‌دهد که انتخاب ترکیب بهینه می‌تواند به مهندسان و طراحان آسفالت امکان تولید مخلوط‌هایی با دوام بالا، مقاومت مناسب در برابر بارهای ترافیکی مکرر و پاسخگویی به شرایط محیطی متنوع را فراهم کند، که این امر راهکار مؤثری برای توسعه روسازی‌های پایدار و اقتصادی محسوب می‌شود.

۶- مراجع

- Ameri, M., Mirzaiyan, D., & Amini, A. (2018). Rutting resistance and fatigue behavior of gilsonite-modified asphalt binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(11), 04018292.
- Amini, A. (2026). Performance Characteristics and Rheological Behavior of RAP Binder Containing Nanoclay: Laboratory Evaluation, Statistical Analysis, and Multiobjective Optimization. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 38(1), 04025516.
- Amini, A., & Akbari, R. (2025). Optimizing performance and sustainability: Predictive modeling of RAB effects on CRMB in paving applications. *Construction Materials*, e05279.
- Amini, A., & Hajian, E. (2025). Analyzing the impact of PPA and sasobit additives on rubberized asphalt binders: A sustainable approach to improved performance. *Construction and Building Materials*, 496, 143794.
- Amini, A., & Imaninasab, R. (2018). Investigating the effectiveness of Vacuum Tower Bottoms for Asphalt Rubber Binder based on performance properties and statistical analysis. *Journal of Cleaner Production*, 171, 1101-1110.
- Amini, A., & Parvizi, H. (2024). Combined effect of gilsonite, sasobit, and soft binder on performance characterization of high RAP binder. *Construction and Building Materials*, 451, 138714. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138714
- Amini, A., & Soltanian, N. (2025). Sustainable Asphalt Solutions: Leveraging NaClO-ARP and Modifiers for Improved Binder Properties and Environmental Benefits. *Construction Materials*, e05396.
- Amini, A., Ziari, H., & Goli, A. (2018). Investigating the performance of rubberised binders used in Iran based on multiple stress creep recovery and performance grading systems. *Road Materials and Pavement Design*, 19(4), 803-818.
- Amini, A., Ziari, H., Saadatjoo, S. A., Hashemifar, N. S., & Goli, A. (2021). Rutting resistance, fatigue properties and temperature susceptibility of nano clay modified asphalt rubber binder. *Construction and Building Materials*, 267, 120946.
- Amjadian, Y., Ziari, H., Sharifi Moghaddam Kakhki, S. M., Abbaspoor, A., & Hajiloo, M. (2022). Evaluating the efficiency of SMA mixtures containing crumb rubber and WMA additives. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 148(2), 04022013.
- Brown, E., Mallick, R. B., Haddock, J. E., & Bukowski, J. (1997). Performance of stone matrix asphalt (SMA) mixtures in the United States.
- Canestrari, F., Graziani, A., Pannunzio, V., & Bahia, H. U. (2013). Rheological properties of bituminous binders with synthetic wax. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 6(1), 15.
- Fakhri, M., & Azami, A. (2017). Evaluation of warm mix asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement and crumb rubber. *Journal of Cleaner Production*, 165, 1125-1132.
- Gong, J., Han, X., Su, W., Xi, Z., Cai, J., Wang, Q., . . . Xie, H. (2020). Laboratory evaluation of warm-mix epoxy SBS modified asphalt binders containing Sasobit. *Journal of Building Engineering*, 32, 101550.
- Gong, J., Liu, Y., Jiang, Y., Wang, Q., Xi, Z., Cai, J., & Xie, H. (2021). Performance of epoxy asphalt binder containing warm-mix asphalt additive. *International Journal of Pavement Engineering*, 22(2), 223-232.

- Wasiuddin, N. M., Selvamohan, S., Zaman, M. M., & Guegan, M. L. T. A. (2007). Comparative laboratory study of sasobit and aspha-min additives in warm-mix asphalt. *Transportation Research Record*, 1998(1), 82-88.
- Wu, S.-p., Pang, L., Mo, L.-t., Chen, Y.-c., & Zhu, G.-j. (2009). Influence of aging on the evolution of structure, morphology and rheology of base and SBS modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 23(2), 1005-1010.
- Wu, S., Xue, Y., Ye, Q., & Chen, Y. (2007). Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures. *Building and Environment*, 42(7), 2580-2585.
- Yang, X., You, Z., Hasan, M. R. M., Diab, A., Shao, H., Chen, S., & Ge, D. (2017). Environmental and mechanical performance of crumb rubber modified warm mix asphalt using Evotherm. *Journal of Cleaner Production*, 159, 346-358.
- Zakerzadeh, M., Shahbodagh, B., Ng, J., & Khalili, N. (2024). The use of waste tyre rubber in Stone Mastic Asphalt mixtures: A critical review. *Construction and Building Materials*, 418.
- Ziari, H., Amini, A., & Goli, A. (2020a). The effect of different aging conditions and strain levels on relationship between fatigue life of asphalt binders and mixtures. *Construction and Building Materials*, 244, 118345.
- Ziari, H., Amini, A., & Goli, A. (2020b). Investigation of blending conditions effect on GTR dissolution and rheological properties of rubberized binders. *Construction and Building Materials*, 242, 117828.
- Ziari, H., Divandari, H., Hajiloo, M., & Amini, A. (2019). Investigating the effect of amorphous carbon powder on the moisture sensitivity, fatigue performance and rutting resistance of rubberized asphalt concrete mixtures. *Construction and Building Materials*, 217, 62-72.
- Ziari, H., Goli, A., & Amini, A. (2016). Effect of crumb rubber modifier on the performance properties of rubberized binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(12), 04016156.
- Ziari, H., Nasiri, E., Amini, A., & Ferdosian, O. (2019). The effect of EAF dust and waste PVC on moisture sensitivity, rutting resistance, and fatigue performance of asphalt binders and mixtures. *Construction and Building Materials*, 203, 188-200.
- Harooni Jamaloei, M., Aboutalebi Esfahani, M., & Filvan Torkaman, M. (2019). Rheological and mechanical properties of bitumen modified with Sasobit, polyethylene, paraffin, and their mixture. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(7), 04019119.
- Hurley, G. C., & Prowell, B. D. (2005). Evaluation of Sasobit for use in warm mix asphalt. *NCAT Report*, 5(6), 1-27.
- Jamshidi, A., Golchin, B., Hamzah, M. O., & Turner, P. (2015). Selection of type of warm mix asphalt additive based on the rheological properties of asphalt binders. *Journal of Cleaner Production*, 100, 89-106.
- Jamshidi, A., Hamzah, M. O., & You, Z. (2013). Performance of warm mix asphalt containing Sasobit®: State-of-the-art. *Construction and Building Materials*, 38, 530-553.
- Li, X., Zhou, Z., & You, Z. (2016). Compaction temperatures of Sasobit produced warm mix asphalt mixtures modified with SBS. *Construction and Building Materials*, 123, 357-364.
- Liu, H., Zhang, Z., Xie, J., Gui, Z., Li, N., & Xu, Y. (2021). Analysis of OMMT strengthened UV aging-resistance of Sasobit/SBS modified asphalt: Its preparation, characterization and mechanism. *Journal of Cleaner Production*, 315, 128139.
- Mashaan, N. S., Ali, A. H., Karim, M. R., & Abdelaziz, M. (2011). Effect of crumb rubber concentration on the physical and rheological properties of rubberised bitumen binders. *Int. J. Phys. Sci*, 6(4), 684-690.
- Qiu, Y., Lum, & KM. (2006). Design and performance of stone mastic asphalt. *Journal of Transportation Engineering*, 132(12), 956-963.
- Rubio, M. C., Martínez, G., Baena, L., & Moreno, F. (2012). Warm mix asphalt: an overview. *Journal of Cleaner Production*, 24, 76-84.
- Sobhi, S., Yousefi, A., & Behnood, A. (2020). The effects of Gilsonite and Sasobit on the mechanical properties and durability of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 238, 117676.
- Wang, H., Dang, Z., Li, L., & You, Z. (2013). Analysis on fatigue crack growth laws for crumb rubber modified (CRM) asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 47, 1342-1349.
- Wang, W., Cheng, H., Sun, L., & Xu, B. (2023). Investigation on aging and rejuvenation of asphalt rubber binders considering liquid and particle effect. *Journal of Cleaner Production*, 392, 136288.

Optimization and Enhancement of Hot Mix Asphalt: (Combined Effects of Crumb Rubber and Sasobit on Durability and Performance)

*Amir Amini, Department of Civil Engineering, Na.C., Islamic Azad University,
Najafabad, Iran.*

E-mail: amiramini@iau.ac.ir

Received: February 2026- Accepted: May 2026

ABSTRACT

Variations in the technical properties of asphalt binder and the aggregate gradation play a critical role in enhancing the performance and durability of pavement structures. This study investigated the synergistic effects of crumb rubber (GTR) and Sasobit additive on the mechanical properties and long-term performance of rubberized hot mix asphalt (HMA). The primary objective was to improve creep resistance, rutting resistance, and fatigue life of asphalt mixtures. Comprehensive experimental tests, including rotational viscosity of binders, high- and low-temperature performance grading, multiple stress creep and recovery (MSCR), linear amplitude sweep (LAS), dynamic creep, and four-point bending tests, were conducted on both binders and asphalt mixtures. The results indicated that the simultaneous incorporation of GTR and Sasobit significantly enhanced creep resistance, fatigue life, and rutting resistance of SMA mixtures and modified binders. Using response surface methodology (RSM), the optimal combination was determined as 14.7% GTR, 1.86% Sasobit, a mixing temperature of 167.8 °C, and 6.90% binder content. This optimal mix not only improved creep resistance, fatigue life, and thermal performance but also reduced plastic deformation of the mixtures. In addition to enhancing technical properties, the reduced mixing temperature contributed to energy savings and lower environmental emissions. Finally, the RSM model accurately predicted and optimized the properties of modified asphalt mixtures, providing an effective and economical strategy for producing durable and environmentally friendly pavements. These findings offer new insights into the utilization of recycled materials and polymer additives for improving the quality and sustainability of asphalt pavements.

Keywords: Sustainable Pavement, Rubberized Hot Mix Asphalt, Performance Properties, Response Surface Methodology (RSM), Synergistic Effects