

ارزیابی و بهینه‌سازی عملکرد حرارتی، ایمنی و رئولوژیکی قیر لاستیکی حاوی اکسید آلومینیوم در حضور روغن‌های زیستی و نفتی با استفاده از روش سطح پاسخ

مقاله علمی - پژوهشی

نیلوفر صالحی‌پور باورصاد، گروه مهندسی عمران، واحد بین‌المللی کیش، دانشگاه آزاد اسلامی، کیش، ایران

*شاهین شعبانی (نویسنده مسئول)، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

سید ابراهیم عبدالمنافی، دانشکده عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: shabani@pnu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۰۲ - پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۲

صفحه ۳۹۹-۴۱۶

چکیده

استفاده از روغن‌های زیستی و نفتی به عنوان افزودنی در قیرهای لاستیکی، راهکاری مؤثر برای بهبود کارایی و عملکرد این نوع قیرها محسوب می‌شود. با این حال، تأثیر نوع روغن بر پایداری حرارتی، ایمنی حرارتی و عملکرد رئولوژیکی قیرهای لاستیکی حاوی اکسید آلومینیوم به‌طور کامل مشخص نشده است. در این پژوهش، اثر سه نوع روغن شامل روغن اپوکسید شده سویا (ESO)، روغن خام آفتابگردان با پوست (SOCP) و روغن نفتی نفتنیک (NPO) در مقادیر ۷.۵ و ۹ درصد وزنی پودر لاستیک بر تغییر جرم ناشی از پیرشدگی کوتاه‌مدت، دمای نقطه اشتعال و پارامتر رئولوژیکی $G^*/\sin\delta$ بررسی شد. بدین منظور، ۱۰ نمونه قیر اصلاح‌شده تهیه و نتایج آزمایشگاهی با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) و مدل خطی تحلیل و بهینه‌سازی گردید. نتایج نشان داد که روغن NPO اثر معنی‌داری بر افزایش تغییر جرم ($p < 0.0001$) و کاهش دمای نقطه اشتعال ($p = 0.0052$) دارد. در حالی که روغن‌های زیستی ESO و SOCP اثر نامطلوب معنی‌داری بر این دو شاخص نشان ندادند. همچنین هر سه روغن موجب کاهش $G^*/\sin\delta$ شدند، اما تمامی نمونه‌ها الزامات عملکردی قیر استاندارد را برآورده کردند. نتایج بهینه‌سازی چندهدفه نشان داد که فرمولاسیون حاوی ۲.۲۲ درصد روغن SOCP دارای بیشترین مطلوبیت کلی (۰.۷۳۵) بوده و به عنوان ترکیب بهینه انتخاب شد. مقادیر پیش‌بینی‌شده در این نقطه بهینه شامل تغییر جرم ۰.۵۶۳ درصد، دمای نقطه اشتعال ۳۰۶.۹ درجه سانتی‌گراد و مقدار $G^*/\sin\delta$ برابر ۱۰.۹۰ کیلوپاسکال بود. این نتایج نشان می‌دهد که روغن SOCP قادر است تعادل مناسبی بین خواص حرارتی، مقاومت در برابر پیرشدگی و عملکرد رئولوژیکی قیر لاستیکی حاوی اکسید آلومینیوم ایجاد کند.

واژه‌های کلیدی: قیر لاستیکی، روغن زیستی، روغن نفتنیک، پایداری حرارتی، روش سطح پاسخ

۱-مقدمه

نمی‌تواند الزامات بزرگراه‌های درجه یک را برآورده کند (J. Xie & X. Zhao & S. Lv & Y. Zhang & W. He & F. Yu, 2023). قیر، به‌عنوان اصلی‌ترین جزء مخلوط‌های آسفالتی، به دلیل رفتار

افزایش بارهای محوری، رشد حجم ترافیک و شرایط اقلیمی نامساعد، عملکرد و دوام روسازی‌های آسفالتی را با چالش‌های جدی مواجه کرده است. روسازی آسفالت معمولی دیگر

۶۷٪ کاهش می‌دهد. همچنین اختلاف نقطه نرمی از ۱,۹ به ۰,۳۵ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته است که بیانگر بهبود کارپذیری و پایداری ذخیره‌سازی است (Q. Liu & B. Han & S. Wang & A. Cannone Falchetto & D. Wang & B. Yu, 2022). دیگر، استفاده از افزودنی‌های زیستی و مشتقات آن‌ها به‌عنوان نسل جدید اصلاح‌کننده‌ها و جوان‌کننده‌های قیر، به دلیل عملکرد زیست‌پایدار و سازگاری با محیط زیست، مورد توجه فزاینده‌ای قرار گرفته است (C. Chen & J. Lu & Y. Zhang & L. Gu & X. Chen, 2023). افزودن روغن گیاهی همراه با SBS و پودرلاستیک، نفوذپذیری و مقاومت قیر در برابر پیرشدگی را بهبود می‌دهد (F. Guo & ZH. Shen & L. Jiang & Q. Long & Y. Yu, 2024). از طرفی، استفاده از روغن‌های زیستی مشتق از پسماند کشاورزی را در بازسازی قیر پیر شده، مؤثر دانستند (B. Furtana Yalcin & M. Yilmaz, 2024). پژوهش‌های انجام شده، نشان دادند که افزودن روغن زیستی به قیر حاوی مقدار زیاد پودرلاستیک، موجب کاهش ویسکوزیته، کاهش دمای اختلاط و افزایش خاصیت الاستیک می‌شود (Z. Ju & D. Ge & S. Lv & D. Jin & Y. Xue & J. Xian & W. Zhang, 2024). شرایط عمل‌آوری و انتخاب نوع روغن نقش تعیین‌کننده‌ای در خواص نهایی قیر دارند. به طوری که، استفاده از پودرلاستیک و روغن پسماند پخت‌وپز به نسبت ۱:۱ و اعمال مایکروویو در روش تر، مقاومت قیر را در برابر پیرشدگی UV، RTFO و PAV افزایش می‌دهد (L. Lyu & J. Pei & D. Hu & G. Sun & EH. Fini, 2022). در پژوهشی دیگر، تأکید کردند که درجه‌ی گوگردزدایی پودرلاستیک عمل‌آوری‌شده با روغن زیستی بر خواص رئولوژیکی و پایداری ذخیره‌سازی تأثیر مستقیم دارد، به طوری که با افزایش درجه‌ی گوگردزدایی، ویسکوزیته و عملکرد در دمای بالا کاهش یافته ولی عملکرد در دمای پایین بهبود می‌یابد (Y. Chen & H. Song & H. Wen & H. Wang & G. Tebaldi & Z. Liu & Y. Yang & S.I. Salihovich, 2025). افزون بر این، روغن‌های نفتی (نفتیک یا آروماتیک) رفتار برهم‌کنش قیر-لاستیک را تغییر داده و دوام و مقاومت نهایی قیر را تعیین می‌کند (X. Zhao & F. Li & X. Zhang & J. Cao & X. Wang, 2023). به موازات این پیشرفت‌ها، برای رفع مشکلات نامطلوب ناشی از اصلاح‌کننده‌های قیر و همچنین پاسخگویی به نیازهای گسترده روسازی‌های آسفالتی، امروزه استفاده از اصلاحات کامپوزیتی به طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته است (Y. Mamuye & N. Duy Do & M. Chih Liao, 2023).

وابسته به دما و نرخ بارگذاری، در معرض آسیب‌هایی مانند شکست زودرس و تغییر شکل‌های دائمی قرار دارد (L. Cao & H. Chu & A. and ZH. Su & R. Liu & T. Zhou, 2022). علاوه بر این، پدیده‌ی پیرشدگی اکسیداتیو که در اثر تبخیر اجزای سبک و تشکیل ترکیبات قطبی رخ می‌دهد، از مهم‌ترین عوامل کاهش دوام و عمر سرویس روسازی‌ها به شمار می‌رود (M. Ren & Y. Li & P. Cheng & Y. Chen, 2022). برای مقابله با این چالش‌ها، استفاده از اصلاح‌کننده‌های پلیمری و به‌ویژه پودرلاستیک بازایافتی به‌عنوان رویکردی کارآمد و دوستدار محیط‌زیست مورد توجه قرار گرفته است. افزودن پودرلاستیک نه تنها راهکاری مؤثر برای بازیافت لاستیک‌های فرسوده و کاهش اثرات زیست‌محیطی محسوب می‌شود، بلکه سبب بهبود مقاومت قیر در برابر شیارشدگی، افزایش سختی در دمای بالا و ارتقای ویژگی‌های مکانیکی مخلوط آسفالتی نیز می‌گردد (K. Duan & CH. Wang & J. Liu, Q. Chen & Y. Chen, 2022). با این حال، قیر اصلاح‌شده با پودرلاستیک (CRMA) معمولاً با مشکلاتی از جمله افزایش بیش از حد ویسکوزیته، دشواری در اختلاط، پمپاژ، پخش و تراکم مواجه است (X. Zhao & F. Li X. Zhang & J. Cao & X. Wang, 2023). همچنین قیری که به طور مستقیم با افزودن پودرلاستیک اصلاح شود، مستعد جدا شدن در طول ذخیره‌سازی و حمل و نقل است (J. Xie & X. Zhao & Y. Zhang & F. Yu & H. Luo & X. Chen & W. He, 2023). در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی به بررسی روش‌های اصلاح این محدودیت‌ها پرداخته‌اند. در کنار این یافته‌ها، روش‌های مختلفی برای عمل‌آوری پودرلاستیک معرفی شده‌اند که شامل روش‌های فیزیکی مانند تابش گاما و پلاسما و روش‌های شیمیایی نظیر پیش‌واکنش، پیونددهی، اکسیداسیون و پوشش پلیمری می‌شود (X. Zhang & X. Wang & CH. Wan & B. yang & ZH. Tang & W. Li, 2023). برای نمونه، نتایج اثر تابش فرابنفش (UV) بر قیرهای اصلاح‌شده با پودرلاستیک را نشان داد که قیر حاوی ۲۲,۵٪ لاستیک بازیافتی، تا حدود ۵۰٪ از آسیب ناشی از پیرشدگی حرارتی و تابشی می‌کاهد و عملکرد حرارتی و دوام قیر را به‌طور محسوسی افزایش می‌دهد (M. Jamal & M. Lanotte & F. Giustozzi, 2022). در مطالعه‌ای دیگر، با استفاده از شبیه‌سازی مولکولی و آزمون‌های آزمایشگاهی، نقش روغن موتور کارکرده را در بهبود سازگاری قیرلاستیکی بررسی کردند. یافته‌های آنان حاکی از آن است که افزودن روغن کارکرده، توزیع فازها را یکنواخت‌تر کرده، پایداری سیستم را افزایش می‌دهد و ویسکوزیته قیر را تا حدود

اجزای سبک کاهش می‌یابد و قیر نرم‌تری ایجاد می‌شود و از طرفی، مدل‌های پیش‌بینی توسعه‌یافته مبتنی بر RSM ضریب همبستگی (R^2) بیش از ۰.۸۲ را برای همه پاسخ‌ها نشان دادند (A. AL. Sabacei & H. Alhussian & S. Jadid Abdulkadir & F. Giustozzi & M. Napiah & A. Jagadeesh & M. Sutanto & AM. Memon, 2023).

با این وجود، کاربرد RSM در بهینه‌سازی همزمان سه شاخص کلیدی پایداری حرارتی (تغییر جرم ناشی از پیرشدگی کوتاه‌مدت)، ایمنی حرارتی (دمای نقطه اشتعال) و عملکرد رئولوژیکی (پارامتر مقاومت در برابر شیارافتادگی $G^*/\sin\delta$) در یک سیستم پیچیده قیر-پودرلاستیک-اکسید آلومینیوم که همزمان حاوی روغن‌های با منشأ زیستی (ESO و SOCP) و نفتی (NPO) است، همچنان محدود و ناشناخته باقی مانده است. اگرچه برخی محققان از RSM برای بررسی اثر روغن‌های زیستی بر خواص قیر استفاده کرده‌اند. مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد (B. Ali, P. Li, M. Hani, Y. Chetbani, M. Sahraoui, A. Belaadi et al, 2026) که اکثر پژوهش‌ها بر ارزیابی اثر روغن‌های زیستی یا نفتی بر خواص رئولوژیکی و مکانیکی قیر تمرکز داشته‌اند و کمتر به شاخص‌های مرتبط با پایداری حرارتی و ایمنی توجه شده است. علاوه بر این، اثر مقایسه‌ای روغن‌های زیستی و نفتی در سامانه‌های قیر اصلاح‌شده حاوی پودرلاستیک و نانوذرات به‌صورت همزمان مورد بررسی قرار نگرفته است. همچنین تاکنون گزارشی از بهینه‌سازی چندهدفه همزمان تغییر جرم RTFO، دمای نقطه اشتعال و پارامتر $G^*/\sin\delta$ با استفاده از روش سطح پاسخ در چنین سامانه‌ای ارائه نشده است. این شکاف تحقیقاتی به ویژه با توجه به اهمیت همزمان کاهش تبخیر ترکیبات فرار (که به عنوان شاخصی از مقاومت در برابر پیرشدگی عمل می‌کند) و حفظ ایمنی عملیاتی (نقطه اشتعال بالاتر از دمای اختلاط) در فرآیندهای تولید، ذخیره‌سازی و اجرای آسفالت، بحرانی‌تر می‌شود. با توجه به تفاوت ساختار شیمیایی روغن‌های زیستی و نفتی، انتظار می‌رود مکانیسم برهم‌کنش آن‌ها با سامانه قیر-پودرلاستیک متفاوت بوده و در نتیجه رفتار حرارتی، ایمنی و عملکرد رئولوژیکی قیر اصلاح‌شده را به شکل متفاوتی تحت تأثیر قرار دهد. همچنین حضور نانو اکسید آلومینیوم می‌تواند با ایجاد ساختار پایدارتر، بخشی از اثر نرم‌کنندگی روغن‌ها را جبران نماید. پارامتر $G^*/\sin\delta$ به عنوان شاخص مقاومت قیر در برابر تغییر شکل دائمی و شیارافتادگی در دماهای بالا شناخته می‌شود و یکی از مهم‌ترین معیارهای طراحی سامانه Superpave محسوب می‌گردد. هدف این پژوهش بررسی اثر سه نوع روغن شامل روغن اپوکسید شده سویا

جدیدی از اصلاح‌کننده‌ها مطرح شده‌اند. در همین راستا، جهت اختلاط نانو ذرات به قیر، ۲ روش غیرمستقیم و مستقیم در حالت خشک و تر معرفی شد (MA. Dalhat, K. Al-Adham, 2023). مطالعات پیشین نشان داده‌اند که نانو اکسید آلومینیوم با ایجاد ساختارهای پایدارتر در ماتریس قیر، مقاومت در برابر پیرشدگی حرارتی، سختی در دمای بالا و پایداری ذخیره‌سازی را بهبود می‌بخشد. بر این اساس، در پژوهش حاضر مقدار ۲ درصد وزنی نانو اکسید آلومینیوم به عنوان یک اصلاح‌کننده ثابت انتخاب شد تا ضمن حفظ تعادل میان سختی و کارپذیری، اثر روغن‌های مورد مطالعه با دقت بیشتری ارزیابی شود (Y. Mamuye & N. Mamuye & N. Chih Liao, 2023). در همین راستا، برای مدلسازی چندپاسخ و بهینه‌سازی همزمان قیر اصلاح‌شده حاوی پودرلاستیک، نانو اکسید آلومینیوم و روغن‌های مختلف، از روش سطح پاسخ استفاده شد. کاربرد RSM در مهندسی روسازی به دلیل توانایی آن در کاهش چشمگیر تعداد آزمایش‌ها، مدلسازی اثرات متقابل میان متغیرهای مستقل و پیش‌بینی پاسخ‌های عملکردی با دقت بالا در سال‌های اخیر رشد قابل توجهی داشته است (A. AL. Sabacei & H. Alhussian & S. Jadid Abdulkadir & F. Giustozzi & M. Napiah & A. Jagadeesh & M. Sutanto & AM. Memon, 2023). مطالعات پیشین نشان داده‌اند که RSM می‌تواند با موفقیت خواص رئولوژیکی قیرهای اصلاح‌شده با نانوکامپوزیت‌ها (N. Bala & I. Kamaruddin & M. Napiah & u. Hartadi Sutanto, 2019) و همچنین عملکرد مخلوط‌های آسفالتی حاوی مواد زائد پلیمری را مدلسازی و بهینه‌سازی کند. به طور خاص، در حوزه قیرهای لاستیکی، استفاده از RSM برای بهینه‌سازی همزمان ویسکوزیته و مقاومت در برابر شیارشدگی گزارش شده است (M. Akpolat & B. Vural Kök & E. Aydoğmuş, 2022). از RSM برای مدلسازی و بهینه‌سازی عملکرد و هزینه آسفالت اصلاح‌شده با TPO نیز استفاده شده است. در این پژوهش، مشخص شد که RSM یک تکنیک مناسب برای پیش‌بینی دقیق عملکرد آسفالت اصلاح‌شده با TPO است (A.J. del Barco Carrion & A. Subhy & M.A.I. Rodriguez & D.L. Presti, 2020). برای بررسی اثرات روغن پالم خام و/یا روغن پیرولیز تایر بر ویسکوزیته برشی و دمای اختلاط و تراکم آسفالت علاوه بر آزمایشات تجربی با کمک RSM جهت توسعه مدل‌های پیش‌بینی برای ویسکوزیته برشی و دمای اختلاط و تراکم آسفالت اصلاح‌شده با روغن پالم خام و/یا روغن پیرولیز تایر پژوهشی انجام شد و نتایج نشان داد که دمای اختلاط و تراکم با افزایش هر ۲ روغن به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد و در نتیجه ویسکوزیته برشی به دلیل

همچنین تعیین نوع و مقدار بهینه روغن با استفاده از روش سطح پاسخ و بهینه‌سازی چندهدفه بود.

(ESO)، روغن خام آفتابگردان با پوست (SOCP) و روغن نفتنیک (NPO) بر پایداری حرارتی، ایمنی حرارتی و خواص رئولوژیکی قیر اصلاح شده حاوی پودر لاستیک و نانو اکسید آلومینیوم و

۲-مواد و روش‌ها

۲-۱-مواد

قرار گرفت (جدول ۲ الی ۴): روغن‌های زیستی شامل روغن اپوکسی سویا (تولید شرکت دانش‌بنیان) و روغن آفتابگردان حاصل از پرس سرد تخمه آفتابگردان با پوست (SOCP) بودند. همچنین، به منظور مقایسه، از یک روغن نفت پایه‌ی با نام نفتنیک نیز استفاده شد. به منظور بررسی اثر حضور نانو اکسید آلومینیوم، یک نمونه شاهد اضافی شامل قیر حاوی ۱۵ درصد پودر لاستیک و بدون نانو آلومینای گاما نیز تهیه شد (نمونه ۱۱). این نمونه صرفاً برای مقایسه عملکرد استفاده شد و در فرآیند مدل‌سازی و بهینه‌سازی RSM وارد نگردید.

قیر PG 64-16 به عنوان قیر اصلی جهت ساخت نمونه‌ها استفاده شد. مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده است. نانوذرات اکسید آلومینیوم مورد استفاده از نوع گاما با نام تجاری نانو آلومینای ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) است که به عنوان عامل تقویت‌کننده و ضدپیرشدگی در قیر به کار گرفته شده است. پودر لاستیک مصرفی نیز که نقش ماده‌ی پلیمری در این پژوهش را دارد، از آسیاب مکانیکی لاستیک‌های فرسوده‌ی بدون سیم مفتول در دمای محیط و با اندازه‌ی مش ۸۰ تهیه شد. پودر لاستیک و نانو اکسید آلومینیوم به عنوان اصلاح‌کننده‌های ثابت استفاده شدند و سه نوع روغن با ۵، ۷ و ۹ درصد به عنوان اصلاح‌کنندگان متغیر مورد بررسی

جدول ۱. اطلاعات قیر پایه

ردیف	نوع آزمایش	مقدار
۱	Viscosity @135°C (RV), Pa.s	۰,۳۶۷
۲	Flash Point Temperature, °C	۳۲۰
۳	Original, Dynamic Shear, Kpa	۱,۱۳۶
۴	RTFOT Present Change Of Mass	۰,۰۷
۵	RTFOT, Dynamic Shear, Kpa	۲,۶۸۰
۶	PAV, Dynamic Shear, Kpa	۳۱۱۹
۷	PAV, Creep Stiffness, MPa	۷۴,۳۲
۸	m – value (Slope)	۰,۳۵

جدول ۲. اطلاعات روغن زیستی اپوکسی سویا

ردیف	نوع آزمایش	مقدار
۱	شکل ظاهری	زرد
۲	نقطه اشتعال	۲۸۵°C
۳	دانسیته	۰,۹۸۵-۰,۹۹
۴	عدد اپوکسی	≥۶,۵

جدول ۳. اطلاعات روغن زیستی آفتابگردان از تخمه با پوست

ردیف	نوع آزمایش	مقدار
۱	شکل ظاهری	زرد
۲	دمای دود	۲۳۲°C
۳	دانسیته	۰,۹۲g/Cm ³

جدول ۴. اطلاعات روغن پایه نفتی

ردیف	نوع آزمایش	واحد
۱	دانسیته	$0.9 \text{ g}/\text{cm}^3$
۲	ویسکوزیته 100°C	هCST
۳	ویسکوزیته 40°C	هCST
۴	نقطه اشتعال	200°C

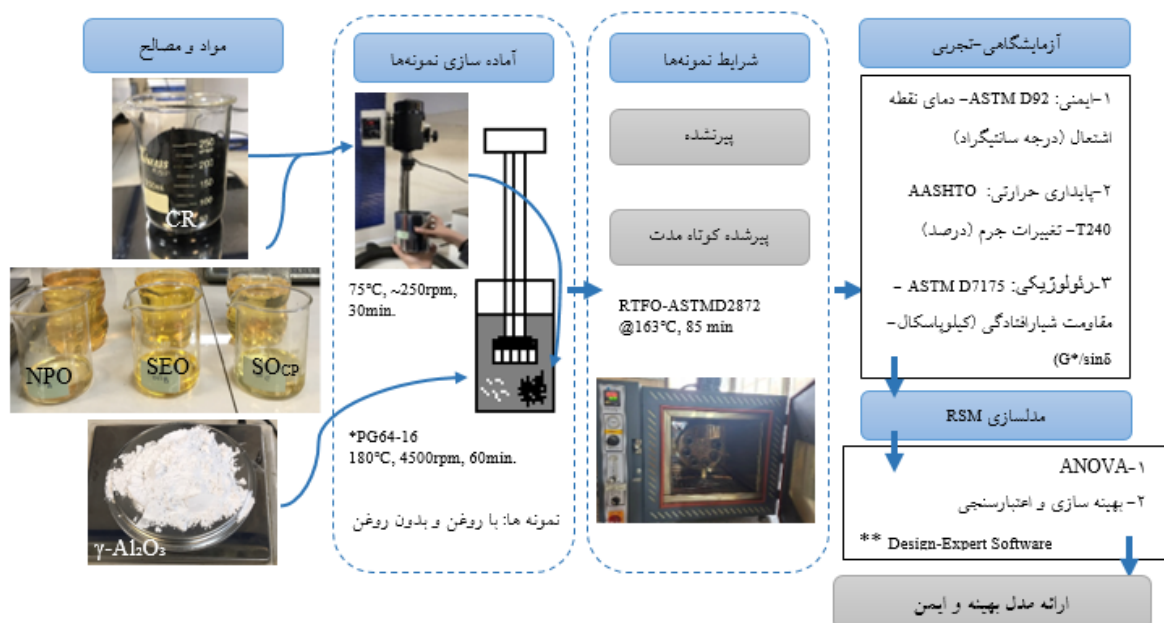
۲-۲- آماده سازی قیرهای اصلاح شده

یک فرآیند دومرحله‌ای برای تهیه ۱۰ نمونه قیر اصلاح شده مطابق با جدول ۵ به کار گرفته شد (شکل ۱). شیوه آماده‌سازی نمونه‌های قیر و عمل آوری پودر لاستیک با اتکا به مطالعات و تجربیات قبلی (M. Ghasemi, Sh. Shabani, P. Hayati, 2021)، انجام شده است. ابتدا، پودر لاستیک (۱۵ درصد وزن قیر) به طور جداگانه با هر یک از سه روغن نام برده در سه سطح ۵، ۷ و ۹ درصد وزنی پودر لاستیک در دمای 75°C درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه، به کمک همزن برقی سرعت پایین (250 الی 300 دور بر دقیقه) پیش‌تورم داده شد. سپس، پودر لاستیک پیش‌تورم داده شده به همراه مقدار ثابت نانو اکسید آلومینیوم (۲ درصد وزن قیر) به قیر پایه PG 64-16 اضافه و در دمای 180°C درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰ دقیقه با استفاده از همزن سرعت بالا (4500 rpm) مخلوط شد (شکل ۱).

جدول ۵. نمونه‌های قیر اصلاح شده

نمونه قیر	نوع روغن (%)		
	NPO	ESO	SO _{CP}
۱	۵	۰	۰
۲	۷	۰	۰
۳	۹	۰	۰
۴	۰	۵	۰
۵	۰	۷	۰
۶	۰	۹	۰
۷	۰	۰	۵
۸	۰	۰	۷
۹	۰	۰	۹
۱۰	۰	۰	۰
*۱۱	۰	۰	۰

**بدون ذرات نانو اکسید آلومینیوم



شکل ۱. فلوچارت روش شناسی پژوهش

۳-۲- روش‌های آزمایشگاهی-تجربی

به دلیل بررسی ایمنی و پایداری حرارتی نمونه‌های ساخته شده، ۲ آزمایش معتبر نقطه اشتعال و تغییر جرم انتخاب شد و به منظور سنجش دقیق‌تر تاثیرات روغن‌های مذکور بر خواص رئولوژیکی نمونه‌های قیر از آزمایش DSR در حالت پیرنشده استفاده شد. در همین راستا، نقطه اشتعال مطابق با استاندارد ASTM D92 (شکل ۲ الف)، تغییر جرم پس از پیری کوتاه مدت نمونه‌ها (شکل ۱) مطابق با استاندارد ASTM D2872 (شکل ۲ ب) و پارامتر رئولوژیکی $G^*/\sin\delta$ روی نمونه‌های پیرنشده (شکل ۲ ج) مطابق با استاندارد ASTM D7175 اندازه‌گیری شد.

شکل ۲. آزمایشات-تجربی: الف-نقطه اشتعال ب-تغییر جرم ج-نمونه‌های آماده شده جهت آزمایش DSR



شکل ۲. آزمایشات-تجربی: الف-نقطه اشتعال ب-تغییر جرم ج-نمونه‌های آماده شده جهت آزمایش DSR

به عنوان متغیرهای مستقل و مشخصات نمونه‌های قیر شامل نقطه اشتعال، تغییر جرم و مقاومت شیارافتادگی به عنوان متغیرهای پاسخ در نظر گرفته شده است. با توجه به ماهیت هدف، داده‌های حاصل از نتایج آزمایشگاهی با استفاده از تابع چند جمله‌ای برازش تحلیل ریاضی-آماري شده‌اند. روش سطح پاسخ مبتنی بر برازش یک مدل رگرسیونی چندجمله‌ای به داده‌های تجربی است. فرم کلی مدل درجه یک (خطی) برای سه متغیر مستقل مطابق معادله (۱) است.

۲-۴ مدل‌سازی و بهینه‌سازی با روش سطح پاسخ (RSM)

روش سطح پاسخ یکی از روش‌های آماری و ریاضی پرکاربرد برای مدل‌سازی، تحلیل و بهینه‌سازی سیستم‌های چندمتغیره است. این روش به منظور بررسی روابط بین متغیرهای مستقل و پاسخ‌های مورد مطالعه و همچنین تعیین شرایط بهینه عملکرد سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد (امیر امینی، ۱۴۰۴). در این پژوهش، از روش سطح پاسخ با رویکرد Historical Data و نرم‌افزار Design-Expert نسخه ۷ برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی استفاده شد. متغیرهای ۳ نوع روغن با درصدهای مختلف

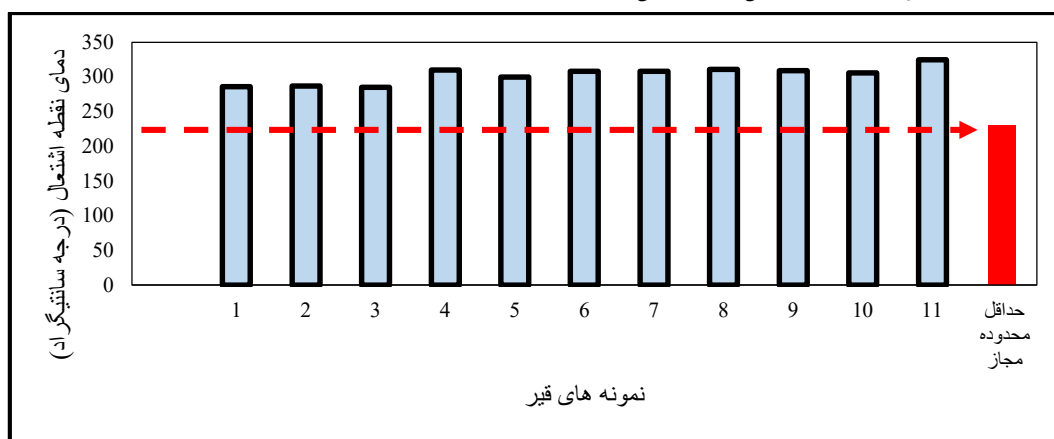
$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \varepsilon \quad (1)$$

که در آن:

- Y = پاسخ پیش‌بینی شده (Mass Change, Flash Point یا $G^*/\sin\delta$)
- β_0 = عرض از مبدأ (Intercept)
- $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ = ضرایب رگرسیون برای متغیرهای X_1, X_2, X_3
- X_1, X_2, X_3 = متغیرهای مستقل (NPO, ESO, SO_{CP})
- ε = خطای مدل

بیشینه‌شونده به منظور افزایش ایمنی حرارتی و پارامتر $G^*/\sin\delta$ به عنوان پاسخ بیشینه‌شونده به منظور حفظ عملکرد مناسب در برابر شیارافتادگی تعریف شدند. در نهایت، مطلوبیت کلی از ترکیب مطلوبیت‌های منفرد هر پاسخ محاسبه شد و فرمولاسیون دارای بیشترین مقدار مطلوبیت کلی به عنوان ترکیب بهینه انتخاب گردید. به منظور ارزیابی صحت نتایج بهینه‌سازی، نمونه متناظر با شرایط بهینه به صورت آزمایشگاهی ساخته شد و مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل با نتایج واقعی حاصل از آزمایش‌ها مقایسه گردید. میزان خطای پیش‌بینی به عنوان معیار اعتبارسنجی مدل‌های توسعه یافته مورد استفاده قرار گرفت.

شدت این کاهش به نوع روغن وابسته بود. بیشترین کاهش دمای نقطه اشتعال در نمونه‌های حاوی روغن نفتتیک (NPO) مشاهده شد، در حالی که روغن خام آفتابگردان با پوست (SOCP) کمترین تأثیر را بر این شاخص داشت. این پدیده به حضور ترکیبات آروماتیک سبک و فرار در ساختار روغن‌های نفتتیک نسبت داده می‌شود که با افزایش محتوای مواد فرار در ماتریس قیر، دمای تولید بخار قابل اشتعال را کاهش می‌دهند. با وجود این کاهش، تمامی نمونه‌ها همچنان حداقل الزام استاندارد ASTM D92 (دمای نقطه اشتعال بالاتر از ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد) را برآورده کردند که بیانگر حفظ سطح قابل قبول ایمنی حرارتی در تمامی فرمولاسیون‌ها است. لازم به ذکر است دمای نقطه اشتعال نسبت به قیر پایه (جدول ۱) نیز کاهشی است.



شکل ۳. نتایج آزمایش نقطه اشتعال نمونه‌های قیر

در این پژوهش، به دلیل ماهیت داده‌ها (عدم وجود نمونه‌های ترکیبی دو یا سه روغن)، مدل خطی به عنوان بهترین مدل انتخاب شد. نرم‌افزار Design-Expert با استفاده از روش حداقل مربعات معمولی (Ordinary Least Squares)، ضرایب β را با کمیته‌سازی مجموع مربعات خطاها (RSS) برآورد می‌کند. پس از توسعه مدل‌های رگرسیونی، بهینه‌سازی عددی با استفاده از تابع مطلوبیت (Desirability Function) در نرم‌افزار انجام شد. در این مرحله، تغییر جرم به عنوان پاسخ کمیته‌شونده به منظور افزایش پایداری حرارتی، دمای نقطه اشتعال به عنوان پاسخ

۳- نتایج و بحث

در این بخش، نتایج آزمایش‌های تجربی، تحلیل آماری داده‌ها، مدل‌سازی با روش سطح پاسخ، بهینه‌سازی عددی و اعتبارسنجی فرمولاسیون بهینه قیر اصلاح‌شده ارائه و مورد بحث قرار می‌گیرد.

۳-۱-۱- نتایج آزمایش‌های تجربی

۳-۱-۱-۱- نتایج آزمایش دمای نقطه اشتعال

نتایج حاصل از آزمایش دمای نقطه اشتعال نمونه‌های قیر اصلاح شده در شکل ۳ نمایش داده شده است. نتایج نشان داد افزودن روغن‌ها به سیستم قیر اصلاح‌شده موجب کاهش دمای نقطه اشتعال نسبت به نمونه‌های فاقد روغن شد؛ با این حال

۳-۱-۲- نتایج آزمایش تغییر جرم

مشاهده می‌شود، تمامی نمونه‌ها به جز نمونه‌های حاوی روغن نفتتیک موفق به پاس درصد مجاز تغییر جرم شدند. در مقابل،

نتایج حاصل از آزمایش درصد تغییر جرم نمونه‌های قیر اصلاح شده در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۴

است. این یافته با گزارش پژوهشگران در زمینه قیرهای اصلاح شده حاوی روغن همسو است؛ به گونه‌ای که افزودن روغن‌های دارای اجزای فرار، افزایش تغییر جرم پس از پیرشدگی کوتاه‌مدت را به دنبال دارد (T. L. X. Wong, T. H. Mok, 2022).

نمونه‌های حاوی NPO با افزایش درصد روغن، درصد افت جرم بیشتری را تجربه کرده و از حد مجاز استاندارد (۱٪) فراتر رفتند. این رفتار احتمالاً تأییدی بر تاثیر حضور ترکیبات سبک و فرار در روغن نفتتیک است که خروج اجزای مالتنی را طی فرآیند RTFO تسهیل کرده و موجب افزایش درصد افت جرم شده

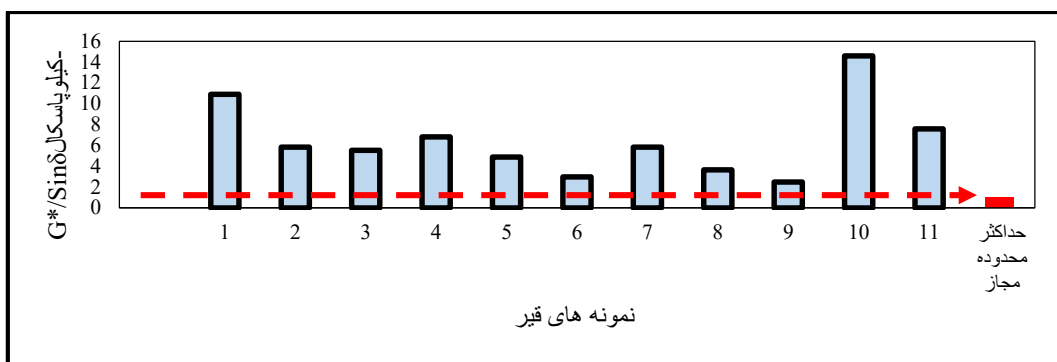


شکل ۴. نتایج آزمایش تغییر جرم نمونه های قیر

نیاز استاندارد Superpave را حفظ کردند؛ بنابراین این کاهش به معنای افت غیرقابل قبول مقاومت شیارافتادگی نبوده است. مقایسه نمونه‌های حاوی روغن با نمونه‌های فاقد روغن (نمونه‌های ۱۰ و ۱۱) به خوبی این روند کاهشی را نشان می‌دهد. این یافته با گزارش Ren و همکاران در سال ۲۰۲۴ همراستا است (Ren et al., 2024). آنان در مطالعه خود نشان دادند که روغن زیستی بیشترین اثر کاهشی را بر عملکرد دمای بالای قیر دارد، در حالی که روغن نفتتیک اثر کاهشی کمتری را نشان می‌دهد. از سوی دیگر، مطالعات نشان دادند که افزودن نانومواد به قیر می‌تواند پارامتر $G/\sin\delta$ را افزایش داده و مقاومت شیارافتادگی را بهبود بخشد (Matarneh et al., 2025). در پژوهش حاضر، حضور ۲٪ نانو اکسید آلومینیوم به عنوان اصلاح کننده ثابت، احتمالاً بخشی از اثر نرم‌کنندگی روغن‌ها را جبران کرده است.

۳-۱-۳- نتایج آزمایش رئومتر برشی دینامیکی

نتایج حاصل از آزمایش رئومتر برشی دینامیکی (DSR) جهت محاسبه پارامتر مقاومت شیارافتادگی ($G^*/\sin\delta$) در دمای ۶۴ درجه بر نمونه های قیر اصلاح شده در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۵ قابل مشاهده است، تمام نمونه‌ها حداقل الزامات استاندارد را کسب کرده‌اند. به طوری که، پارامتر $G^*/\sin\delta$ نمونه‌های قیر اصلاح شده، در محدوده تقریبی ۲/۵ الی ۱۴/۶ کیلو پاسکال محاسبه شد. این محدوده بیانگر بهبود مقاومت شیارافتادگی تمامی نمونه‌های اصلاح شده نسبت به قیر پایه است که نشان‌دهنده نقش مؤثر پودر لاستیک و نانوذرات در ارتقای عملکرد دمای بالای قیر می‌باشد. از سوی دیگر، افزودن روغن موجب کاهش مقدار $G/\sin\delta$ نسبت به نمونه‌های فاقد روغن شد که بیانگر اثر نرم‌کنندگی روغن‌ها بر ساختار قیر اصلاح شده است. با این وجود، تمامی نمونه‌ها همچنان مقادیر بالاتر از حداقل مورد



شکل ۵. نتایج آزمایش DSR

۲-۳-مدلسازی آماری و تحلیل نتایج RSM

داده‌های آزمایشگاهی به عنوان داده‌های ورودی در مدلسازی (جدول ۶) مطرح شد و براساس آن مدلسازی و سپس تحلیل نتایج انجام شد. به طور کلی، از مجموع ۱۱ نمونه ساخته شده، تنها ۱۰ نمونه دارای مقدار ثابت ۲ درصد نانو اکسید آلومینیوم در مدلسازی RSM مورد استفاده قرار گرفتند. نمونه شماره ۱۱ به دلیل نداشتن اکسید آلومینیوم و نقش شاهد، در تحلیل آماری و بهینه‌سازی وارد نشد.

۱-۲-۳-مدلسازی و تحلیل پاسخ دمای نقطه اشتعال

نتایج حاصل از تحلیل واریانس (ANOVA) برای پاسخ نقطه اشتعال در جدول ۷ نشان داده شده است. براساس نتایج، تنها روغن NPO اثر معنی‌دار آماری بر نتایج دمای نقطه اشتعال ($p = 0.0025$) دارد. ضریب منفی این متغیر ($-2,534$ = ضریب)

نشان می‌دهد که با افزایش درصد روغن NPO، دمای نقطه اشتعال کاهش می‌یابد. کاهش دمای نقطه اشتعال، به دلیل افزایش خطر آتش سوزی در دمای پایین از نظر ایمنی نامطلوب است. ضریب مثبت ESO و SOCP نشان می‌دهد که افزایش این روغن‌ها تمایل به افزایش دمای نقطه اشتعال به همراه دارد، هرچند این اثر از نظر آماری معنی‌دار نبود. روغن‌های ESO و SOCP اثر معنی‌داری بر نقطه اشتعال نشان ندادند که به پایداری حرارتی بالای آن‌ها نسبت داده می‌شود. به طور کلی، روغن‌های گیاهی به دلیل ساختار شیمیایی متفاوت نه تنها نقطه اشتعال را کاهش نمی‌دهند، بلکه در برخی موارد آن را افزایش نیز می‌دهند (A. E. Modupe, et al. 2019 and Colak et al. 2023). اعتبار بالای مدل RSM توسعه‌یافته نیز مطابق با مطالعات دیگر (R. O. Tewegbola, et al. 2026) توسط نمودارهای تشخیصی تأیید شد.

جدول ۶. داده‌های ورودی مدلسازی RSM

نمونه قیر	نوع روغن (%)			نتایج آزمایش تجربی		
	NPO	ESO	SOCP	Mass Change (%)	Flash Point (°C)	G*/sinδ
۱	۵	۰	۰	1.3	286	10.9
۲	۷	۰	۰	1.4	287	5.82
۳	۹	۰	۰	1.7	285	5.53
۴	۰	۵	۰	0.6	310	6.83
۵	۰	۷	۰	0.5	300	4.88
۶	۰	۹	۰	0.4	308	2.98
۷	۰	۰	۵	0.6	308	5.82
۸	۰	۰	۷	0.5	311	3.65
۹	۰	۰	۹	0.3	309	2.49
۱۰	۰	۰	۰	0.5	306	14.6
۱۱	۰	۰	۰	0.7	325	7.5

جدول ۷. ANOVA برای پاسخ دمای نقطه اشتعال

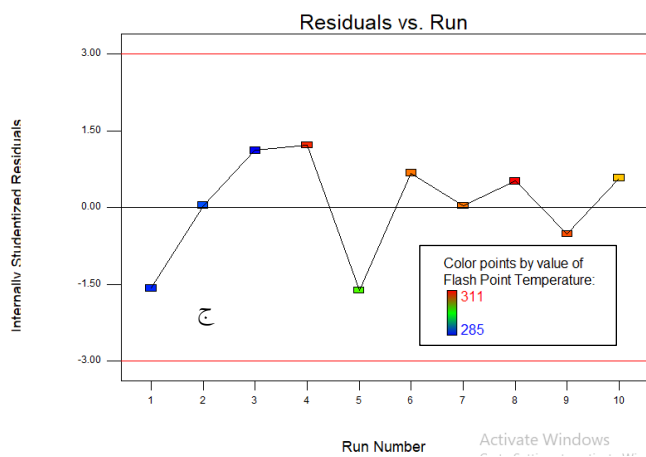
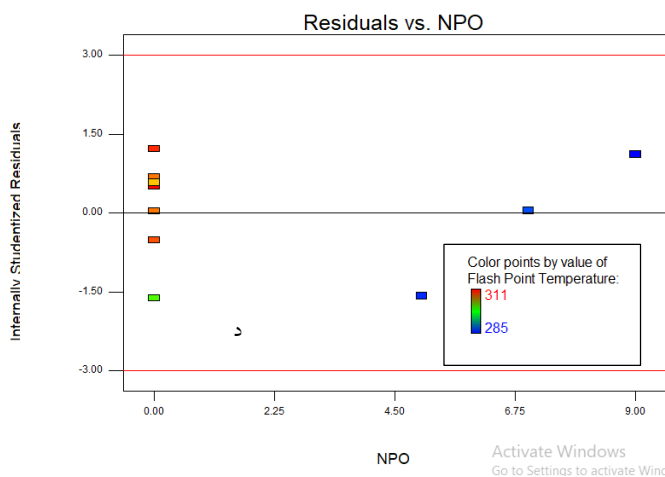
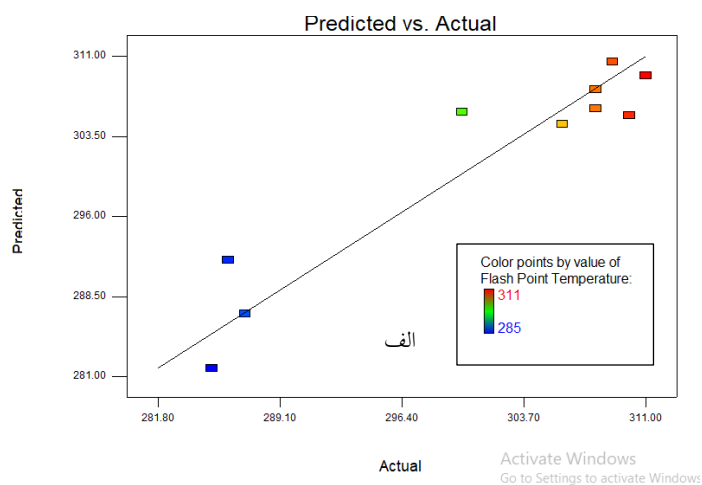
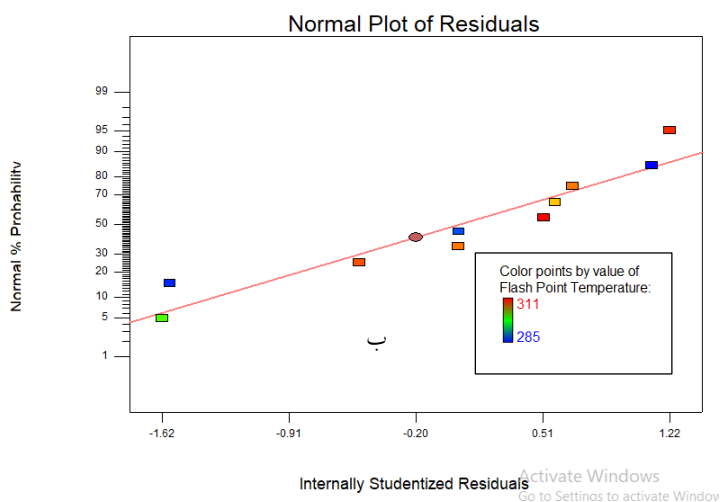
منبع	مجموع مربعات (SS)	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات (MS)	F-value	p-value Prob > F	وضعیت
Model	935.32	3	311.77	16.90	0.0025	Significant
A-NPO	338.21	1	338.21	18.33	0.0052	Significant
B-ESO	1.40	1	1.40	0.076	0.7925	Not significant
C-SOCP	22.47	1	22.47	1.22	0.3120	Not significant
Residual	110.68	6	18.45	-	-	-
Cor Total	1046.00	9	-	-	-	-

معیارهای آماری:

$$R^2 = 0.8942, \text{Adj } R^2 = 0.8413, \text{Pred } R^2 = 0.7375, \text{Adeq Precision} = 10.559, \text{C.V.}\% = 1.43$$

فرض استقلال خطاها قابل قبول است. این موضوع برای نمودار شکل ۶ ج نیز صدق می کند به گونه ای که: نمودار باقیمانده‌ها بر حسب ترتیب اجرای آزمایش‌ها (Residuals vs. Run) نشان داد که باقیمانده‌ها به صورت تصادفی حول صفر توزیع شده‌اند و هیچ روند سیستماتیک یا الگوی تناوبی مشخصی مشاهده نمی‌شود. همچنین، تمامی نقاط در محدوده ± 3 باقیمانده‌های Studentized قرار دارند که نشان‌دهنده عدم وجود داده پرت و قابل قبول بودن فرض استقلال خطاها در مدل RSM است.

نزدیکی اغلب نقاط به خط ۴۵ درجه (شکل ۶ الف) بیانگر هماهنگی مناسب بین مقادیر پیش‌بینی شده و تجربی و توان قابل قبول مدل در پیش‌بینی دمای نقطه اشتعال است. همچنین، نمودار نرمال باقیمانده‌ها (شکل ۶ ب) نشان می‌دهد که نقاط تقریباً در امتداد خط مستقیم قرار گرفته‌اند و بنابراین فرض نرمال بودن خطاها برقرار است. پراکندگی تصادفی باقیمانده‌ها حول صفر و قرار گرفتن تمامی نقاط در محدوده ± 3 (شکل ۶ د) نشان می‌دهد که روند سیستماتیک یا داده پرت قابل توجهی وجود ندارد و



شکل ۶. نمودارهای تشخیصی - نقطه اشتعال

با توجه به نتایج پاسخ دمای نقطه اشتعال، فرمولاسیون معادله (۲) مطلوب است:

$$\text{Flash Point (}^{\circ}\text{C)} = 304.60793 - 2.53398 \times \text{NPO} + 0.16280 \times \text{ESO} + 0.65312 \times \text{SO}_{\text{CP}} \quad (2)$$

۲-۲-۳- مدل سازی و تحلیل پاسخ تغییر جرم

نتایج تحلیل واریانس مطابق با جدول ۸، نشان داد که تنها روغن نفتنیک (NPO) اثر معنی دار بر افزایش تغییر جرم دارد ($p = 0,0001$). علامت مثبت ضریب (+۰,۱۲۰) بیانگر آن است که با افزایش درصد NPO، مقدار تغییر جرم به طور معنی داری

افزایش می یابد. این پدیده از نظر پایداری حرارتی نامطلوب است، زیرا افزایش تغییر جرم به معنای تبخیر بیشتر اجزای سبک قیر در طی فرآیند پیرشدگی کوتاه مدت می باشد. در مقابل، روغن های ESO و SOCP اثر معنی داری بر تغییر جرم نشان ندادند که حاکی از پایداری حرارتی مناسب این دو روغن است.

جدول ۸. ANOVA برای پاسخ تغییر جرم

منبع	مجموع مربعات (SS)	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات (MS)	F-value	p-value Prob > F	وضعیت
Model	2.12	3	0.71	76.23	< 0.0001	Significant
A-NPO	0.76	1	0.76	82.15	0.0001	Significant
B-ESO	0.018	1	0.018	1.94	0.2136	Not significant
C-SO _{CP}	0.013	1	0.031	3.34	0.1172	Not significant
Residual	0.056	6	0.0093	-	-	-
Cor Total	2.18	9	-	-	-	-

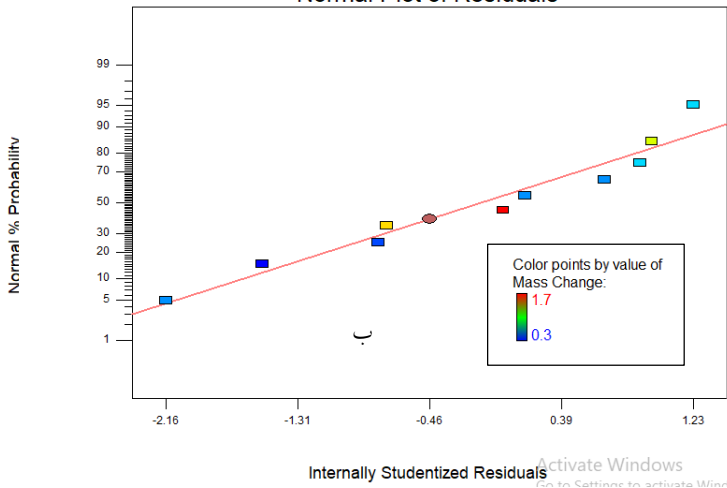
معیارهای آماری

$R^2 = 0,9744$ ، $Adj R^2 = 0,9617$ ، $Pred R^2 = 0,8841$ ، $Adeq Precision = 21,357$ ، $C.V.\% = 12,35$

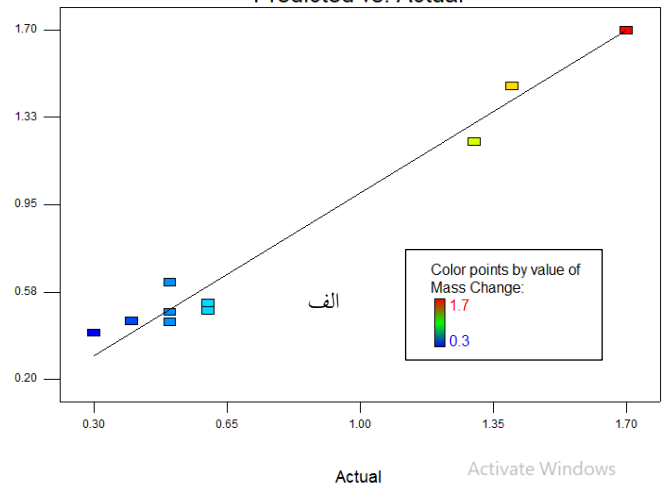
باقیمانده ها حول صفر و عدم مشاهده الگوی مشخص، بیانگر قابل قبول بودن فرض یکنواختی واریانس خطاها است. نمودار Residuals vs. Run نیز نشان داد که باقیمانده ها به صورت تصادفی حول صفر توزیع شده اند و هیچ روند سیستماتیک یا الگوی تناوبی مشخصی مشاهده نمی شود. همچنین تمامی مقادیر در محدوده ± 3 قرار دارند که بیانگر نبود داده پرت و قابل قبول بودن فرض استقلال خطاها است.

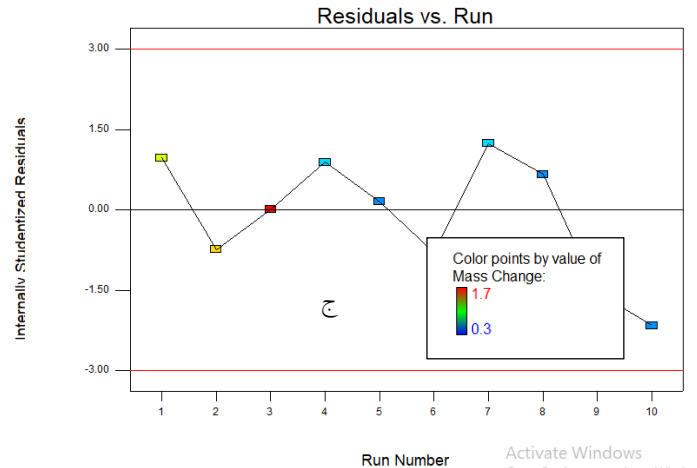
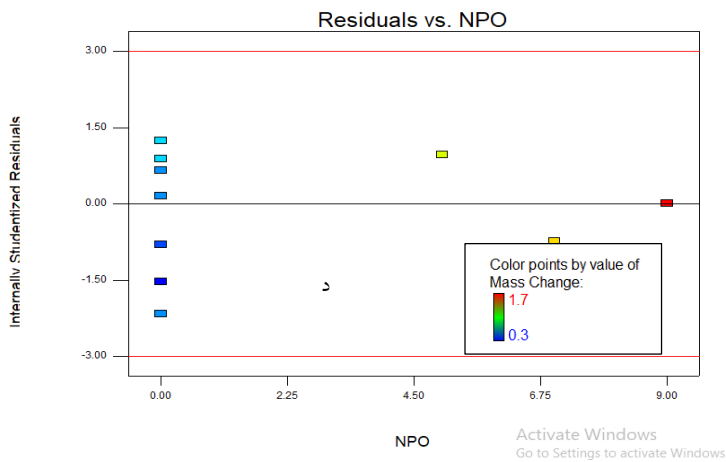
در نمودار نرمال خطاها (شکل ۷ب) نقاط به خوبی اطراف خط راست مشاهده می شود که تأییدکننده نرمال بودن خطاها است. همچنین، نمودار مقادیر پیش بینی شده در مقابل مقادیر واقعی (Predicted vs. Actual) در شکل ۷ الف) انطباق عالی مدل با داده های آزمایشگاهی-تجربی را نشان می دهد. از طرفی، نمودار باقیمانده ها بر حسب متغیر NPO (Residuals vs. NPO) در شکل ۷د پخش تصادفی نقاط را نشان می دهد که تأییدکننده ثابت بودن واریانس خطاها است. پراکندگی نسبتاً تصادفی

Normal Plot of Residuals



Predicted vs. Actual





شکل ۷. نمودارهای تشخیصی- تغییر جرم

با توجه به نتایج پاسخ تغییر جرم، فرمولاسیون معادله (۳) مطلوب است:

$$\text{Mass Change (\%)} = 0.61718 + 0.12025 \times \text{NPO} - 0.018457 \times \text{ESO} - 0.024263 \times \text{SO}_{\text{CP}} \quad (۳)$$

پارامتر $G^*/\sin\delta$ دارند. در مطالعه حاضر روغن SO_{CP} (با منشأ زیستی) با ضریب $-۱,۴۰۲$ بیشترین اثر کاهش را داشت و روغن NPO (نفتنیک) با ضریب $-۰,۹۶۳$ کمترین اثر کاهش را نشان داد. با توجه به نتایج پاسخ DSR، فرمولاسیون معادله (۴) مطلوب است.

لازم به ذکر است که در تمام معادله های ۱ الی ۳، استفاده از هر بخش از این فرمول بنابر استفاده هر نوع روغن در نمونه‌ها کاربرد دارد و این ترکیب جهت استفاده در بهینه سازی است.

۳-۲-۳- مدل‌سازی و تحلیل پاسخ $G^*/\sin\delta$

نتایج تحلیل واریانس مطابق با جدول ۹، نشان داد که هر سه نوع روغن NPO، ESO و SOCP اثر معنی‌دار آماری بر کاهش

$$G^*/\sin\delta \text{ (kPa)} = 14.01454 - 0.96320 \times \text{NPO} - 1.28500 \times \text{ESO} - 1.40158 \times \text{SO}_{\text{CP}} \quad (۴)$$

جدول ۹. ANOVA برای پاسخ DSR-پیرنشده

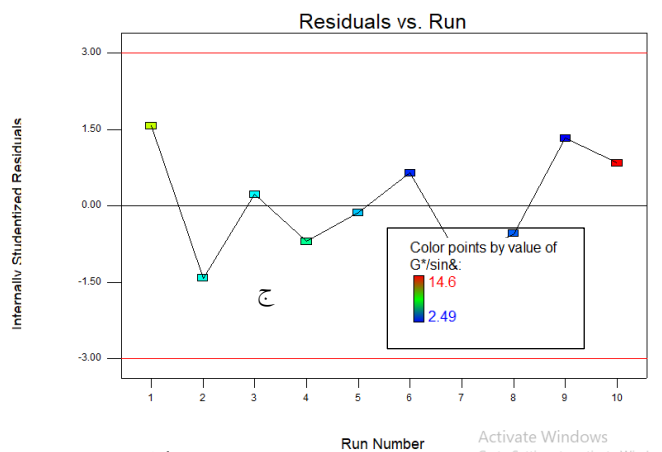
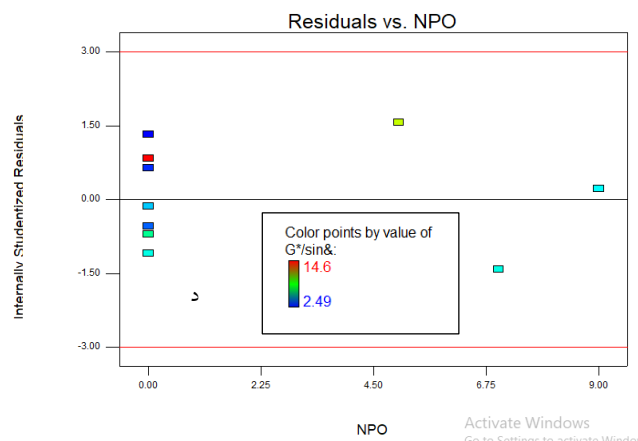
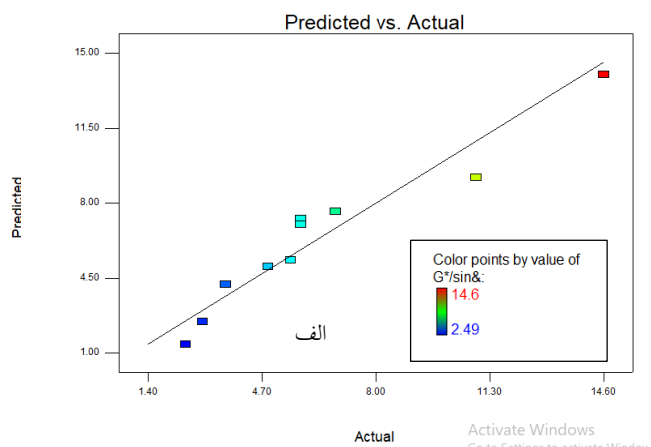
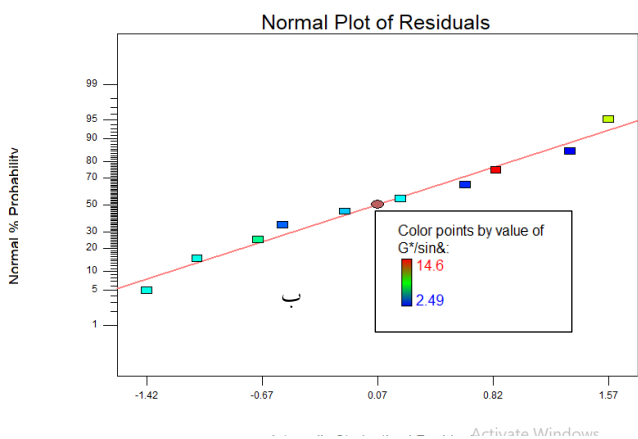
منبع	مجموع مربعات (SS)	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات (MS)	F-value	p-value Prob > F	وضعیت
Model	116.78	3	38.93	25.50	0.0008	Significant
A-NPO	48.87	1	48.87	32.01	0.0013	Significant
B-ESO	86.97	1	86.97	56.97	0.0003	significant
C-SO _{CP}	103.47	1	103.47	67.78	0.0002	significant
Residual	9.16	6	1.53	-	-	-
Cor	125.94	9	-	-	-	-
Total						

معیارهای آماری

$$R^2 = ۰,۹۲۷۳ \text{ Adj } R^2 = ۰,۸۹۰۹ \text{ Pred } R^2 = ۰,۸۰۵۳ \text{ Adeq Precision} = ۱۶/۱۴۲ \text{ C.V. \%} = ۱۹/۴۶$$

۴۵ درجه قرار دارند که بیانگر توافق مناسب بین داده‌های تجربی و مقادیر پیش‌بینی شده و توان مطلوب مدل در پیش‌بینی پاسخ $G^*/\sin\delta$ است. نمودار باقیمانده‌ها بر حسب NPO (شکل ۵۸) نیز توزیع تصادفی نقاط حول صفر را نشان داد و الگوی مشخصی مشاهده نشد که بیانگر قابل قبول بودن فرض یکنواختی واریانس خطاها است. علاوه بر این، نمودار Residuals vs. Run (شکل ۵۹) عدم وجود روند سیستماتیک، الگوی تناوبی و داده پرت را تأیید کرد و نشان داد که فرض استقلال خطاها در مدل برقرار است.

مقدار بالای R^2 (0.9273)، نزدیکی مناسب مقادیر $Adj-R^2$ و $Pred-R^2$ و همچنین Adeq Precision برابر با ۱۶,۱۴۲ نشان می‌دهد که مدل توسعه‌یافته از برازش و توان پیش‌بینی مناسبی برای توصیف تغییرات پارامتر $G^*/\sin\delta$ برخوردار است. نمودار نرمال باقیمانده‌ها (شکل ۵۸ ب) نشان می‌دهد که اغلب نقاط در امتداد خط مستقیم قرار گرفته‌اند و انحراف قابل توجهی از توزیع نرمال مشاهده نمی‌شود؛ بنابراین فرض نرمال بودن خطاها قابل قبول است. نمودار مقادیر پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر واقعی (شکل ۵۸ الف) نشان می‌دهد که اکثر نقاط در نزدیکی خط



شکل ۵۸. نمودارهای تشخیصی $G^*/\sin\delta$

۴- بهینه‌سازی چندهدفه و اعتبارسنجی مدل

۴-۱- نتایج بهینه‌سازی عددی

پس از تأیید و ارزیابی مدل‌های توسعه‌یافته، مرحله بهینه‌سازی چندهدفه با اهداف کمینه‌سازی تغییر جرم، بیشینه‌سازی دمای نقطه اشتعال و بیشینه‌سازی پارامتر $G^*/\sin\delta$ در نمونه‌های حاوی روغن انجام شد. در این مرحله، نرم‌افزار Design-Expert با استفاده از ۲۰ نقطه شروع تصادفی و راه‌حل معتبر ارائه داد که از

میان آن‌ها بهترین پاسخ بر اساس مقدار مطلوبیت کلی (معادله ۵) انتخاب شد. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که فرمولاسیون بهینه شامل ۲.۲۲٪ روغن SOCP بوده و دارای مقدار مطلوبیت برابر با 0.735 می‌باشد.

Mass Change (%) = 0.563%
Flash Point (°C) = 306.9°C
G*/sinδ (kpa) = 10.90 Kpa

مطلوبیت کلی سیستم از رابطه ۵ زیر محاسبه می‌شود.

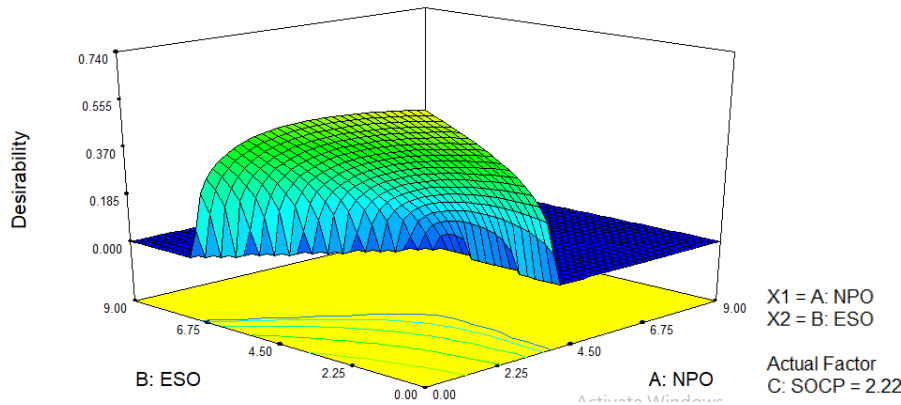
$$D = (d_1 \times d_2 \times d_3)^{1/n} \quad (5)$$

D: مطلوبیت کلی سیستم d_1, d_2, d_3 : مطلوبیت هر پاسخ

n: تعداد پاسخ‌ها

Tempreacher $\geq 230^\circ\text{C}$ مطابق استاندارد ASTM D92 و ≤ 1
Mass Change (%) مطابق با استاندارد AASHTO T240
استفاده شد.

محاسبات d_1 الی d_3 توسط نرم افزار براساس کمینه سازی و بیشینه‌سازی از محدود مجاز استانداردها نظر مقادیر $G^*/\sin\delta \geq 1$ Kpa مطابق استاندارد ASTM-D7175، Flash Point همان‌گونه که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار مطلوبیت در ناحیه ای حاصل می‌شود که ۲ روغن NPO و ESO در نمونه‌ها در پایین ترین سطوح قرار بگیرند.



شکل ۹. نمودار سطح پاسخ مطلوبیت کلی به عنوان تابعی از مقادیر ESO و NPO در شرایط بهینه SOCP

۴-۲- اعتبارسنجی آزمایشگاهی فرمولاسیون بهینه

جهت اعتبارسنجی آزمایشگاهی-تجربی، نمونه با بهترین فرمولاسیون بهینه معرفی شده، ساخته شد و نتایج حاصل از آزمایشات و اعداد بهینه سازی در جدول ۱۰ نشان داده شد. خطای محاسباتی مدل برای هر سه پاسخ مطابق با معادله (۶) کمتر از ۵٪ شد. این میزان خطا در محدوده قابل قبول استانداردهای بین‌المللی قرار داشته و نشان‌دهنده دقت بالای مدل‌های توسعه یافته در پیش‌بینی خواص قیر اصلاح شده می‌باشد.

با وجود آنکه روغن SOCP بیشترین کاهش را در پارامتر $G^*/\sin\delta$ در میان روغن‌های مورد مطالعه ایجاد کرد، نتایج نشان داد که این روغن به طور همزمان کمترین تغییر جرم ناشی از پیرشدگی کوتاه‌مدت و یکی از بالاترین مقادیر دمای نقطه اشتعال را فراهم می‌کند. این موضوع بیانگر آن است که مزایای حاصل از پایداری حرارتی بیشتر و ایمنی حرارتی بالاتر، بر اثر نرم‌کنندگی آن غلبه کرده است. از این رو، در فرآیند بهینه‌سازی چندهدفه که به طور همزمان سه شاخص تغییر جرم، دمای نقطه اشتعال و $G^*/\sin\delta$ را در نظر می‌گیرد، روغن SOCP بالاترین مقدار مطلوبیت کلی را به دست آورد و به عنوان گزینه بهینه انتخاب شد.

$$\text{Error (\%)} = |(\text{Predicted Value} - \text{Actual Value}) / \text{Predicted Value}| \times 100 \quad (6)$$

جدول ۱۰. نتایج اعتبارسنجی آزمایشگاهی-تجربی و RSM

وضعیت	حدمجاز	(%) خطا	مقدار واقعی (میانگین ۳ نمونه)	مقدار پیش بینی شده	پاسخ
✓	< 5%	4	0.54	0.563	(%) تغییر جرم
✓	< 5%	0.36	308	306.9	(°C) نقطه اشتعال
✓	< 5%	3.76	10.49	10.9	G*/sinδ (kPa)

این فرمولاسیون و فرمولاسیون حاوی روغن SOCP به اولویت کاربرد حداکثر مقاومت به شیارافتادگی در مقابل حداکثر پایداری حرارتی و ایمنی بستگی دارد. البته لازم به ذکر است که مقاومت این نمونه به مراتب بسیار بالاتر از قیر پایه و استاندارد اولیه است.

تطابق بین نتایج پیش‌بینی شده و آزمایشگاهی-تجربی، اعتبار مدل‌های RSM توسعه یافته را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که این مدل‌ها می‌توانند با اطمینان برای پیش‌بینی عملکرد قیر اصلاح شده مورد استفاده قرار گیرند. لازم به ذکر است که با توجه به نمونه بدون روغن که G*/sinδ قوی را بدست آورد، انتخاب بین

۵- نتیجه گیری

و توان پیش‌بینی مناسبی برای توصیف رفتار قیرهای اصلاح شده برخوردار بودند.

-نتایج بهینه‌سازی چندهدفه با هدف کمینه‌سازی تغییر جرم و پیشینه‌سازی دمای نقطه اشتعال و پارامتر G*/sinδ نشان داد که فرمولاسیون حاوی ۲,۲۲ درصد روغن خام آفتابگردان (SOCP) با مقدار مطلوبیت ۰,۷۳۵، به عنوان فرمولاسیون بهینه انتخاب شد. برای این ترکیب، مقادیر تغییر جرم، دمای نقطه اشتعال و G*/sinδ به ترتیب برابر با ۰,۵۶۳ درصد، ۳۰۶,۹ درجه سانتی‌گراد و ۱۰,۹۰ کیلوپاسکال پیش‌بینی شد. همچنین، نتایج اعتبارسنجی آزمایشگاهی نشان داد که اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی شده و نمونه آزمایشات تجربی برای تمامی پاسخ‌ها کمتر از ۵ درصد بوده و مدل‌های توسعه‌یافته از دقت و قابلیت پیش‌بینی مناسبی برخوردار هستند.

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان داد SOCP توانست تعادل مناسبی میان پایداری حرارتی، ایمنی حرارتی و عملکرد رئولوژیکی قیر لاستیکی حاوی نانو اکسید آلومینیوم ایجاد کند. اگرچه این روغن موجب کاهش پارامتر G*/sinδ نسبت به نمونه شاهد شد، اما عملکرد مطلوب آن در کاهش تغییر جرم ناشی از پیرشدگی و حفظ دمای نقطه اشتعال بالا سبب شد تا در بهینه‌سازی چندهدفه، بالاترین مطلوبیت کلی را کسب کند. بنابراین، SOCP را می‌توان به عنوان یک افزودنی زیست‌پایه امیدوارکننده در تولید قیرهای اصلاح شده حاوی پودر لاستیک و نانو اکسید آلومینیوم معرفی کرد.

در این پژوهش، اثر سه نوع روغن شامل روغن اپوکسید شده سویا (ESO)، روغن خام آفتابگردان با پوست (SOCP) و روغن نفتنیک (NPO) بر خواص حرارتی، ایمنی و رئولوژیکی قیر لاستیکی حاوی ۱۵ درصد پودر لاستیک و ۲ درصد نانو اکسید آلومینیوم بررسی شد. همچنین روش سطح پاسخ (RSM) برای مدل‌سازی، بهینه‌سازی و اعتبارسنجی نتایج مورد استفاده قرار گرفت. بر اساس نتایج حاصل، مهم‌ترین یافته‌های پژوهش به شرح زیر است:

-نتایج آزمون RTFO نشان داد که روغن نفتنیک بیشترین تأثیر را بر افزایش تغییر جرم داشته و موجب کاهش پایداری حرارتی قیر می‌شود، در حالی که روغن‌های زیستی ESO و SOCP تأثیر قابل توجهی بر این شاخص نداشتند.

-در بررسی ایمنی حرارتی، روغن NPO موجب کاهش دمای نقطه اشتعال شد، در حالی که روغن‌های زیستی ESO و SOCP مقادیر بالاتری از دمای نقطه اشتعال را حفظ کردند که نشان‌دهنده عملکرد مناسب‌تر آن‌ها از دیدگاه ایمنی حرارتی است.

-نتایج آزمون DSR نشان داد که هر سه روغن موجب کاهش پارامتر G*/sinδ شدند، با این حال تمامی نمونه‌ها مقدار G*/sinδ بالاتر از حداقل الزامات عملکردی قیرهای پیرنشده را حفظ کردند. در میان روغن‌های مورد مطالعه، SOCP بیشترین و NPO کمترین اثر کاهش را بر این پارامتر نشان دادند. از طرفی، ذرات اکسید آلومینیوم سبب افزایش مقاومت شد.

-مدل‌های توسعه‌یافته مبتنی بر RSM با ضرایب تعیین بین ۰,۸۹ تا ۰,۹۷ و خطای اعتبارسنجی کمتر از ۵ درصد، از دقت آماری

آسفالتی با استفاده از آزمون‌های تکمیلی نظیر FTIR و MSCR در مطالعات آینده ارائه خواهد شد.

این پژوهش در حال توسعه است و نتایج حاصل از بررسی اثر این روغن‌ها بر ویژگی‌های ریزساختاری، رفتار رئولوژیکی پس از پیرشدگی کوتاه‌مدت و بلندمدت و عملکرد مخلوط‌های

۶- مراجع

- H. Chu, A. Ibrahim Almohana, G. QasMarrogy et al, Experimental investigation of performance properties of asphalt binder and stone matrix asphalt mixture using waste material and warm mix additive, *Journal of Construction and Building Materials*, 368 (2023), 130397. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130397
- J. Xie, X. Zhao, S. Lv, Y. Zhang, W. He, F. Yu, Research on performance and mechanism of terminal blend/grafting activated crumb rubber composite modified asphalt, *Construction and Building Materials*, Vol.394, 29 August 2023, 132225. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132225
- J. Xie, X. Zhao, Y. Zhang, F. Yu, H. Luo, X. Chen, W. He, (2023). Preparation of terminal blend/grafting activated crumb rubber composite modified asphalt based on response surface methodology, *Sec. Structural Materials*, Vol. 10. doi.org/10.3389/fmats.2023.1193225
- K. Duan, CH. Wang, J. Liu, Q. Chen, Y. Chen (2022). Research progress and performance evaluation of crumb-rubber-modified asphalts and their mixtures, *Journal of Construction and Building Materials*, 361 129687. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129687
- L. Cao, ZH. Su, R. Liu, T. Zhou (2022). Optimized formulation of asphalt compound containing bio-oil and shredded rubber, *Journal of Cleaner Production*, 378 134591. doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134591
- L. Lyu, J. Pei, D. Hu, G. Sun, EH. Fini (2022). Bio-modified rubberized asphalt binder: A clean, sustainable approach to recycle rubber into construction, *Journal of Cleaner Production* 345, 131151. doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131151
- M. A Çolak, E.Zorlu, M. Y.Çodur, F. İ.Baş, Ö.Yalçın, E. Kuşkapan (1866). Investigation of Physical and Chemical Properties of Bitumen Modified with Waste Vegetable Oil and Waste Agricultural Ash for Use in Flexible Pavements. *Coatings*, 13(11).
- M. Akpolat, B. Vural Kök, E. Aydoğmuş, (2022). Research on the Rheological Properties of Asphalt Binder Modified by Fume Silica and Crumb Rubber Compound, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, Vol. 66, No. 2. doi.org/10.3311/PPci.19139
- M. Ghasemi, Sh. Shabani, P. Hayati, evaluation of performance grade of modified bitumen with waste crumb rubber using SHRP and SHRP plus tests, *Journal of Transportation Research*, 267 (17) (2021), 103-114.
- امینی، امیر (۱۴۰۴). بهینه سازی چند هدفه مشخصات عملکردی آسفالت حاوی افزودنی‌های بازیافتی با استفاده از روش پاسخ سطح، *فصلنامه علمی پژوهشنامه حمل و نقل*، سال بیست و دوم، دوره دوم، شماره ۸۳، تابستان، ۱۹۷-۱۸۵.
- A. AL. Sabaei, H. Alhussian, S. Jadid Abdulkadir, F. Giustozzi, M. Napiiah, A. Jagadeesh, M. Sutanto, AM. Memon, Utilization of response surface methodology and machine learning for predicting and optimizing mixing and compaction temperatures of bio-modified asphalt, *Journal of Case Studies in Construction Materials*, 18 (2023), e02073, doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02073
- A. E.Modupe, O. D. Atoyebi, A. O. Basorun, A. J. Gana, J. A. L. Ramonu, O. D. Raphael, (2019). Development and Performance Evaluation of Crumb Rubber - Bio-Oil Modified Hot Mix Asphalt for Sustainable Highway Pavements, *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 10(2), 273-287.
- A.J. del Barco Carrion, A. Subhy, M.A.I. Rodriguez, D.L. Presti, Optimisation of liquid rubber modified bitumen for road pavements and roofing applications, *Constr. Build. Mater.* 249 (2020), 118630.
- B. Furtana Yalcin, M. Yilmaz, Investigation of the Performance of Bio-Oils from Three Different Agricultural Wastes as Rejuvenators for Recycled Asphalt, *Turkish Journal of Civil Engineering*, (2024), 95-123, 771. doi.org/10.18400/tjce.1320185
- B. Ali, P. Li, M. Hani, Y. Chetbani, M. Sahraoui, A. Belaadi et al, D. (2026). Evaluation of the performance of bio-oil modified asphalt mixtures through response surface methodology and optimization techniques. *Scientific Reports*, 16(1), 4169.
- C. Chen, J. Lu, Y. Zhang, L. Gu, X. Chen, Applications of vegetable oils and their derivatives as Bio-Additives for use in asphalt binders: A review, *Journal of Construction and Building Materials*, 383 (2023), 131312. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131312
- F. Guo, ZH. Shen, L. Jiang, Q. Long, Y. Yu, (2024). Study on the Performance of Asphalt Modified with Bio-Oil, SBS and the Crumb Rubber Particle Size Ratio, *Polymers (Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI))*, 16(13) 1929. doi.org/10.3390/polym16131929

- T. L. X. Wong, T. H. Mok, T. Guo, M. R. Mohd Hasan, M. A. Kassim, M. A. Sukiran (2022). Characterisations of bio-asphalt incorporating palm bio-oil from waste empty fruit bunches. *Journal of Oil Palm Research*, 35(1) (2022) 45-57.
- X. Zhang, X. Wang, CH. Wan, B. yang, ZH. Tang, W. Li, (2023). Performance evaluation of asphalt binder and mixture modified by pre-treated crumb rubber, *Journal of Construction and Building Materials*, 362 (2023), 129777. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129777
- X. Zhao, F. Li, X. Zhang, J. Cao, X. Wang, (2023). Rheological properties and viscosity reduction mechanism of aromatic/ naphthenic oil pre-swelling crumb rubber modified asphalt, *Journal of Construction and Building Materials*, 398 (2023), 132545. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132545
- Y. Chen, H. Song, H. Wen, H. Wang, G. Tebaldi, Z. Liu, Y. Yang, S.I. Salihovich (2025). Desulfurization degree characterization of crumb rubber pretreated with heavy bio-oil and its effect on asphalt binder rheological performances and storage stability, *Journal of Construction and Building Materials*, 490, 142300. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142300
- Y. Mamuye, N. Duy Do, M. Chih Liao (2023). Nano-Al₂O₃ composite on intermediate and high temperature properties of neat and modified asphalt binders and their effect on hot mix asphalt mixtures, *Journal of Construction and Building Materials*, 331,127304.
- Y. Zhao, X. Zhang, F. Li, H. Zhang, B. Li, X. Chang, (2024). Effect of naphthenic oil and viscosity reduction process on fatigue life and rheological properties of crumb rubber modified asphalt, *Journal of Construction and Building Materials*, 455, 139201. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139201
- Z. Ju, D. Ge, S. Lv, D. Jin, Y. Xue, J. Xian, W. Zhang, (2024). Performance evaluation of bio-oil and high rubber content modified asphalt: More effective waste utilization, *Journal Case Studies in Construction Materials*, 21 (2024). e03828, doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03828
- M. Jamal, M. Lanotte, F. Giustozzi, (2022). Exposure of crumb rubber modified bitumen to UV radiation: A waste-based sunscreen for roads, *Journal of Construction and Building Materials*, 348, 131372, doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131372
- M. Ren, Y. Li, P. Cheng, Y. Chen, Effect of modifier on Low-Temperature reversible aging behavior of asphalt binder and its morphology analysis, *Journal of Construction and Building Materials*, 351 (2022), 128943. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128943
- MA. Dalhat, K. Al-Adham, Review on laboratory preparation processes of polymer modified asphalt binder, *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, (2023) Io (2). 159-184, doi.org/10.1016/j.jtte.2023.01.002
- N. Bala, I. Kamaruddin, M. Napiah, u. Hartadi Sutanto (2019). Polymer Nanocomposite-Modified Asphalt: Characterisation and Optimisation Using Response Surface Methodology, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 368, Vol. 44, 4233–4243.
- Q. Liu, B. Han, S. Wang, A. Cannone Falchetto, D. Wang, B. Yu, (2022). Evaluation and molecular interaction of asphalt modified by rubber particles and used engine oil, *Journal of Cleaner Production*, 375, 134222. doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134222
- R. O. Tewegbola, A. O.Arinkoola, T. O.Salawudeen, O. O.Ogunleye, (2026). Optimization of Ethylene – Vinyl Acetate Dosage for Rheological and Physico-Mechanical Properties of Loda Bitumen. *LAUTECH Journal of Engineering and Technology*, 20(1), 40-53.
- S. Ren, X. Liu, S. Erkens. (2024). Rutting and shear resistance evaluation of rejuvenated bitumen. In A. F. Nikolaidis & E. Manthos (Eds.), *Bituminous mixtures and pavements VIII*, 18-25, *CRC Press*.
- S.Matarneh, N.Louzi, I.Asi, M.Abdel-Jaber, E. Masad, (2025). Genetic expression programming based empirical models for the prediction of rutting parameter of bitumen modified using nanomaterials. *Engineered Science*, 35, Article 1438.

Evaluation and Optimization of the Thermal, Safety, and Rheological Performance of Alumina-Modified Crumb Rubber Asphalt in the Presence of Bio-Based and Petroleum Oils Using Response Surface Methodology

Niloufar Salehipourbavarsad, Department of Civil Engineering, Ki.C., Islamic Azad University, Kish, Iran.

*Shahin Shabani, Department of Civil Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran.
Seyed Ebrahim Abdolmanafi, Department of Civil Engineering,
Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.*

Email: shabani@pnu.ac.ir

Received: February 2026- Accepted: May 2026

ABSTRACT

The use of bio-based and petroleum oils as additives in crumb rubber asphalt (CRA) is an effective approach for improving the workability and performance of rubberized binders. However, the influence of oil type on the thermal stability, thermal safety, and rheological properties of alumina-modified CRA has not been fully clarified. This study evaluated three oils, including epoxidized soybean oil (ESO), sunflower oil containing peel (SO_{CP}), and naphthenic petroleum oil (NPO), at dosages of 5%, 7%, and 9% by weight of crumb rubber. The investigated properties were mass loss after short-term aging, flash point temperature, and rutting resistance ($G^*/\sin\delta$). Ten modified asphalt binders were prepared and analyzed using Response Surface Methodology (RSM) based on a linear model. Results showed that NPO significantly increased mass loss and reduced flash point temperature, whereas ESO and SO_{CP} had no significant adverse effects on these properties. Although all three oils caused a reduction in the $G^*/\sin\delta$ parameter, all samples still met the performance requirements specified for standard asphalt binders. Multi-objective optimization identified the formulation containing 2.22% SO_{CP} as the optimum mixture, with a desirability value of 0.735. The optimized binder was predicted to exhibit a mass loss of 0.563%, a flash point temperature of 306.9 °C, and a rutting resistance parameter of 10.90 kpa. Experimental validation showed prediction errors below 5%. These results indicate that SO_{CP} is capable of providing a favorable balance between thermal properties, short-term aging resistance, and rheological performance of alumina-modified crumb rubber asphalt.

Keywords: Crumb Rubber Asphalt, Bio-Based Oil, Naphthenic Oil, Thermal Stability, Response Surface Methodology