

بهینه‌سازی رفتار رئولوژیکی و عملکرد قیر لاستیکی اصلاح‌شده در شرایط اقلیمی متنوع

مقاله علمی - پژوهشی

سینا حاتمی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی شیمی - مهندسی فرآیند، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

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

رضا سلیمانی مرغملکی، دانش آموخته دکتری، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

محمد محمدزاده، دانش آموخته کارشناسی، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه آزاده واحد قشم، قشم، ایران

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

دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۷ - پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۵

صفحه ۹۰-۷۳

چکیده

محدود بودن مطالعات موجود در زمینه بررسی اثرات هم‌زمان اصلاح‌کننده‌های پودر لاستیک بازیافتی (CRM)، روغن موتور مستعمل (WEO) و اسید پلی‌فسفریک (PPA) موجب ایجاد خلأ علمی در طراحی قیرها و روسازی‌های آسفالتی با عملکرد بالا، صرفه اقتصادی و پایداری زیست‌محیطی شده است. از این رو، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی اثر ترکیبی این سه افزودنی بر خواص رئولوژیکی و عملکردی قیر نیمه‌سنتزی انجام شد. نتایج نشان داد که ویسکوزیته قیر به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر درصد WEO قرار دارد؛ به گونه‌ای که افزایش مقدار WEO منجر به کاهش ویسکوزیته و بهبود کارایی اختلاط، پمپاژ و پخش قیر می‌شود. در حالی که افزایش درصد CRM باعث افزایش ویسکوزیته و ارتقای مقاومت قیر در دماهای بالا و شرایط بارگذاری سنگین می‌گردد. نتایج حاصل از آزمون‌های MSCR و LAS حاکی از آن است که ایجاد تعادل بهینه بین CRM و WEO می‌تواند به‌طور هم‌زمان مقاومت قیر در برابر شیارشدگی و طول عمر خستگی آن را به‌صورت معناداری بهبود بخشد. بر اساس تحلیل نتایج، سه سناریوی بهینه برای طراحی قیر اصلاح‌شده پیشنهاد شد: (۱) ترکیب CRM برابر با ۲۵٪ و WEO برابر با ۱۵٪ به‌منظور کنترل ویسکوزیته در محدوده مجاز استاندارد؛ (۲) ترکیب CRM برابر با ۲۵٪ و WEO برابر با ۱۷٫۵٪ برای بهبود کارایی اجرایی و کاهش ویسکوزیته؛ و (۳) ترکیب CRM برابر با ۱۸٫۶٪ و WEO برابر با ۱۵٪ به‌منظور افزایش مقاومت قیر در دماهای بالا و تحت ترافیک سنگین. در مجموع، نتایج این پژوهش راهکاری علمی، کاربردی و پایدار برای بهبود دوام، عملکرد و سازگاری زیست‌محیطی روسازی‌های آسفالتی ارائه می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: قیر لاستیکی اصلاح شده، عملکرد دمایی، مقاومت عملکردی، قیر گرم لاستیکی، بهینه‌سازی عملکردی، توسعه پایدار

۱-مقدمه

می‌شود، به گونه‌ای که تایرهای مستعمل در صورت عدم بازیافت صحیح می‌توانند منجر به آلودگی گسترده خاک، منابع آب و هوا شوند و پیامدهای زیان‌بار بلندمدتی برای اکوسیستم‌ها به همراه داشته باشند (Ziari, Amini, & Goli, 2020a; Ziari, Nasiri,

هم‌زمان با رشد شتابان صنعت خودروسازی و افزایش تقاضا برای وسایل نقلیه، حجم ضایعات لاستیکی ناشی از تایرهای فرسوده به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. مدیریت نامناسب این ضایعات یکی از چالش‌های مهم زیست‌محیطی محسوب

(Riccardi, & Jiang, 2025). از این رو، توسعه و ارزیابی این رویکردهای نوین، گامی مؤثر در جهت دستیابی به روسازی‌های پایدار و همسو با اصول توسعه پایدار محسوب می‌شود. رشد شتابان صنعت خودروسازی در مقیاس جهانی منجر به تولید سالانه بیش از یک میلیارد تیر مستعمل و میلیون‌ها بشکه WEO شده است. مدیریت غیراصولی این پسماندها می‌تواند پیامدهای گسترده زیست‌محیطی و بهداشتی به دنبال داشته باشد. روغن موتور پس از طی دوره بهره‌برداری در موتور خودرو، در معرض دماهای بالا و فرایندهای اکسیداسیون قرار می‌گیرد که در نتیجه آن، ترکیبات شیمیایی سمی و بالقوه خطرناک تولید می‌شود؛ ترکیباتی که در صورت رهاسازی در محیط می‌توانند سلامت انسان و پایداری اکوسیستم‌ها را به‌طور جدی تهدید کنند. افزون بر این، دفع غیرکنترل‌شده WEO موجب آلودگی خاک، منابع آب سطحی و زیرزمینی و اختلال در زنجیره‌های زیستی می‌شود (Attahiru et al., 2023; Nouali, Derriche, & Ghorbel, 2021). به‌طور مشابه، حجم بالای تولید تیرهای فرسوده و طول عمر بسیار زیاد آن‌ها، در کنار روش‌های ناکارآمد دفع، این ضایعات را به یکی از منابع اصلی آلودگی زیست‌محیطی و تهدیدی بالقوه برای سلامت عمومی تبدیل کرده است. انباشت تیرهای مستعمل نه تنها چشم‌اندازهای طبیعی و شهری را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بلکه به دلیل قابلیت اشتعال و تجزیه‌ناپذیری، مخاطرات زیست‌محیطی و ایمنی قابل‌توجهی ایجاد می‌کند. در این راستا، افزایش نگرانی‌های جهانی پیرامون تغییرات اقلیمی، مصرف انرژی و کاهش منابع طبیعی، صنعت آسفالت را به سمت توسعه و به‌کارگیری فناوری‌های پایدار و دوستدار محیط زیست سوق داده است؛ رویکردی که هدف آن کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی، افزایش استفاده از مواد بازیافتی و در عین حال، ارتقای عملکرد و دوام روسازی‌های آسفالتی است (Amir Amini, Ziari, & Goli, 2018; Picado-Santos, Capitão, & Neves, 2020; Zheng et al., 2021; Ziari, Amini, & Goli, 2020b). با وجود مزایای قابل‌توجه زیست‌محیطی و عملکردی استفاده از CRM در اصلاح قیر، این فناوری با چالش‌های فنی متعددی همراه است. یکی از مهم‌ترین محدودیت‌ها، کاهش کارایی فرآیند تولید مخلوط آسفالتی به دلیل نیاز به دماهای بالاتر برای اختلاط و تراکم قیرهای اصلاح‌شده با CRM است که این امر به افزایش مصرف انرژی و انتشار آلاینده‌ها منجر می‌شود

(Amini, & Ferdosian, 2019). افزون بر این، انباشت تیرهای فرسوده به دلیل ماهیت تجزیه‌ناپذیر آن‌ها، می‌تواند در تشدید پدیده گرمایش جهانی، افزایش مصرف انرژی و تحمیل هزینه‌های اقتصادی قابل‌توجه برای سیستم‌های مدیریت پسماند نقش مؤثری ایفا کند (Amir Amini & Imaninasab, 2018). در این میان، بهره‌گیری از تیرهای فرسوده در پروژه‌های ساخت و بهسازی روسازی‌های جاده‌ای به‌عنوان یک راهکار پایدار و دوستدار محیط زیست مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. این رویکرد، علاوه بر کاهش حجم دفن زباله‌های لاستیکی، موجب صرفه‌جویی در مصرف منابع طبیعی، کاهش وابستگی به مواد اولیه نو و کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی می‌شود (Amir Amini & Hasanpoori, 2025; Ziari, Goli, & Amini, 2016). بر همین اساس، مطالعات متعددی بر توسعه روش‌های نوآورانه بازیافت تیرهای فرسوده تمرکز یافته‌اند که در آن‌ها از پودر لاستیک حاصل از تیرهای فرسوده (CRM) به‌عنوان ماده اصلاح‌کننده قیر برای بهبود عملکرد روسازی‌های آسفالتی استفاده می‌شود (Amini, Goli, & Ziari, 2017; Ziari et al., 2016). از سوی دیگر، هم‌زمان با افزایش تعداد خودروها، تولید روغن موتور مصرف‌شده و بازیافتی (WEO) نیز روندی صعودی داشته است که در صورت دفع یا سوزاندن غیراصولی، می‌تواند تهدیدی جدی برای محیط زیست و سلامت انسان محسوب شود. به‌عنوان نمونه، سوزاندن تنها یک تن تیر فرسوده منجر به انتشار مقادیر قابل‌توجهی گازهای سمی و ذرات معلق می‌شود. در این راستا، استفاده از CRM به‌عنوان اصلاح‌کننده قیر، جایگزینی سبز، اقتصادی و کارآمد برای کاهش این آلاینده‌ها به شمار می‌آید. در سال‌های اخیر، ترکیب هم‌زمان WEO و CRM به‌عنوان یک سیستم اصلاح‌کننده نوین، توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است. این ترکیب می‌تواند با بهبود خواص رئولوژیکی، مکانیکی و شیمیایی قیر، عملکرد مخلوط‌های آسفالتی را در برابر ترک‌خوردگی، شیارشدگی و پیرشدگی افزایش دهد. نتایج مطالعات پیشین نشان می‌دهد که استفاده از اصلاح‌کننده‌های WEO-CRM علاوه بر ارتقای دوام و طول عمر روسازی‌ها، می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌های نگهداری و افزایش کارایی اقتصادی پروژه‌های راه‌سازی شود (Chen, Hu, 2024; Khan et al., 2021; Wang, Chen, Zhang, & Zhang, 2024).

به‌ویژه در بازه‌های زمانی طولانی‌تر و در شرایط دمایی متغیر، تشدید شده و یکنواختی سیستم اصلاح‌شده را به‌شدت کاهش می‌دهد.

پژوهش‌های پیشین نیز نشان‌دهنده ناپایداری ترمودینامیکی قیرهای اصلاح‌شده با لاستیک هستند که این امر تأثیر منفی قابل توجهی بر خواص مکانیکی و رفتار رئولوژیکی این قیرها دارد (Guerrero-Bustamante et al., 2024; Lv et al., 2022). ناهمگونی توزیع مواد در قیرهای اصلاح‌شده باعث تشکیل رابط‌های ضعیف در ساختار روسازی آسفالتی شده که دوام و عملکرد کلی پوشش جاده‌ای را تحت تأثیر قرار می‌دهد. (Liang et al., 2022; Zhao et al., 2017). به منظور بهبود پایداری ذخیره‌سازی و کاهش مشکلات مرتبط، استفاده از افزودنی نظیر پلی‌فسفریک اسید (PPA) پیشنهاد شده و در عمل به کار گرفته شده است. این مواد می‌توانند با بهبود سازگاری فازها و تقویت ساختار شبکه‌ای، از جداسازی فازی جلوگیری کرده و ویژگی‌های عملکردی قیرهای اصلاح‌شده با GTR را بهبود بخشند (Ge, Yan, You, & Wang, 2017).

با وجود پیشرفت‌های حاصل‌شده، بررسی هم‌زمان اثرات متقابل CRM، WEO و PPA در مطالعات پیشین بسیار محدود بوده است؛ در حالی که شناسایی و تبیین تعاملات سه‌جانبه این مواد برای طراحی قیرهای اصلاح‌شده با عملکرد بالا، اقتصادی و پایدار، امری ضروری به شمار می‌آید. به‌طور کلی، افزودنی‌هایی نظیر پلیمرها، اسیدها و پرکننده‌های معدنی می‌توانند از طریق تغییر در ساختار فیزیکی و شیمیایی قیر، ویژگی‌های کلیدی نظیر ویسکوزیته، نفوذپذیری و رفتار دمایی آن را بهبود بخشند. مرور ادبیات پژوهش نشان می‌دهد که اگرچه اثرات منفرد این افزودنی‌ها تا حدی مورد بررسی قرار گرفته است، اما رفتار ترکیبی، اثرات هم‌افزا و مکانیسم‌های اندرکنش آن‌ها هنوز به‌طور جامع و نظام‌مند مورد مطالعه قرار نگرفته‌اند.

بر این اساس، پژوهش حاضر با تمرکز بر ارزیابی هم‌زمان CRM، WEO و PPA، در پی پر کردن این خلأ علمی و ارائه بینش‌های نوین در زمینه طراحی قیرهای نیمه‌سنتزی با دوام و عملکرد بهبودیافته است. این تحقیق به‌طور ویژه تأثیر ترکیب سه‌گانه این افزودنی‌ها را بر پایداری ذخیره‌سازی، حساسیت به شیارشدگی، مقاومت در برابر خستگی و رفتار قیر در گستره‌های دمایی

(Mashaan, Ali, Karim, & Abdelaziz, 2014; Zheng et al., 2021). همچنین، ساختار شبکه‌ای ولکانیزه سطح CRM و تفاوت چگالی آن با قیر پایه، موجب بروز ناپایداری فاز در هنگام ذخیره‌سازی می‌شود (Li et al., 2019; Xie et al., 2019; Zhao et al., 2022). این بی‌ثباتی در طول زمان می‌تواند عملکرد قیر اصلاح‌شده را به‌شدت تحت تأثیر قرار دهد (Liang et al., 2017; Zhao et al., 2022). علاوه بر این، ویسکوزیته بالای مخلوط‌های حاوی CRM باعث افزایش مصرف انرژی و آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از دماهای بالای تولید می‌شود. در پاسخ به این چالش‌ها، استفاده از افزودنی‌های آسفالت با دمای پایین و ترکیبات زیست‌پایه نظیر WEO مورد توجه قرار گرفته است. اگرچه افزودنی‌های WMA قادر به کاهش دمای فرآوری و بهبود مقاومت در برابر ترک‌خوردگی حرارتی و خستگی هستند، اما معایبی چون حساسیت رطوبتی بالا، هزینه زیاد و ضعف در برابر شیارشدگی، کاربرد صنعتی آن‌ها را محدود ساخته است (Amir Amini & Hajian, 2025; Liu & Li, 2012). (Arabani, Roshani, & Hamed Gh, 2012).

در این میان، WEO به دلیل شباهت ساختار شیمیایی آن با قیر نفتی، پتانسیل بالایی در کاهش سختی و ویسکوزیته قیرهای اصلاح‌شده دارد و می‌تواند با بهبود برهم‌کنش اجزای قیر و پلیمر، به تقویت ساختار شبکه‌ای قیرهای اصلاح‌شده پلیمری کمک کند. مطالعات پیشین نشان می‌دهند که استفاده کنترل‌شده از WEO، ضمن بهبود فرآیندپذیری قیرهای حاوی CRM، می‌تواند بخشی از چالش‌های مرتبط با دما، انرژی و پایداری ذخیره‌سازی را برطرف سازد (Babangida Attahiru et al., 2023; Nouali et al., 2021).

یکی دیگر از چالش‌های اساسی و جدی در مصرف و نگهداری قیرهای لاستیکی، مشکلات مرتبط با پایداری ذخیره‌سازی و سازگاری بین CRM و قیر و قیر پایه است که محدودیت‌های قابل‌توجهی در استفاده گسترده از این نوع قیرها ایجاد می‌کند. اختلافات چشمگیر در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی دو فاز، از جمله چگالی، حلالیت، ویسکوزیته، ساختار و وزن مولکولی، زمینه‌ساز بروز پدیده جداسازی فازی در طول فرآیندهای ذخیره‌سازی، انتقال و تولید مخلوط‌های آسفالتی می‌شود (Li et al., 2019; Xie et al., 2019; Zhao et al., 2022). این مسئله

مختلف مورد بررسی قرار می‌دهد. انتظار می‌رود که استفاده هم‌زمان از این مواد، با کاهش جداسازی فازی، افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل‌های دائمی و بهبود عملکرد در برابر ترک‌خوردگی دماهای پایین و آسیب‌های خستگی، گامی مؤثر در جهت ارتقای کیفیت فنی و پایداری زیست‌محیطی قیرهای اصلاح‌شده بردارد.

۲- روش تحقیق و مصالح آزمایشگاهی

۲-۱- قیر و مواد آزمایشگاهی

در این پژوهش، از قیر پایه با رده عملکردی PG64-22 تولید شرکت نفت جی بندرعباس به‌عنوان ماده پیونددهنده اصلی استفاده شده است. به‌منظور اصلاح قیر، پودر لاستیک حاصل از CRM که از الک شماره ۵۰ عبور داده شده بود، به‌کار گرفته شد. همچنین، روغن موتور مصرف‌شده و بازیافتی به‌صورت مستقیم از خودروهای سبک در یک تعمیرگاه محلی در شهر بندرعباس جمع‌آوری و بدون انجام هرگونه فرآیند پالایش، تصفیه یا عمل‌آوری ویژه مورد استفاده قرار گرفت. استفاده از این مواد در حالت اولیه، با هدف بررسی اثر مستقیم آن‌ها بر خواص فیزیکی، رئولوژیکی و عملکردی قیرهای اصلاح‌شده انجام شده است. افزودنی پلی‌فسفریک مورد استفاده در این مطالعه از محصولات شرکت مرک آلمان انتخاب شد. این افزودنی به‌صورت مایع، با رنگ زرد مایل به تیره و فرمول شیمیایی کلی HOP(OH)(O)O(n)H مشخص می‌شود.

چگالی PPA برابر با ۲٫۰۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب بوده و نقطه جوش آن حدود ۵۳۰ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است. در این تحقیق، مقدار ۰٫۵ درصد وزنی PPA نسبت به وزن قیر پایه، به‌منظور بهبود سازگاری فازی، افزایش پایداری ذخیره‌سازی و ارتقای خواص مکانیکی و رئولوژیکی قیرهای اصلاح‌شده با لاستیک مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۲- روند اصلاح قیر با پلیمر

به‌منظور تولید قیرهای اصلاح‌شده، در مرحله نخست قیر پایه تا دمای ۱۴۵ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد تا به حالت کاملاً روان و مناسب برای اختلاط برسد. سپس، CRM و WEO

با نسبت‌های مشخص و به‌صورت تدریجی به قیر پایه افزوده شدند. اختلاط اولیه اجزا به مدت ۳۰ دقیقه و با استفاده از همزن مکانیکی با سرعت ۶۰۰ دور بر دقیقه انجام گرفت تا توزیع اولیه افزودنی‌ها در ماتریس قیر فراهم شود و از تجمع موضعی ذرات جلوگیری به عمل آید.

پس از مرحله اختلاط اولیه، دمای مخلوط به ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد افزایش داده شد و فرآیند اختلاط نهایی با استفاده از میکسر برشی با سرعت بالا انجام پذیرفت. در این مرحله، مخلوط به مدت ۹۰ دقیقه و با سرعت ۴۰۰۰ دور بر دقیقه هم زده شد تا برهم‌کنش فیزیکی و تورم ذرات CRM در محیط قیری به‌طور مؤثر تسهیل شده و یکنواختی ساختاری مناسبی حاصل گردد. استفاده از اختلاط برشی بالا در این مرحله نقش مهمی در بهبود سازگاری اجزا و افزایش پایداری ریزساختاری قیر اصلاح‌شده ایفا می‌کند (Amir Amini & Akbari, 2025; Amir Amini & Soltanian, 2025).

در ادامه، PPA با دقت و کنترل‌شده، به‌صورت تدریجی به مخلوط قیر افزوده شد. هم‌زمان با افزودن PPA، عملیات هم‌زدن متناوب انجام گرفت تا از توزیع یکنواخت افزودنی در کل مخلوط اطمینان حاصل شود. پس از افزودن کامل PPA، مخلوط برای مدت زمان مشخصی در دمای ثابت نگه داشته شد تا واکنش‌های شیمیایی موردنیاز بین PPA و اجزای قیر، از جمله فاز آسفالتنی، به‌طور مؤثر انجام پذیرد و فرآیند اصلاح شیمیایی به‌صورت کامل محقق شود. در مرحله نهایی، مخلوط حاصل به مدت حدود ۴۵ دقیقه در محدوده دمایی ۱۷۵ تا ۱۸۵ درجه سانتی‌گراد، تحت اختلاط با همزن مکانیکی سرعت بالا و با سرعت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه قرار گرفت. این مرحله به‌منظور تثبیت ساختار قیر اصلاح‌شده، بهبود همگنی نهایی و اطمینان از توزیع یکنواخت کلیه اجزا انجام شد (Amir Amini & Hajian, 2025).

۲-۳- آزمایش‌های عملکردی

آزمایش ویسکوزیته چرخشی در دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد که این دما به‌عنوان معیار مرجع برای ارزیابی کارایی اختلاط، قابلیت پمپاژ و اجرای قیر در کارخانه‌های آسفالت‌سازی در نظر گرفته می‌شود. مطابق الزامات استاندارد SHRP، مقدار

ویسکوزیته در این دما نباید از ۳ پاسکال ثانیه تجاوز کند تا قیر از نظر اجرایی مناسب تلفی شود. این آزمایش نقش مهمی در سنجش اثر افزودنی‌ها بر رفتار جریان قیر در دماهای بالا ایفا می‌کند. به منظور بررسی رفتار ویسکوالاستیک قیر در دماهای بالا و تعیین دمای عملکردی آن، آزمایش DSR مطابق معیارهای سیستم درجه‌بندی عملکردی انجام شد. نتایج این آزمایش با استفاده از پارامترهای رئولوژیکی نظیر مدول برشی مختلط (G^*) و زاویه فاز (δ)، امکان ارزیابی مقاومت قیر در برابر تغییر شکل‌های دائمی و شیارشدگی را فراهم می‌سازد (Goli, Ziari, & Amini, 2017; Ziari, Amini, Goli, & Mirzaiyan, 2018).

برای بررسی عملکرد قیر در دماهای پایین و ارزیابی حساسیت آن نسبت به ترک‌خوردگی حرارتی، آزمایش BBR انجام شد. این آزمایش با اندازه‌گیری مدول خزش (S) و نرخ تغییر مدول (m -value)، توانایی قیر در تحمل تنش‌های ناشی از انقباض حرارتی در شرایط اقلیمی سردسیر را مورد سنجش قرار می‌دهد. به منظور ارزیابی دقیق مقاومت قیر در برابر شیارشدگی تحت بارگذاری‌های ترافیکی، آزمایش MSCR با استفاده از دستگاه DSR روی نمونه‌های پیرشده کوتاه‌مدت (RTFO) انجام شد. این آزمایش در ۲۰ سیکل بارگذاری و در دو سطح تنش متفاوت اجرا گردید و پارامترهای خزش غیرقابل‌بازگشت (J_{nr}) و درصد بازیابی الاستیک (R ٪) به عنوان شاخص‌های کلیدی عملکرد قیر در برابر تغییر شکل‌های دائمی استخراج شدند (Ziari et al., 2019). علاوه بر این، آزمایش LAS به منظور پیش‌بینی رفتار خستگی و عمر مفید قیر در برابر بارگذاری‌های تکراری انجام شد. این آزمایش روی نمونه‌های پیرشده بلندمدت (PAV) و در دو مرحله شامل مرحله تعیین محدوده خطی و مرحله اعمال دامنه کرنش افزایشی، با فرکانس و دامنه بارگذاری متغیر صورت گرفت. نتایج حاصل از این آزمایش امکان تخمین عمر خستگی قیر و ارزیابی عملکرد آن در روسازی‌های آسفالتی تحت شرایط ترافیکی سنگین را فراهم می‌سازد (Ziari et al., 2020a).

۳-۱- ارائه و تفسیر نتایج

۳-۱-۱- نتایج آزمایش ویسکوزیته

در شکل ۱ سمت چپ نمودار تغییرات ویسکوزیته قیرهای

مختلف بر اساس دما نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ویسکوزیته در دمای پایین‌تر (۱۳۵ درجه سانتی‌گراد) به طور قابل توجهی بالاتر است و با افزایش دما، ویسکوزیته به طور چشمگیری کاهش می‌یابد که این رفتار طبیعی قیرهای ویسکوالاستیک است. همچنین افزایش درصد WEO باعث کاهش چشمگیر ویسکوزیته در دمای ۱۳۵ درجه شده است که نشان‌دهنده تأثیر قوی این ماده بر روانی و کارایی قیر در دماهای بالاست. تفاوت میزان CRM (۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد) نیز در کاهش ویسکوزیته مؤثر است ولی اثر آن نسبت به WEO کمتر به نظر می‌رسد. ترکیبات سبک‌تر موجود در WEO باعث نرم‌تر شدن قیر می‌شوند. این ویژگی، تنش‌های داخلی بین مولکول‌های قیر را کاهش داده و در نتیجه، ویسکوزیته قیر را پایین می‌آورد و کارایی و سهولت استفاده از آن را افزایش می‌دهد (Cao et al., 2019).

در نمودار سمت راست، ویسکوزیته در دو دمای کلیدی ۱۳۵ و ۱۶۵ درجه سانتی‌گراد به صورت میله‌ای نشان داده شده است. ویسکوزیته در دمای ۱۳۵ درجه، در برخی موارد بالاتر از حد آستانه ۳۰۰۰ میلی‌پاسکال ثانیه است که نشان می‌دهد قیر در این دما خاصیت ویسکوزیته مناسب برای کاربردهای آسفالت را ندارد و رفتار سخت و مقاوم از خود نشان می‌دهد.

اما در دمای ۱۶۵ درجه ویسکوزیته به طور قابل توجهی کاهش یافته و همگی زیر این آستانه قرار گرفته‌اند که بیانگر روانی بهتر و کارایی بیشتر قیر در دماهای بالاتر است. این کاهش ویسکوزیته برای فرآیندهای اجرایی نظیر اختلاط و پخش آسفالت در کارگاه اهمیت دارد و در صورتی که ویسکوزیته قیرها بیش از مقدار مجاز باشد می‌تواند نتایج نامطلوبی از نظر اجرایی، هزینه و آلودگی‌های زیست محیطی به همراه داشته باشد.

در نهایت، این نتایج نشان می‌دهد که تنظیم درصد WEO و CRM در تولید قیر لاستیکی می‌تواند تعادلی بین مقاومت و کارایی قیر ایجاد کند. به‌طوری‌که در دماهای بالا ویسکوزیته پایین و مناسب برای عملیات اجرایی و در دماهای پایین‌تر ویسکوزیته بالا و مناسب برای مقاومت در برابر تغییر شکل‌های پلاستیک و بارهای دینامیکی فراهم شود. این ویژگی‌ها باعث می‌شود که قیرهای بهینه شده با ترکیب مناسب WEO و CRM عملکرد بهتری در شرایط محیطی و عملیاتی مختلف داشته باشند. بنابراین لازم است با توجه به مقادیر ویسکوزیته و رعایت حدود مجاز، مقادیر CRM و WEO حتماً بهینه‌سازی شوند تا ترکیب مطلوب از نظر اجرایی و عملکردی تولید شود.

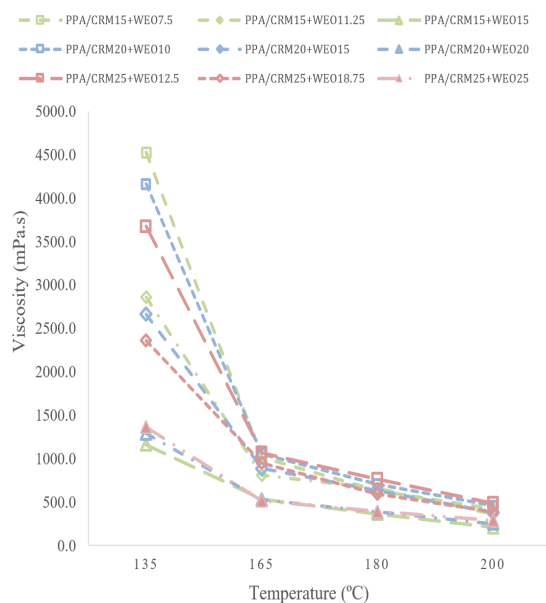
۳-۲- مقاومت در دمای بالا

شکل ۲ نمودارهای مربوط به مشخصه‌های دمای بالای قیرهای مختلف است که تغییرات پارامتر $G^*/\sin(\delta)$ را در دماهای مختلف نشان می‌دهد. این پارامتر بیانگر مقاومت قیر در برابر تغییر شکل‌های پلاستیک تحت بارهای دینامیکی است که برای ارزیابی عملکرد قیر در دماهای بالای آسفالت اهمیت دارد.

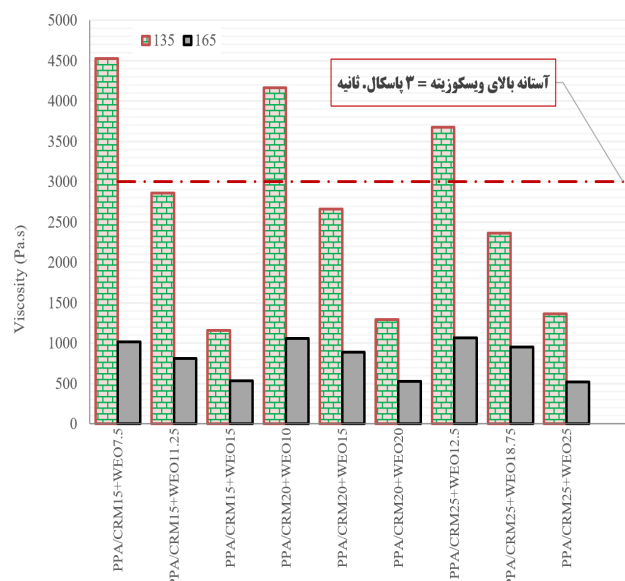
در نمودار سمت چپ، مقدار $G^*/\sin(\delta)$ در حالت قبل از پیرشدگی در دماهای مختلف نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که افزایش همزمان درصد CRM و WEO به طور کلی منجر به کاهش مقاومت قیر در برابر تغییر شکل پلاستیک می‌شود، به خصوص در دماهای پایین‌تر مانند ۵۸ و ۶۴ درجه سانتی‌گراد. همچنین با افزایش مقدار WEO، این مقاومت کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده تأثیر نرم‌کننده WEO بر کاهش سختی قیر است. این موضوع در نمودار کوچک داخل شکل که اختلاف $G^*/\sin(\delta)$ بین دماهای ۵۸ و ۶۴ را نشان می‌دهد، مشخص است و این اختلاف در نمونه‌های با درصد بالاتر WEO کمتر است. نمودار سمت راست مربوط به قیرهای بعد از پیرشدگی است که نمایانگر عملکرد قیر بعد از شرایط مشابه اختلاط و پخش در دماهای بالای اجرایی است. همان روند نمودار سمت چپ

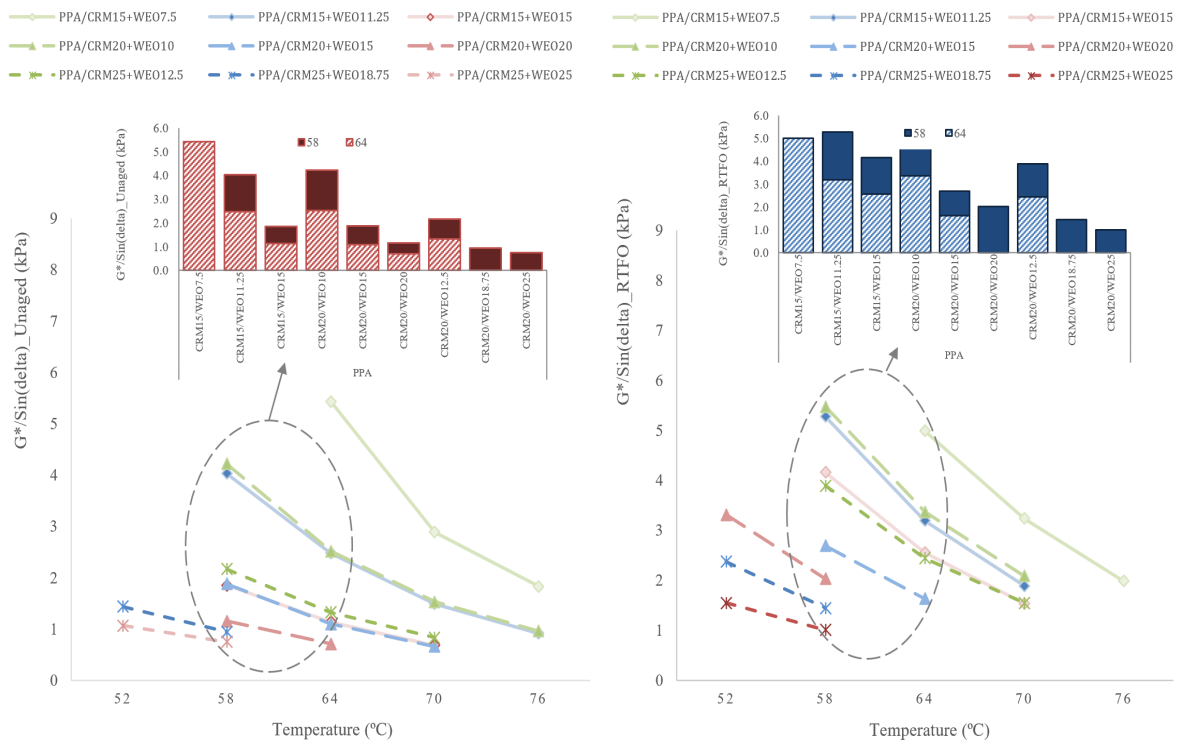
حفظ شده، یعنی افزایش CRM/WEO مقاومت را کاهش داده و افزایش WEO منجر به کاهش آن می‌شود. نکته مهم این است که در هر دو حالت، نمونه‌هایی با CRM بیشتر و WEO کمتر، مقاومت بالاتری دارند که این موضوع نشان‌دهنده بهبود عملکرد قیر در شرایط دمایی بالا و تحمل بارهای دینامیکی سنگین است. همچنین، وجود PPA کمک محسوسی به بهبود عملکرد دمای بالا کرده است. اسید پلی‌فسفریک (PPA) با واکنش شیمیایی با قیر، رزین‌ها را به آسفالتین تبدیل کرده و باعث افزایش ترکیبات درشت‌مولکولی می‌شود. این تغییر ساختاری موجب بهبود پایداری حرارتی و مقاومت آسفالت در دماهای بالا می‌گردد (Edwards, Tasdemir, & Isacsson, 2007; Hossain, 2020).

در مجموع، این نتایج تأکید می‌کنند که ترکیب بهینه باید به گونه‌ای باشد که درصد CRM کافی برای افزایش مقاومت مکانیکی قیر وجود داشته باشد و مقدار WEO به اندازه‌ای کنترل شود که کاهش زیاد سختی و مقاومت در برابر تغییر شکل ایجاد نکند. این تعادل باعث می‌شود که قیر تولیدی در دماهای بالای عملیاتی، از مقاومت لازم برای جلوگیری از تغییر شکل‌های پلاستیک تحت بارهای سنگین برخوردار باشد و در عین حال کارایی و قابلیت اجرا نیز حفظ شود.

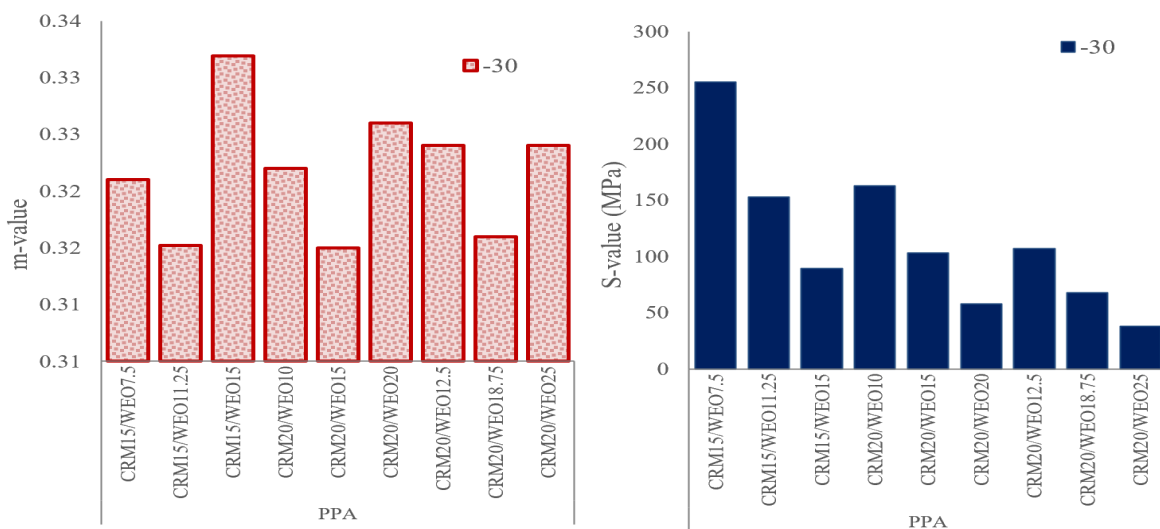


شکل ۱. بررسی نتایج آزمایش ویسکوزیته چرخشی





شکل ۲. بررسی مقاومت دمای بالای قیرها قبل و بعد از پیرشدگی



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

۳-۳- مقاومت در دمای پایین

value برای نمونه‌های مختلف با ترکیب‌های گوناگون CRM و WEO در بازه‌ای حدود ۰٫۳۱ تا ۰٫۳۴ قرار دارد. بیشترین مقدار m-value مربوط به نمونه CRM15 با ۱۵ درصد WEO است که نشان‌دهنده انعطاف‌پذیری بهتر و مقاومت بیشتر در برابر ترک‌زایی در دمای پایین است. به طور کلی، افزایش درصد WEO در برخی نمونه‌ها موجب افزایش m-value شده، اما این تغییرات در محدوده کوچکی است و تفاوت‌ها زیاد چشمگیر نیست. در نمودار سمت راست، مقدار S-value به صورت

شکل ۳ نمودارهای مرتبط با مشخصات عملکرد قیر در دماهای پایین است که به ترتیب مقدار m-value و S-value را نشان می‌دهد. این پارامترها برای ارزیابی مقاومت قیر در برابر ترک‌های ناشی از تنش‌های حرارتی و تغییرات دمای پایین اهمیت دارند. مقدار m-value نشان‌دهنده انعطاف‌پذیری قیر در دماهای پایین و توانایی آن در تحمل ترک‌خوردگی است، و مقدار S-value معرف سختی قیر و مقاومت آن در برابر ایجاد ترک‌های دمای پایین است. در نمودار سمت چپ مشاهده می‌شود که مقدار m-

شیارشدگی و رفتار الاستیک آن را به طور قابل توجهی افزایش دهد.

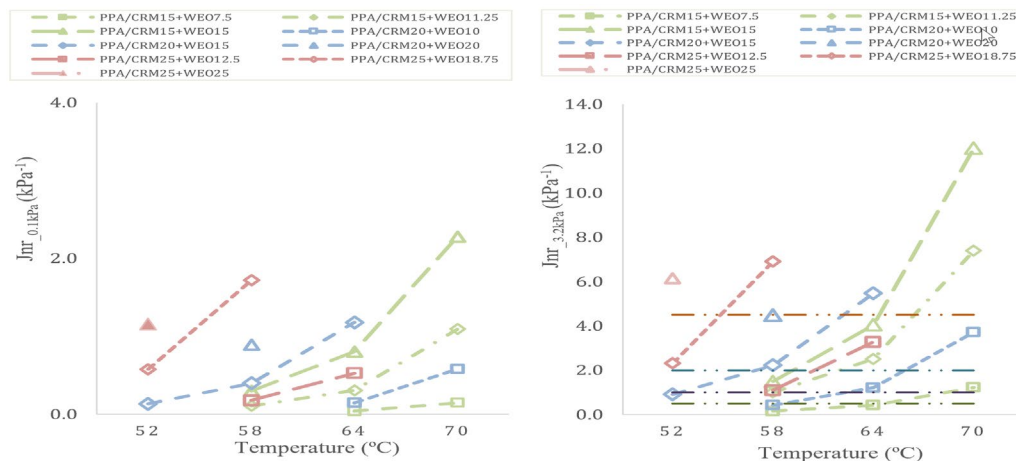
۳-۵- مقاومت در برابر خستگی

شکل ۵ عمر خستگی قیرهای اصلاح شده را بر اساس آزمون LAS در سه سطح کرنش برشی (۵، ۲، ۵ و ۸) نشان می‌دهند. محور عمودی نمودارها به صورت لگاریتمی مقیاس شده است که به دلیل گستردگی دامنه عمر خستگی، این نوع نمایش امکان مشاهده دقیق‌تر تفاوت‌ها را فراهم می‌کند. کاهش عمر خستگی با افزایش تنش اعمالی، یک رفتار معمول در مواد الاستوپلاستیک مانند قیر است که نشان‌دهنده تسریع فرآیند آسیب تجمعی و ایجاد ریزترک‌ها تحت بارگذاری‌های متناوب با شدت بیشتر می‌باشد. با بررسی اثر پارامترهای اصلاح‌کننده، مشخص است که افزایش درصد WEO در حضور CRM باعث افزایش قابل توجه عمر خستگی می‌شود. این اثر احتمالاً ناشی از بهبود خواص الاستیک-پلاستیک قیر و افزایش توانایی ماده در جذب و توزیع انرژی تنش است. به عبارت دیگر، WEO موجب افزایش انعطاف‌پذیری و کاهش شکنندگی قیر می‌شود و در نتیجه مقاومت در برابر رشد و اتصال ترک‌های ناشی از بارگذاری‌های چرخه‌ای بهبود می‌یابد. نمونه‌هایی با CRM20 همراه با مقادیر بالاتر WEO مثلاً (WEO20) بالاترین عمر خستگی را نشان می‌دهند که نشانگر بهینه‌سازی اثر اصلاح‌کننده‌ها در این ترکیب است. همچنین، مقایسه نمونه‌های CRM15 و CRM20 حاکی از آن است که افزایش درصد CRM به عنوان عامل اصلاح‌کننده موجب بهبود ساختار ماتریسی قیر و افزایش مقاومت مکانیکی آن می‌شود، که در نهایت منجر به افزایش عمر خستگی می‌گردد. این موضوع با توجه به خاصیت الاستومری CRM و تأثیر آن در توزیع تنش‌های وارد شده در شبکه قیر قابل توجیه است. در کل، نتایج نشان می‌دهند که تعامل هم‌زمان CRM و WEO می‌تواند به صورت هم افزایی عملکرد خستگی قیر را بهبود دهد، که اهمیت زیادی در طراحی مخلوط‌های آسفالتی با دوام بالا دارد. WEO همچنین به عنوان یک افزودنی مؤثر برای افزایش مقاومت در برابر خستگی، مخصوصاً در شرایط کرنش پایین‌تر و لایه‌های ضخیم آسفالت، شناخته می‌شود. این بهبود ناشی از خاصیت روان‌کنندگی آن است که اصطکاک داخلی قیر را کاهش داده و انرژی وارد شده در بارگذاری‌های متوالی را بهتر دفع می‌کند (Elahi et al., 2021). با این وجود، در کرنش‌های بالا، ممکن است عمر خستگی را کاهش دهد که این موضوع در تحقیقات قبلی نیز به آن اشاره شده است (Nuñez et al., 2014).

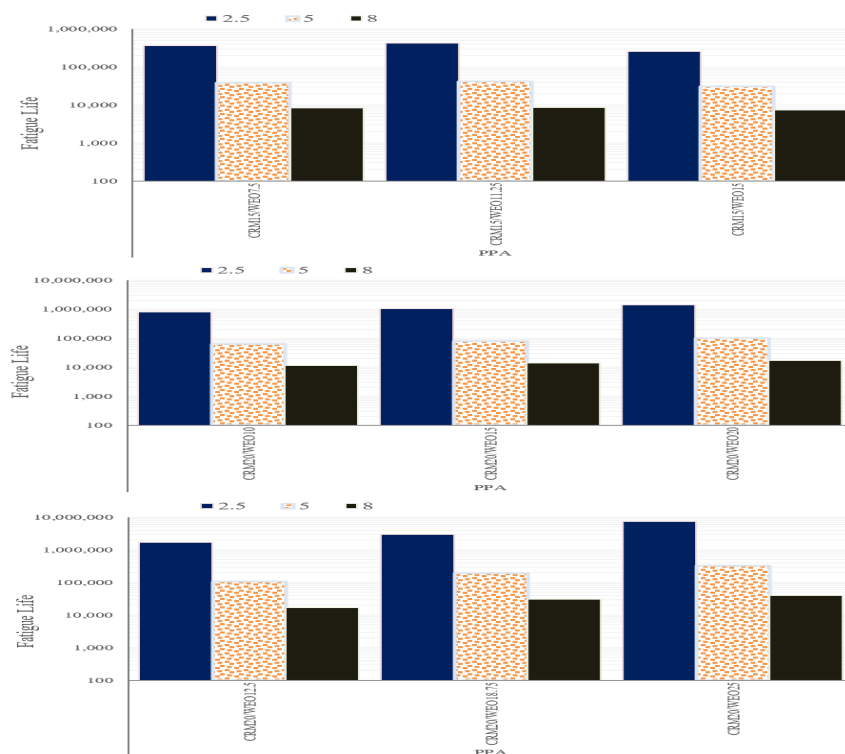
ملموس‌تر تفاوت مقاومت نمونه‌ها را نشان می‌دهد. نمونه CRM15 با ۰.۷۵ درصد WEO بالاترین مقدار سختی (حدود ۲۶۰ مگاپاسکال) را دارد که بیانگر مقاومت خوب در برابر ترک‌های دمای پایین است. با افزایش درصد CRM و WEO، مقدار S-value کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده کاهش سختی و افزایش احتمال ترک‌خوردگی است. این موضوع به ویژه برای نمونه‌هایی با درصد WEO بالاتر مشهود است. به طور کلی، ترکیب‌های با CRM کمتر و WEO پایین‌تر سختی بیشتری داشته و مقاومت بهتری در دمای پایین دارند.

۳-۴- مقاومت در برابر شیارشدگی

شکل ۴ نشان‌دهنده نتایج آزمایش MSCR بر اساس شاخص J_{nr} در دو سطح تنش ۰.۱ و ۳.۲ کیلوپاسکال برای نمونه‌های مختلف قیر با ترکیبات متفاوت PPA، CRM و WEO در دماهای مختلف هستند. شاخص J_{nr} معرف میزان تغییر شکل پلاستیک و مقاومت قیر در برابر شیارشدگی است، به این معنی که مقدار کمتر J_{nr} بیانگر مقاومت بهتر در برابر شیارشدگی و رفتار الاستیک بهتر قیر است. در نمودار اول ($J_{nr0.1}$)، مشاهده می‌شود که مقدار J_{nr} با افزایش دما افزایش می‌یابد، که این روند طبیعی است زیرا در دماهای بالاتر قیر نرم‌تر شده و مقاومت آن در برابر تغییر شکل پلاستیک کاهش می‌یابد. همچنین نمونه‌های با درصد بالاتر CRM/WEO بیشتر تمایل به افزایش سریع‌تر J_{nr} دارند که نشان‌دهنده کاهش مقاومت به شیارشدگی در دماهای بالا است. در مقابل، نمونه‌های با CRM کمتر و WEO پایین‌تر مقدار J_{nr} کمتری دارند و بنابراین عملکرد بهتری در برابر شیارشدگی از خود نشان می‌دهند. در نمودار دوم ($J_{nr3.2}$)، همان روند افزایشی با دما دیده می‌شود، اما مقادیر J_{nr} به مراتب بالاتر هستند که نشان‌دهنده رفتار تحت تنش بالاتر و در نتیجه تغییر شکل پلاستیک بیشتر است. باز هم نمونه‌هایی با درصد کمتر CRM و WEO پایین‌تر مقاومت بهتری نشان می‌دهند و مقادیر J_{nr} کمتری دارند. همچنین می‌توان مشاهده کرد که ترکیب‌های با CRM15 و WEO کمتر، بهترین عملکرد را در برابر شیارشدگی دارند، به خصوص در دمای ۷۰ درجه که مقدار J_{nr} به طور قابل توجهی کمتر از سایر نمونه‌ها است. علاوه بر این، روغن موتور سوخته باعث شکسته شدن و پخش یکنواخت ذرات لاستیک می‌شود که این امر نسبت آسفالتین به مالتین را افزایش داده و در نهایت منجر به افزایش سختی قیر می‌گردد (Jain & Chandrappa, 2023). بطور کلی نتایج آزمایش MSCR نشان داد که استفاده از روغن موتور سوخته باعث پخش یکنواخت ذرات لاستیک و افزایش نسبت آسفالتین به مالتین شده و در نتیجه سختی و مقاومت قیر را بهبود می‌بخشد. به طور کلی، تنظیم ترکیب CRM و WEO همراه با افزودنی مناسب می‌تواند مقاومت قیر در برابر



شکل ۴. بررسی مقاومت شیارشدگی قیرها بر اساس آزمایش MSCR



شکل ۵. بررسی عمر خستگی قیرها بر اساس آزمایش LAS

۳-۶- نتایج تحلیل ANOVA

باید علاوه بر مقدار CRM، مقدار و اثرات WEO را به دقت مد نظر قرار داد. برای m -value که نشان‌دهنده مقاومت قیر در برابر ترک‌های دمای پایین است، مدل کلی معنادار نیست، اما اثرات جداگانه CRM و WEO و تعامل آن‌ها نزدیک به سطح معنی‌داری قرار دارند. این نشان می‌دهد که تغییرات درصد مواد به تنهایی تأثیر قوی ندارد، اما ترکیب و تعامل آن‌ها می‌تواند به بهبود

نتایج آنالیز واریانس در جدول ۱ نشان می‌دهد که مدل کلی برای پارامتر $G^*/\sin(\delta)$ معنادار است و این پارامتر به شدت تحت تأثیر درصد WEO و تعامل بین WEO و CRM قرار دارد، در حالی که تأثیر مستقیم CRM به تنهایی معنی‌دار نیست. این مسئله اهمیت نقش WEO را در بهبود مقاومت الاستیک-ویسکوز قیر نشان می‌دهد و تأکید می‌کند که برای بهینه‌سازی این ویژگی

در درصدهای بالاتر، احتمال تغییر شکل پلاستیک و خستگی قیر بیشتر است که می‌تواند دوام آن را کاهش دهد. اما پارامتر N_f که مربوط به عمر خستگی قیر است، با افزایش CRM و WEO بهبود می‌یابد و این یعنی طول عمر قیر در برابر بارهای تکراری افزایش می‌یابد و عملکرد طولانی‌مدت بهتر می‌شود.

در مجموع، این نتایج نشان می‌دهند که افزایش درصد CRM و WEO باعث کاهش سختی و ویسکوزیته قیر و بهبود مقاومت در برابر ترک‌های دمای پایین و عمر خستگی می‌شود، اما در عین حال مقاومت قیر در برابر تغییر شکل پلاستیک کاهش می‌یابد. بنابراین، بهینه‌سازی ترکیب باید تعادلی بین بهبود کارایی، مقاومت در برابر ترک سرد و افزایش عمر خستگی با حفظ دوام مکانیکی برقرار کند که معمولاً در درصدهای متوسط CRM و WEO قابل دستیابی است.

۳-۷- پیشنهاد طرح های بهینه

در این مطالعه، سه سناریوی بهینه‌سازی برای تولید قیرهای لاستیکی با ترکیب PPA/WEO/CRM طراحی شده است که هر کدام بر اساس اهداف و شرایط خاصی تعریف شده‌اند. سناریوی اول با هدف کنترل دقیق ویسکوزیته قیر در حدود ۳۰۰۰ میلی‌پاسکال ثانیه انجام شده تا ترکیب نهایی از نظر اجرایی و پایداری عملکردی در شرایط استاندارد حفظ شود. سناریوی دوم به دنبال به حداقل رساندن ویسکوزیته است تا کارایی و سهولت اجرایی قیر بهبود یابد، به طوری که ترکیب بهینه بتواند در شرایط مختلف به راحتی استفاده شود. سناریوی سوم به ویژه برای شرایط مناطق گرمسیر و ترافیک سنگین طراحی شده است و در آن ضریب اهمیت ویژگی‌های عملکردی در دمای بالا و مقاومت در برابر شیارشدگی افزایش یافته تا قیر تولید شده بتواند در سخت‌ترین شرایط محیطی و ترافیکی دوام بیاورد.

در سناریوی اول (شکل ۷) که ویسکوزیته در دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد بر روی ۳۰۰۰ میلی‌پاسکال ثانیه تنظیم شده، ناحیه بهینه در محدوده حدودی ۲۲ تا ۲۵ درصد CRM و ۱۴،۵ تا ۱۵،۵ درصد WEO قرار دارد. این ترکیب بهینه توانسته ویسکوزیته استاندارد را حفظ کند و در عین حال مقدار $G^*/\sin(\delta)$ برابر با ۱،۷۹ است که نشان‌دهنده مقاومت خوب در برابر تغییر شکل الاستیک-ویسکوزی است. همچنین پارامتر N که نمایانگر مقاومت در برابر شیارشدگی است حدود ۲،۵۷ میلیون است که مقاومت مناسبی برای دوام قیر فراهم می‌کند. مقدار J_{nr} نیز حدود ۴،۵۵ است که نشان می‌دهد قیر در برابر بارگذاری‌های دینامیکی، رفتار قابل قبولی دارد. از نظر درصد مواد، افزایش CRM به حدود ۲۵ درصد باعث بهبود خواص مکانیکی و مقاومت در برابر تغییر

مقاومت در برابر ترک‌های سرد کمک کند. این نکته حاکی از پیچیدگی رفتار قیر در دماهای پایین است و نیاز به بررسی دقیق‌تر اثرات ترکیبی مواد دارد. پارامترهای J_{nr} و N_f که به ترتیب مقاومت در برابر تغییر شکل پلاستیک و عمر خستگی قیر را نشان می‌دهند، به طور واضح تحت تأثیر هر دو ماده و تعامل آن‌ها هستند و مدل‌ها برای این پاسخ‌ها بسیار معنی‌دار بوده‌اند. این امر اهمیت کنترل دقیق درصدهای CRM و WEO را در افزایش دوام و بهبود عملکرد طولانی‌مدت قیر لاستیکی نشان می‌دهد. به ویژه، تعامل مواد می‌تواند نقش مهمی در بهبود عمر خستگی و مقاومت در برابر بارهای دینامیکی ایفا کند.

در نهایت، ویسکوزیته در دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد نیز به شدت تحت تأثیر CRM، WEO، تعامل آن‌ها و اثرات غیرخطی CRM قرار دارد. این موضوع بیانگر پیچیدگی تأثیر ترکیبات بر خواص جریان قیر است و نشان می‌دهد که برای دستیابی به ترکیب بهینه‌ای که تعادل مناسبی بین کارایی و دوام فراهم کند، باید اثرات غیرخطی و ترکیبی مواد را به دقت مدنظر قرار داد. به طور کلی، این تحلیل تأکید می‌کند که بهینه‌سازی قیر لاستیکی نیازمند توجه همزمان به درصد هر ماده و نحوه تعامل بین آن‌ها برای دستیابی به خواص مطلوب است.

تأثیر WEO به‌خصوص در پارامترهای $G^*/\sin(\delta)$ و J_{nr} و ویسکوزیته بسیار قوی‌تر از CRM است، اما ترکیب و تعامل بین CRM و WEO نقش مهم و معناداری در اکثر پاسخ‌ها ایفا می‌کند. همچنین، برخی پاسخ‌ها مثل m -value حساسیت کمتری دارند ولی تأثیرات ترکیبی قابل توجه است. بنابراین در فرمولاسیون قیر لاستیکی، توجه دقیق به درصدهای هر دو ماده و نحوه تعامل آن‌ها برای دستیابی به خواص بهینه ضروری است.

شکل ۶ تأثیر درصدهای CRM و WEO را بر پنج مشخصه مهم عملکرد قیر لاستیکی نشان می‌دهند. پارامتر $G^*/\sin(\delta)$ که مقاومت قیر در برابر تغییر شکل الاستیک-ویسکوز است، با افزایش درصد CRM و WEO کاهش می‌یابد، یعنی قیر نرم‌تر شده و سختی کمتری پیدا می‌کند. همچنین، ویسکوزیته در دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد نیز با افزایش این دو ماده کاهش می‌یابد که باعث بهبود کارایی و سهولت در اجرای آسفالت می‌شود. از سوی دیگر، m -value که نشان‌دهنده مقاومت قیر در برابر ترک‌های دمای پایین است، در محدوده‌های میانی درصد CRM و WEO کمترین مقدار را دارد و این نشان‌دهنده شرایط بهینه برای مقاومت در برابر ترک‌های سرد است. پارامتر J_{nr} که بیانگر مقاومت قیر در برابر تغییر شکل پلاستیک تحت بارگذاری دینامیکی است، با افزایش CRM و WEO افزایش می‌یابد؛ یعنی

برابر تغییر شکل‌های الاستیک است که برای مناطق گرمسیر بسیار حیاتی است.

از طرفی، مقدار J_{nr} به ۱,۹۲ کاهش یافته که نشان‌دهنده بهبود چشمگیر در رفتار الاستیک و کاهش احتمال شیارشدگی تحت بارگذاری‌های ترافیکی سنگین است. همچنین مقاومت در برابر خستگی کاهش یافته و به حدود ۷۸۸ هزار رسیده است که نشان می‌دهد در این ترکیب مقاومت در برابر خستگی کاهش داشته است. سناریوی سوم با کاهش مقدار CRM و تنظیم دقیق WEO توانسته مقاومت مکانیکی در دماهای بالا ($G^*/\sin(\delta)$) و رفتار الاستیک تحت بارگذاری (J_{nr}) را بهبود دهد، که برای شرایط گرمسیر و ترافیک سنگین مناسب است. اما کاهش در عمر خستگی نقطه ضعفی است که می‌تواند منجر به افزایش خرابی‌های شود. ویسکوزیته نیز پایین‌تر از سناریوی اول است که می‌تواند به بهبود کارایی کمک کند، اما ممکن است از نظر دوام سطحی کمی آسیب‌پذیرتر باشد.

سه سناریوی بهینه‌سازی تولید قیر لاستیکی بر اساس اهداف متفاوت طراحی شدند که هرکدام ویژگی‌های خاص خود را دارند. سناریوی اول با محدود کردن دقیق ویسکوزیته در حد استاندارد و درصد CRM حدود ۲۵ درصد و WEO نزدیک ۱۵ درصد، ترکیبی متعادل ارائه می‌دهد که مقاومت مکانیکی مناسبی دارد و پایداری خوبی در برابر بارگذاری‌های دینامیکی و شیارشدگی نشان می‌دهد. این حالت برای پروژه‌هایی که نیاز به ثبات عملکرد و کنترل دقیق خواص قیر دارند، بسیار مناسب است. در سناریوی دوم با افزایش درصد WEO به ۱۷,۵ درصد و کاهش ویسکوزیته به حدود ۲۶۰۰ میلی‌پاسکال‌ثانیه، کارایی و سهولت اجرایی بهبود یافته اما مقاومت مکانیکی و دوام تحت بارگذاری کاهش یافته است. سناریوی سوم که برای مناطق گرمسیر و ترافیک سنگین طراحی شده، بیشترین مقاومت مکانیکی و رفتار الاستیک را ارائه می‌دهد ولی مقاومت در برابر خستگی کاهش یافته است. بنابراین انتخاب سناریو باید بر اساس شرایط محیطی و اولویت‌های پروژه صورت گیرد تا تعادلی مناسب بین کارایی و دوام برقرار شود.

شکل می‌شود، در حالی که حدود ۱۵ درصد WEO باعث کاهش ویسکوزیته تا مقدار هدف می‌شود و به انعطاف‌پذیری قیر کمک می‌کند. بنابراین، این سناریو بیشتر برای شرایطی مناسب است که کنترل دقیق ویسکوزیته و حفظ عملکرد مکانیکی مطلوب اهمیت دارد و ترکیب انتخابی تعادلی بین این دو هدف برقرار می‌کند. این ترکیب، ضمن حفظ خواص عملکردی، قابلیت اجرایی قابل قبولی نیز ارائه می‌دهد.

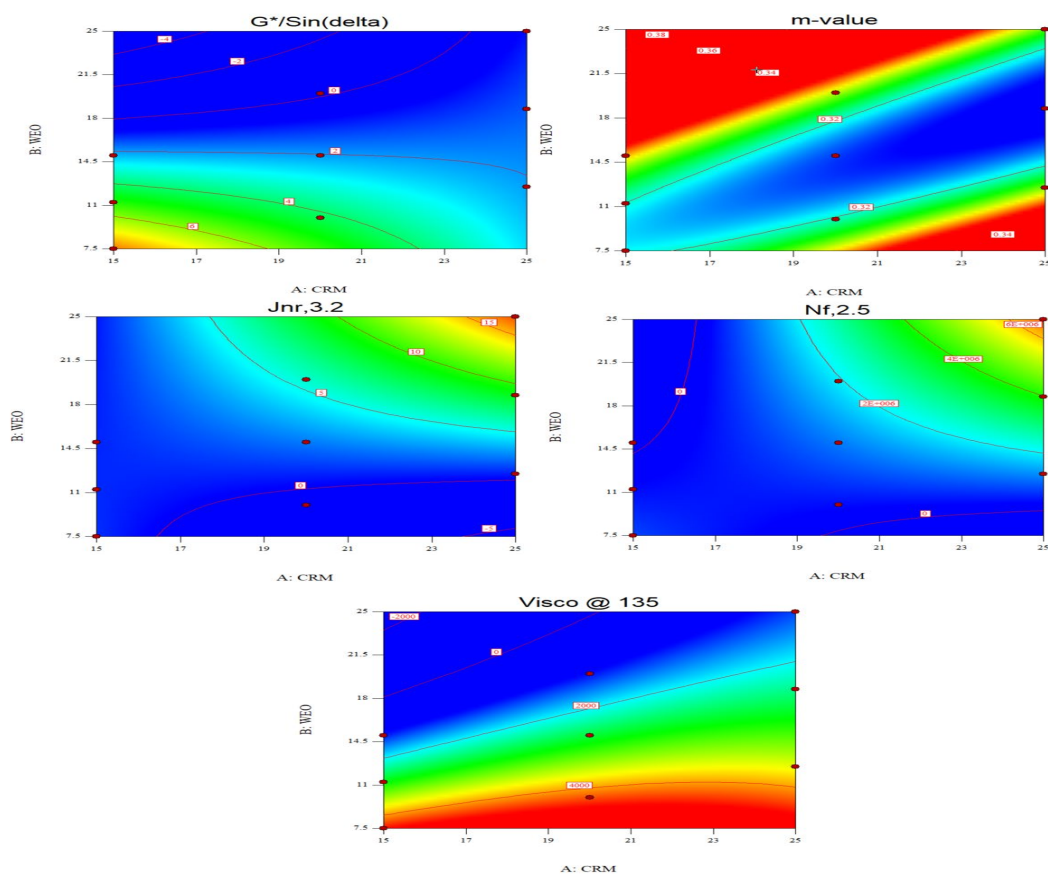
در سناریوی دوم (شکل ۸) که هدف کاهش حداقل ویسکوزیته بوده، درصد بهینه CRM ثابت و برابر با ۲۵ درصد باقی مانده، اما مقدار WEO به حدود ۱۷,۵ درصد افزایش یافته است. این تغییر باعث شده ویسکوزیته به ۲۶۱۳ میلی‌پاسکال‌ثانیه کاهش یابد که نسبت به سناریوی اول کارایی بهتری از نظر اجرایی فراهم می‌کند. هرچند مقدار $G^*/\sin(\delta)$ کاهش یافته و به ۱,۵۹ رسیده است که نشان‌دهنده کاهش نسبی مقاومت مکانیکی قیر است، اما عمر خستگی بهبود یافته و به حدود ۳,۴۳ میلیون رسیده است. این یعنی قیر توانایی بیشتری در تحمل فشارهای ترافیکی و مقاومت در برابر بروز خستگی دارد.

از سوی دیگر، مقدار J_{nr} افزایش یافته (حدود ۷,۱۵) که نشان‌دهنده کاهش کمی در رفتار الاستیک قیر و افزایش احتمال شیارشدگی تحت بارگذاری‌های دینامیکی است. بنابراین، سناریوی دوم با افزایش کارایی و کاهش ویسکوزیته، یک ترکیب متعادل برای شرایطی ارائه می‌دهد که نیاز به سهولت در اجرا و عملکرد مناسب در برابر خستگی دارند، اما مقاومت در برابر شیارشدگی کمتر باشد. این سناریو بیشتر برای شرایطی مناسب است که اولویت اصلی بهبود کارایی و قابلیت پخش و اجرا است. در سناریو سوم (شکل ۹) که تمرکز بر مقاومت در دمای بالا و مقاومت در برابر شیارشدگی بوده، درصد CRM به حدود ۱۸,۶ درصد کاهش یافته و درصد WEO حدود ۱۵ درصد است. ویسکوزیته در این حالت ۲۳۶۶ میلی‌پاسکال‌ثانیه است که نسبت به سناریوی اول (۳۰۰۰) و دوم (۲۶۱۳) کاهش یافته است.

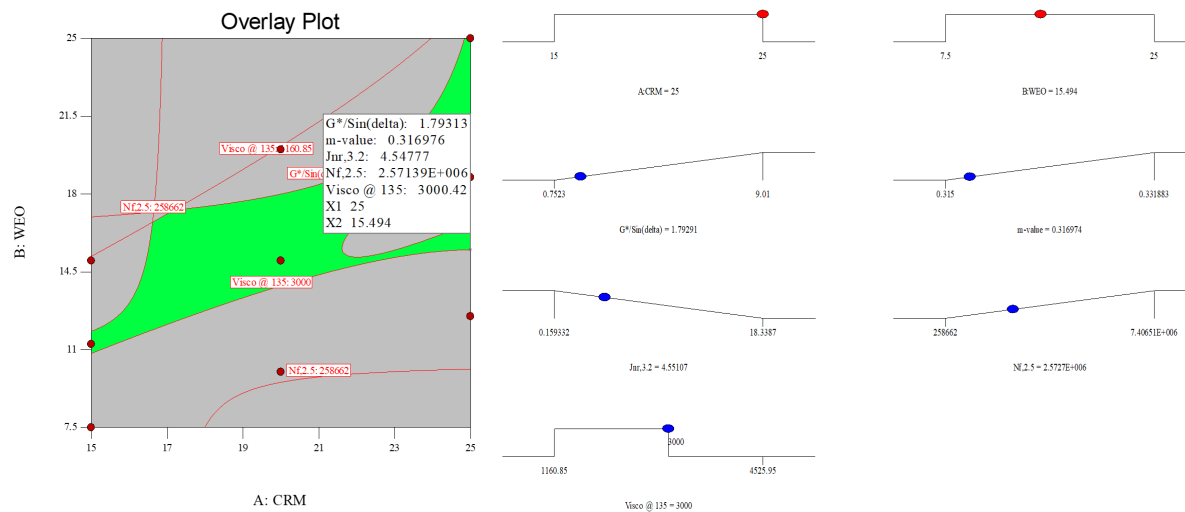
با این وجود، مقدار $G^*/\sin(\delta)$ برابر ۲,۱۲ است که بالاترین مقدار در بین سه سناریوست و نشان‌دهنده مقاومت بهتر قیر در

جدول ۱. نتایج آزمون ANOVA

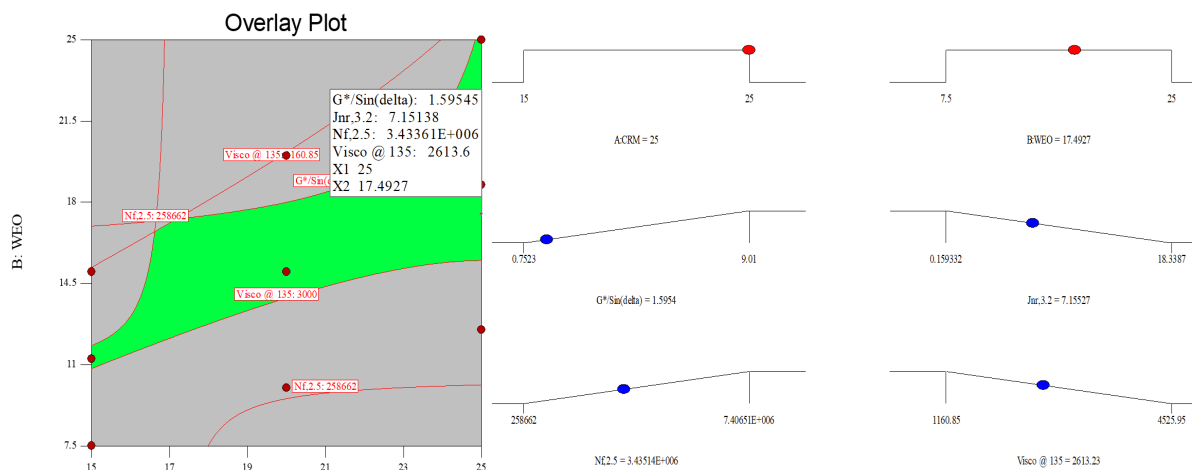
Source	Sum of Squares	Mean Square	F- Value	p-value Prob > F	
Response 1: $G^*/\sin(\delta)$					
Model	50.17	16.72	19.36	0.0035	significant
A-CRM	0.14	0.14	0.16	0.7059	
B-WEO	25.86	25.86	29.93	0.0028	
AB	13.26	13.26	15.34	0.0112	
Response 2: m-value					
Model	2.06E-04	4.12E-05	2.65	0.226	Not significant
A-CRM	1.56E-04	1.56E-04	10.01	0.0507	
B-WEO	1.56E-04	1.56E-04	10.07	0.0504	
AB	1.77E-04	1.77E-04	11.42	0.0431	
A2	7.12E-05	7.12E-05	4.58	0.1218	
Response 3: $J_{nr,3.2}$					
Model	258.99	86.33	44.75	0.0005	significant
A-CRM	18.4	18.4	9.54	0.0272	
B-WEO	56.33	56.33	29.2	0.0029	
AB	52.07	52.07	26.99	0.0035	
Response 4: $N_{f,2.5}$					
Model	3.83E+13	1.28E+13	25.16	0.0019	significant
A-CRM	7.99E+12	7.99E+12	15.76	0.0106	
B-WEO	3.52E+12	3.52E+12	6.93	0.0464	
AB	8.74E+12	8.74E+12	17.23	0.0089	
D-OBC	1.52E+07	1.52E+07	6.94	0.0579	
Response 5: Viscosity @ 135					
Model	1.27E+07	2.54E+06	252.43	0.0004	significant
A-CRM	2.13E+06	2.13E+06	212.5	0.0007	
B-WEO	7.69E+06	7.69E+06	765.5	0.0001	
AB	2.24E+05	2.24E+05	22.3	0.018	
A2	3.04E+05	3.04E+05	30.24	0.0118	
B2	16242.2	16242.2	1.62	0.2931	



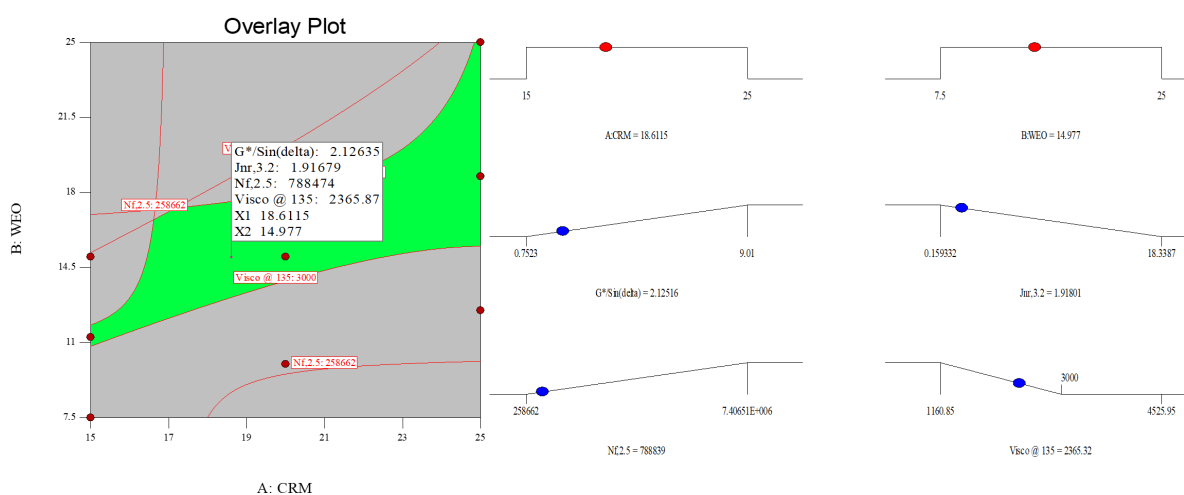
شکل ۶. نمودارهای هم پوشانی از مشخصات عملکردی و دمایی قیرهای لاستیکی اصلاح شده



شکل ۷. نتایج سناریو اول بهینه سازی (کنترل ویسکوزیته در آستانه مجاز)



شکل ۸. نتایج سناریو دوم بهینه سازی (حداقل ویسکوزیته با بهبود شرایط اجرایی)



شکل ۹. نتایج سناریو سوم بهینه سازی (ویژه مناطق گرمسیر با ترافیک سنگین)

۵- نتیجه گیری

نتیجه گیری های اصلی این پژوهش به شرح زیر است:

- ویسکوزیته قیرهای اصلاح شده در دمای ۱۳۵ درجه سانتی گراد تحت تأثیر مستقیم درصد WEO و تا حدودی CRM قرار دارد. افزایش WEO باعث کاهش محسوس ویسکوزیته و بهبود روانی و کارایی قیر در حین عملیات اجرایی می شود، در حالی که افزایش CRM موجب افزایش ویسکوزیته می گردد.

در نتیجه، تعادل مناسب بین این دو اصلاح کننده می تواند شرایط اختلاط و پخش آسفالت را بهینه نماید.

- آزمون $G^*/\sin(\delta)$ نشان داد که با افزایش CRM، مقاومت قیر در برابر تغییر شکل های ویسکوالاستیک در دماهای بالا به طور معناداری افزایش می یابد، اما افزودن WEO به دلیل خاصیت نرم کنندگی اش این مقاومت را کاهش می دهد.

- نتایج آزمون BBR نشان داد که ترکیبات با CRM پایین تر و WEO کمتر، سختی بیشتری داشته و در برابر ترک خوردگی در دماهای پایین مقاوم ترند. با این حال، m-value در اکثر نمونه ها تفاوت زیادی نداشت، که نشان می دهد اصلاح همزمان با WEO و CRM به خصوص در ترکیب های متعادل، می تواند انعطاف پذیری قیر را در دماهای پایین حفظ کند.

- نتایج آزمون MSCR نشان داد که افزایش درصدهای WEO و CRM منجر به افزایش Jnr و در نتیجه کاهش مقاومت قیر در برابر شیارشدگی می شود. این موضوع به ویژه در دماهای بالا و تحت تنش های بیشتر (۳،۲ کیلو پاسکال) ملموس تر است. بنابراین، در کاربردهایی که مقاومت در برابر شیارشدگی اهمیت بالایی دارد، توصیه می شود از مقادیر پایین تر WEO و CRM استفاده شود.

- آزمون LAS نشان داد که افزایش همزمان WEO و CRM، به ویژه در مقادیر متوسط تا بالا (مانند CRM20/WEO20)، موجب بهبود قابل توجه عمر خستگی قیر می شود. این موضوع ناشی از تقویت ویژگی های الاستیک-پلاستیک قیر و بهبود توانایی آن در جذب و توزیع انرژی تحت بارگذاری های چرخه ای است.

- تحلیل ANOVA نشان داد که تأثیر WEO بر خواص عملکردی قیر (ویسکوزیته، $G^*/\sin(\delta)$ ، Jnr، Nf) قوی تر از CRM است، اما تعامل این دو اصلاح کننده در بیشتر پاسخ ها معنادار و تعیین کننده است.

- سه سناریوی بهینه برای ترکیب CRM و WEO شناسایی شد: اول CRM=25٪ و WEO=15٪ برای کنترل ویسکوزیته؛ دوم، CRM=25٪ و WEO=17.5٪ برای بهبود عملکرد اجرایی با ویسکوزیته کمتر؛ سوم، CRM=18.6٪ و WEO=15٪ برای مقاومت بالاتر در دماهای بالا. این ترکیبات بهینه امکان تنظیم خواص قیر بر اساس نیازهای عملیاتی را فراهم می کنند.

۶- مراجع

- 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., & 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.
- Arabani, M., Roshani, H., & Hamed Gh, H. (2012). Estimating Moisture Sensitivity of Warm Mix Asphalt Modified with Zycosoil as

- Guerrero-Bustamante, O., Camargo, R., Dawd, I., Duque, J., Polo-Mendoza, R., Gálvis, J., Acosta, C. (2024). Implementation of Crumb Rubber (CR) in Road Pavements: A Comprehensive Literature Review. *Infrastructures*, 9(12), 223.
- Hossain, Z., Alam, M. S., & Baumgardner, G. (2020). Evaluation of rheological performance and moisture susceptibility of polyphosphoric acid modified asphalt binders. *Road Materials and Pavement Design*, 21(1), 237-252.
- Jain, S., & Chandrappa, A. K. (2023). A laboratory investigation on benefits of WCO utilisation in asphalt with high recycled asphalt content: emphasis on rejuvenation and aging. *International Journal of Pavement Engineering*, 24(1), 2172577.
- Khan, M. Z. H., Koting, S., Katman, H. Y. B., Ibrahim, M. R., Babalghaith, A. M., & Asqool, O. (2021). Performance of high content reclaimed asphalt pavement (RAP) in asphaltic mix with crumb rubber modifier and waste engine oil as rejuvenator. *Applied Sciences*, 11(11), 5226.
- Li, B., Li, H., Wei, Y., Zhang, X., Wei, D., & Li, J. (2019). Microscopic properties of hydrogen peroxide activated crumb rubber and its influence on the rheological properties of crumb rubber modified asphalt. *Materials*, 12(9), 1434.
- Liang, M., Xin, X., Fan, W., Ren, S., Shi, J., & Luo, H. (2017). Thermo-stability and aging performance of modified asphalt with crumb rubber activated by microwave and TOR. *Materials & Design*, 127, 84-96.
- Liu, J., & Li, P. (2012). Low Temperature Performance of Sasobit-Modified Warm-Mix Asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(1), 57-63.
doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000347
- Lv, Q., Huang, W., Zheng, M., Hu, Y., Yan, C., & Wang, J. (2022). Understanding the particle effects and interaction effects of crumb rubber modified asphalt regarding bonding properties. *Construction and Building Materials*, 348, 128716.
- Mashaan, N. S., Ali, A. H., Karim, M. R., & Abdelaziz, M. (2014). A review on using crumb rubber in reinforcement of asphalt pavement. *The Scientific World Journal*, 2014(1), 214612.
- Nouali, M., Derriche, Z., & Ghorbel, E. (2021). Effect of Used Engine Oil Addition on the Rheological Properties of a Plastic Bag Waste-Modified 40/50 Grade Bitumen. *Journal of an Antistrip Agent Using Surface Free Energy Method. Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(7), 889-897.
doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000455
- Attahiru, Y. B., Mohamed, A., Eltwati, A., Burga, A. A., Ibrahim, A., & Nabade, A. M. (2023). Effect of waste cooking oil on warm mix asphalt block pavement—A comprehensive review. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 129, 103310.
- Babangida Attahiru, Y., Mohamed, A., Eltwati, A., Burga, A. A., Ibrahim, A., & Nabade, A. M. (2023). Effect of waste cooking oil on warm mix asphalt block pavement – A comprehensive review. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 129, 103310.
doi.org/10.1016/j.pce.2022.103310
- Cao, Z., Chen, M., Liu, Z., He, B., Yu, J., & Xue, L. (2019). Effect of different rejuvenators on the rheological properties of aged SBS modified bitumen in long term aging. *Construction and Building Materials*, 215, 709-717.
- Chen, Y., Hu, K., Chen, Y., Zhang, T., & Zhang, W. (2024). Preparation and modification mechanism study of microwave-treated crumb rubber and waste engine oil-modified asphalt. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(8), 12483-12498.
- 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.
- Elahi, Z., Mohd Jakarni, F., Muniandy, R., Hassim, S., Ab Razak, M. S., Ansari, A. H., & Ben Zair, M. M. (2021). Waste cooking oil as a sustainable bio modifier for asphalt modification: A review. *Sustainability*, 13(20), 11506.
- 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.
- Goli, A., Ziari, H., & Amini, A. (2017). Influence of carbon nanotubes on performance properties and storage stability of SBS modified asphalt binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(8), 04017070.

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., Amini, A., Goli, A., & Mirzaiyan, D. (2018). Predicting rutting performance of carbon nano tube (CNT) asphalt binders using regression models and neural networks. *Construction and Building Materials*, 160, 415-426.

-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.

Materials in Civil Engineering, 33(3), 04020484.

doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003533

-Nuñez, J. Y. M., Domingos, M. D. I., & Faxina, A. L. (2014). Susceptibility of low-density polyethylene and polyphosphoric acid-modified asphalt binders to rutting and fatigue cracking. *Construction and Building Materials*, 73, 509-514.

-Picado-Santos, L. G., Capitão, S. D., & Neves, J. M. (2020). Crumb rubber asphalt mixtures: A literature review. *Construction and Building Materials*, 247, 118577.

-Wang, T., Riccardi, C., & Jiang, W. (2025). From waste to sustainable pavement: Rejuvenation of asphalt binder using waste engine oil residue and crumb rubber. *Chemical Engineering Journal*, 505, 159523.

-Xie, J., Yang, Y., Lv, S., Zhang, Y., Zhu, X., & Zheng, C. (2019). Investigation on rheological properties and storage stability of modified asphalt based on the grafting activation of crumb rubber. *Polymers*, 11(10), 1563.

-Zhao, Y., Chen, M., Wu, S., Jiang, Q., Xu, H., Zhao, Z., & Lv, Y. (2022). Effects of waterborne polyurethane on storage stability, rheological properties, and VOCs emission of crumb rubber modified asphalt. *Journal of Cleaner Production*, 340, 130682.

-Zheng, W., Wang, H., Chen, Y., Ji, J., You, Z., & Zhang, Y. (2021). A review on compatibility between crumb rubber and asphalt binder.

Optimization of the Rheological Behavior and Performance of Modified Rubberized Asphalt Binder under Diverse Climatic Conditions

Sina Hatami, M.Sc., Grad., in Chemical Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

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

Reza Soleimani Morghamaleki, Ph.D., Student, Chemical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Mohammad Mohammadzadeh, B.Sc., Grad., Chemical Engineering, Qeshm Branch, Islamic Azad University, Qeshm, Iran.

E-mail: amiramini@iaau.ac.ir

Received: March 2026- Accepted: August 2026

ABSTRACT

The limited number of existing studies investigating the simultaneous effects of crumb rubber modifier (CRM), waste engine oil (WEO), and polyphosphoric acid (PPA) has resulted in a significant knowledge gap in the design of high-performance, cost-effective, and environmentally sustainable asphalt binders and pavements. Accordingly, this study aims to evaluate the combined influence of these modifiers on the rheological and performance-related properties of a semi-synthetic asphalt binder. Key performance indicators, including viscosity, rutting resistance, fatigue behavior, and temperature-dependent performance, were systematically investigated. The results indicate that binder viscosity are strongly influenced by the WEO content; increasing WEO significantly reduces viscosity, thereby improving mixing, pumping, and workability characteristics. In contrast, higher CRM contents lead to increased viscosity and enhanced resistance to high-temperature deformation under heavy traffic loading conditions. Findings from the MSCR and LAS tests demonstrate that an optimal balance between CRM and WEO can simultaneously improve rutting resistance and fatigue life of the modified binder in a statistically significant manner. Analysis of variance (ANOVA) further reveals that although WEO exhibits a stronger individual effect on binder properties than CRM, the interaction between these two modifiers plays a critical role in regulating the overall performance behavior of the asphalt binder. Based on the comprehensive analysis, three optimal design scenarios was identified: (i) CRM = 25% and WEO = 15% to maintain viscosity within standard allowable limits; (ii) CRM = 25% and WEO = 17.5% to enhance workability through reduced viscosity; and (iii) CRM = 18.6% and WEO = 15% to improve high-temperature performance and resistance under heavy traffic conditions. Overall, the findings of this study provide a scientifically sound, practical, and sustainable approach for enhancing the durability, performance, and environmental compatibility of asphalt pavements, making it suitable for applications under diverse climatic conditions and high traffic demands.

Keywords: Modified Rubberized Asphalt Binder, Thermal Performance, Performance Resistance, Warm Rubberized Asphalt, Performance-Based Optimization