بهینه‌سازی چند هدفه مشخصات عملکردی آسفالت حاوی افزودنی‌های بازیافتی با استفاده از روش پاسخ سطح

مقاله علمی - پژوهشی

امیر امینی*، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: amiramini@iau.ac.ir

دریافت: ۱٤۰۳/۱۰/۱۵- پذیرش: ۱٤۰٤/۰۳/۰۱

صفحه ۱۹۸-۱۸۵

چکیده

استفاده از افزودنی‌های پودر لاستیک و پودر کربن در روسازی، با وجود مزایای فنی و زیست‌محیطی، با محدودیت‌هایی مواجه است که نیاز به بهینه‌سازی درصد مصرف آنها دارد. هدف این پژوهش، بهینه‌سازی خصوصیات مکانیکی آسفالت به‌منظور افزایش طول عمر و کیفیت روسازی و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری بر مبنای نتایج آزمایشگاهی است. متغیرهای ورودی شامل درصد پودر کربن و پودر لاستیک و متغیرهای خروجی شامل مدول برجهندگی، مقاومت رطوبتی، انرژی شکست، عمق شیارشدگی و کرنش‌های تجمعی آسفالت هستند. مدل ریاضی فرآیند برای هر مشخصه مکانیکی آسفالت با استفاده از روش پاسخ سطح تعیین و دقت آن با تحلیل واریانس بررسی شد. نتایج نشان داد که تحلیل آماری RSM از دقت بالایی برخوردار بوده و متغیرهای خطی CRM و ACP تأثیر قابل توجهی بر رفتار مکانیکی و عملکردی آسفالت دارند. شرایط بهینه برای بیشینه‌سازی مشخصات مکانیکی آسفالت به‌صورت ACP برابر ٤٤/٤٪ و CRM برابر ۱٤/۹٪ پیشنهاد شد. مقایسه شرایط بهینه‌سازی‌شده و حداقل آزمایشگاهی نشان داد که استفاده از ترکیب بهینه پودر لاستیک و پودر کربن، به ترتیب ۹٪، ۵۳٪ و ۶۹٪ بهبود در مقاومت رطوبتی، انرژی شکست و مدول برجهندگی و همچنین ٤۸٪ و ٤٤٪ کاهش در عمق شیارشدگی و کرنش پلاستیک ایجاد می‌کند. به‌طور کلی، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که بهینه‌سازی انرژی شکست، مدول برجهندگی و مقاومت رطوبتی، همراه با کاهش شیارشدگی، می‌تواند منجر به افزایش کیفیت و طول عمر روسازی و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری شود.

واژه‌های کلیدی: توسعه پایدار، آسفالت اصلاح شده، محیط زیست، مشخصات عملکردی، بهینه سازی چند هدفه

۱-مقدمه

خرابی‌های ناشی از شیارشدگی، خستگی و ترک‌های برودتی دمای پایین به‌عنوان اصلی‌ترین دلایل کاهش سطح کیفیت جاده و تضعیف عملکرد روسازی‌های آسفالتی می‌باشند. در بین این خرابی‌ها، شیارشدگی یکی از مهم‌ترین آسیب‌های رخ‌داده در روسازی‌های آسفالتی است که معمولاً در لایه‌های آسفالتی و لایه‌های غیرمحدود زیرین ایجاد می‌شود. این خرابی به شکل فرورفتگی سطحی در مسیر چرخ‌ها و براثر تنش‌های برشی افقی ناشی از اصطکاک لاستیک در هنگام ترمز گیری مکرر خودروها و در قسمت‌های طولانی و شیب‌دار بزرگراه‌ها رخ می‌دهد(Ameri, Mirzaiyan, & Amini, 2018; Amir Amini, Ziari, & Goli, 2018). با توجه به افزایش قیمت شدید مواد افزودنی و کمبود بودجه‌های عمرانی، نیاز به استفاده از مواد ارزان و با رویکرد زیست‌محیطی در حال افزایش است. شرایط جغرافیایی، مسائل اقتصادی، سازگاری با محیط‌زیست و آب‌وهوای منطقه و عملکرد فنی از جمله عوامل مؤثر در انتخاب مواد افزودنی با کارایی مناسب هستند. مطالعات اخیر نشان

می‌دهد که مشکل دفع زباله‌ها و کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی در حال تبدیل شدن به یک فرهنگ عمومی است. یکی از مسائل مهم در این زمینه، افزایش تعداد خودروها و تولید لاستیک‌های فرسوده است که باعث تهدید جدی برای محیط‌زیست و سلامت افراد می شود (Wang, Dang, Li, & You, 2013; Zakerzadeh, Shahbodagh, Ng, & Khalili, 2024; Zhao et al., 2022).

استفاده از تایرهای بازیافتی به عنوان راهکاری مؤثر در بهبود کیفیت جاده‌ها و کاهش هزینه‌های نگهداری و ترمیم راه‌ها مطرح شده است. همچنین، بازیافت لاستیک‌های قراضه و فرسوده می‌تواند به عنوان روشی موثر در بهبود کیفیت مواد آسفالتی و کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی استفاده شود. با افزایش جمعیت و تعداد خودروها، مشکل دفع لاستیک‌های قراضه و فرسوده بزرگتر شده است. بنابراین، راه حل‌های جایگزین و بازیافت لاستیک‌ها به منظور بهره‌برداری منابع و حفظ محیط‌زیست، باید مورد توجه قرار گیرند (Hassan Ziari, Amini, & Goli, 2020; Hasan Ziari, Goli, & Amini, 2016). در فرآیند اصلاح شیمیایی قیرهای اصلاح شده با پودر لاستیک (CRMB)، هدف تغییر پیوند شیمیایی بین قیر و ذرات لاستیک است. این تغییر پیوند با استفاده از مواد شیمیایی و فعال‌کننده‌ها انجام می‌شود. اصلاحات شیمیایی می‌توانند ویسکوزیته و دمای عملکردی CRMB را افزایش دهند و رادیکال‌های آزاد را تولید کنند. این اصلاحات، بهبود فعل‌وانفعالات قیر و لاستیک را فراهم می‌کنند و پایداری ذخیره‌سازی CRMB را بهبود می‌بخشند. همچنین، استفاده از تکنولوژی پودر لاستیک به عنوان یک راهکار زیست‌محیطی برای مدیریت لاستیک های قراضه مورد توجه قرار می‌گیرد(Mashaan, Ali, Karim, & Abdelaziz, 2014; Presti, 2013). این تکنولوژی امکان استفاده بهینه از تعداد قابل‌توجهیاز لاستیک های قراضه را فراهم می‌کند و در زنجیره بازیابی و استفاده مجدد این لاستیک‌ها نقش مهمی ایفا می‌کند. افزایش مالکیت خودرو در کشورهای صنعتی و درحال‌توسعه، تعداد لاستیک های قراضه را افزایش داده است. از طرفی، اصلاح آسفالت با پودر لاستیک می‌تواند عملکرد روسازی را در مقابل خستگی، ترک‌ها و لغزش بهبود بخشد. بطوری که ارزیابی‌های مختلف نشان داده است که روسازی‌های آسفالتی اصلاح شده با پودر لاستیک دارای عمر مفید و مقاومت شیارشدگی بالاتری نسبت به روش‌های دیگر هستند (Amir Amini et al., 2018; Ansari, Jakarni, Muniandy, Hassim, & Elahi, 2021). در مطالعه انجام شده توسط باباگلی و همکاران (Ameli, Babagoli, Asadi, & Norouzi, 2021) اثر افزودنی‌های نیمه گرم و پودر لاستیک بر عملکرد ترک‌های دمای پایین قیر و مخلوط آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه‌ای حاوی گیلسونایت بررسی شده است. نتایج نشان داد که استفاده از پودر لاستیک بهبود قابل توجهی در عملکرد دماهای پایین دارد، در حالی که افزودن گیلسونایت منجر به کاهش عملکرد قیرها در دماهای پایین می‌شود. همچنین، پودر لاستیک سبب بهبود خصوصیات شکل‌پذیری قیر و افزایش مقاومت مخلوط در برابر ترک‌خوردگی می‌شود. گیو و همکاران (Gui, Liang, Wang, Gao, & Zhang, 2021) در سال ۲۰۲۱ به بررسی تأثیر اندازه ذرات لاستیک و افزودنی‌های گرم بر مقاومت دمای بالا قیرهای لاستیکی گرم پرداختند. در این تحقیق، از دو نوع مختلف پودر لاستیک، یک مش منفرد و یک مش ترکیبی، همچنین دو افزودنی مختلف WMA استفاده شد. نتایج نشان داد که ترکیب پودر لاستیک و WMA تأثیر هم‌افزایی مثبتی بر خواص رئولوژیکی قیرها دارد. قیرهای لاستیکی اصلاح شده حاوی افزودنی نیمه گرم با مش ترکیبی نشان دهنده عملکرد مطلوبی هستند. علاوه بر این، تجزیه و تحلیل خواص ضد شیار شدگی نشان داد که اثر مثبت اندازه ذرات ترکیبی بیشتر از اندازه ذرات با مش منفرد است. ژیان و همکاران (Qian et al., 2020) در سال ۲۰۲۱ به ارزیابی تأثیر اندازه ذرات لاستیک بر خواص قیرهای اصلاح‌شده ترکیبی لاستیک/پلیمر پرداختند. در این تحقیق، قیرهای اصلاح‌شده ترکیبی از طریق اختلاط قیر، ذرات لاستیک با اندازه ذرات مختلف و SBS با ساختارهای مولکولی متفاوت تهیه شدند. نتایج نشان داد که استفاده از ذرات لاستیک بزرگ‌تر مقاومت شیارشدگی و خستگی را بهبود می‌بخشد، اما مقاومت در برابر ترک‌خوردگی در دمای پایین و پایداری ذخیره‌سازی را کاهش می‌دهد. همچنین، استفاده از قیرهای اصلاح‌شده ترکیبی تأثیر هم‌افزایی مناسبی بر خواص رئولوژیکی قیر دارد و میزان موردنیاز افزودنی‌ها را کاهش می‌دهد که از نظر اقتصادی و زیست محیطی مطلوب است. خالد و آرتامندی (Khalid & Artamendi, 2003) به این نکته اشاره کردند که افزودن بیش از ۱۰ درصد پودر لاستیک باعث تولید قیری می‌شود که بسیار چسبناک است و مشکلاتی در عملیات اختلاط میدانی ایجاد می‌کند. همچنین، قیر اصلاح‌شده با لاستیک به دلیل ته‌نشین شدن پودر لاستیک ممکن است مشکلاتی در ذخیره‌سازی داشته باشد. در این صورت، اختلاط مخلوط در دمای بالا تا زمانی که ذرات لاستیک دپلیمریزه شوند، می‌تواند یک گزینه مناسب برای رفع مشکلات ته‌نشینی باشد و خواص قیر را بهبود بخشد.

با وجود مزایای قابل توجه فنی، اقتصادی و زیست محیطی در خصوص مصرف پودر لاستیک در روسازی، ولی حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی حاوی CRMB یک مسئله مهم

است. اگرچه تاثیر مثبت CRMB بر مقاومت شیارشدگی و عملکرد خستگی آسفالت مشخص است، اما حساسیت رطوبتی در این مخلوط‌ها همچنان مورد بحث و بررسی است (Presti, 2013). تحقیقات نشان داده است که افزودن پودر لاستیک به قیر باعث افزایش ویسکوزیته می‌شود و اتصال ضعیفی بین قیر و سنگدانه‌ها ایجاد می‌شود که منجر به افزایش حساسیت رطوبتی می‌شود (Xiao, Amirkhanian, & Juang, 2007). همچنین، تحقیقات نشان داده است که ترکیب پودر لاستیک با قیرهای پلیمری نیز می‌تواند به افزایش حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی شود (Mohammad, Cooper Jr, & Elseifi, 2011). با توجه به این واقعیت‌ها، اگرچه پودر لاستیک مزایای فنی و عملکردی در بهبود خصوصیات آسفالت دارد، اما، می‌تواند مقاومت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی را کاهش دهد. بنابراین، تلاش‌های بیشتری برای اصلاح مقاومت رطوبتی در مخلوط‌های حاوی CRMB لازم است تا این چالش مهم مورد بررسی قرار گیرد. در تحقیقات گذشته برای رفع مشکل حساسیت رطوبتی آسفالت‌های لاستیکی، افزودنی‌های افزودنی ضد عریان شدگی نظیر زایکوترم پیشنهاد شده است (Mansourkhaki & Aghasi, 2019). با این وجود، قیمت بالا و عدم تاثیرگذاری محسوس بر سایر مشخصات فنی آسفالت و توجه جدی به توسعه پایدار موجب شده است تا مواد اصلاح کننده با ماهیت زیست محیطی بیشتر مورد توجه قرار گیرد. پودر کربن آمورف ماده‌ای زیست محیطی و از ضایعات تولید پارافین می‌باشد. استفاده از این ماده به عنوان جایگزین بخشی از فیلرها در مخلوط‌های آسفالتی، علاوه بر بهبود خواص فنی و عملکردی، می‌تواند از رها سازی ضایعات تولید پارافین و جلوگیری از آلودگی محیط زیست، اقدامی مثبت باشد (Hassan Ziari et al., 2017). تحقیقات گذشته نشان داده است که استفاده ازACP به دلیل خاصیت آبگریزی و بافت خشن باعث کاهش واکنش آسفالت با آب و بهبود مقاومت رطوبتی می‌شود. همچنین، نتایج آزمایش‌های خزش دینامیکی و شیارشدگی ویلتراک هامبورگ نشان داده است که استفاده از ACP مقاومت در برابر شیارشدگی را افزایش می‌دهد. با این حال، ارزیابی عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از آزمایش چهار نقطه‌ای خمشی نشان داده است که استفاده از ACP می‌تواند سختی مخلوط را افزایش داده و در نتیجه عمر خستگی آن را کاهش دهد.

با توجه به مطالب بیان شده، استفاده از افزودنی‌های پودر لاستیک و پودر کربن علیرغم مزایای فنی و زیست محیطی، دچار محدویت‌هایی می‌باشند که نیاز است درصد مصرف آنها بهینه سازی شوند. هدف این پژوهش بهینه‌سازی خصوصیات مکانیکی آسفالت به منظور افزایش طول عمر و کیفیت روسازی و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری بر مبنای نتایج آزمایشگاهی است. متغیرهای ورودی شامل درصد پودر کربن و پودر لاستیک و متغیرهای خروجی شامل مدول برجهندگی، مقاومت رطوبتی، انرژی شکست، عمق شیارشدگی و کرنش‌های تجمعی آسفالت است. بر همین اساس، مدل ریاضی فرآیند برای هر مشخصه مکانیکی آسفالت با استفاده از روش پاسخ سطح (RSM) تعیین خواهد شد و دقت و صحت مدل با تحلیل واریانس بررسی می‌گردد. در نهایت، خصوصیات عملکردی و مکانیکی آسفالت حاوی ترکیب مواد بازیافتی با روش بهینه‌سازی تحلیل خواهد شد و مقدار بهینه پودر لاستیک و پودر کربن تعیین می‌شود.

۲-روش تحقیق و مصالح آزمایشگاهی

۲-۱-قیر و مصالح آزمایشگاهی

در این تحقیق از قیر PG 64-22 تهیه شده از شرکت نفت جی استفاده شد. برای تولید مخلوط آسفالتی از سنگدانه‌های آهکی به دست آمده از معادن اسبچران واقع در شمال شرق تهران استفاده شده است. برای بهبود خواص عملکردی و فنی قیر مخلوط‌های آسفالتی، از پودر لاستیک ضایعاتی با مش عبوری از الک ٤۰ استفاده شده است. همچنین، برای بهبود خصوصیات عملکردی و فیزیکی مخلوط‌های آسفالتی، از پودر کربن به عنوان فیلر استفاده شده است. پودر کربن مورد استفاده در این مطالعه، ضایعات تولید پارافین است که استفاده از آن در آسفالت به منظور حفظ محیط زیست انجام شده است. بر اساس تحلیل XRF، ترکیبات پودر کربن شامل حدود ۷٤/٤٪ کربن، ۱۸٪ اکسیژن و ۷/٦٪ گوگرد می‌باشد.

۲-۲- تولید قیرهای اصلاح شده

برای تهیه قیرهای اصلاح شده لاستیکی، ابتدا قیر خالص در دمای حدود ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد گرم شد و سپس پودر لاستیک به مدت ۱۵ دقیقه به آن اضافه شد. سپس، عمل اختلاط در دمای ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد، به مدت ۹۰ دقیقه و با سرعت میکسر ٤۰۰۰ دور در دقیقه و با استفاده از میکسر برش بالا انجام شد. در این مطالعه، مقدار پودر لاستیک استفاده شده برای اصلاح خواص قیر، با توجه به مطالعات گذشته (Amir Amini & Imaninasab, 2018; Hasan Ziari et al., 2016) و به میزان ۸، ۱۲ و ۱٦ درصد وزنی قیر انتخاب شده است. نتایج آزمایش رئولوژیکی نشان داد که رده عملکردی قیرهای تولید شده حاوی ۸، ۱۲ و ۱٦٪ پودر لاستیک به ترتیب برابر PG70-22، PG70-22 و PG76-22 می‌باشند.

۲-۳- طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی

در این تحقیق، از پودر کربن در درصدهای ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد وزنی به عنوان جایگزین بخشی از فیلر استفاده شده است. ابتدا مطابق استاندارد ASTM D1559، درصد قیر بهینه برای

مخلوط‌های آسفالتی محاسبه شده است. درصد قیر بهینه برای نمونه‌های حاوی قیرهای اصلاح شده با ۸ و ۱۲ و ۱٦ درصد CRM و ۵۰ درصد پودر کربن محاسبه شده و درصد قیر بهینه برای نمونه‌های با ۲۵ و ۷۵ درصد پودر کربن همانند نمونه ۵۰ درصد در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر، تأثیر پودر کربن بر درصد قیر بهینه نمونه‌ها به طور ناچیز در نظر گرفته شده تا بتوان اثر آن را در مخلوط‌های آسفالتی به تنهایی بررسی کرد. در مجموع، ٥٤ نمونه برای محاسبه درصد قیر ساخته شده است. با توجه به تاثیر قابل توجه پودر لاستیک بر ویسکوزیته قیر و به تبع آن مقدار بهینه قیر، پس از تحلیل نتایج آزمایش‌های مارشال و رایس، مقدار بهینه قیر برای نمونه‌های حاوی قیر لاستیکی با ۸، ۱۲ و ۱٦ پودر لاستیک برابر ۵/۱، ۵/۲ و ۵/٤ درصد تعیین شد.

۳- روش تحقیق

۳-۱-آزمایش‌های آسفالتی

به منظور بهینه سازی مشخصات مکانیکی آسفالت حاوی ترکیب مواد بازیافتی از آزمایش‌های عملکردی شامل مدول برجهندگی، مقاومت کششی غیرمستقیم، حساسیت رطوبتی لاتمن، خزش دینامیکی و چرخ ویل ترک استفاده شده است. مدول برجهندگی به عنوان پارامتر مهمی در ارزیابی عملکرد روسازی نسبت به بارگذاری ترافیکی استفاده می‌شود(Hassan Ziari, Nasiri, Amini, & Ferdosian, 2019). در این مطالعه، نمونه‌ها در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته و با اعمال بار نیمه سینوسی، مدول برجهندگی آنها اندازه‌گیری شده است. مقاومت کششی و ترک خوردگی آسفالت دیگر مشخصه مورد بررسی در این تحقیق است که با استفاده از آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم اندازه‌گیری شد. انرژی شکست مساحت زیر منحنی بار-تغییر مکان تا حداکثر بار در لحظه شکست است که نشان دهنده مقاومت ترک‌خوردگی آسفالت است. رطوبت دیگر پارامتر تاثیرگذار بر عملکرد روسازی به خصوص در ایجاد خرابی‌های عریان شدگی و قیرزدگی است. حضور رطوبت باعث کاهش چسبندگی و پیوستگی بین سنگدانه و قیر می‌شود و در نتیجه باعث کاهش ظرفیت باربری روسازی آسفالتی می‌شود. در این مطالعه، حساسیت رطوبتی بتن آسفالتی براساس استاندارد AASHTO-T283 یا لاتمن اصلاح شده بررسی شد (A Amini, Goli, & Ziari, 2017). همچنین، برای بررسی شیارشدگی آسفالت از دو آزمایش خزش دینامیکی و چرخ ویل ترک استفاده شده است.

آزمایش خزش دینامیکی مطابق با استاندارد کشور استرالیا و با شرایط بارگذاری نیمه‌سینوسی، تنش برابر ٤۰۰ کیلوپاسکال و دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام شده است.

در حالی که برای انجام آزمایش چرخ ویل تراک، نمونه‌ها پس از آماده‌سازی و عمل آوری به مدت ۵ ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. سپس نمونه‌ها در شرایط آزمایش با دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده می‌شوند و عمق شیارشدگی تحت ۸۰۰۰ سیکل بارگذاری تعیین می‌شود.

۳-۲-روش تحلیل سطح پاسخ

روش سطح پاسخ یکی از تکنیک‌های چند متغیره است که در بهینه‌سازی استفاده می‌شود. این روش بر اساس مجموعه‌ای از تکنیک‌های ریاضی و آماری به منظور تعیین ارتباط بین متغیرهای مستقل و تابع هدف طراحی شده است. در این روش، با بررسی یک یا چند پاسخ تحت تأثیر چندین متغیر، بهترین عملکرد سیستم شناسایی می‌شود (Bezerra, Santelli, Oliveira, Villar, & Escaleira, 2008; Khuri & Mukhopadhyay, 2010). در تحقیق حاضر نیز از مدل RSM برای تعیین ارتباط بین متغیرهای مستقل و تابع هدف استفاده شده است. متغیرهای درصد پودر لاستیک و پودر کربن به عنوان متغیرهای مستقل و مشخصات مکانیکی و عملکردی آسفالت شامل مدول برجهندگی، شاخص حساسیت رطوبتی، انرژی شکست، عمق شیارشدگی و کرنش‌های پلاستیک ناشی از بارگذاری دینامیکی به عنوان متغیرهای پاسخ در نظر گرفته شده است. سپس با استفاده از نتایج آزمایش‌ها، داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از تابع چند جمله‌ای برازش تحلیل ریاضی-آماری شده‌اند. در نهایت، مدل نهایی تعیین شده و مقدار مدل در پیش‌بینی داده‌ها ارزیابی شده است. معادله RSM استفاده شده در این مطالعه را می‌توان به شکل مدل ۱ نمایش داد. در این معادله، Y متغیر پاسخ است، X_i و X_j متغیرهای مستقل هستند و b_0، b_i، b_{ii} و b_{ij} نشان دهنده ضرایب ثابت، خطی، درجه دوم و اندرکنش می‌باشند.

(۱)

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

٤-ارائه و تفسیر نتایج

٤-۱-نتایج آزمایشگاهی

مقاومت در برابر شیارشدگی آسفالت‌های اصلاح‌شده بر اساس نتایج آزمایش‌های خزش دینامیکی و چرخ ویل تراک تحلیل شده است. افزایش درصد ACP (فیلر) از ۲۵ به ۵۰ درصد منجر به کاهش کرنش تجمعی و بهبود مقاومت شیارشدگی آسفالت می‌شود. با این حال، افزایش ACP از ۵۰ به ۷۵ درصد، تغییر شکل‌های ماندگار را افزایش می‌دهد. مخلوط آسفالتی حاوی ۵۰ درصد فیلر ACP و قیر اصلاح‌شده با ۱٦ درصد پودر لاستیک دارای کمترین کرنش تجمعی و بهترین مقاومت شیارشدگی است. این بهبود ممکن است به دلیل افزایش سختی و ویسکوزیته ماستیک اصلاح‌شده باشد. همچنین، ساختار چندوجهی ACP می‌تواند به افزایش قفل و بست و کاهش تغییر شکل جانبی مخلوط کمک کند. نتایج آزمایش چرخ ویل تراک نیز نشان می‌دهد که استفاده از قیر لاستیکی و فیلر ACP به‌طور قابل توجهی عمق شیارشدگی را کاهش می‌دهد. به‌عنوان مثال، با افزایش CRM (قیر اصلاح‌شده) از ۸ به ۱۲، عمق شیارشدگی حدود ۲۸٪ و با افزایش CRM از ۸ به ۱٦، این کاهش به ٤٦٪ می‌رسد بهترین مقاومت شیارشدگی در نمونه‌هایی با ۵۰٪ پودر کربن و ۱٦٪ پودر لاستیک مشاهده می‌شود. افزایش همزمان CRMو ACP منجر به افزایش قابل توجهی در مقاومت شیارشدگی و کاهش عمق شیار می‌شود. با این حال، استفاده از بیش از ۵۰ ACP %می‌تواند منجر به کلوخه شدن و کاهش توزیع مناسب ماستیک در سطح سنگدانه‌ها شود و در نتیجه مقاومت شیارشدگی را کاهش دهد (Hassan Ziari et al., 2017).

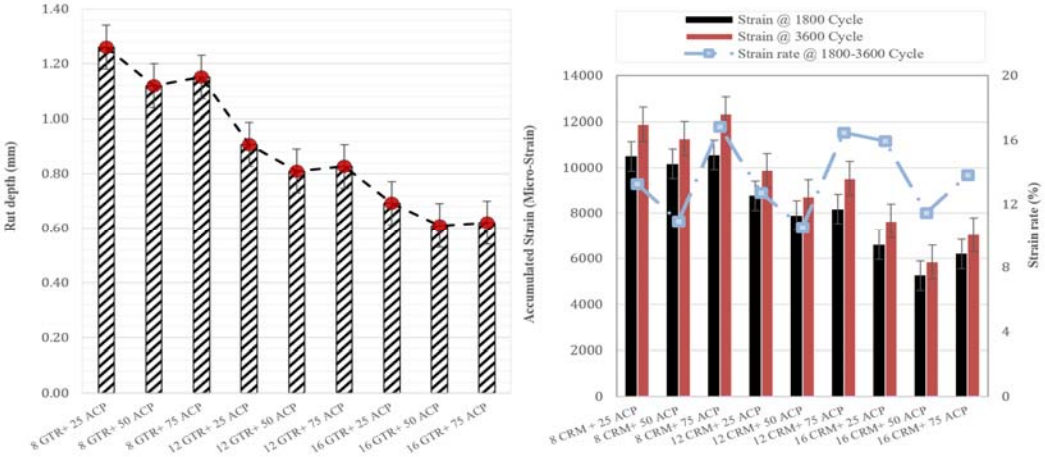
براساس آنالیز و ارزیابی‌های انجام‌شده در آزمایش، از شاخص‌های ITS (مقاومت کششی) و TSR (حساسیت رطوبتی) برای بررسی تأثیر ACP (فیلر) بر مقاومت کششی و حساسیت رطوبتی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش درصد CRM (قیر اصلاح‌شده) از ۸ به ۱٦ درصد، به‌طور کلی منجر به افزایش ITS مخلوط آسفالتی می‌شود. در مقابل، افزایش درصد ACP از ۲۵ به ۵۰ درصد باعث افزایش ITSو افزایش از ۵۰ به ۷۵ درصد موجب کاهش آن می‌گردد. به‌طور خاص، افزایش درصد ACP از ۲۵ به ۵۰ درصد میانگین آن حدود ۷٫۵٪ در حالت خشک و ۱۰٫۱٪ در حالت اشباع، ITS را افزایش می‌دهد. اما افزایش ACP از ۵۰ به ۷۵ درصد حدود ۵٫۳٪ در حالت خشک و ۱۲٪ در حالت اشباع، مقاومت کششی را کاهش می‌دهد. بیشترین مقدار ITS مربوط به مخلوطی است که ۵۰٪ فیلر ACP و ۱٦٪ پودر لاستیک دارد. افزایش ITS ناشی از افزایش سختی و ویسکوزیته قیر و در نتیجه بهبود مقاومت آن است. همچنین، افزودن ACP به‌عنوان فیلر به دلیل بافت چندوجهی و خاصیت آبگریزی، مانع نفوذ آب بین قیر و سنگدانه‌ها می‌شود و به این ترتیب اتصال قوی‌تری بین قیر و سنگدانه‌ها ایجاد می‌کند.

نتایج نشان می‌دهد که افزایش درصد ACP (فیلر) می‌تواند بهبود قابل توجهی در شاخص TSR و مقاومت رطوبتی آسفالت ایجاد کند. ساختار چندوجهی ACP به‌عنوان فیلر، سطح زبری نانومتری ایجاد می‌کند که قیر را از آب جدا کرده و مانع ورود رطوبت به محل اتصال قیر و سنگدانه‌ها می‌شود. این خاصیت آبگریزی باعث افزایش چسبندگی بین قیر و سنگدانه‌ها و بهبود مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی می‌گردد. با این حال، افزایش درصد ACP به بیش از ۵۰ درصد ممکن است منجر به کلوخه شدن ماستیک قیر و ACP شود که کارایی ACP در بهبود مقاومت رطوبتی را تحت تأثیر قرار داده و ممکن است کاهش اندکی در شاخص TSR ایجاد کند .همچنین، با افزایش درصد CRM (قیر اصلاح‌شده)، حساسیت رطوبتی افزایش می‌یابد. این امر ممکن است به دلیل جذب روغن‌های سبک قیر توسط CRM باشد که حجم مخلوط را افزایش می‌دهد و در نتیجه ویسکوزیته قیر را بالا می‌برد. این شرایط ممکن است منجر به پوشش‌دهی نامناسب قیر لاستیکی بر روی سنگدانه‌ها و اتصال ضعیف بین قیر و سنگدانه‌ها شود. افزایش درصد CRM از ۸ به ۱٦ درصد، خاصیت چسبندگی قیر را کاهش داده و حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی را افزایش می‌دهد. این موضوع ضرورت رعایت حداقل مقدار TSR برای طراحی مخلوط‌های سوپرپیو را نشان می‌دهد. طبق استانداردAASHTO T283، مقدار ۸۰ درصد به‌عنوان حداقل میزان TSR برای طراحی این مخلوط‌ها تعیین شده است. بنابراین، نمونه‌های حاوی ۱٦ درصد CRM پایین‌تر از این حد مجاز قرار می‌گیرند و مقاومت لازم در برابر رطوبت را ندارند (Hassan Ziari et al., 2017).

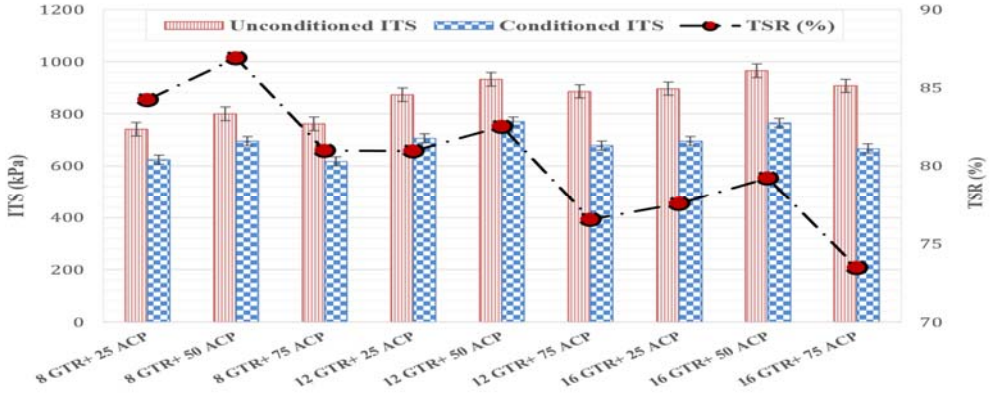
در شکل ۳ تأثیر مواد بازیافتی تقویت‌کننده بر تغییرات مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی نشان داده شده است. نتایج بررسی تأثیر مقادیر مختلف مواد تقویت‌کننده نشان می‌دهد که افزایش درصد ACP (فیلر) از ۲۵ به ۵۰ درصد موجب افزایش مدول برجهندگی می‌شود، در حالی که افزایش آن از ۵۰ به ۷۵ درصد

باعث کاهش مدول برجهندگی می‌گردد. به‌طور خاص، افزایش مقدار ACP از ۲۵ به ۵۰ درصد در مخلوط آسفالتی حاوی ۸، ۱۲ و ۱۶ درصد لاستیک، به ترتیب منجر به افزایش مدول برجهندگی به میزان ۲۱,۸، ۱۹,۵ و ۲۲,۹ درصد می‌شود. اما افزایش ACP از ۵۰ به ۷۵ درصد به‌طور میانگین حدود ۲ درصد مدول برجهندگی را کاهش می‌دهد .در میان نمونه‌های مورد بررسی، مخلوط آسفالتی حاوی ۱۶ درصد CRM و ۵۰ درصد ACP بالاترین مقدار مدول برجهندگی را نشان می‌دهد.

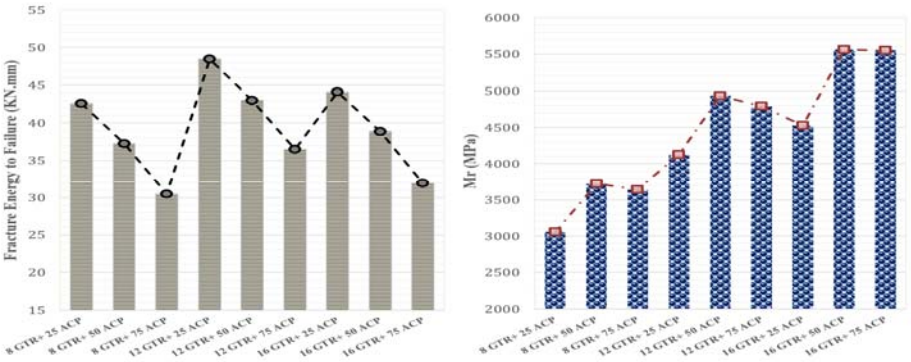
نتایج نشان می‌دهد که استفاده از ACP (فیلر) به‌عنوان فیلر موجب کاهش انرژی شکست و تضعیف مقاومت خستگی می‌شود. اما استفاده از قیر لاستیکی می‌تواند این ضعف را جبران کرده و مقاومت خستگی را بهبود بخشد. همچنین، ترکیب ACP به‌عنوان فیلر و CRM (قیر اصلاح‌شده) به‌عنوان اصلاح‌کننده قیر، منجر به بهبود حساسیت رطوبتی و مقاومت خستگی آسفالت می‌شود. مقایسه انرژی شکست نشان می‌دهد که بالاترین انرژی شکست مربوط به مخلوطی با ۲۵ درصد فیلر ACP و ۱۲ درصد CRMاست. اگرچه استفاده از ACP به‌عنوان فیلر ممکن است انرژی شکست را کاهش دهد، اما قیر اصلاح‌شده با CRM این مشکل را برطرف کرده و مقاومت خستگی را افزایش می‌دهد. در نهایت، استفاده از ACP و قیر لاستیکی می‌تواند به بهبود حساسیت رطوبتی و مقاومت خستگی مخلوط‌های آسفالتی منجر شود. با این حال، تعیین مقدار بهینه هر افزودنی ضروری است تا عملکرد نهایی آسفالت از جنبه‌های فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی بهینه باشد.



شکل ۱. خلاصه نتایج آزمایش خزش دینامیکی و چرخ ویل تراک بر اساس مقاومت شیارشدگی



شکل ۲. نتایج آزمایش لاتمن اصلاح شده بر اساس مقاومت کشش غیرمستقیم و شاخص حساسیت رطوبتی



شکل ۳. تایج آزمایش‌های مدول برجهندگی و مقاومت شکست آسفالت تحت تاثیر افزودنی‌های بازیافتی

٤-۲-نتایج مدل سازی

در جدول ۱ پارامتر معادلات پیش بینی مشخصات آسفالت بر اساس روش RSM نمایش داده شده است. برای تعیین رابطه بین متغیرهای مستقل و پارامتر شیارشدگی قیرها، از معادلات خطی و چند جمله‌ای مختلفی استفاده شده است. در نهایت، معادله چند جمله‌ای ۱ با بالاترین دقت و بیشترین مقدار معنی‌داری به عنوان معادله بهینه پیشنهاد شده است. در این رابطه متغیرهای A و B به ترتیب درصد پودر لاستیک و پودر کربن می‌باشند. برای بررسی کفایت مدل و صحت سنجی نتایج بدست آمده از تحلیل ANOVA در جدول ۲ استفاده شده است. پارامتر F معیاری از انحراف داده‌ها از مقدار میانگین است. برای مدلی که نتایج آزمایش را با موفقیت پیش‌بینی می‌کند، مقدار F به طور معمول بسیار بالا است و مقدار Prob کمتر از ۰/۰۵ نیز به معنی معنادار بودن مدل و تاثیرگذاری پارامترهای مستقل بر مقادیر پاسخ در سطح اطمینان ۹۵٪ است. با توجه به نتایج بدست آمده، مقادیر F برای مدل‌های طراحی شده خصوصیات حساسیت رطوبتی، انرژی شکست، مدول برجهندگی، عمق شیارشدگی و کرنش خزشی به ترتیب برابر ۲۵۵، ۳۸۳۱، ٤۳۰، ۲۸۸ و ۱۲٤ می‌باشد. با توجه به مقادیر بسیار بالا، مدل‌های طراحی شده طور کامل معنادار است. در این معادلات، پارامترهای خطی A و B پارامترهای درجه دوم هستند و A2 و B2 به همراه پارامترهای میان‌کنش AB پارامترهای شاخص مدل هستند.

بررسی جز به جز هر آزمایش نشان می‌دهد که بر اساس تحلیل همزمان شاخص‌های F و Prob به ترتیب CRM، ACP2 و ACP بیشترین تاثیر را بر شاخص رطوبتی داشته‌اند. همانطور که مشاهده شده است وجود ذرات کربن تاثیر معنادار و قابل توجهی بر بهبود مقاومت رطوبتی آسفالت حاوی قیر لاستیکی داشته است. بررسی نتایج انرژی شکست نشان داده است که به ترتیب ACP، CRM2، CRMو ACP^2 بیشترین تاثیر معنادار را بر مقاومت آسفالت در خستگی و ترک خوردگی داشته‌اند.

بررسی روند مدول برجهندگی نشان داده است که همه متغیرها تاثیر معنادار داشته‌اند و ترتیب اثرگذاری آن‌ها به ترتیب CRM، ACP، ACP^2، CRM^2 و CRM.ACP بوده است. تحلیل نتایج عمق شیارشدگی از آزمایش چرخ ویل تراک نشان داده است که به ترتیب CRM، ACP، ACP^2 و CRM^2 با داشتن بیشترین مقدار F و Prob کمتر از ۰/۰۵ دارای بیشترین تاثیر معناداری در سطح اطمینان ۹۵٪ می‌باشند. در نهایت، ارزیابی کرنش‌های تجمعی در آزمایش خزش نشان داده است که تنها متغیرهای CRM و ACP^2 دارای تاثیر معنادار در سطح اطمینان ۹۵٪ می‌باشند. در حالی که می‌توان متغیرهای با مقدار P بزرگتر از ۰/۰۵ که تاثیرگذاری معنادار بر عوامل پاسخ ندارند را برای بهبود کیفیت و دقت نتایج و بهینه سازی از مدل نهایی حذف کرد.

در جدول ۳ خلاصه عملکرد مدل‌های توسعه یافته بر حسب ضرایب رگرسیون R^2 و پیش بینی R^2 نشان می دهد که سازگاری مناسبی بین مقادیر پیش بینی و واقعی وجود دارد. به نحوی که مقادیر پارامتر R^2 برای مدل‌های پیش بینی حساسیت رطوبتی، انرژی شکست، مدول برجهندگی، عمق شیارشدگی و کرنش‌های تجمعی به ترتیب برابر ۰/۹۷۲، ۰/۹۹۸، ۰/۹۸٦، ۰/۹۷٤ و ۰/۹٤۳ است. همچنین مقدار پارامتر AP به عنوان تابع دقت خصوصیات مکانیکی نسبت به تغییر متغیرهای CRM و ACP تعریف شده که نسبت بیشتر از ٤ برای آن قابل پذیرش است. مقدار پارامتر AP برای مدل‌های توسعه یافته حساسیت رطوبتی، انرژی شکست، مدول برجهندگی، عمق شیارشدگی و کرنش‌های تجمعی به ترتیب برابر ۵۰/٦۲، ۱۸۳/۳، ۵۷/٦، ٤٤/٤ و ۳۰/۲ است که نشان دهنده بالا بودن مقدار دقت مدل‌ها است. با توجه به مقدارهای واقعی و پیش‌بینی شده، تحلیل آماری RSM از صحت بالایی برخوردار بوده و میزان تأثیر پارامترهای گوناگون به خوبی بیان و تحلیل شد. همچنین متغیرهای خطی CRM و ACP در همه مدل‌ها جز پارامترهای تاثیرگذار بر پاسخ می‌باشند که نشان دهنده تاثیرپذیری چشمگیر رفتار مکانیکی و عملکردی آسفالت از قیر لاستیکی و فیلر پودر کربنی بوده است.

جدول ۱. معادلات پیش بینی مشخصات آسفالت بر اساس روش RSM

Source	TSR	FE	Mr.	Rut depth	Accumulated strain
Constant	84.0532	3.98603	-1429.764	2.50419	18783.9252
A-CRM	-1.38993	7.86686	505.6727	-0.1569	433.76811-
B-ACP	0.57329	-0.12862	63.48599	-0.012016	-148.96479
AB	-0.0020416	-0.0001487	1.15194	0.000043235	-2.59331
A^2	0.024163	-0.31934	-14.1008	0.00361687	-2.42694
B^2	-0.0062715	-0.0011070	-0.633	0.000096274	1.76711

جدول ۲. خلاصه نتایج تحلیل واریانس برای مدلسازی مشخصات مکانیکی آسفالت حاوی ترکیبات بازیافتی

Source	TSR		FE		Mr		Rut depth		Accumulated strain	
	F-Value	Prob > F	F-Value	Prob > F	F-Value	Prob > F	F-Value	Prob > F	F-Value	Prob > F
Model	255.91	0.0004	3831.68	< 0.0001	430.01	0.0002	288.18	0.0003	124.18	0.0011
A-CRM	762	0.0001	254	0.0005	1722	< 0.0001	1357	< 0.0001	578	0.0002
B-ACP	219	0.0007	15197	< 0.0001	261	0.0005	40.19	0.0079	0.66	0.4746
AB	1.59	0.2963	0.062	0.8199	18	0.0226	0.23	0.6649	4.1	0.1331
A^2	2.85	0.1898	3639	< 0.0001	36	0.0092	20	0.0201	0.047	0.8423
B^2	293	0.0004	66	0.0038	111	0.0018	22	0.0181	38	0.0086

جدول ۳. خلاصه عملکرد مدل‌های پیش بینی بر اساس مشخصه‌های آماری

Source	TSR	FE	Mr.	Rut depth	Accumulated strain
Std. Dev.	0.32	0.12	53.08	0.018	253.36
Mean	80.26	39.25	4476.58	0.89	9353.2
Adj R-Squared	0.9938	0.9996	0.9963	0.9945	0.9872
Pred R-Squared	0.9722	0.9985	0.9862	0.9748	0.9434
Adeq Precision	50.62	183.354	57.668	44.391	30.227

۳-۳-نتایج بهینه سازی

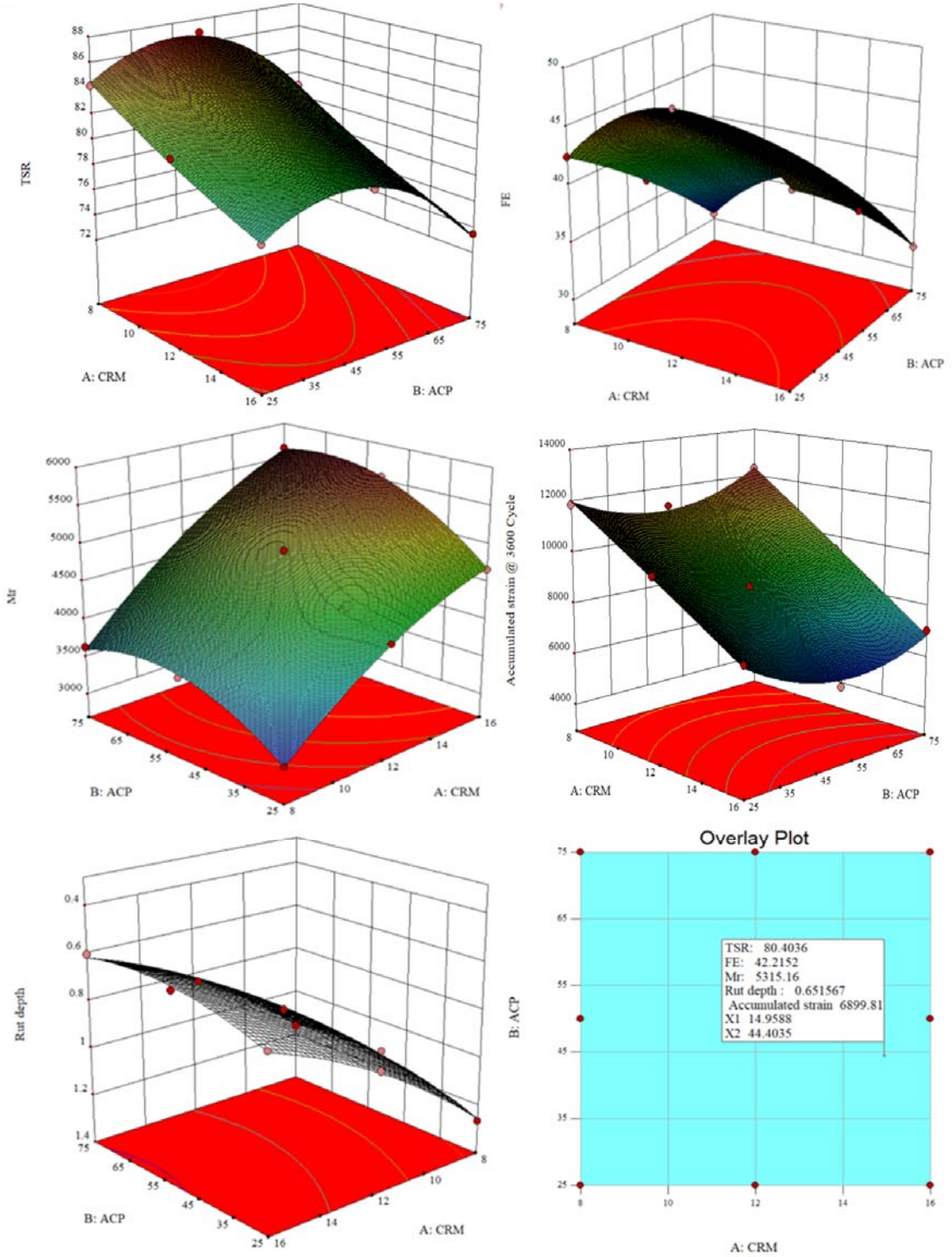
نتایج آزمایشگاهی نشان داد که با وجود مزایای قابل توجه قیر لاستیکی در بهبود مقاومت شیارشدگی و خستگی و پودر کربن در افزایش مقاومت رطوبتی، ولی تاثیر منفی بر برخی از ویژگی‌های آسفالت لزوم بهینه‌سازی درصد مصرف هر افزودنی را مشخص کرد. بنابراین، بهینه سازی متغیرهای آسفالتی به دلیل تاثیر مستقیم بر کیفی روسازی و شرایط اقتصادی از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. در فرآیند بهینه سازی می‌توان هر پاسخ را به طور جداگانه بهینه کرد. اما بهینه سازی تک متغیره ممکن است اثر منفی بر پاسخ یا پاسخ‌های دیگر داشته باشد. ابزار RSM یک تکنیک مناسب برای دستیابی به راه حل بهینه و تعیین ترکیب مطلوب از متغیرهای مستقل بر اساس رفتار متغیرهای پاسخ است. در این پژوهش هدف بیشینه کردن تولید آسفالت با کیفیت در برابر شیارشدگی، رطوبت و خستگی و بطور همزمان بهینه سازی مقدار پودر لاستیک و پودر کربن است. در شکل ٤ تاثیر پارامترهای CRM و ACP بر مشخصات مکانیکی و عملکردی مخلوط آسفالتی مشاهده شده است. بررسی شاخص TSR نشان می دهد که با افزایش مقدار ACP مقدار TSR به صورت غیرخطی ابتدا بهبود یافته و سپس کاهش یافته است. در حالی که با افزایش مقدار CRM مقاومت آسفالت در برابر رطوبت به مقدار کمینه خود رسیده و این تاثیرگذاری به صورت خطی و بیشتر از تاثیر ACP بوده است. همچنین با توجه به تحلیل ANOVA اثر متقابل آن‌ها بر حساسیت رطوبتی ناچیز بوده و برابر ۰/۰۰۲۰٤- می باشد. بررسی پارامتر FE نشان داده است که با افزایش مقدار ACP مقاومت در برابر خستگی به صورت تدریجی کاهش یافته و در ۷۵٪ به مقدار کمینه خود رسیده است. در حالی که تاثیر CRM به صورت غیرخطی و مثبت بوده و نسبت به تاثیر ACP به مراتب کمتر است. همچنین با توجه به تحلیل ANOVA اثر متقابل آن‌ها بر انرژی شکست ناچیز بوده و برابر ۰/۰۰۰۱٤- می‌باشد. علامت منفی در اثرات متقابل بر شاخص‌های TSR و FE نشان‌دهنده تاثیر متفاوت و رابطه معکوس افزودنی‌ها بر مقاومت آسفالت است که لزوم بهینه سازی مقدار افزودنی را کاملا آشکار می‌کند. بررسی نمودار مدول برجهندگی نشان داده است که با افزایش مقدار CRM و ACP این شاخص به مقدار بیشینه خود می‌رسد که اثر افزایش

ACP بر افزایش مدول برجهندگی به صورت غیر خطی و کمتر از تاثیر CRM بوده است. همچنین، مطابق با تحلیل ANOVA اثر متقابل آن‌ها بر مدول برجهندگی محسوس بوده و برابر ۱/۱۵ است. به عبارت دیگر، تاثیر هر متغیر تابعی از مقدار متغیر دیگر است و مقدار Prob تاثیرات تعاملی دو متغیر در تحلیل ANOVA معنادار بوده و کوچکتر از ۰/۰۵ است. نمودار نتایج کرنش خزشی نشان داده است که با افزایش مقدار CRM عمق شیارشدگی به شکل قابل توجهی به مقدار کمینه خود می‌رسد و این تاثیرگذاری کاملاً خطی بوده است. در حالی که اثر افزایش ACP بر کاهش کرنش‌های خزشی به صورت غیرخطی و کمتر از تاثیر CRM بوده است. بطوری که ابتدا تاثیر مثبت بر کاهش کرنش‌های خزشی داشته و سپس با افزایش بیشتر ACP، مقدار کرنش افزایش یافته و مقاومت در برابر شیارشدگی کمتر می‌شود. همچنین، مطابق با تحلیل ANOVA اثر متقابل آن بر عمق شیارشدگی محسوس بوده و برابر ۲/۵۹ – می‌باشد. در نهایت نمودار هم پوشانی داده‌ها در آزمایش چرخ ویل تراک نشان داده است تاثیر متغیرهای CRM و ACP بر افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی به صورت غیرخطی بوده است و تاثیر قیر لاستیکی به مراتب بیشتر از فیلر پودر کربن است. در حالی که با توجه به تحلیل ANOVA اثر متقابل آن‌ها بر عمق شیارشدگی ناچیز بوده و برابر ۰/۰۰۰۰٤۳ می‌باشد.

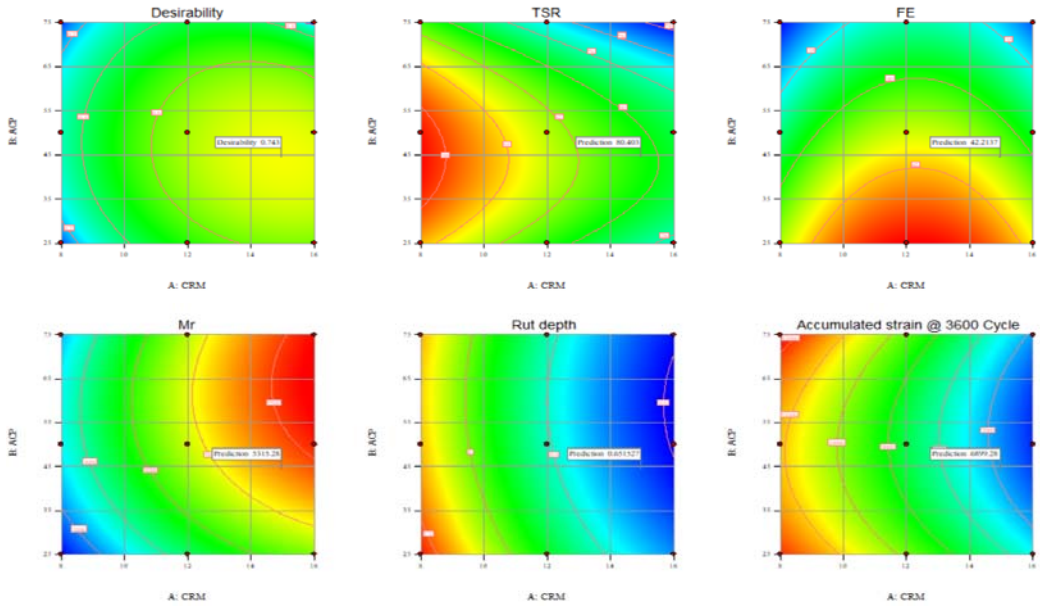
در این مطالعه متغیرهای CRM و ACP به عنوان عامل مستقل و پاسخ‌های حساسیت رطوبتی، مدول برجهندگی، انرژی شکست، عمق شیارشدگی و کرنش خزشی به عنوان متغیرهای وابسته در نظر گرفته شده‌اند. محدوده تغییرات افزودنی‌ها و نتایج بهینه سازی فرآیند اصلاح خواص آسفالت در شکل ٤ نشان داده شده است. بنابر نتایج حاصل شده، شرایط بهینه برای بیشینه کردن مشخصات مکانیکی و عملکردی آسفالت بر اساس شرایط اجرایی و فنی برای ACP برابر ٤٤/٤ درصد و CRM برابر ١٤/٩ درصد گزارش شده است. در این شرایط علاوه بر بهینه‌سازی مقادیر افزودنی‌ها، تعادل مطلوبی بین خصوصیات عملکردی آسفالت از جمله شیارشدگی، خستگی و حساسیت رطوبتی برقرار شده است.

پاسخ سطح مشخصات مکانیکی آسفالت اصلاح شده تحت تاثیر مقادیر بهینه پودر لاستیک و پودر کربن در شکل ٥ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد در صورت استفاده از ترکیب ١٤/٩٪ پودر لاستیک و ٤٤/٤٪ پودر کربن در مخلوط آسفالتی مشخصات حساسیت رطوبتی، انرژی شکست، مدول برجهندگی، عمق شیارشدگی و کرنش تجمعی ناشی از خزش به ترتیب برابر ٨٠/٤ درصد، ٤٢/٢ کیلو نیوتن. میلی متر، ٥٣١٥ مگا پاسکال ، ٠/٦٥١ میلی متر و ٨٩٩٩ میکرو استرین می‌باشند. در این صورت مقاومت رطوبتی، انرژی شکست و مدول برجهندگی نسبت به مقادیر میانگین به ترتیب ٠/١٧٪ ، ٧/٥٪ و ١٩/٨٪ افزایش یافته است. همچنین عمق شیارشدگی و کرنش خزشی به ترتیب ٢٦/٧ ٪ و ٢٦/٢ ٪ کاهش یافته است. همچنین، با مقایسه نتایج بهینه و حداقل می‌توان دریافت که استفاده از ترکیب بهینه‌سازی شده مقاومت رطوبتی، انرژی شکست و مدول برجهندگی آسفالت را به ترتیب ٩/٤ ٪، ٣٨/٥٪ و ٦٩/٣٪ افزایش داده است. همچنین، این ترکیب تاثیر قابل توجهی بر کاهش مقاومت شیارشدگی داشته است و عمق شیارشدگی و کرنش پلاستیک را به ترتیب ٤٨٪ و ٤٤٪ کاهش داده است.

واضح است که با بیشنه کردن انرژی شکست، مدول برجهندگی و مقاومت رطوبتی و کمینه‌کردن عمق شیارشدگی و با حفظ شرایط عملیاتی و کیفیت آنها نتایج بهینه سازی حاصل منجر به افزایش کیفیت و طول عمر روسازی و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری خواهد شد.



شکل ٤. بررسی تاثیر همزمان متغیرهای مستقل بر پاسخ‌های عملکردی آسفالت و تعیین مقدار بهینه افزودنی‌ها



شکل ۵. پاسخ سطح مشخصات مکانیکی آسفالت اصلاح شده تحت تاثیر مقادیر بهینه پودر لاستیک و پودر کربن

۵-نتیجه‌گیری

هدف این پژوهش بهینه سازی خصوصیات مکانیکی آسفالت به‌منظور افزایش طول عمر و کیفیت روسازی و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری بر مبنای نتایج آزمایشگاهی است. متغیرهای ورودی شامل درصد پودر کربن و پودر لاستیک و متغیرهای خروجی شامل مدول برجهندگی، مقاومت رطوبتی، انرژی شکست، عمق شیارشدگی و کرنش‌های تجمعی آسفالت است. بر همین اساس، مدل ریاضی فرآیند برای هر مشخصه مکانیکی آسفالت با استفاده از روش پاسخ سطح تعیین شد و مقدار بهینه پودر لاستیک و پودر کربن تعیین شد.

نتایج حاصل از این مطالعه به‌صورت زیر می‌باشد:

-ویسکوزیته بالای قیر لاستیکی و سختی ماستیک قیر لاستیکی و فیلر ACP موجب شد تا مخلوط حاوی ۵۰ درصد فیلر ACP و قیر اصلاح شده با CRM16 دارای کمترین کرنش تجمعی و بهترین مقاومت شیارشدگی باشد.

-نتایج آزمایش لاتمن اصلاح شده نشان داد که با وجود تاثیر منفی قیر لاستیک بر مقاومت رطوبتی، ولی جایگزین کردن ACP به عنوان فیلر به دلیل بافت خشن و چند وجهی، چسبندگی و پیوستگی قیر و سنگدانه‌ها را افزایش داده و موجب بهبود عملکرد آسفالت در برابر رطوبت شد.

-انرژی شکست آزمایش کشش غیر مستقیم نشان داد استفاده از ACP به عنوان فیلر موجب کاهش انرژی شکست می‌شود، ولی استفاده از قیر لاستیکی این ضعف را بر طرف کرد و مقاومت خستگی آسفالت را بهبود بخشید.

-مقادیر ضرایب همبستگی و تابع دقت خصوصیات مکانیکی آسفالت نسبت به تغییر متغیرهای مستقل نشان داد که تحلیل آماری RSM از صحت بالایی برخوردار بوده و متغیرهای خطی CRM و ACP در همه مدل‌ها تاثیر گذاری قابل توجهی بر رفتار مکانیکی و عملکردی آسفالت داشته است.

-بنابر بر نتایج تحلیل روش سریع پاسخ، شرایط بهینه برای بیشینه‌کردن مشخصات مکانیکی و عملکردی آسفالت بر اساس ویژگی‌های فنی برای ACP برابر ٤٤/٤ ٪ و CRM برابر ١٤/٩ ٪ گزارش شد.

-مقایسه شرایط بهینه‌سازی شده و حداقل آزمایشگاهی نشان داد که استفاده از ترکیب بهینه پودر لاستیک و پودر کربن مقاومت رطوبتی، انرژی شکست و مدول برجهندگی آسفالت را به ترتیب ٩/٤ ٪، ٣٨/٥٪ و ٦٩/٣٪ افزایش و عمق شیارشدگی و کرنش پلاستیک را به ترتیب ٤٨٪ و ٤٤٪ کاهش داده است.

-با بیشنه‌کردن انرژی شکست، مدول برجهندگی و مقاومت رطوبتی و کمینه کردن شیارشدگی و با حفظ شرایط اجرایی و کیفی، نتایج بهینه سازی حاصل منجر به افزایش کیفیت و طول عمر روسازی و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری خواهد شد.

۶-سپاسگزاری

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از آزمایشگاه اداره کل راهداری و حمل‌ونقل جاده‌ای استان اصفهان و شرکت نفت جی اصفهان که در تهیه مصالح مصرفی آزمایشگاهی و انجام آزمایش‌های قیر و آسفالت همکاری لازم را داشتند، کمال قدردانی و تشکر را نمایند.

۷-مراجع

-Ameli, A., Babagoli, R., Asadi, S., & Norouzi, N. (2021). Investigation of the performance properties of asphalt binders and mixtures modified by Crumb Rubber and Gilsonite. *Construction and Building Materials*, *279*, 122424.

-Ameri, M., Mirzaiyan, D., & Amini, A. (2018). Rutting resistance and fatigue behavior of gilsonite-modified asphalt binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *30*(11), 04018292.

-Amini, A., 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., & 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., 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.

-Ansari, A. H., Jakarni, F. M., Muniandy, R., Hassim, S., & Elahi, Z. (2021). Natural rubber as a renewable and sustainable bio-modifier for pavement applications: A review. *Journal of Cleaner Production*, *289*, 125727.

-Bezerra, M. A., Santelli, R. E., Oliveira, E. P., Villar, L. S., & Escaleira, L. A. (2008). Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta*, *76*(5), 965-977.

-Gui, W., Liang, L., Wang, L., Gao, X., & Zhang, F. (2021). Performance evaluation of warm-mixed crumb rubber modified asphalt based on rheological characteristics. *Construction and Building Materials*, *285*, 122881.

-Khalid, H. A., & Artamendi, I. (2003). Performance based characterisation of crumb rubber asphalt modified using the wet process. *Road Materials and Pavement Design*, *4*(4), 385-399.

-Khuri, A. I., & Mukhopadhyay, S. (2010). Response surface methodology. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, *2*(2), 128-149.

-Mansourkhaki, A., & Aghasi, A. (2019). Performance of rubberized asphalt containing liquid nanomaterial anti-strip agent. *Construction and Building Materials*, *214*, 468-474.

-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*.

-Mohammad, L. N., Cooper Jr, S. B., & Elseifi, M. A. (2011). Characterization of HMA mixtures containing high reclaimed asphalt pavement content with crumb rubber additives. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *23*(11), 1560-1568.

-Presti, D. L. (2013). Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixtures: A literature review. *Construction and Building Materials*, *49*, 863-881.

-Qian, C., Fan, W., Yang, G., Han, L., Xing, B., & Lv, X. (2020). Influence of crumb rubber particle size and SBS structure on properties of CR/SBS composite modified asphalt. *Construction and Building Materials*, *235*, 117517.

-Wang, H., Dang, Z., Li, L., & You, Z. (2013). Analysis on fatigue crack growth laws for crumb rubber modified (CRM) asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, *47*, 1342-1349.

-Xiao, F., Amirkhanian, S., & Juang, C. H. (2007). Rutting resistance of rubberized asphalt concrete pavements containing reclaimed asphalt pavement mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *19*(6), 475-483.

-Zakerzadeh, M., Shahbodagh, B., Ng, J., & Khalili, N. (2024). The use of waste tyre rubber in Stone Mastic Asphalt mixtures: A critical review. *Construction and Building Materials*, *418*, 135420.

-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.

doi:10.1016/j.jclepro.2022.130682

-Ziari, H., Amini, A., & Goli, A. (2020). Investigation of blending conditions effect on GTR dissolution and rheological properties of rubberized binders. *Construction and Building Materials*, *242*, 117828.

-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., Korayem, A. H., Hajiloo, M., Nakhaei, M., Razmjou, A., & Divandari, H. (2017). Evaluating the effect of amorphous carbon powder on moisture susceptibility and mechanical resistance of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, *152*, 182-191.

-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.

Multi-Objective Optimization of Performance Characteristics of Asphalt Containing Recycled Additives Using Response Surface Method

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

E-mail: amiramini@iau.ac.ir

Received: January 2025- Accepted: April 2025

ABSTRACT

The use of rubber powder and carbon powder additives in pavement, despite its technical and environmental advantages, faces limitations that require optimization of their usage percentage. The aim of this research is to optimize the mechanical properties of asphalt in order to increase the lifespan and quality of the pavement and reduce maintenance costs based on laboratory results. The input variables include the percentage of carbon powder and rubber powder, and the output variables include the modulus of elasticity, moisture resistance, fracture energy, rutting depth, and asphalt cumulative strains. The mathematical process model for each asphalt mechanical characteristic was determined using response surface method (RSM) and its accuracy was checked by variance analysis. The results showed that the statistical analysis of RSM is highly accurate and the linear variables of CRM and ACP have a significant effect on the mechanical and functional behavior of asphalt. The optimal conditions for maximizing the mechanical characteristics of asphalt were proposed as ACP equal to 44.4% and CRM equal to 14.9%. The comparison of the optimized and minimum laboratory conditions showed that the use of the optimal combination of rubber powder and carbon powder, respectively 9%, 53% and 69% improvement in moisture resistance, fracture energy and modulus of elasticity, as well as 48% and 44% reduction in the depth of rutting and creates plastic strain. In general, the results of this research show that the optimization of fracture energy, modulus of elasticity and moisture resistance, along with the reduction of rutting, can lead to an increase in the quality and lifespan of the pavement and a reduction in maintenance costs.

Keywords: Sustainable Development, Modified Asphalt, Environment, Performance Characteristics, Multi-Objective Optimization