طراحی بهینه قیرهای لاستیکی با افزودنی‌های PPA و ساسوبیت: ارزیابی رئولوژیکی، خستگی و عملکرد دمایی

مقاله علمی – پژوهشی

*امیر امینی (نویسنده مسئول)، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران
احسان حاجیان، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: amiramini@iau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۰– پذیرش: ۱۴۰۵/۰۸/۰۲
صفحه ٦٦-۵۱

چکیده

این مطالعه با هدف بررسی و بهینه‌سازی اثرات ترکیبی افزودنی‌های پلی‌فسفریک اسید (PPA) و ساسوبیت بر خواص مکانیکی و عملکردی قیرهای لاستیکی با رده‌های ARB58 و ARB64 انجام شد. با استفاده از روش پاسخ سطح (RSM) و مجموعه‌ای از آزمایش‌های گسترده آزمایشگاهی، تأثیر هم‌زمان PPA، پودر لاستیک بازیافتی (GTR) و ساسوبیت در دو سناریو مورد ارزیابی قرار گرفت. در سناریوی اول، دو قیر با رده‌های عملکردی PG64-22 و PG58-22 با افزودنی‌های GTR و PPA اصلاح شدند، و در سناریوی دوم همان قیرها همراه با ۲٪ ساسوبیت تحت شرایط آسفالت گرم‌میکس کم‌دما (WMA) مورد بررسی قرار گرفتند. پارامترهایی از جمله G/Sinδ، m-value، Jnr و عمر خستگی اندازه‌گیری شدند و نقش مؤثر این افزودنی‌ها در بهبود مقاومت خستگی و مقاومت در برابر تغییر شکل‌های دائمی تأیید گردید. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که افزودن PPA و ساسوبیت به قیر نرم‌تر (ARB58) موجب افزایش قابل توجه مقاومت خستگی و عملکرد دمایی می‌شود، به‌ویژه در شرایط کرنش پایین که معمولاً در روسازی‌های ضخیم رخ می‌دهد. مدل‌های توسعه یافته قادر بودند عملکرد ترکیبات بهینه را با دقت بالا پیش‌بینی کنند و میانگین خطای کمتر از ۱۰ درصد را نشان دادند. در تحلیل عملکردی، ترکیب بهینه افزودنی‌ها برای قیر ARB58 شامل ۱٫۴۹٪ PPA و ۰٫۹۷٪ ساسوبیت و برای قیر ARB64 شامل ۱٫۵۰٪ PPA و ۰٫۸۸٪ ساسوبیت بود که باعث افزایش سختی، مقاومت خستگی و بهبود خواص دمای پایین شد. در سناریوی اقتصادی، با کاهش مقدار افزودنی‌ها به حدود ۱٫۱۸٪ PPA و ۰٫۵۹٪ ساسوبیت برای ARB58 و ۱٫۱۶٪ PPA و ۰٫۵۵٪ ساسوبیت برای ARB64، عملکرد قیرها همچنان در سطح مطلوب حفظ شد و هزینه‌های اصلاح به طور مؤثری کاهش یافت. این پژوهش راهکارهای علمی و عملی برای انتخاب ترکیب بهینه اصلاح‌کننده‌ها ارائه می‌دهد و می‌تواند در طراحی قیرهای اصلاح‌شده با دوام و عملکرد بالا، متناسب با شرایط مختلف جوی و ترافیکی، مورد استفاده قرار گیرد.*

واژه‌های کلیدی: قیر اصلاح شده، ساسوبیت، مقاومت خستگی، عملکرد دمایی قیر، بهینه سازی طراحی

۱-مقدمه

افزایش فزاینده محدودیت‌های منابع طبیعی، نه تنها منجر به افزایش هزینه‌های تولید شده، بلکه نگرانی‌های زیست‌محیطی قابل‌توجهی را نیز ایجاد کرده است. در پاسخ به این چالش‌ها، اصلاح قیر با استفاده از افزودنی‌های مختلف به‌منظور ارتقای عملکرد و کاهش ضایعات، به یکی از استراتژی‌های کلیدی در صنایع ساختمانی و راه‌سازی تبدیل شده است. قیرهای سنتی،

علاوه بر بار مالی بالا، اثرات زیان‌آوری بر محیط زیست دارند؛ از این رو، استفاده از قیرهای اصلاح‌شده یا جایگزین می‌تواند نقش مهمی در کاهش هزینه‌ها و پیامدهای زیست‌محیطی ایفا کند (Amir Amini, 2025, 2026; Hassan et al., 2019; Prakash & Suman, 2022).

در این راستا، نسخه‌های متعددی از قیر اصلاح‌شده با کیفیت بالا توسعه یافته‌اند که خواص عملکردی آن‌ها به طور چشمگیری بهبود یافته است. اصلاح قیر با پلیمرها به منظور افزایش مقاومت و دوام آن رایج است، اما هزینه بالای این اصلاح‌کننده‌ها پژوهشگران را به جستجوی جایگزین‌های مقرون‌به‌صرفه‌تر، مانند استفاده از لاستیک‌های بازیافتی، سوق داده است. با رشد سریع صنعت خودرو و افزایش تعداد خودروها، تولید و دورریز تایرها نیز به‌طور چشمگیری افزایش یافته است؛ به‌طوری که سالانه حدود ۱,۵ میلیارد تایر تولید و بیش از ٤ میلیارد تایر مستعمل دور ریخته می‌شود. در ایالات متحده، بیش از دو میلیارد تایر مستعمل موجود است و هر سال بین ۲۰۰ تا ۲۵۰ میلیون تایر به این حجم افزوده می‌شود، در حالی که کمتر از ۱۰ درصد آن‌ها از طریق فرآیندهای بازیافت محلی مدیریت می‌شوند. این مسئله به یکی از بحران‌های محیط زیستی جهانی تبدیل شده است (Amir Amini & Akbari, 2025; Amir Amini & Soltanian, 2025; Shu & Huang, 2014; T. Wang, Xiao, Amirkhanian, Huang, & Zheng, 2017; Zheng et al., 2021).

استفاده مجدد از تایرهای فرسوده به صورت پودر لاستیک یا GTR، به‌عنوان یک راهکار پایدار و اقتصادی برای اصلاح قیر، مورد توجه گسترده قرار گرفته است. این ماده می‌تواند خواص عملکردی قیر را بهبود دهد، اما چالش‌هایی همچون سازگاری پایین و جدایش فازی در آن وجود دارد. قیر اصلاح‌شده با GTR دارای ویسکوزیته بالاتری است که فرآیند تولید و پخش آسفالت را مستلزم دماهای بالاتر می‌کند؛ این امر منجر به افزایش مصرف انرژی و تولید آلاینده‌های محیط زیستی می‌شود. با وجود این، افزودن پودر لاستیک به قیر می‌تواند خواص مهمی مانند افزایش الاستیسیته، مقاومت در برابر پیرشدگی و کاهش ترک‌های ناشی از خستگی را تقویت کند (A Amini, Goli, & Ziari, 2017; Amir Amini & Imaninasab, 2018; Amir Amini, Ziari, & Goli, 2018; Hassan Ziari, Amini, & Goli, 2020b).

با این حال، مشکلاتی همچون ویسکوزیته بالا، نیاز به دماهای بالای تولید و پخش، و ناپایداری ذخیره‌سازی ناشی از ساختار ولکانیزه GTR و ناسازگاری آن با قیر پایه، از جمله چالش‌های کلیدی این فناوری محسوب می‌شوند. این ناسازگاری باعث جدایش فازی و کاهش عملکرد مکانیکی و رئولوژیکی قیر می‌شود. همچنین، افزایش دمای تولید، علاوه بر مصرف انرژی بیشتر، می‌تواند پیامدهای محیط زیستی منفی نیز داشته باشد.

در این زمینه، فناوری آسفالت گرم مخلوط‌شونده (WMA) به‌عنوان یک رویکرد نوین معرفی شده است که هدف آن کاهش دمای تولید و بهبود شرایط زیست‌محیطی و ایمنی است. این فناوری مزایایی همچون کاهش مصرف انرژی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و افزایش ایمنی کارگران دارد، اما با چالش‌هایی مانند شیارشدگی، حساسیت به رطوبت، هزینه بالاتر تولید و کاهش مقاومت حرارتی در دماهای پایین نیز مواجه است. بنابراین، درک دقیق رفتار افزودنی‌ها در WMA و توسعه طراحی‌های استاندارد و بهینه برای عملکرد بهتر ضروری است (Amir Amini & Hajian, 2025; S. Yang et al., 2024; Zheng et al., 2021).

برای حل مشکلات ناشی از ناپایداری ذخیره‌سازی و جدایش فازی در قیرهای اصلاح‌شده با لاستیک، استفاده از افزودنی‌هایی مانند مونتموریلونیت، کربن سیاه، گوگرد و اسید پلی‌فسفریک (PPA) پیشنهاد شده است. PPA قادر است بدون نیاز به دمیدن هوا، دمای نرم‌شدن قیر را افزایش داده و حساسیت آن به پیرشدگی را کاهش دهد. ترکیب PPA با پلیمرها اثر هم‌افزایی ایجاد کرده و مقاومت قیر را در برابر ترک‌خوردگی و تغییر شکل دائمی بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، PPA با تغییر ترکیب شیمیایی قیر و بهبود پراکندگی آسفالتن‌ها، خواص الاستیک آن را ارتقا می‌دهد (Baumgardner, Masson, Hardee, Menapace, & Williams, 2005; Masson, 2008; Masson & Collins, 2009).

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی به بررسی نقش اسید پلی‌فسفریک (PPA) و پودر لاستیک بازیافتی (GTR) در بهبود خواص قیرهای اصلاح‌شده پرداخته‌اند. در این راستا، سانگ و همکاران (Song et al., 2021) تأثیر ترکیبی پلاستی‌سازها و PPA را بر بهبود خواص رئولوژیکی و پایداری ذخیره‌سازی قیر نشان دادند و نقش واکنش شیمیایی بین PPA و قیر را در ارتقاء این خواص برجسته کردند. دومینگوس و همکاران (Domingos & Faxina, 2019) نیز به بررسی عملکرد قیرهای اصلاح‌شده با ترکیب GTR و PPA پرداختند و تأکید کردند که این اصلاح‌کننده‌ها می‌توانند در شرایط ترافیکی سنگین به بهبود عملکرد قیر کمک کنند، هرچند نیاز به بررسی‌های بیشتر در

مقیاس روسازی وجود دارد. به‌علاوه، مطالعات اخیر حمزه و همکاران (Javed, Zaidi, & Haroon, 2024) اثرات ترکیبی WEO، GTR و PPA را بر خواص رئولوژیکی قیرهای نیمه‌سنتزی نشان دادند که در آن‌ها ترکیب بهینه باعث افزایش ویسکوزیته، مقاومت و استحکام پیوند قیر شد. این یافته‌ها حاکی از پتانسیل بالای استفاده از PPA همراه با سایر مواد اصلاح‌کننده در بهبود عملکرد و توسعه پایدار قیرهای اصلاح‌شده در صنعت آسفالت است. مطالعه مشابهی توسط هوانگ و همکاران(Huang et al., 2024) نشان داد که PPA می‌تواند ساختار شیمیایی قیر را اصلاح کرده و مقاومت آن در برابر تغییر شکل‌های دائمی و شیارشدگی را افزایش دهد، به‌ویژه در قیرهای زیستی که نقش مهمی در توسعه پایدار دارند.

با وجود پیشرفت‌های قابل‌توجه در استفاده از PPA و GTR برای بهبود خواص قیرهای اصلاح‌شده، همچنان خلأهای پژوهشی مهمی در زمینه بهینه‌سازی دقیق ترکیبات و درک جامع مکانیزم‌های واکنش‌های شیمیایی و فیزیکی میان این مواد وجود دارد. از جمله چالش‌های اصلی، می‌توان به عدم اجماع در خصوص مقادیر بهینه PPA و تأثیرات متقابل آن با سایر اصلاح‌کننده‌ها، به‌ویژه تحت شرایط دمایی و بارگذاری‌های مختلف، اشاره کرد. افزون بر این، مطالعات محدودی به بررسی عملکرد بلندمدت، دوام و پایداری زیست‌محیطی این قیرهای اصلاح‌شده در شرایط واقعی بهره‌برداری روسازی‌ها پرداخته‌اند که ضرورت انجام پژوهش‌های جامع‌تر را نشان می‌دهد(Hassan Ziari et al., 2020b; Hassan Ziari, Divandari, Hajiloo, & Amini, 2019).

پژوهش حاضر با هدف تعیین نسبت بهینه ترکیبات PPA، ساسوبیت و GTR و ارزیابی جامع تأثیر آن‌ها بر خواص رئولوژیکی، مکانیکی و شیمیایی قیر اصلاح‌شده انجام شده است. بررسی دقیق مکانیزم‌های واکنش شیمیایی و تعاملات مولکولی میان این ترکیبات می‌تواند زمینه‌ساز توسعه فناوری‌های نوین در صنعت آسفالت و افزایش دوام و طول عمر روسازی‌ها باشد.

هدف اصلی این تحقیق، شناسایی طرح بهینه اصلاح قیر لاستیکی با بهره‌گیری هم‌زمان از این افزودنی‌ها و فناوری آسفالت گرم (WMA) است. بدین منظور، مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر روش سطح پاسخ (RSM) توسعه داده شده‌اند که در آن‌ها دمای اختلاط، درصد ساسوبیت و مقدار PPA به‌عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شده و شاخص‌های عملکردی نظیر مقاومت در برابر دماهای بالا و پایین، شیارشدگی و عمر خستگی به‌عنوان پاسخ‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. نتایج این تحقیق، علاوه بر ارائه راهکارهای فنی و اقتصادی، می‌تواند به تولید آسفالت‌هایی با کیفیت بالاتر، دوام بیشتر و سازگاری بهتر با محیط زیست کمک کند.

۲-روش تحقیق و مصالح آزمایشگاهی

۲-۱- قیر و مواد آزمایشگاهی

در این مطالعه از دو نوع قیر پایه ۷۰-۶۰ و ۱۰۰-۸۵ با رده‌های عملکردی PG64-22 و PG58-22 از شرکت شیمی تجارت نقش جهان اصفهان استفاده شده است. به منظور بهبود خواص عملکردی قیر، ۱۰ درصد پودر لاستیک ضایعاتی با دانه‌بندی عبوری از الک شماره ۴۰ به کار گرفته شده است. همچنین، اسید پلی‌فسفریک (PPA) به عنوان افزودنی پلیمری معدنی در مقادیر ۰,۵، ۱ و ۱,۵ درصد وزن قیر استفاده شده است. علاوه بر این، ۲ درصد ساسوبیت به منظور اصلاح خواص نصف قیر ها، مصرف شده است. این ترکیب مواد با هدف ارتقاء عملکرد رئولوژیکی، پایداری و انعطاف‌پذیری قیر در شرایط مختلف عملیاتی مورد استفاده قرار گرفته است.

۲-۲- روند اصلاح قیر با پلیمر

برای آماده‌سازی قیرهای اصلاح‌شده، ابتدا قیرهای پایه در دمای حدود ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد گرم شدند. سپس PPA به آن‌ها افزوده شده و به مدت ۳۰ دقیقه با همزن مکانیکی و سرعت ۶۰۰ دور در دقیقه مخلوط شدند. پس از آن دما به ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته و پودر لاستیک به تدریج اضافه شد، سپس اختلاط به مدت ۹۰ دقیقه با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه انجام گرفت. در نهایت، دمای مخلوط به ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته و ۲ درصد ساسوبیت اضافه شد و مجدداً به مدت ۳۰ دقیقه با سرعت ۶۰۰ دور در دقیقه هم زده شد (Qian, Fan, Ren, Lv, & Xing, 2019; Yadollahi & Mollahosseini, 2011; Hasan Ziari, Goli, & Amini, 2016).

۲-۳- آزمایش های عملکردی

در این پژوهش، آزمایش‌های عملکردی متعددی برای ارزیابی خواص قیرهای اصلاح شده انجام شده است. ابتدا، آزمایش ویسکوزیته چرخشی به منظور سنجش سختی و قابلیت کارایی قیرها در دماهای بالا انجام گرفت که نشان‌دهنده مقاومت برشی و پمپاژپذیری قیر در فرایند تولید آسفالت است. همچنین، آزمایش DSR برای بررسی خواص رئولوژیکی و ویسکوالاستیک قیرها در دمای بالا با فرکانس مشخص اجرا شد و پارامترهای

کلیدی مانند مدول مختلط برشی (G*) و زاویه فاز (δ) به‌دست آمد که مقاومت قیر در برابر کرنش پلاستیک را نشان می‌دهد. برای ارزیابی رفتار قیر در دماهای پایین و جلوگیری از ترک‌خوردگی، آزمایش BBR انجام شد که سختی خزشی (S) و نرخ نرم‌شوندگی (m-value) قیر را اندازه‌گیری می‌کند. این آزمایش‌ها به طور جامع مقاومت قیر در برابر شرایط مختلف دمایی و تنش‌های وارد شده را مورد سنجش قرار دادند. علاوه بر آن، آزمایش‌های پیشرفته‌تری مانند MSCR و LAS نیز برای ارزیابی دقیق‌تر عملکرد قیر به کار رفتند. آزمایش MSCR با هدف بررسی رفتار خزش و بازگشت قیر تحت سیکل‌های بارگذاری و باربرداری، پارامترهای مهمی چون خزش غیرقابل بازگشت (J_{nr}) و درصد بازیابی (R%) را استخراج کرد که ارتباط مستقیم با مقاومت قیر در برابر شیارشدگی دارد. همچنین، آزمایش LAS به منظور پیش‌بینی مقاومت قیر در برابر خستگی ناشی از بارگذاری‌های ترافیکی اجرا شد و با استفاده از تغییر فرکانس و دامنه بارگذاری، عملکرد قیر تحت شرایط خستگی بررسی شد (Hassan Ziari, Amini, & Goli, 2020a; Hassan Ziari, Nasiri, Amini, & Ferdosian, 2019). این مجموعه آزمایش‌ها به درک کامل‌تر ویژگی‌های عملکردی قیرهای اصلاح شده کمک کرده و امکان ارزیابی دقیق‌تر آن‌ها در شرایط عملیاتی مختلف را فراهم می‌سازد.

۲-٤- طراحی آزمایش های با استفاده از RSM

روش پاسخ سطحی (RSM) یک ابزار چندمتغیره و شناخته‌شده برای بهینه‌سازی است که با استفاده از تکنیک‌های ریاضی و آماری به تحلیل روابط و اثرات متقابل بین چند متغیر می‌پردازد. در این مطالعه، داده‌های آزمایشگاهی به صورت ریاضی و آماری تحلیل شده و با استفاده از ضریب همبستگی(R^2) ، ضریب واریانس و انحراف معیار، دقت و قابلیت تکرار مدل‌ها ارزیابی شد. سپس به کمک این مدل‌های پیش‌بینی، بهینه‌سازی چندهدفه برای تعیین ترکیب بهینه ساسوبیت و PPA انجام شد تا پارامترهای مهمی مانند G*/Sinδ ، m-value و N_f افزایش و J_{nr} کاهش یابند. در این مدل، متغیرهای پاسخ شامل G*/Sinδ، m-value، J_{nr} و N_f بوده و متغیرهای مستقل میزان PPA و ساسوبیت هستند. فرآیند تحقیق و بهینه‌سازی به صورت گام‌به‌گام و سیستماتیک دنبال شده است. این روش توانست به شکل مؤثری ترکیب بهینه افزودنی‌ها را برای بهبود خواص قیرهای اصلاح‌شده ارائه دهد و نشان‌دهنده قابلیت بالای RSM در پیش‌بینی و بهینه‌سازی ترکیبات پیچیده است(Amir Amini & Hasanpoori, 2025; Amir Amini & Parvizi, 2024).

۳-ارائه و تفسیر نتایج

۳-۱- نتایج آزمایش ویسکوزیته

نتایج آزمایش ویسکوزیته در شکل ۱ نشان داد که نوع قیر تأثیر قابل توجهی بر سختی و ویسکوزیته آن دارد؛ به طور کلی قیرهای اصلاح شده با پایه PG58 نرم‌تر و با ویسکوزیته کمتر در دماهای بالا هستند که این ویژگی باعث افزایش انعطاف‌پذیری در دماهای پایین می‌شود، اما در دماهای بالاتر احتمال نرم شدن و کاهش سختی بیشتر است. در مقابل، قیرهای پایه PG64 سخت‌تر بوده و ویسکوزیته بالاتری در تمام دماها از جمله دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهند که باعث مقاومت بیشتر در برابر تغییر شکل دائمی و شیارشدگی می‌شود. همچنین، با افزایش دما، ویسکوزیته هر دو نوع قیر کاهش می‌یابد اما کاهش ویسکوزیته در PG58 بیشتر است که ممکن است منجر به مشکلات عملکردی در دماهای بالا شود.

تأثیر افزودنی‌ها نیز در افزایش یا کاهش ویسکوزیته قیرها مشهود بود؛ افزودن GTR به هر دو نوع قیر باعث افزایش خاصیت الاستیکی و بهبود ویسکوزیته، به ویژه در دماهای بالا شد که مقاومت قیر را در برابر تغییر شکل افزایش می‌دهد. همچنین، PPAبه عنوان اصلاح‌کننده شیمیایی، با افزایش پیوندهای بین مولکولی و افزایش مولکول‌های سنگین آسفالتین، سختی و ویسکوزیته قیر را بهبود داد (Zapién-Castillo, Rivera-Armenta, Chávez-Cinco, Salazar-Cruz, & Mendoza-Martínez, 2016). در مقابل، افزودن ساسوبیت باعث کاهش ویسکوزیته قیرهای WMA نسبت به قیرهای HMA شده و شرایط تولید و اجرای آسفالت را تسهیل کرد. این نتایج اهمیت انتخاب دقیق نوع قیر و افزودنی‌ها را برای دستیابی به عملکرد مطلوب در شرایط مختلف دمایی و بارگذاری نشان می‌دهد (Diab, Sangiorgi, Ghabchi, Zaman, & Wahaballa, 2016).

۳-۲- خواص دمای بالای قیر

نتایج آزمایش عملکرد رئولوژیکی در دماهای بالا در شکل ۲ نشان می‌دهد که افزایش دما باعث کاهش پارامتر G*/sin(δ) و کاهش خواص الاستیک قیرها می‌شود که بیانگر نرم شدن و افزایش سیالیت قیر است. افزودن PPA به قیر به طور قابل توجهی این پارامتر را افزایش داده و مقاومت قیر در برابر شیارشدگی و تغییر شکل دائمی را بهبود می‌بخشد. به عنوان مثال،

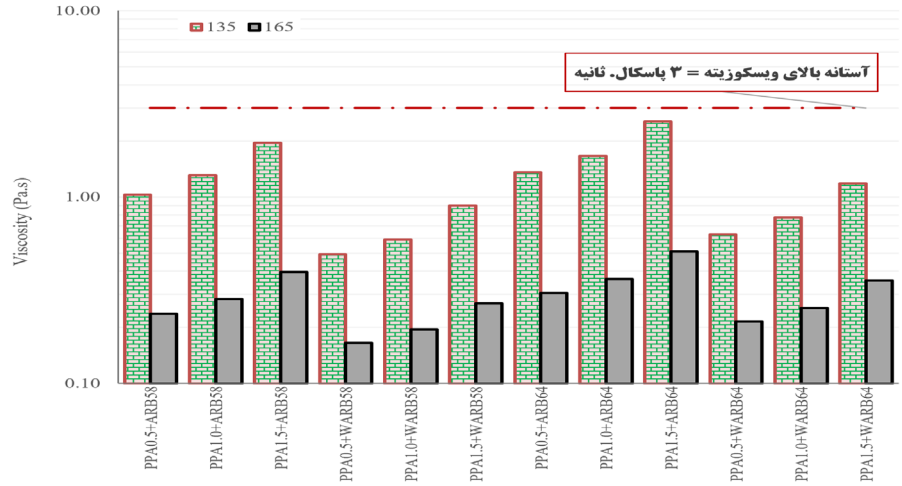
افزایش مقدار PPA تا ۱٫۵٪ در قیرهای اصلاح‌شده موجب افزایش چشمگیر G*/sin(δ) تا بیش از ۲۰۰ درصد در دماهای ٦٤ و ۸۲ درجه سانتی‌گراد شد. همچنین، افزودن ساسوبیت و ترکیب آن با GTR و PPA منجر به افزایش بیشتر این مقاومت شده و بهترین عملکرد رئولوژیکی در نمونه‌هایی با ترکیب GTR، PPA و WMA مشاهده شد، که تا چندین برابر مقاومت الاستیک قیر را افزایش می‌دهد.

مکانیسم اثرگذاری بر مقاومت دمای بالا شامل نوع قیر، دما و افزودنی‌ها است. قیرهای سخت‌تر مانند PG64 به دلیل محتوای آسفالتین بالاتر، مقاومت بیشتری در برابر نرم شدن و تغییر شکل دائمی در دماهای بالا دارند. افزایش دما باعث افزایش انرژی مولکولی و کاهش ویسکوزیته و خواص الاستیک می‌شود که ممکن است عملکرد قیر را تحت تأثیر قرار دهد. افزودنی‌هایی مانند GTR با ایجاد ساختار شبکه‌ای و افزایش خاصیت الاستیکی، و PPA با تقویت پیوندهای شیمیایی و بهبود ساختار کلوئیدی (Baumgardner et al., 2005) ، به افزایش مقاومت قیر در برابر تغییر شکل و پیرشدگی کمک می‌کنند. ساسوبیت نیز با تشکیل ساختار بلوری و افزایش سختی (Edwards, Tasdemir, & Isacsson, 2007; Kim, Lee, & Amirkhanian, 2010)، موجب بهبود خواص الاستیک و کاهش شیارشدگی در دماهای بالا می‌شود. اثر هم‌افزایی این افزودنی‌ها موجب تولید قیرهایی با عملکرد بهتر و پایداری بیشتر در شرایط سخت بارگذاری و دمایی می‌گردد.

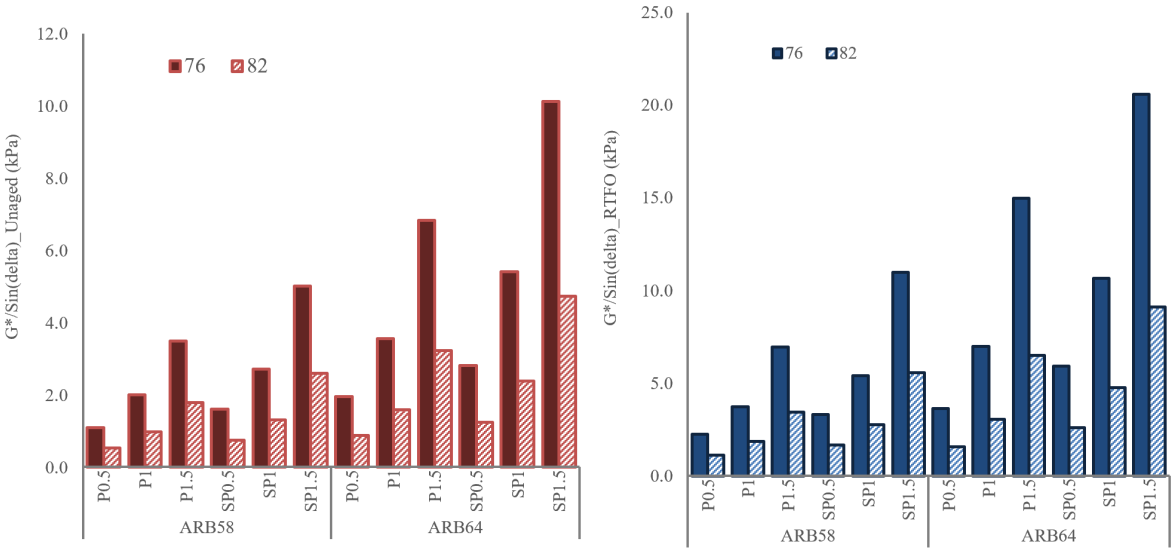
۳-۳- خواص دمای پایین

نتایج آزمایش‌های رئولوژیکی در دمای پایین در شکل ۳ نشان می‌دهد که افزودن GTR به قیر باعث افزایش خاصیت الاستیکی (افزایش مقدارm) و کاهش شکنندگی (کاهش مقدارS) می‌شود و در نتیجه مقاومت قیر در برابر ترک‌خوردگی بهبود می‌یابد. اما افزایش درصد PPA در ترکیب‌های GTR/PPA موجب کاهش مقدار m و افزایش سختی قیر شده که به تضعیف خواص رئولوژیکی و کاهش مقاومت در برابر ترک‌خوردگی در دماهای پایین منجر می‌شود. به طور خاص، PPAباعث افزایش فاز جامد و سختی بیشتر قیر شده و خواص الاستیکی را کاهش می‌دهد (Alam & Hossain, 2017). همچنین افزودن ساسوبیت در ترکیب با PPA تاثیر منفی بر انعطاف‌پذیری و مقاومت دمای پایین قیر داشته و احتمال ترک‌خوردگی را افزایش می‌دهد.

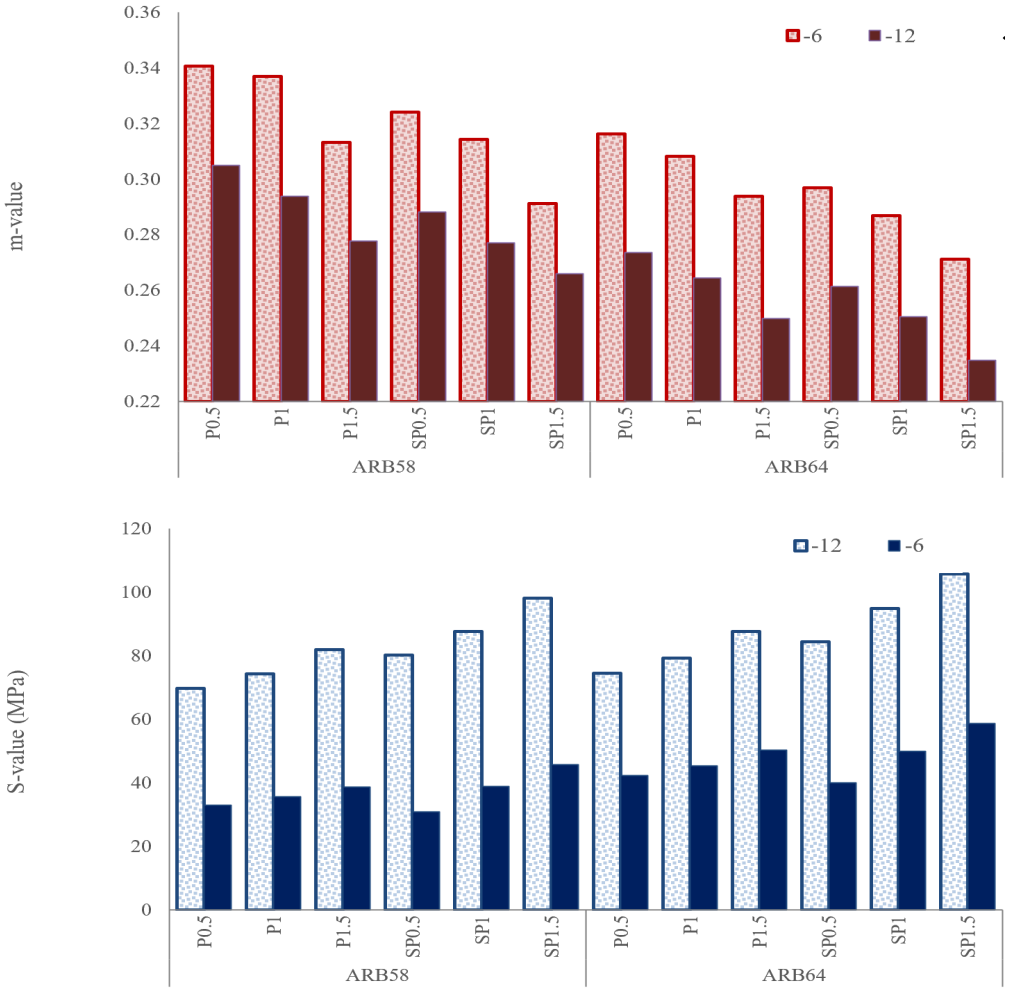
نوع قیر نیز تأثیر قابل توجهی بر عملکرد دمای پایین دارد؛ قیرهای سخت‌تر مانند PG64 که دارای زنجیرهای مولکولی بلندتر و پیوندهای قوی‌تری هستند، مقاومت کمتری در برابر ترک‌خوردگی در دماهای پایین نشان می‌دهند، در حالی که قیرهای نرم‌تر مانند PG58 انعطاف‌پذیری بیشتری دارند و ترک‌خوردگی کمتری در شرایط سرد تجربه می‌کنند. ترکیب افزایش PPA با تغییر نوع قیر از PG58 به PG64 باعث کاهش قابل توجهی در مقدار m و افزایش سختی شده است. این نتایج تأکید می‌کند که انتخاب نوع قیر و میزان افزودنی‌ها باید با توجه به شرایط محیطی و دمایی به دقت انجام شود تا از ترک‌خوردگی در مناطق سرد جلوگیری شود. به طور کلی، قیرهای اصلاح شده با ترکیب مناسب GTR و میزان کنترل شده PPA و ساسوبیت بهترین عملکرد را در دمای پایین دارند و توجه به مقدار بهینه این افزودنی‌ها در مناطق سردسیر بسیار مهم است.



شکل ۱. نتایج شاخص شیار شدگی شارپ برای قیرهای پایه و اصلاح‌شده در دمای ۵۲، ٦٤ و ۷٦ درجه سانتی‌گراد



شکل ۲. تاثیر همزمان دما و درصد پلیمر بر مقاومت دمای بالای قیرها



شکل ۳. بررسی مشخصات دمای پایین قیرها بر اساس آزمایش BBR

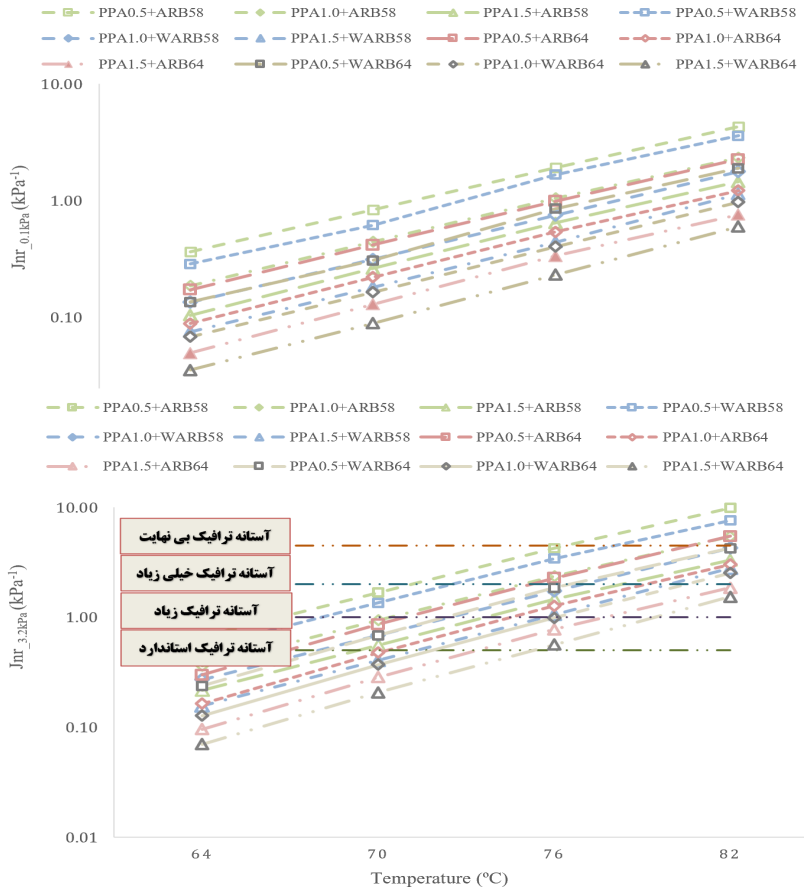
۳-٤- عملکرد ضد شیارشدگی

نتایج آزمایش MSCR در شکل ٤ داد که با افزایش دما، مدول الاستیک قیر کاهش یافته و مقاومت آن در برابر تغییر شکل دائمی (شیارشدگی) کمتر می‌شود. همچنین در تنش‌های بالاتر (۳,۲ کیلوپاسکال)، تغییر شکل دائمی قیر بیشتر است. افزودنی‌هایی مانند GTR ، PPA و ساسوبیت به‌طور قابل توجهی خواص رئولوژیکی قیر را بهبود می‌بخشند. به ویژه، GTR باعث افزایش مقاومت در برابر ت غییر شکل دائمی و بهبود قابلیت بازیابی قیر می‌شود. ترکیبات GTR با PPA و WMAعملکرد بسیار خوبی در دماها و تنش‌های مختلف دارند و مقدار تغییر شکل دائمی را به شکل چشمگیری کاهش می‌دهند. افزایش مقدار PPA به ایجاد ساختاری شبیه ژل در قیر کمک کرده که از لغزش مولکول‌ها جلوگیری و سختی و مقاومت شیارشدگی را افزایش می‌دهد (Mousavi, Kabir, & Fini, 2021). به عنوان نمونه، افزودن ۱,۵ PPA و ترکیب آن با WMA در قیر PG 58_GTR/PPA0.5 باعث کاهش ٦٧ تا ٧٦ درصدی تغییر شکل دائمی شد. همچنین استفاده از قیر سخت‌تر PG64 همراه با ترکیب PPA و WMA باعث کاهش بیش از ۸۵ درصدی این تغییر شکل می‌شود. مکانیسم اثر افزودنی‌ها شامل ایجاد شبکه سه‌بعدی توسطGTR، ایجاد پیوندهای شیمیایی جدید توسط PPA و تشکیل ساختار کریستالی توسط ساسوبیت است که باعث افزایش سختی، پایداری حرارتی و الاستیسیته قیر می‌شود (Firoozifar, Foroutan, & Foroutan, 2011; Ge, Yan, You, & Wang, 2017; Singh, Ashish, Kataware, & Habal, 2019). PPA با افزایش سختی و دمای نرم‌شدن قیر، مقاومت قیر را در دماهای بالا بهبود می‌بخشد و درصد بازیابی قیرهای لاستیکی را نیز افزایش می‌دهد (X. Yang, Peng, Chen, Liu, & He, 2023). با این حال، حساسیت قیرهای اصلاح‌شده به تنش زیاد است و ممکن است تحت بارهای ترافیکی غیرمعمول یا نوسانات دمایی دچار شیارشدگی شوند. این موضوع به دلیل رسوب بیش از حد آسفالتین در حضور PPA و ناپایداری سیستم قیر است. به همین دلیل کنترل میزان افزودنی‌ها و ترکیبات بهینه برای تضمین عملکرد مطلوب قیر ضروری است.

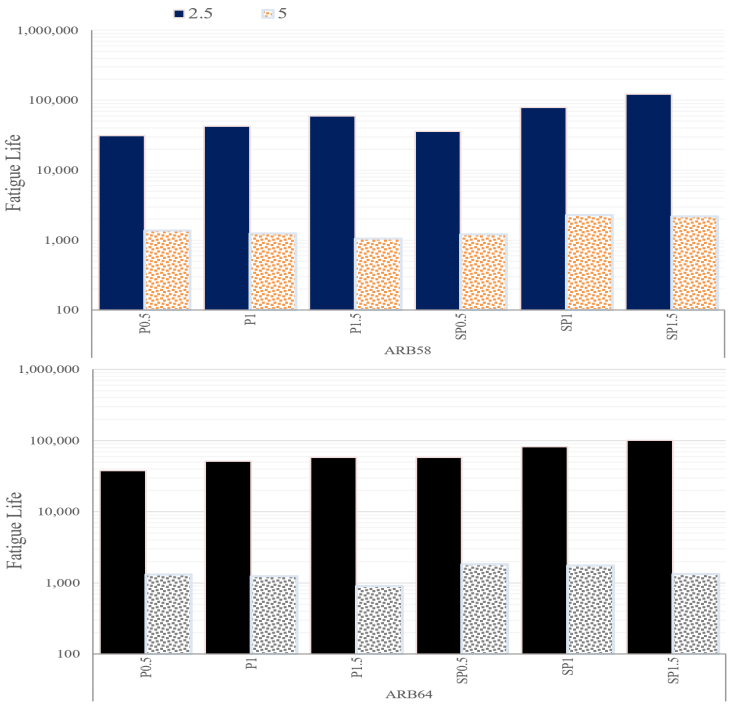
۳-۵- مقاومت در برابر خستگی قیرها

نتایج آزمایش LAS در شکل ۵ داد که عمر خستگی قیرها بسته به نوع قیر و میزان کرنش متفاوت است. قیرهای نرم‌تر PG58 در کرنش‌های بالا (بیش از ۲,۵٪) مقاومت خستگی بهتری نسبت به قیرهای سخت‌تر PG64 دارند، در حالی که PG64 در کرنش‌های پایین (۱٪) عملکرد بهتری دارد .افزودن GTR به خصوص در قیرهای نرم (PG58) باعث افزایش قابل توجه عمر خستگی می‌شود. ترکیب GTR با PPA نیز عمر خستگی را به طور چشمگیری بهبود می‌بخشد؛ برای مثال افزایش PPA تا ۱,۵٪ عمر خستگی قیر PG58_GTR/PPA0.5 را در کرنش‌های ۱، ۲,۵ و ۳ درصد به ترتیب حدود ۵۲۸٪، ۸۹٪ و ٤۹٪ افزایش داده است، اما در PG64 این افزایش کمتر بوده است. این بهبود به دلیل تشکیل ساختار شبکه‌ای پایدار توسط PPAاست که مقاومت در برابر گسترش ترک را افزایش می‌دهد. با این حال، افزایش PPA از ۰,۵ به ۱,۵٪ در کرنش‌های بالاتر (۵ و ۸ درصد) باعث کاهش عمر خستگی شد؛ به‌طوری که در کرنش ۵ درصد عمر خستگی حدود ٢٤٪ و در ۸ درصد حدود ۵۹٪ کاهش یافت. این نشان می‌دهد که قیرهای اصلاح شده بیشتر برای شرایط کرنش پایین مناسب‌اند و در سطوح کرنش بالا، قیرهای معمولی عملکرد بهتری دارند (Ameri, Mirzaiyan, & Amini, 2018; C. Wang, Xie, & Underwood, 2018).استفاده از ترکیب PPA و ساسوبیت نیز در کرنش‌های پایین تاثیر چشمگیری بر افزایش عمر خستگی دارد.

برای مثال ترکیب PPA1.5 + ساسوبیت در قیر PG58_GTR/PPA0.5 عمر خستگی را در کرنش‌های ۱، ۲,۵ و ۳ درصد به ترتیب بیش از ۱۱٦۵٪، ۲۸۹٪ و ۲۰۷٪ افزایش داده است. اما مشابهPPA، در کرنش‌های بالا تاثیر منفی بر عمر خستگی دارد. در نهایت، نتایج نشان داد که افزودنی‌های PPA و ساسوبیت برای بهبود عمر خستگی در کرنش‌های پایین و ساختارهای ضخیم مفید هستند. در کرنش‌های بالا و ساختارهای نازک‌تر، حداقل میزان PPA و عدم استفاده از ساسوبیت در قیرهای نرم (PG58) عملکرد بهتری دارد. قیرهای نرم‌تر با درجه نفوذ بالاتر در برابر خستگی عملکرد بهتری دارند، به ویژه در فشار و کرنش‌های بالا. رتبه‌بندی عمر خستگی بسته به کرنش تغییر می‌کند؛ برای مثال در کرنش ۱٪، قیرهایPPA1.5+WMA/ _PG64 و PG58/PPA1.5+WMA بهترین عملکرد را دارند، اما در کرنش ۵٪ قیرهای PG58 /PPA1.0+WMA و PG58 /PPA1.5+WMA بهترین مقاومت خستگی را نشان دادند.



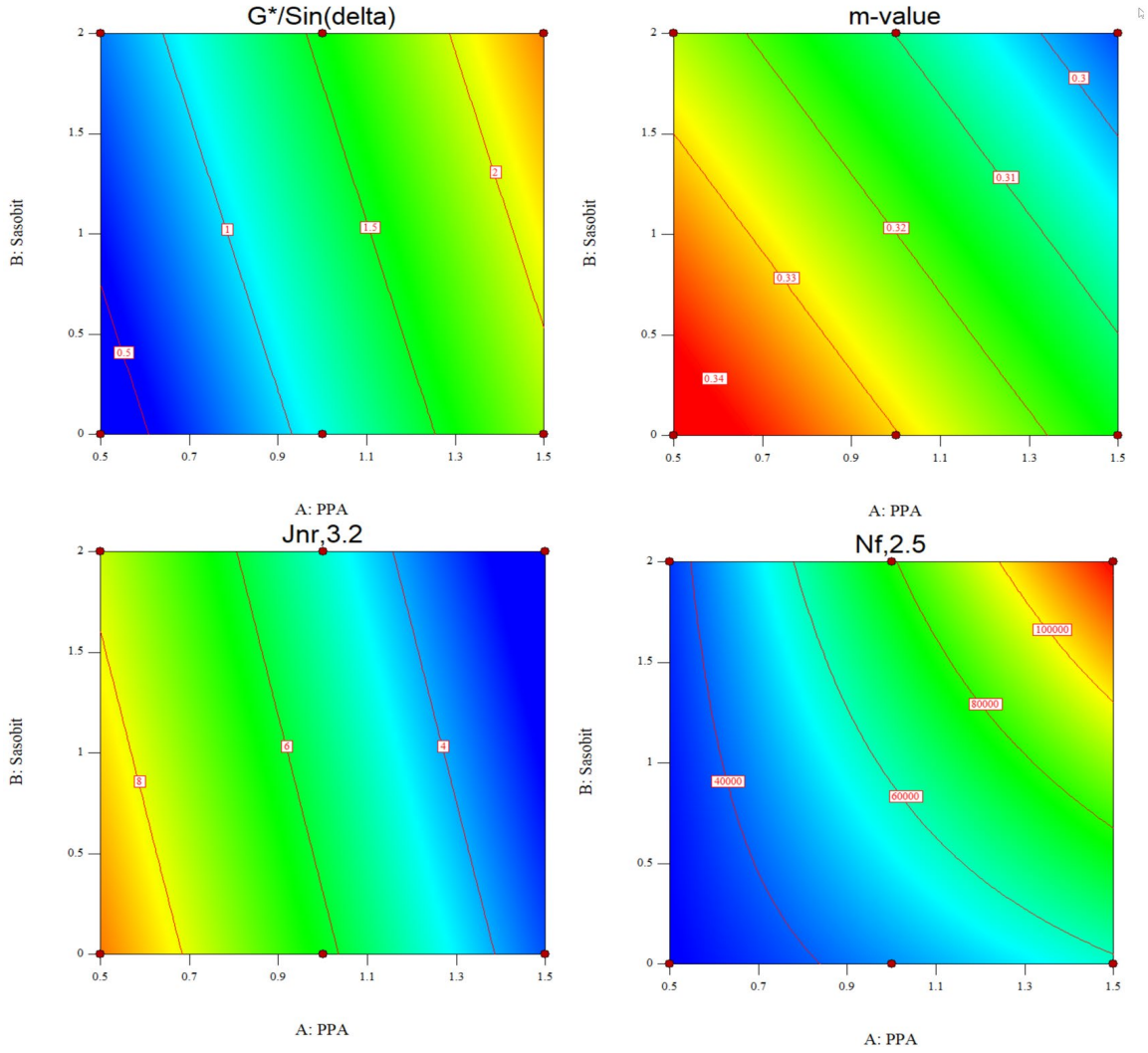
شکل ٤. ارزیابی مقاومت شیارشدگی قیرها بر اساس کرنش‌های پلاستیک



شکل ۵. بررسی عمر خستگی در سطوح کرنش ۲,۵ و ۵ درصد

جدول ۱. نتایج تحلیل ANOVA برای قیرهای ARB58 اصلاح شده

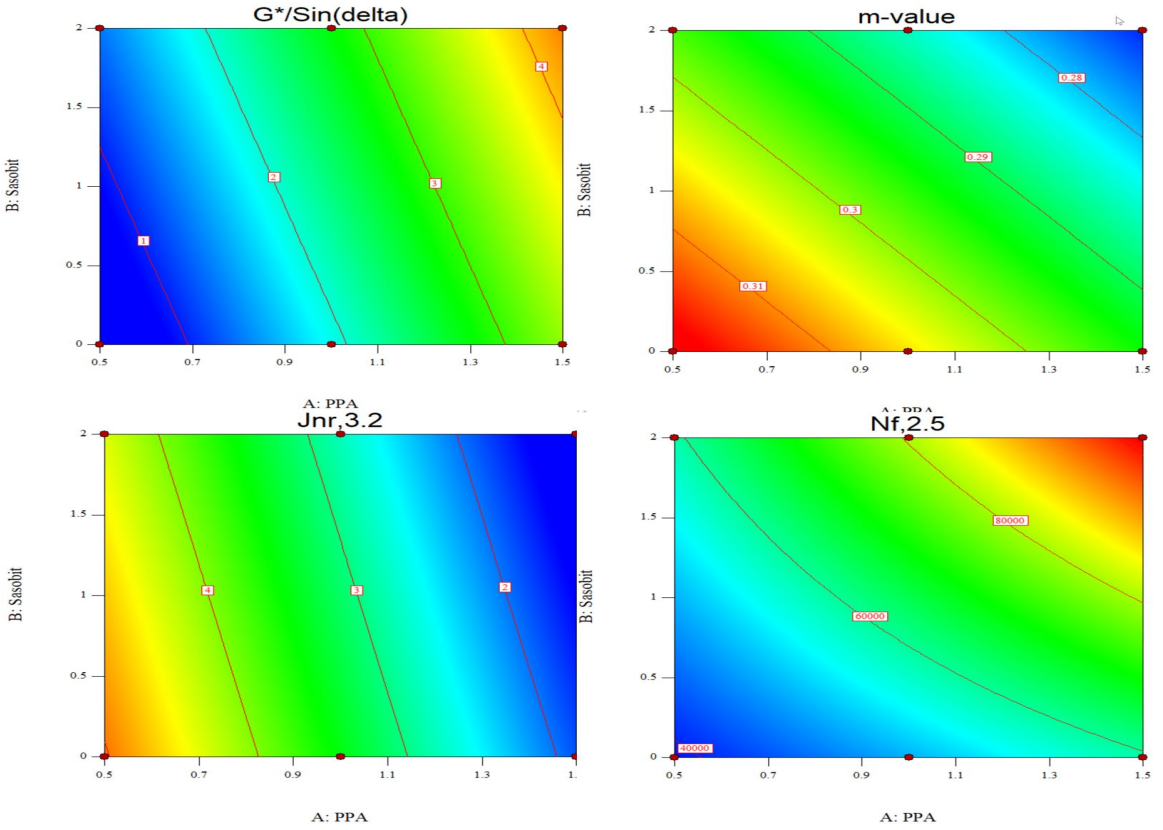
Source	Sum of Squares	Mean Square	F Value	p-value	
G*/Sinδ @ 82 °C					
Model	2.7	1.35	20.47	0.0178	significant
A-PPA	2.4	2.4	36.31	0.0092	
B-Sasobit	0.3	0.3	14.62	0.012	
m-value @ -6 °C					
Model	1.54E-03	7.68E-04	22.38	0.0157	significant
A-PPA	9.09E-04	9.09E-04	26.48	0.0142	
B-Sasobit	6.28E-04	6.28E-04	18.28	0.0235	
Jnr,3.2 @ 82 °C					
Model	34.96	17.48	23.09	0.0151	significant
A-PPA	32.41	32.41	42.81	0.0073	
B-Sasobit	2.55	2.55	13.37	0.0163	
Nf @ 2.5%					
Model	5.90E+09	1.97E+09	887.66	0.0011	significant
A-PPA	3.26E+09	3.26E+09	1469.4	0.0007	
B-Sasobit	1.79E+09	1.79E+09	809.16	0.0012	



شکل ٦. منحنی‌های هم پوشانی پارامترهای آزمایشگاهی قیرهای ARB58 تحت تاثیر اصلاح با PPA و ساسوبیت

جدول ۲. نتایج تحلیل ANOVA برای قیرهای ARB64 اصلاح شده

Source	Squares Sum of	Square Mean	Value F	p-value	
G*/Sinδ @ 82 °C					
Model	9.72	4.86	20.49	0.0178	significant
A-PPA	8.53	8.53	35.94	0.0093	
B-Sasobit	1.2	1.2	15.04	0.011	
m-value @ -6 °C					
Model	1.25E-03	6.24E-04	126.99	0.0013	significant
A-PPA	5.76E-04	5.76E-04	117.26	0.0017	
B-Sasobit	6.71E-04	6.71E-04	136.72	0.0013	
Jnr,3.2 @ 82 °C					
Model	10.69	5.34	28.83	0.011	significant
A-PPA	10.01	10.01	54.02	0.0052	
B-Sasobit	0.68	0.68	13.64	0.0152	
Nf @ 2.5%					
Model	2.65E+09	8.82E+08	167.52	0.0059	significant
A-PPA	1.01E+09	1.01E+09	191.44	0.0052	
B-Sasobit	1.51E+09	1.51E+09	286.15	0.0035	



شکل ۷. منحنی های هم پوشانی پارامترهای آزمایشگاهی قیرهای ARB64 تحت تاثیر اصلاح با PPA و ساسوبیت

٤-تعیین ترکیب بهینه

نتایج جدول ANOVA در خصوص قیرهای ARB58 نشان می‌دهد که هر دو افزودنی PPA و ساسوبیت تأثیر معناداری بر خواص قیر لاستیکی (ARB58) دارند. افزودنی PPA در همه متغیرهای آزمایشگاهی شامل مشخصات دمای بالا و پایین، کرنش پلاستیک و عمر خستگی تأثیر بسیار معناداری داشته ($P < 0.05$)و نقش غالب‌تری نسبت به ساسوبیت ایفا کرده است. ساسوبیت نیز در تمامی متغیرها تأثیر معنادار داشته، اما شدت اثر آن نسبت به PPA کمتر بوده است. این نتایج نشان می‌دهد که هر دو افزودنی می‌توانند عملکرد رئولوژیکی قیر را بهبود دهند، اما PPA تأثیر قوی‌تری دارد، به‌ویژه در کاهش تغییرشکل دائمی و افزایش دوام خستگی قیر. نمودارهای RSM در شکل۷ نشان می‌دهند که افزودنی PPA بیشترین تأثیر

را بر بهبود مقاومت دمای بالا و کاهش شیارشدگی دارد، که نشان‌دهنده افزایش سختی و مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی قیر است؛ در حالی‌که ساسوبیت اثر بیشتری بر افزایش عمر خستگی و بهبود مشخصه دمای پایین دارد، که بیانگر افزایش مقاومت خستگی و بهبود عملکرد در دمای پایین است. در این مطالعه دو طرح بهینه‌سازی مختلف برای ترکیب افزودنی‌های PPA و ساسوبیت در قیرهای اصلاح شده لاستیکی ارائه شده است که هر کدام هدف متفاوتی را دنبال می‌کنند .طرح اول (عملکردی) با تمرکز بر دستیابی به بهترین خواص رئولوژیکی و عملکردی قیر، محدودیتی بر مقدار افزودنی‌ها قائل نشده و هدف اصلی بهبود حداکثری مقاومت شیارشدگی، خستگی و رفتار در دماهای مختلف است. در مقابل، طرح دوم (اقتصادی) با هدف کاهش هزینه‌های اصلاح قیر و بهینه‌سازی مصرف افزودنی‌ها، مقادیر PPA و ساسوبیت را محدود کرده تا با حفظ عملکرد قابل قبول، هزینه‌ها به حداقل برسد.

در این طرح الف (عملکردی) شکل ۸، مقدار PPA تقریباً ۱,۴۹ و مقدار ساسوبیت نزدیک به ۰,۹۷ انتخاب شده که باعث می‌شود مقادیر پارامترهای کلیدی عملکردی مانند G*/Sin(δ) برابر با ۲,۰۸، m-value حدود ۰,۳۱، $J_{nr3.2}$ حدود ۲,۷۹ و N_f برابر با ۸۸،۷۱۶ بهینه و در سطح بالایی قرار گیرند. این نتایج نشان می‌دهد که در این حالت، قیر از نظر مقاومت شیارشدگی، رفتار در دمای پایین، مقاومت تغییر شکل دائمی و دوام در برابر خستگی در بهترین وضعیت قرار دارد. البته در این طرح محدودیتی برای مقدار افزودنی‌ها وجود ندارد و بهینه‌سازی صرفاً روی عملکرد متمرکز شده است. در مقابل، طرح ب (اقتصادی) با هدف کاهش هزینه‌ها و محدود کردن مقدار افزودنی‌ها به خصوص با توجه به قیمت بالای PPA و ساسوبیت، انجام شده است. در این حالت، مقدار PPA به حدود ۱,۱۸ و ساسوبیت به ۰,۵۹ کاهش یافته که منجر به کاهش هزینه اصلاح می‌شود اما هنوز پارامترهای عملکردی در حد قابل قبولی باقی می‌مانند. اگرچه این مقادیر نسبت به طرح عملکردی کاهش داشته، اما با توجه به صرفه اقتصادی، این ترکیب می‌تواند به عنوان یک راهکار متعادل و اقتصادی برای بهبود خواص قیر لاستیکی پیشنهاد شود.

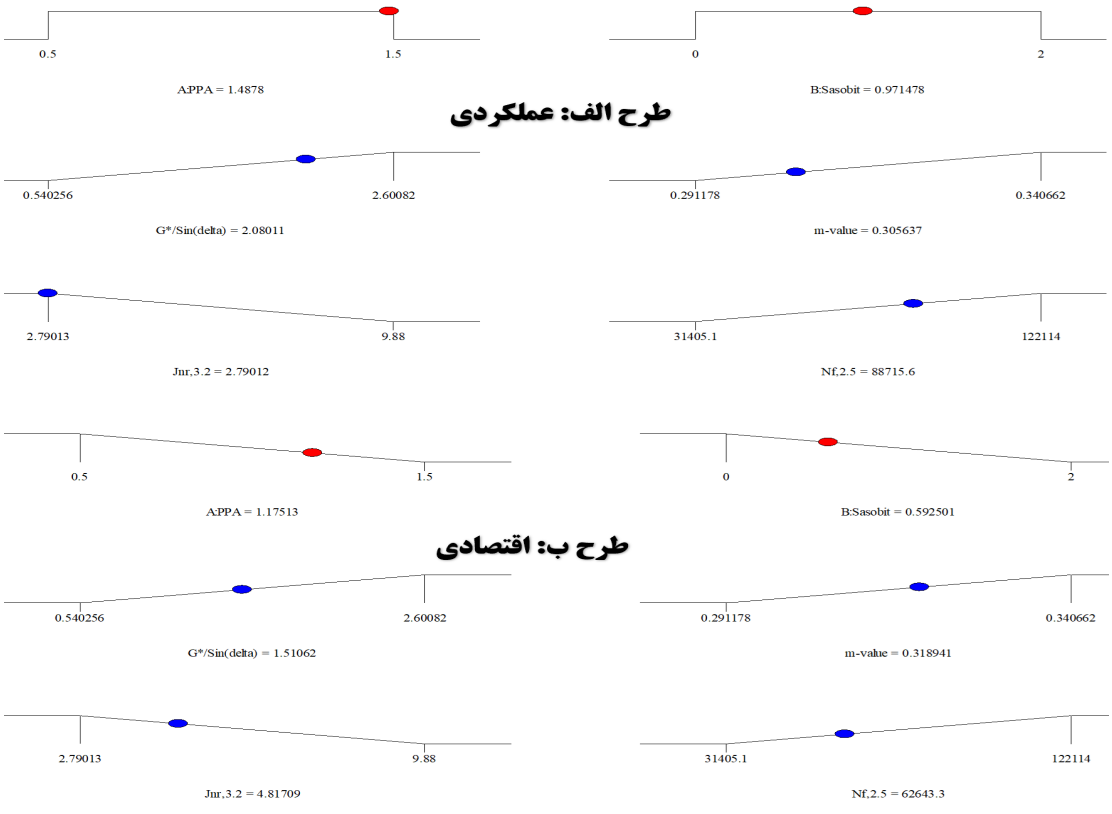
در جدول ۲ نتایج نشان می‌دهد که هر دو افزودنی PPA و ساسوبیت تأثیر آماری معناداری بر ویژگی‌های عملکردی قیر لاستیکی (ARB64) دارند. افزودنی PPA در تمام متغیرهای مورد بررسی اثر معناداری داشته($p < 0.05$)، و در متغیرهایی مانند G*/Sinδ و $J_{nr3.2}$ تأثیر غالب‌تری نسبت به ساسوبیت نشان داده است. در مقابل، ساسوبیت در این جدول برخلاف جدول قبل، در m-value و N_f تأثیری حتی قوی‌تر از PPA داشته که با مقدار F بالاتر و p-value پایین‌تر مشخص است. به‌طور کلی، هر دو افزودنی نقش مهمی در بهبود خواص رئولوژیکی و مقاومت در برابر خستگی و تغییر شکل دائمی قیر دارند. بر اساس منحنی کانتور قیرهای ARB64 در شکل ۸، افزودنی PPA نقش قوی‌تر و غالب‌تری در بهبود خواص رئولوژیکی قیر لاستیکی ARB58 ایفا می‌کند. در مقابل، تأثیر ساسوبیت نسبت به مجموعه نمودار قبلی که در آن ساسوبیت نقش قابل توجهی در افزایش مقاومت خستگی و بهبود عملکرد دمای پایین داشت، کاهش یافته است. اما به طور کلی PPA به عنوان عامل اصلی بهبود خواص قیر شناخته می‌شود. با این حال، ترکیب بهینه هر دو افزودنی می‌تواند عملکرد جامع‌تر و متعادل‌تری ایجاد کند؛ به طوری که PPA اثر اصلی را در بهبود ویژگی‌های کلیدی دارد و ساسوبیت نقش تکمیلی و کم‌رنگ‌تری ایفا می‌کند.

در شکل ۹ نمودارهای بهینه‌سازی برای قیر لاستیکی اصلاح شده با قیر پایه PG64-22 ارائه شده‌اند و دو طرح عملکردی و اقتصادی را نشان می‌دهند. در طرح الف (عملکردی)، مقدار PPAحدود ۱,۵ و ساسوبیت نزدیک به ۰,۸۸ انتخاب شده که منجر به مقادیر بالای G*/Sin(δ) برابر با ۳,۷۶، m-value حدود ۰,۲۸، $J_{nr3.2}$ معادل ۱,۵۷ و N_f حدود ۷۸،۱۱۳ شده است. این نتایج بیانگر عملکرد بسیار خوب و بهبود چشمگیر مقاومت در برابر شیارشدگی، تغییر شکل دائمی و خستگی قیر است که با توجه به سختی بالاتر قیر پایه PG64-22، انتظار می‌رود. در طرح ب (اقتصادی)، مقادیر افزودنی‌ها کاهش یافته‌اند (PPA حدود ۱,۱۶ و ساسوبیت نزدیک به ۰,۵۵) که همچنان مقادیر عملکردی قابل قبول اما پایین‌تر شامل G*/Sin(δ) برابر ۲,۶۳، m-value حدود ۰,۳، $J_{nr3.2}$ حدود ۲,۷۵ و N_f حدود ۶۱،۹۹۷ را به همراه دارد. این کاهش افزودنی‌ها

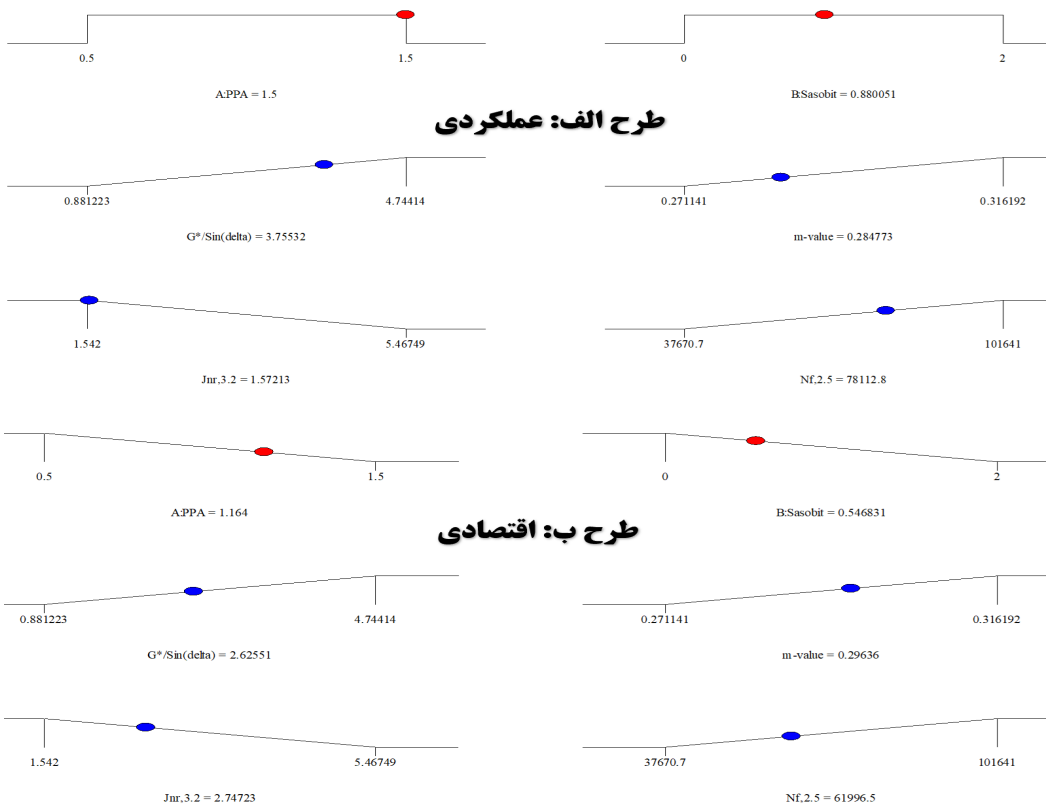
به نفع صرفه اقتصادی است و در عین حال عملکرد قیر حفظ می‌شود.

تفاوت مقدار درصد بهینه افزودنی‌های PPA و ساسوبیت بین دو نوع قیر پایه PG58-22 و PG64-22 نشان‌دهنده تأثیر ویژگی‌های پایه قیر بر نیاز به اصلاح است. در قیر پایه نرم‌تر PG58-22، برای رسیدن به خواص عملکردی مطلوب، مقادیر بالاتری از افزودنی‌ها PPA (حدود ۱,۴۹ و ساسوبیت نزدیک به ۰,۹۷ در طرح عملکردی) مورد نیاز است، زیرا این قیر پایه ذاتاً نرم‌تر و انعطاف‌پذیرتر است و برای بهبود مقاومت در برابر شیارشدگی و تغییر شکل دائمی باید مقدار بیشتری اصلاح‌کننده افزوده شود. در مقابل، در قیر پایه سخت‌تر PG64-22، مقادیر بهینه افزودنی‌ها کمتر است (PPA حدود ۱,۵ و ساسوبیت نزدیک به ۰,۸۸ در طرح عملکردی) اما با این حال، عملکرد نهایی به مراتب بهتر و مقاوم‌تر است. این به دلیل آن است که قیر پایه سخت‌تر ذاتاً ساختار مقاوم‌تری دارد و افزودنی‌ها بیشتر نقش تکمیلی و بهبوددهنده عملکرد را ایفا می‌کنند، در حالی که نیاز به اصلاح شدیدتر کمتر است.

از نظر طرح اقتصادی، تفاوت‌ها باز هم حفظ می‌شود؛ در PG58-22 مقادیر کاهش یافته برای صرفه اقتصادی بیشتر است (PPA حدود ۱,۱۸ و ساسوبیت ۰,۵۹)، در حالی که در PG64-22 این مقادیر به ترتیب کمتر و بهینه‌تر هستند (PPA حدود ۱,۱۶ و ساسوبیت ۰,۵۵). بنابراین، قیر سخت‌تر به مقدار کمتری افزودنی برای رسیدن به عملکرد قابل قبول نیاز دارد که این موضوع می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌های اصلاح شود. به طور خلاصه، قیر پایه سخت‌تر (PG64-22) نیاز به افزودنی‌های کمتر ولی با تأثیر مؤثرتر دارد، در حالی که قیر نرم‌تر (PG58-22) برای رسیدن به خواص مشابه باید با مقادیر بالاتری از اصلاح‌کننده‌ها ترکیب شود.



شکل ۸. ارائه طرح بهینه برای اصلاح قیرهای ARB58 اصلاح شده



شکل ۹. ارائه طرح بهینه برای اصلاح قیرهای ARB64 اصلاح شده

۵- نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که افزودن اسید پلی‌فسفریک (PPA) و ساسوبیت به قیرهای لاستیکی (ARB)، به‌ویژه در قیر نرم‌تر ARB58، منجر به بهبود قابل‌توجهی در مقاومت خستگی و عملکرد در دماهای بالا شد. این امر بیانگر اثربخشی بالاتر اصلاح‌کننده‌ها در قیرهای با درجه نفوذ بیشتر است. عملکرد قیرهای اصلاح‌شده به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای به نوع قیر پایه و سطح کرنش اعمالی وابسته است؛ به‌طوری که در کرنش‌های پایین، افزودنی‌ها نقش مؤثرتری در افزایش عمر خستگی ایفا می‌کنند، در حالی که در کرنش‌های بالا، افزایش سختی ناشی از افزودنی‌ها می‌تواند منجر به کاهش عمر خستگی شود.

با بهره‌گیری از روش سطح پاسخ (RSM)، مقادیر بهینه PPA و ساسوبیت برای هر نوع قیر و شرایط اقلیمی مختلف تعیین شد. نتایج نشان داد که مقادیر کمتر افزودنی‌ها برای مناطق سردسیر و مقادیر بالاتر برای مناطق گرمسیر مناسب‌تر هستند، که این امر بر اهمیت تطبیق طراحی قیر اصلاح‌شده با شرایط اقلیمی تأکید دارد.

مدل‌های بهینه‌سازی توسعه‌یافته با خطای کمتر از ۱۵ درصد نسبت به داده‌های آزمایشگاهی، از دقت و قابلیت اعتماد مناسبی در پیش‌بینی خواص رئولوژیکی و عملکردی قیرهای اصلاح‌شده برخوردار بودند و کارایی روش RSM را در طراحی قیرهای اصلاح‌شده تأیید کردند.

نتایج بهینه‌سازی عملکردی برای قیرهای لاستیکی اصلاح‌شده با دو نوع قیر پایه نشان داد که برای قیر PG58-22، ترکیب بهینه شامل ۱٫۴۹ درصد PPA و ۰٫۹۷ درصد ساسوبیت است. در مقابل، برای قیر پایه PG64-22، مقادیر بهینه به ۱٫۵۰ درصد PPA و ۰٫۸۸ درصد ساسوبیت کاهش یافت، در حالی که عملکرد کلی بهبود بیشتری نشان داد. این موضوع بیانگر نقش مؤثر قیر پایه سخت‌تر در ارتقای عملکرد نهایی قیر اصلاح‌شده است. در طرح بهینه‌سازی اقتصادی، با هدف کاهش هزینه افزودنی‌ها، مقادیر PPA و ساسوبیت کاهش داده شد. برای قیر PG58-22، ترکیب بهینه اقتصادی شامل ۱٫۱۸ درصد PPA و ۰٫۵۹ درصد ساسوبیت به دست آمد. در مورد قیر PG64-22،

مقادیر بهینه اقتصادی حتی کمتر بود (PPA = 1.16% و ساسوبیت = ۰٫۵۵٪) و با وجود کاهش مقدار افزودنی‌ها، عملکرد قابل قبولی حاصل شد. این نتایج نشان می‌دهد که قیر پایه سخت‌تر نیاز کمتری به اصلاح داشته و در عین حال قادر به ارائه عملکرد مناسب است.

به‌طور کلی، انتخاب هوشمندانه ترکیب قیر پایه و افزودنی‌ها می‌تواند منجر به افزایش دوام و عملکرد روسازی‌های آسفالتی شود و علاوه بر بهبود فنی، مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی قابل‌توجهی را نیز فراهم آورد.

٦-مراجع

-Alam, S., & Hossain, Z. (2017). Changes in fractional compositions of PPA and SBS modified asphalt binders. *Construction and Building Materials,* 152, 386-393.

-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. (2025). Effect of Nanoclay on the Rheological Properties, Rutting, Fatigue, and Storage Stability of Polymer-Modified Binder. *Journal of Materials in Civil Engineering,* 37(6), 04025129.

-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. *Case Studies in Construction Materials,* e05279.

-Amini, A., Goli, A., & Ziari, H. (2017). The influence of nanoclay on the performance properties and moisture susceptibility of rubberized asphalt mixture. *Petroleum Science and Technology,* 35(2), 175-182.

-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., & Hasanpoori, M. (2025). Optimising RAP-WMA binders reinforced with nanoclay based on response surface methodology. *International Journal of Pavement Engineering,* 26(1), 2572494.

-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. *Case Studies in 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.

-Baumgardner, G. L., Masson, J., Hardee, J. R., Menapace, A. M., & Williams, A. G. (2005). Polyphosphoric acid modified asphalt: proposed mechanisms. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists,* 74, 283-305.

-Diab, A., Sangiorgi, C., Ghabchi, R., Zaman, M., & Wahaballa, A. M. (2016). Warm mix asphalt (WMA) technologies: Benefits and drawbacks—A literature review. *Functional Pavement Design,* 1145-1154.

-Domingos, M. D. I., & Faxina, A. L. (2019). Alternative interpretation of the adequate traffic levels of modified bitumens on Superpave®: a case study with crumb rubber and polyphosphoric acid (PPA). *Road Materials and Pavement Design,* 20(sup2), S632-S646.

-Edwards, Y., Tasdemir, Y., & Isacsson, U. (2007). Rheological effects of commercial waxes and polyphosphoric acid in bitumen 160/220–high and medium temperature performance. *Construction and Building Materials,* 21(10), 1899-1908.

-Firoozifar, S. H., Foroutan, S., & Foroutan, S. (2011). The effect of asphaltene on thermal properties of bitumen. *Chemical Engineering Research and Design,* 89(10), 2044-2048.

-Ge, D., Yan, K., You, L., & Wang, Z. (2017). Modification mechanism of asphalt modified with Sasobit and Polyphosphoric acid (PPA). *Construction and Building Materials,* 143, 419-428.

-Hassan, N. A., Ruzi, N. A., Shukry, N. A. M., Jaya, R. P., Hainin, M. R., Kamaruddin, N. H. M., & Abdullah, M. E. (2019). Physical properties of bitumen containing diatomite and waste engine oil. *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences,* 15(4), 528-531.

-Huang, M., Wei, J., Zhou, Y., Li, P., Li, J., Ju, H., & Shi, S. (2024). High-Temperature Characteristics of Polyphosphoric Acid-Modified Asphalt and High-Temperature Performance

483-505.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.031
-Yadollahi, G., & Mollahosseini, H. S. (2011). Improving the performance of Crumb Rubber bitumen by means of Poly Phosphoric Acid (PPA) and Vestenamer additives. *Construction and Building Materials,* 25(7), 3108-3116.
-Yang, S., Zhu, H., Li, R., Yang, X., Tan, Q., Chen, Y., & Lei, L. (2024). Application of functionalized graphene oxide in the preparation of crumb rubber modified asphalt with excellent storage stability. Construction and Building Materials, 450, 138488.
-Yang, X., Peng, C., Chen, J., Liu, G., & He, X. (2023). Effect of short-term aging on rheological properties of bio-asphalt/SBS/PPA composite modified asphalt. *Case Studies in Construction Materials,* 19, e02439.
-Zapién-Castillo, S., Rivera-Armenta, J. L., Chávez-Cinco, M. Y., Salazar-Cruz, B. A., & Mendoza-Martínez, A. M. (2016). Physical and rheological properties of asphalt modified with SEBS/montmorillonite nanocomposite. *Construction and Building Materials,* 106, 349-356.
-Zheng, W., Wang, H., Chen, Y., Ji, J., You, Z., & Zhang, Y. (2021). A review on compatibility between crumb rubber and asphalt binder. *Construction and Building Materials,* 297, 123820.
-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.
Prediction Analysis of Its Mixtures. *Sustainability,* 16(12), 4922.
-Javed, H., Zaidi, S. B. A., & Haroon, W. (2024). Experimental investigation of the effect of polyphosphoric acid on bitumen containing crumb rubber and waste engine oil. *Innovative Infrastructure Solutions,* 9(11), 1-22.
-Kim, H., Lee, S.-J., & Amirkhanian, S. N. (2010). Effects of warm mix asphalt additives on performance properties of polymer modified asphalt binders. *Canadian Journal of Civil Engineering,* 37(1), 17-24.
-Masson, J. (2008). Brief review of the chemistry of polyphosphoric acid (PPA) and bitumen. *Energy & Fuels,* 22(4), 2637-2640.
-Masson, J., & Collins, P. (2009). FTIR study of thereaction of polyphosphoric acid and model bitumen sulfur compounds. *Energy & Fuels,* 23(1), 440-442.
-Mousavi, M., Kabir, S. F., & Fini, E. H. (2021). Polyphosphoric Acid's synergy with bio-modified bituminous composites. Resources, Conservation and Recycling, 168, 105310.
doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105310
-Prakash, G., & Suman, S. K. (2022). An intensive overview of warm mix asphalt (WMA) technologies towards sustainable pavement construction. *Innovative Infrastructure Solutions,* 7(1), 110.
-Qian, C., Fan, W., Ren, F., Lv, X., & Xing, B. (2019). Influence of polyphosphoric acid (PPA) on properties of crumb rubber (CR) modified asphalt. Construction and Building Materials, 227, 117094.
-Shu, X., & Huang, B. (2014). Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: An overview. Construction and Building Materials, 67, 217-224.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.027
-Singh, D., Ashish, P. K., Kataware, A., & Habal, A. (2019). Effects of WMA additives and hydrated lime on high-stress and high-temperature performance of Elvaloy®-and PPA-modified asphalt binder. *Road Materials and Pavement Design,* 20(6), 1354-1375.
-Song, R., Sha, A., Shi, K., Li, J., Li, X., & Zhang, F. (2021). Polyphosphoric acid and plasticizer modified asphalt: Rheological properties and modification mechanism. *Construction and Building Materials,* 309, 125158.
-Wang, C., Xie, W., & Underwood, B. S. (2018). Fatigue and healing performance assessment of asphalt binder from rheological and chemical characteristics. Materials and Structures, 51(6), 171.
doi:10.1617/s11527-018-1300-2
-Wang, T., Xiao, F., Amirkhanian, S., Huang, W., & Zheng, M. (2017). A review on low temperature performances of rubberized asphalt materials. *Construction and Building Materials,* 145,

Optimal Design of Rubberized Binders Modified with PPA and Sasobit: Rheological, Fatigue, and Thermal Performance Evaluation

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

Ehsan Hajian, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

E-mail: amiramini@jau.ac.ir

Received: May 2026- Accepted: November 2026

ABSTRACT

This study aims to investigate and optimize the combined effects of polyphosphoric acid (PPA) and Sasobit additives on the mechanical and performance-related properties of rubberized asphalt binders with ARB58 and ARB64 grades. Using the Response Surface Methodology (RSM) in conjunction with an extensive experimental program, the simultaneous influence of PPA, ground tire rubber (GTR), and Sasobit was evaluated under two distinct scenarios. In the first scenario, asphalt binders with performance grades PG58-22 and PG64-22 were modified with GTR and PPA, while in the second scenario, the same binders were further modified with 2% Sasobit under warm mix asphalt (WMA) conditions. Key performance indicators, including G*/sinδ, m-value, non-recoverable creep compliance (Jnr), and fatigue life, were measured to assess the effectiveness of the modifiers. The results confirmed the significant role of PPA and Sasobit in enhancing fatigue resistance and resistance to permanent deformation. Experimental findings revealed that the incorporation of PPA and Sasobit into the softer binder (ARB58) led to a substantial improvement in fatigue resistance and thermal performance, particularly under low strain levels typically associated with thick pavement structures. The developed RSM-based models demonstrated high predictive accuracy for optimal binder compositions, with an average error of less than 10%. From a performance-oriented optimization perspective, the optimal additive contents for ARB58 were identified as 1.49% PPA and 0.97% Sasobit, while for ARB64, the optimal values were 1.50% PPA and 0.88% Sasobit. These combinations resulted in increased stiffness, enhanced fatigue resistance, and improved low-temperature performance. In the economic optimization scenario, reducing the additive contents to approximately 1.18% PPA and 0.59% Sasobit for ARB58 and 1.16% PPA and 0.55% Sasobit for ARB64 maintained acceptable performance levels while significantly lowering modification costs. Overall, this study provides practical and scientific guidelines for selecting optimal modifier combinations and contributes to the design of durable, high-performance rubberized asphalt binders tailored to diverse climatic and traffic conditions.

Keywords: Modified Bitumen, Sasobit, Fatigue Resistance, Bitumen Thermal Performance, Design Optimization