

مدل‌سازی و طراحی بهینه آسفالت بازیافتی حاوی الیاف در دمای پایین با استفاده از روش پاسخ سطح

مقاله علمی - پژوهشی

امیر امینی*، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران
رضا اکبری، دانش‌آموخته دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فنی تهران، تهران، ایران
احمد صفری، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: amiramini@iaau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۲ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۲

صفحه ۹۵-۱۰۸

چکیده

مخلوط‌های حاوی درصد‌های بالای تراشه آسفالت معمولاً با چالش‌هایی در تولید و تراکم مواجه هستند و ممکن است منجر به ترک‌های ریز و خرابی‌های زودرس شوند. به همین دلیل، اصلاح ویژگی‌های فنی و عملکردی این مخلوط‌ها ضروری است. استفاده از الیاف، به‌ویژه الیاف شیشه، می‌تواند به بهبود مقاومت خستگی و ترک‌خوردگی کمک کند. هدف این تحقیق، ارائه مدل پیش‌بینی و بهینه‌سازی برای ویژگی‌های شکست آسفالت بازیافتی با درصد بالای تراشه آسفالت و الیاف در دماهای پایین با استفاده از روش پاسخ سطح می‌باشد. به این منظور، مقادیر ۰.۰۶٪، ۰.۱۲٪ و ۰.۱۸٪ الیاف شیشه به مخلوط‌های آسفالتی با درصد‌های مختلف تراشه آسفالت اضافه شد و انرژی شکست، انرژی کل شکست و J -انتگرال در دمای ۱۵- درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. نتایج این تحقیق نشان داد که الیاف شیشه تأثیر مثبتی بر عملکرد شکست مخلوط‌های بازیافتی دارند و می‌توانند به‌عنوان مکمل و اصلاح‌کننده در مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالت مورد استفاده قرار گیرند. علاوه بر این، نتایج مدل‌سازی نشان داد که مدل‌های توسعه‌یافته از نظر ضریب همبستگی و تابع دقت، قابلیت مناسبی در پیش‌بینی ویژگی‌های شکست آسفالت بازیافتی حاوی الیاف دارند. در نهایت، برای به حداکثر رساندن مقاومت شکست آسفالت در برابر ترک‌خوردگی در دماهای پایین، مقادیر بهینه برای الیاف ۰/۱۴ درصد و برای تراشه آسفالت مقدار ۶۷/۳ درصد پیشنهاد شد. بر اساس نتایج کلی تحقیق، اگر از ترکیب بهینه استفاده شود، انرژی کل شکست، انرژی کل و J به ترتیب ۴۰٪، ۳۹٪ و ۵۹٪ نسبت به مقادیر میانگین آزمایشگاهی افزایش می‌یابند، که این تأثیرگذاری منجر به بهبود کیفیت روسازی و صرفه‌جویی اقتصادی خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: تراشه آسفالت بازیافتی، الیاف شیشه، مقاومت ترک‌خوردگی، بهینه‌سازی، روش پاسخ سطح

۱-مقدمه

ترافیکی، تنش‌های حرارتی و گرادیان دما قرار دارد. تئوری‌های مکانیک شکست به‌عنوان تکنیک‌های قابل اعتماد برای اندازه‌گیری رفتار ترک‌خوردگی مواد آسفالتی شناخته می‌شوند. (Pirmohammad, Momeni, & Khanghahi, 2024; Saha & Biligiri, 2016; Zeng, Underwood, & Kim, 2024).

در سال‌های اخیر، افزایش شدت بار ترافیکی و متعاقباً افزایش سطح تنش و کرنش در لایه‌های روسازی، منجر به خرابی زودرس روسازی‌ها شده است. شیارشدگی، خرابی رطوبت، خستگی و ترک‌خوردگی از شایع‌ترین خرابی‌ها در روسازی‌های آسفالتی هستند. مقاومت در برابر ترک‌خوردگی آسفالت تحت تأثیر بار

خستگی شده و روسازی را در برابر خرابی‌های اساسی آسیب‌پذیرتر می‌کند.

با این حال، نگرانی‌های اصلی استفاده از میزان بالای تراشه آسفالت در روسازی شامل سختی بیش‌ازحد مخلوط و افزایش خطر ترک‌خوردگی در دوره خدمت راه‌سازی است. بنابراین استفاده از مقدار بالای مواد تراشه آسفالت باعث افزایش شکنندگی آسفالت و متعاقباً تضعیف رفتار ترک‌خوردگی روسازی می‌شود. تحقیقات بیشتر برای توسعه روش‌هایی برای استفاده حداکثر ۴۰٪ از تراشه آسفالت در طراحی مخلوط آسفالتی صورت گرفته است. اما فناوری‌های پیشرفته فعلی می‌توانند با کاهش وابستگی به افزایش قیمت قیر، هزینه‌های مربوط به مواد اولیه را ثابت کرده و استفاده از تراشه آسفالت در راه‌سازی را بهینه کنند (R. Bonaquist, 2005; R. F. Bonaquist, 2011).

در این راستا، کمبود منابع طبیعی مانند سنگدانه‌ها و قیمت بالای قیر، پژوهش‌ها را به دنبال راه‌حلی برای افزایش درصد تراشه آسفالت در مخلوط‌های آسفالتی تازه تولید کرده است. بنابراین، افزودنی‌ها و جوان‌کننده‌های مختلفی برای استفاده در ترکیب با مواد تراشه آسفالت به صنعت معرفی شدند. در سال ۲۰۲۰، هانگ و همکاران (Hong et al., 2020) با بررسی تأثیر جوان ساز ترکیبی حاوی روغن آروماتیک و SBS بر خواص قیرهای تراشه آسفالت نشان دادند که ترکیب پلیمر و جوان ساز بهبود قابل توجهی در خواص فیزیکی، رئولوژیکی و عملکرد دمایی بالا و پایین قیرهای بازیافتی دارد. همچنین، در سال ۲۰۲۱، دریایی و همکاران (Daryae, Habibpour, Gulzar, & Underwood, 2021) نشان دادند که استفاده هم‌افزایی از پلیمر ضایعاتی و جوان ساز بهبود قابل توجهی در خواص دمایی بالا، متوسط و پایین قیرهای بازیافتی دارد. در سال ۲۰۲۱ فخری و رحیم زاده (Fakhri & Mottahed, 2021) نشان دادند که استفاده از تراشه آسفالت و نانو رس تأثیرات مفیدی بر مخلوط‌های WMA از نظر مقاومت در برابر شکست و رطوبت دارد. در مطالعه دیگری در سال ۲۰۲۱، باقرصاد و همکاران (Baqersad & Ali, 2021) ادعا کردند که استفاده از قیرهای اصلاح‌شده با نانو ذرات به‌عنوان مکمل در کنار مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی می‌تواند موجب افزایش درصد تراشه آسفالت در تولید مخلوط‌های آسفالتی شود. دریایی و همکاران (Daryae et al., 2021) سال ۲۰۲۱ با ارزیابی اثر ترکیبی جوان ساز و پلیمر ضایعاتی بر خواص مکانیکی قیرهای تراشه آسفالت دریافتند که استفاده هم‌افزایی از پلیمر ضایعاتی همراه با

شکست خمشی نیمه دایره‌ای (SCB) به دلیل راحتی در آماده‌سازی نمونه و نتایج قابل اعتماد آن به‌عنوان یک روش محبوب برای ارزیابی عملکرد شکست مخلوط‌های آسفالتی شناخته شده است. روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری مقاومت آسفالت در برابر ترک‌خوردگی در دمای پایین وجود دارد که استفاده از مکانیک شکست به‌عنوان یکی از مطمئن‌ترین تکنیک‌ها شناخته می‌شود. چقرمگی شکست، انرژی شکست و J-انتگرال از رایج‌ترین پارامترهای شکستی هستند که برای توصیف رفتار ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شوند.

از آنجایی که چقرمگی شکست به‌عنوان یک پارامتر مقاومت در برابر شکست برای مواد الاستیک تعریف می‌شود، می‌توان از آن فقط در دماهای منفی برای مخلوط‌های آسفالتی استفاده کرد (Moniri, Ziari, Amini, & Hajiloo, 2022; Hassan Ziari, 2021; Amini, Moniri, & Habibpour, 2021).

از طرفی به دلیل آلودگی هوا، نادیده گرفتن مسائل زیست‌محیطی و استفاده نامناسب از منابع طبیعی، توسعه پایدار به‌طور جدی مورد توجه قرار گرفته است (Amini & Imaninasab, 2018; Hassan Ziari, Divandari, Hajiloo, & Amini, 2019). هدف از توسعه پایدار در صنعت راه‌سازی، بهبود شرایط اقتصادی، کاهش تولید زباله و مصرف مواد خام، و استفاده از مواد بازیافت شده به‌عنوان جایگزین منابع طبیعی است (Amini & Akrami, 2023). یکی از راهکارهای تولید آسفالت پایدار و صرفه‌جویی اقتصادی، استفاده از میزان بالای مواد بازیافت شده است. تراشه‌های آسفالت بازیافتی (RAP) از سنگدانه‌ها و قیر مخلوط‌های آسفالت گرم تشکیل شده و بازیابی و استفاده مجدد شده‌اند. تراشه آسفالت حاوی سنگدانه‌های پوشش داده شده با قیر و ارزش فنی و اقتصادی قابل توجه بوده که می‌تواند در ساخت راه‌های جدید بسیار مفید باشند. (Guo et al., 2020; Yang et al., 2021; Yousefi, Behnood, Nowruzi, & Haghshenas, 2021; Hasan Ziari, Goli, & Amini, 2016). در کنار محاسن ویژه بازیافت آسفالت، قیر پیر شده موجود در مصالح تراشه آسفالت به‌عنوان یک عامل منفی تأثیرگذار بر عملکرد بلندمدت روسازی‌های بازیافتی مطرح شده است. قیر پیر شده سختی آسفالت حاوی تراشه آسفالت را در مقایسه با مخلوط‌های معمولی بیشتر کرده و باعث کاهش مقاومت آسفالت در برابر ترک‌خوردگی می‌شود (Brown et al., 2009; Newcomb, Brown, & Epps, 2007; Williams, Willis, & Shacat, 2020). افزایش محتوای تراشه آسفالت منجر به کاهش عملکرد آسفالت در دمای پایین و مقاومت در برابر

بکر در این مخلوطها بسیار کم است. بنابراین، از آنجایی که الیاف مستقیماً به مخلوطها اضافه می‌شوند، می‌توانند جایگزینی برای جبران تأثیر منفی مواد تراشه آسفالت در مخلوطها باشند. بر اساس نتایج قبلی، الیاف باعث بهبود خستگی و مقاومت در برابر ترک‌خوردگی مخلوطهای آسفالتی می‌شوند. الیاف شیشه پتانسیل خوبی برای بهبود عملکرد شیارشدگی و ترک‌خوردگی مخلوطهای آسفالتی نشان داده‌اند بهبود قابلیت ترمیم و شیار شدگی، مقاومت در برابر رطوبت و خستگی بالاتر نیز به‌عنوان مزایای الیاف شیشه در مخلوطهای آسفالتی گزارش شده است (Morea & Zerbino, 2018). بنابراین مطالعه ترکیب مواد تراشه آسفالت و الیاف ضروری است.

باین‌حال، انجام آزمایش‌ها زمان‌بر و هزینه‌بر هستند و توسعه مدل‌های پیش‌بینی می‌تواند برای صرفه‌جویی در زمان و انرژی مفید باشد. از طرفی تعیین مقدار بهینه الیاف در آسفالت بازیافتی حاوی درصد تراشه آسفالت بالا می‌تواند علاوه بر صرفه‌جویی در هزینه نهایی پروژه، کارایی و عملکرد الیاف را ارتقا داده و در نتیجه مقاومت در برابر ترک‌خوردگی را به حداکثر برساند. روش پاسخ سطح (RSM) یک روش آماری و تجربی است که برای تحلیل و بهینه‌سازی فرآیندهای صنعتی و علمی استفاده می‌شود. در این روش، تأثیر متغیرهای مختلف بر یک پاسخ مشخص از طریق طراحی آزمایش‌ها و مدل‌سازی ریاضی انجام می‌شود. هدف این تحقیق ارائه مدل پیش‌بینی و بهینه‌سازی خصوصیات شکست آسفالت بازیافتی حاوی درصد تراشه آسفالت بالا و الیاف در دمای پایین با استفاده از روش پاسخ سطح است.

به این منظور، ۰٫۰۶٪، ۰٫۱۲٪ و ۰٫۱۸٪ الیاف شیشه به مخلوطهای آسفالتی حاوی ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ تراشه آسفالت اضافه خواهد شد و انرژی شکست، انرژی کل شکست و انتگرال \int دمای ۱۵- درجه سانتی‌گراد تعیین می‌شود. سپس بر اساس مشخصه‌های شکست آسفالت و با استفاده از روش پاسخ سطح مقدار بهینه تراشه آسفالت و الیاف شیشه پیش‌بینی می‌شود. این تحقیق به بررسی تأثیر درصدهای بالای تراشه آسفالت بازیافتی بر عملکرد آسفالت در برابر ترک‌خوردگی می‌پردازد. با استفاده از تئوری‌های مکانیک شکست، آزمایش شکست خمشی نیمه دایره‌ای به‌عنوان تکنیک اصلی برای ارزیابی رفتار ترک‌خوردگی مخلوطهای آسفالتی انتخاب شده است. این تحقیق بر ارزیابی تأثیر بار ترافیکی، تنش‌های حرارتی و گرادین‌های دما بر مقاومت آسفالت تمرکز دارد و از پارامترهای چقرمگی شکست،

جوان ساز به‌طور قابل‌توجهی خواص دمای بالا، متوسط و پایین قیرهای تراشه آسفالت را بهبود می‌بخشد. الیفا و همکاران (Moniri, Ziari, Aliha, & Saghafi, 2021) گزارش کردند که عوامل جوان ساز می‌توانند مقاومت آسفالت بازیافتی را در برابر خرابی‌های ناشی از خستگی و ترک‌خوردگی در دمای متوسط بهبود بخشند. سامارا و همکاران (Samara et al., 2022) سال ۲۰۲۲ با بررسی تأثیر نوع و دوز عوامل جوان ساز نشان دادند که استفاده از جوانسازها منجر به کاهش درجه عملکرد بالا و پایین قیرهای تراشه آسفالت می‌شود. بر اساس یافته‌های بیان‌شده در این تحقیق، جوان‌کننده‌های ارگانیک تأثیر بیشتری بر درجه عملکرد قیر داشتند. باقرصاد و همکاران (Baquersad & Ali, 2021) ادعا کردند که استفاده از قیرهای اصلاح‌شده با نانو ذرات به‌عنوان مکمل در کنار مخلوطهای آسفالتی بازیافتی می‌تواند موجب افزایش درصد تراشه آسفالت در تولید مخلوطهای آسفالتی شود. سال ۲۰۲۲ ردی و همکاران (Reddy, Ramesh, & Ramayya, 2022) با ارزیابی تأثیر ساسوبیت بر مشخصات فنی آسفالت‌های بازیافتی ادعا کردند که ترکیب ۳٪ ساسوبیت و نانو ذرات موجب افزایش معنادار مقاومت آسفالت در برابر ترک‌خوردگی، شیارشدگی و خرابی‌های رطوبتی می‌شود.

برای ایجاد عملکرد مکانیکی مناسب مخلوطهای آسفالتی حاوی تراشه آسفالت، راهکارهای مختلفی از جمله استفاده از قیر نرم‌تر، عوامل جوان ساز، پلیمرها و الیاف‌ها پیشنهاد شده است (Pan, Kuang, Hu, & Zhang, 2018). عوامل نرم‌کننده یا روان‌کننده ویسکوزیته را در قیر تراشه آسفالت کاهش می‌دهند (Roberts, Kandhal, Brown, Lee, & Kennedy, 1991). درحالی‌که عوامل جوان‌کننده به دلیل داشتن مقادیر بالای مالتن، می‌توانند ساختار شیمیایی قیر پیرشده را مجدداً متعادل و بازسازی کنند (Loise et al., 2019). اگرچه استفاده از عوامل جوان ساز منجر به بهبود رفتار خستگی مخلوطهای حاوی تراشه آسفالت می‌شود، اما آثار نامطلوبی بر عملکرد شیارشدگی و مقاومت رطوبتی دارند (Mansourkhaki, Ameri, & Daryae, 2019). قیرهای اصلاح‌شده پلیمری یکی دیگر از گزینه‌های مطرح‌شده برای بهبود هم‌زمان خستگی و شیارشدگی آسفالت‌های بازیافتی است. استفاده از قیرهای پلیمری می‌تواند خصوصیات مکانیکی قیرها را اصلاح کند و عملکرد قیرها در دماهای پایین و بالا بهبود یابد (Pradhan & Sahoo, 2020). با این وجود، قیر پلیمری برای مخلوطهای با تراشه آسفالت بالا مؤثر نخواهد بود، زیرا میزان قیر

(Mallick, & Frank, 2014) و ۶٪ از کل قیر تراشه آسفالت محاسبه شد.

۲-۲- طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی

روش طراحی مخلوط مارشال برای تعیین طراحی مخلوط و خواص حجمی مخلوط‌های حاوی ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد مواد تراشه آسفالت بر اساس AASHTO T245 استفاده شد. برای این منظور، ابتدا مصالح بکر و مواد تراشه آسفالت به ترتیب به مدت ۱۶ و ۲ ساعت در دمای ۱۷۵ درجه سانتی‌گراد اوان نگهداری شدند.

سپس جوان کننده مستقیماً به مواد تراشه آسفالت اضافه شد و مواد تراشه آسفالت جوان شده با سنگدانه های بکر مخلوط شدند. سپس کل مخلوط‌ها به مدت دو ساعت در دمای تراکم قرار گرفتند. برای تهیه نمونه‌های استوانه‌ای با تراکم‌های دلخواه، از متراکم کننده ژیراتوری با قالب به قطر ۱۵۰ میلی‌متر استفاده شد. نمونه‌های استوانه‌ای فشرده به نمونه‌های خمشی نیمه دایره‌ای با ضخامت ۵۷ میلی‌متر برش داده شدند. سپس از ابزار جت آب برای ایجاد بریدگی در وسط نمونه‌ها با عرض ۰،۳ میلی‌متر و طول‌های ۲۵ میلی‌متر، ۳۲ میلی‌متر و ۳۸ میلی‌متر در وسط نمونه‌های خمشی نیمه دایره‌ای استفاده شد.

۲-۳- برنامه آزمایشگاهی

آزمایش شکست خمشی نیمه دایره‌ای

آزمایش شکست خمشی نیمه دایره‌ای با استفاده از دستگاه آزمایش فشار-کشش با ظرفیت بارگذاری ۵۰ کیلو نیوتن انجام شد. سپس یک بار خطی با سرعت ۰،۵ میلی‌متر در دقیقه بر روی نمونه‌های با طول‌های بریدگی مختلف تا زمان وقوع شکست در دمای ۱۵- درجه سانتی‌گراد مطابق با ASTM D8044 اعمال شد. چهار تکرار برای هر عمق بریدگی انجام شد. انرژی قبل از شکست و بار-جابجایی قبل از بار اوج و گسیختگی کل محاسبه می‌شوند، به‌عنوان عوامل شروع و انتشار ترک استفاده می‌شوند. در این مطالعه، پارامترهای فوق برای نمونه‌های با طول برش ۲۵ میلی‌متر محاسبه شد. مقدار بحرانی J-integral پارامتر دیگری برای تعیین مقاومت ترک‌خوردگی است که به‌عنوان تغییر انرژی شکست تا شکست در طول ترک مشخص پیشنهاد شده است (Meng et al., 2023; Qiu et al., 2024).

انرژی شکست و J-انتگرال برای توصیف رفتار ترک‌خوردگی استفاده می‌کند. حجم کار این تحقیق شامل بررسی ویژگی‌های عملکردی مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۰ تا ۱۰۰٪ RAP است. در این راستا، نمونه‌هایی با درصد‌های مختلف RAP و الیاف (۶۰ نمونه) تهیه و آزمایش می‌شوند. آزمایش‌ها مکانیکی مانند آزمایش SCB برای اندازه‌گیری چقرمگی شکست و انرژی‌های مرتبط در دماهای پایین انجام می‌شود و تحلیل‌های آماری برای تعیین تأثیر عوامل مختلف بر عملکرد مخلوط‌ها صورت می‌گیرد. این تحقیق با تمرکز بر بهبود پایداری تولید آسفالت و افزایش استفاده از RAP به نوآوری می‌پردازد. الیاف بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی حاوی تراشه‌های بازیافتی در مناطق سردسیر را امکان‌پذیر می‌سازد. همچنین، توسعه مدل‌های پیش‌بینی برای عملکرد مخلوط‌ها بر اساس درصد تراشه آسفالت، انتخاب‌های بهتری در طراحی فراهم می‌کند و به مسائل زیست‌محیطی پرداخته و استفاده از مواد بازیافتی را ترویج می‌کند.

۲- روش تحقیق و مصالح آزمایشگاهی

۲-۱- قیر و مصالح آزمایشگاهی

در این تحقیق از قیر PG 64-16 تهیه‌شده از شرکت نفت پاسارگاد به‌عنوان قیر بکر استفاده شد. برای تولید مخلوط آسفالتی از سنگدانه‌های آهکی به دست آمده از معادن اسپچران واقع در شمال شرق تهران استفاده شده است. برای تقویت نمونه‌های آسفالت از الیاف شیشه با مقاومت کششی بالا استفاده شد. نقطه ذوب، وزن مخصوص، قطر و طول الیاف مصرفی به ترتیب ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد، ۱/۱۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب، ۰/۱۳ میلی‌متر و ۱۲ میلی‌متر بوده است.

برای تهیه تراشه آسفالت از رویه آسفالت که برای ۷ سال بدون بازسازی استفاده‌شده و دارای قیر ۶۰/۷۰ می‌باشد استفاده‌شده است. همچنین استخراج قیر از مواد تراشه آسفالت در دو مرحله انجام‌شده است. ابتدا قیر موجود در تراشه آسفالت با استفاده با استفاده از حلال تری کلرواتیلن استخراج شد. سپس قیر با استفاده از یک دستگاه تبخیرکننده دوار و بر اساس استاندارد ASTM 5404 از حلال جدا شد. دانه‌بندی سنگدانه‌های استخراج شده از مواد تراشه آسفالت در محدوده مجاز ASTM D2172 برای حداکثر اندازه اسمی سنگدانه ۱۹ میلی‌متر بود. همچنین، از سایکولوژن به‌عنوان عامل جوانساز مواد تراشه آسفالت استفاده شد. غلظت جوان ساز بر اساس رده عملکرد قیر پیر شده با درصد‌های مختلف بازیافت شده از مواد تراشه آسفالت تعیین شد (Zaumanis,)

روش تحلیل پاسخ سطح

به عنوان متغیر پاسخ انتخاب شد. مدل ۱ معادله پاسخ سطح استفاده شده را نمایش داده است. در این معادله، Y متغیر پاسخ، X_i و X_j متغیرهای مستقل و b_0, b_i, b_{ii} و b_{ij} به ترتیب نشان دهنده ضرایب ثابت ترم‌های قطع، خطی، درجه دوم و اندرکنش هستند.

(۱)

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

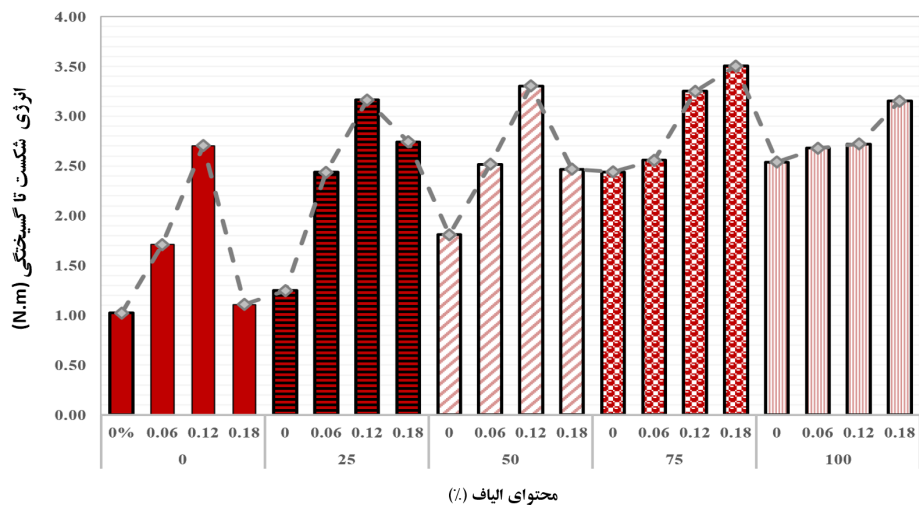
۳-ارائه و تفسیر نتایج

۳-۱- نتایج آزمایشگاهی

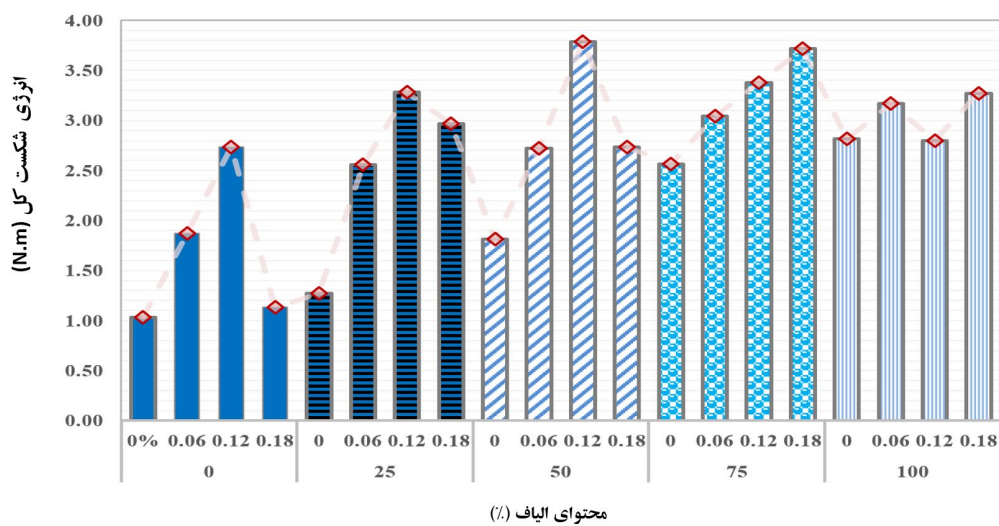
با توجه به نتایج آزمایش شکست خمشی نیمه دایره‌ای دمای ۱۵- درجه سانتی‌گراد که در شکل‌های ۱ تا ۳ نشان داده شده است، می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت ترک‌خوردگی مخلوط‌ها با افزایش تراشه آسفالت بهبود می‌یابد. این بهبود عمدتاً به دلیل تأثیر سفت‌کننده مواد تراشه آسفالت است که بر سفتی کل مخلوط‌ها تأثیر می‌گذارد و باعث بالا رفتن بار اوج و در نتیجه افزایش انرژی شکست می‌شود. به عبارت دیگر، انرژی شکست به بار اوج و جابجایی وابسته است. در دماهای منفی، جابجایی‌ها بسیار کم هستند، بنابراین انرژی شکست به شدت تحت تأثیر مقاومت بارگذاری در دماهای منفی قرار می‌گیرد و با افزایش محتوای تراشه آسفالت افزایش می‌یابد. الیاف نیز تأثیر مشابهی دارد و با افزایش مقدار الیاف، مقاومت ترک‌خوردگی مخلوط‌ها بهبود می‌یابد (Victory, 2022). همچنین، مشاهده می‌شود که هر سه پارامتر مورد بررسی در یک روند مشخص و تقریباً ثابت پیروی می‌کنند. انرژی شکست تا زمان شکست با افزایش محتوای تراشه آسفالت افزایش می‌یابد و این روند برای نتایج آزمون J_c نیز صحت دارد. دلیل این امر این است که در دماهای منفی، مواد آسفالتی شکننده هستند و با سفت شدن مواد شکننده، انرژی شکست افزایش می‌یابد. همان‌طور که افزودن مواد تراشه آسفالت به مخلوط‌ها آن‌ها را سفت‌تر می‌کند، انرژی شکست و مقدار J_c با افزایش محتوای تراشه آسفالت در دماهای منفی افزایش می‌یابد. همچنین، مشاهده می‌شود که افزودن الیاف شیشه به‌طور قابل توجهی بر عملکرد ترک‌خوردگی مخلوط‌ها تأثیر می‌گذارد.

بهینه‌سازی معمولاً با نظارت بر تأثیر یک فاکتور بر یک پاسخ آزمایشگاهی در یک زمان مشخص انجام می‌شود. در این شرایط تنها یک فاکتور تغییر کرده و سایر عوامل ثابت نگه داشته می‌شود. در این روش، اثرات تعاملی بین متغیرها و تأثیر کامل عوامل بر متغیر پاسخ لحاظ نمی‌شود. برای رفع این مشکلات، استفاده از تکنیک‌های آماری چند متغیره در فرآیند بهینه‌سازی پیشنهاد شده است. روش پاسخ سطح (یکی از رایج‌ترین ابزارهای چند متغیره در بهینه‌سازی است که بر اساس مجموعه‌ای از تکنیک‌های ریاضی و آماری طراحی شده است. پاسخ سطح مجموعه‌ای از روش‌ها و تکنیک‌ها است که برای مدل‌سازی و تحلیل مشکلات چند متغیره به کار می‌رود. این تکنیک یک ابزار قدرتمند برای بهینه‌سازی و مدل‌سازی است که می‌تواند به محققان و مهندسان در درک بهتر فرآیندها و بهبود کیفیت محصولات کمک کند) (Susaimanickam, Manickam, & Idris, 2023; Joseph, 2023; Veza, Spraggon, Fattah, & Idris, 2023).

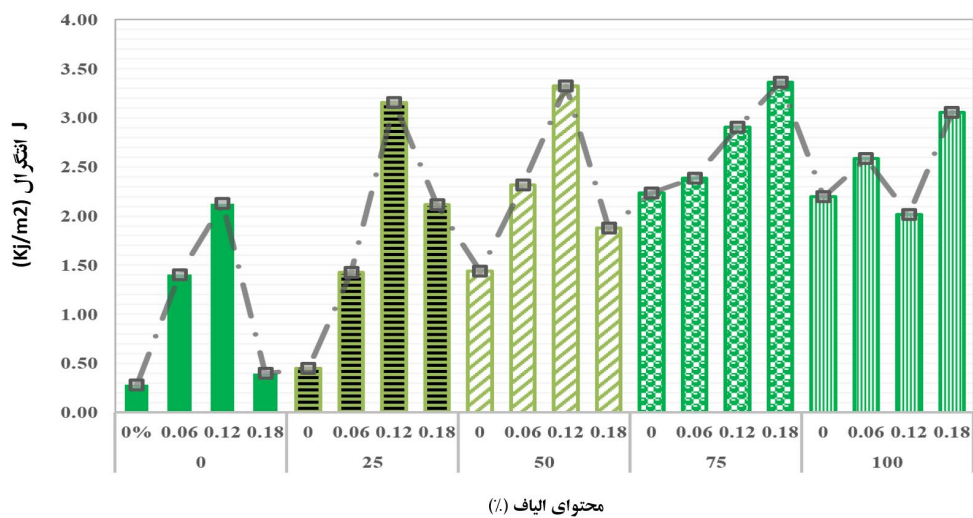
با توجه به مزایا و کاربردهای آن، پاسخ سطح به عنوان یکی از روش‌های مؤثر در تحقیقات و صنایع مختلف شناخته می‌شود. هدف اصلی آن بهینه‌سازی پاسخ (متغیر وابسته) با توجه به تعدادی از متغیرهای مستقل (ورودی‌ها) است. پاسخ سطح به شناسایی و تحلیل تعاملات بین متغیرها کمک می‌کند. همچنین، این روش به مدل‌سازی روابط پیچیده بین متغیرها کمک می‌کند. ابزار پاسخ سطح یک تکنیک مناسب برای دستیابی به راه‌حل بهینه و تعیین ترکیب مطلوب از متغیرهای مستقل بر اساس رفتار متغیرهای پاسخ است. مراحل انجام این روش شامل؛ اجرای آزمایش‌ها و ثبت داده‌ها برای متغیرهای ورودی و پاسخ، استفاده از رگرسیون چندگانه برای ایجاد یک مدل ریاضی و بررسی اثرات متغیرها و شناسایی مقادیر بهینه برای رسیدن به بهترین پاسخ است (Chen et al., 2022; Hadiyat, Sopha, & Wibowo, 2022). در این تحقیق از مدل پاسخ سطح برای تعیین ارتباط بین متغیرهای مستقل و تابع هدف استفاده شده است. برای این هدف، ابتدا متغیرهای درصد الیاف و درصد تراشه آسفالت به عنوان متغیرهای مستقل و شاخص‌های مقاومت شکست آسفالت در دمای پایین



شکل ۱. بررسی تأثیر هم‌افزایی تراشه آسفالت و الیاف بر انرژی شکست تا گسیختگی آسفالت بازیافتی



شکل ۲. بررسی تأثیر هم‌افزایی تراشه آسفالت و الیاف بر انرژی شکست کل آسفالت بازیافتی



شکل ۳. بررسی تأثیر هم‌افزایی تراشه آسفالت و الیاف بر شاخص J انتگرال در آسفالت بازیافتی

۳-۲- نتایج مدل سازی

معادلات پیش بینی مشخصات آسفالت بر اساس روش پاسخ سطح در روابط ۱ تا ۳ نشان داده شده است. برای تعیین رابطه بین متغیرهای مستقل و پارامتر شیارشدگی قیرها، از معادلات خطی و چندجمله ای مختلفی استفاده شده است. در نهایت، معادله چندجمله ای ۱ با بالاترین دقت و بیشترین مقدار معنی داری به عنوان معادله بهینه پیشنهاد شده است.

در این رابطه متغیرهای A و B به ترتیب درصد الیاف و درصد تراشه آسفالت می باشند. شکل ۴، نمودارهای سه بعدی از عملکرد ترک خوردگی مخلوط های آسفالتی بازیافتی را نشان داده است. همچنین، برای بررسی کیفیت مدل و صحت سنجی نتایج به دست آمده از تحلیل ANOVA در جدول های ۱ تا ۳ استفاده شده است. پارامتر F معیاری از انحراف داده ها از مقدار میانگین است. برای مدلی که نتایج آزمایش را با موفقیت پیش بینی می کند، مقدار F به طور معمول بسیار بالا است و مقدار Prob کمتر از ۰/۰۵ نیز به معنی معنادار بودن مدل و تأثیرگذاری پارامترهای مستقل بر مقادیر پاسخ در سطح اطمینان ۹۵٪ است. با توجه به نتایج به دست آمده، مقادیر F برای مدل های طراحی شده برای انرژی شکست، انرژی کل و J انتگرال به ترتیب برابر ۱۱/۵۵، ۱۱/۳ و ۶/۸۵ می باشد. با توجه به مقادیر بالای پارامتر F، مدل های طراحی شده طور کامل معنادار است.

بررسی جز به جز هر شاخص نشان می دهد که بر اساس تحلیل هم زمان شاخص های F و Prob به ترتیب $Fiber^2$ ، RAP، $Fiber^2$ و $Fiber$ بیشترین تأثیر معنادار را بر انرژی شکست دارند. به عبارت دیگر، انرژی شکست رابطه بیشتری با جمله درجه دوم الیاف دارند. همچنین، تحلیل رفتار آسفالت از نظر انرژی کل نشان می دهد که به ترتیب $Fiber^2$ ، RAP، $Fiber^2$ و $Fiber$ بیشترین تأثیرگذاری را داشته اند. در حالی برخلاف دو تحلیل قبل، برای شاخص J انتگرال رتبه بندی متغیرها تغییر کرده و به ترتیب $Fiber^2$ ، RAP، $Fiber^2$ و $Fiber$ بیشترین تأثیر را دارند. از تحلیل ANOVA می توان دو نتیجه خلاصه گرفت. نتیجه اول مربوط به

برتری قابل توجه الیاف نسبت به تراشه آسفالت در تأثیرگذاری بر شاخص های شکست آسفالت بازیافتی است. دومین نتیجه مربوط به تأثیرگذاری بیشتر تراشه آسفالت بر شاخص J انتگرال نسبت به مشخصه های انرژی است. در حالی که می توان متغیرهای با مقدار P بزرگ تر از ۰/۰۵ که تأثیرگذاری معنادار بر عوامل پاسخ ندارند را برای بهبود کیفیت و دقت نتایج و بهینه سازی از مدل نهایی حذف کرد. عملکرد مدل های توسعه یافته برحسب مقادیر پارامتر R^2 برای مدل های پیش بینی انرژی شکست، انرژی کل و J انتگرال به ترتیب برابر ۰/۸۳۳، ۰/۸۲۹ و ۰/۷۳۴ است.

همچنین مقدار پارامتر AP به عنوان تابع دقت برای مدل های توسعه یافته انرژی شکست، انرژی کل و J انتگرال به ترتیب برابر ۱۱/۷۲، ۱۱/۳۷ و ۹/۰۶ است. مقدار بزرگ تر از ۴ برای شاخص AP قابل پذیرش است و مقادیر بالاتر آن نشان دهنده بالا بودن مقدار دقت مدل ها است.

(۲)

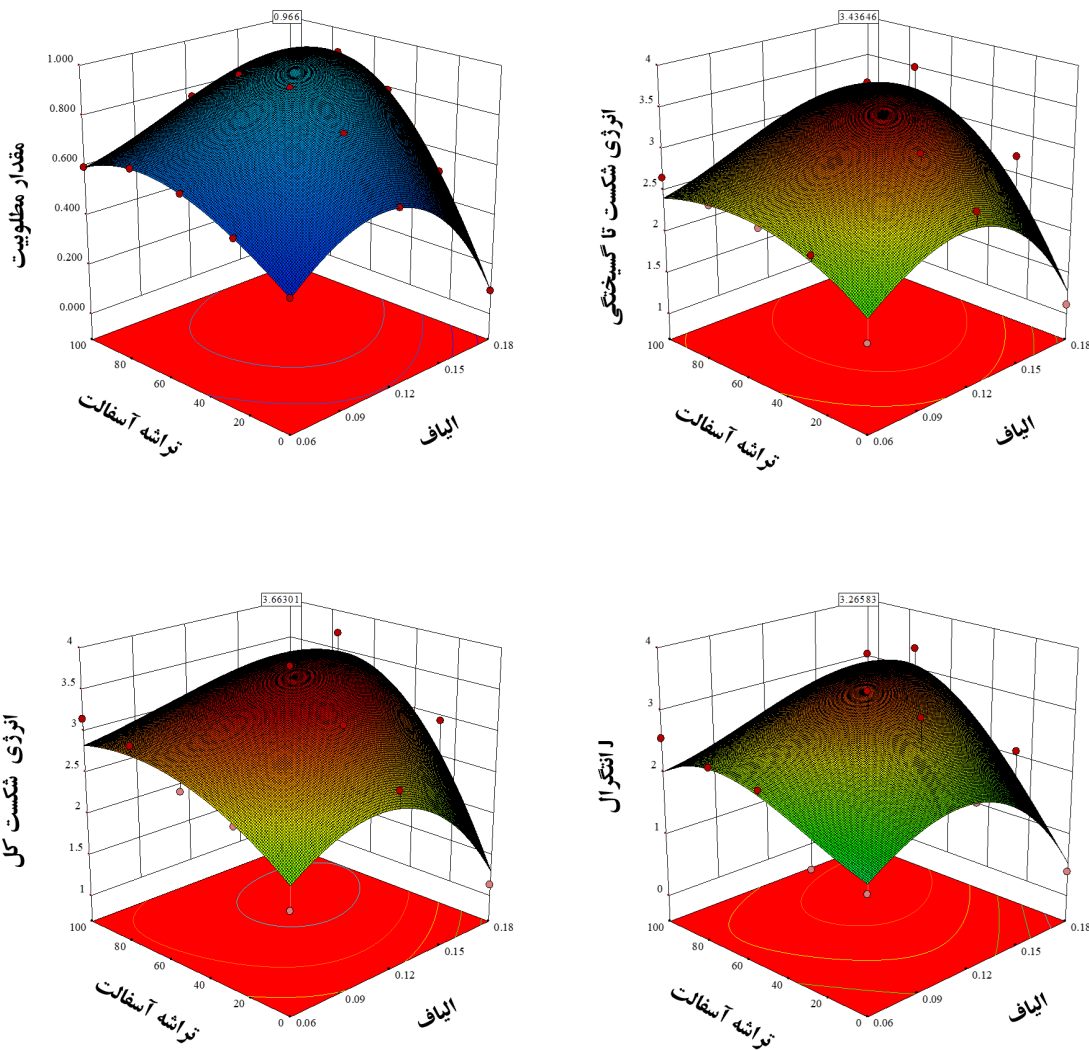
$$\text{Fracture Energy until Failure (N.m)} = +0.85389 + 17.60 \times \text{Fibers} + 0.0233 \times \text{RAP} + 76.43 \times \text{Fiber}^2 - 7.945\text{E-}005 \times \text{RAP}^2 + 1.913 \times \text{Fiber}^2 \times \text{RAP}$$

(۳)

$$\text{Total Fracture Energy (N.m)} = +0.858 + 25.16 \times \text{Fiber} + 0.0199 \times \text{RAP} + 27.65 \times \text{Fiber}^2 + 9.07 \text{E-}006 \times \text{RAP}^2 + 1.8285 \times \text{Fiber}^2 \times \text{RAP} - 2.45 \text{E-}003 \times \text{Fiber} \times \text{RAP}^2$$

(۴)

$$\text{J integral (kJ/m}^2\text{)} = +0.035 + 26.747 \times \text{Fiber} + 0.018 \times \text{RAP} + 34.0962 \times \text{Fiber}^2 + 3.00\text{E-}004 \times \text{RAP}^2 + 2.595 \times \text{Fiber}^2 \times \text{RAP} - 1.7255\text{E-}003 \times \text{Fiber} \times \text{RAP}^2$$



شکل ۴. نمودارهای سه‌بعدی از عملکرد ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی بازبافتی

جدول ۲. نتایج تحلیل واریانس برای مدل‌سازی انرژی شکست تا لحظه گسیختگی آسفالت بازبافتی

Source	Sum of Squares	Degree of freedom	Mean Square	F-Value	Prob > F	Model performance
Model	9.13	9	1.01	11.55	0.0003	significant
A-Fibre	1.18	1	1.18	13.41	0.0044	
B-RAP	9.65E-03	1	9.65E-03	0.11	0.7472	
AB	2.04E-05	1	2.04E-05	2.32E-04	0.9882	
A ²	1.25	1	1.25	14.24	0.0036	
B ²	0.7	1	0.7	7.99	0.018	
A ² B	1.19	1	1.19	13.51	0.0043	
AB ²	0.25	1	0.25	2.85	0.1222	
A ³	0.34	1	0.34	3.83	0.0789	
B ³	1.20E-03	1	1.20E-03	0.014	0.9091	
Residual	0.88	10	0.088			
Cor Total	10.01	19				
R-Squared	0.9123					
Pred R-Squared	0.8333					
Adeq Precision	11.727					
R-Squared	0.9123					

ادامه جدول ۲. نتایج تحلیل واریانس برای مدل‌سازی انرژی شکست کل آسفالت بازیافتی

Source	Sum of Squares	Degree of freedom	Mean Square	F-Value	Prob > F	Model performance
Model	11.35	9	1.26	11.3	0.0004	significant
A-Fibre	0.96	1	0.96	8.64	0.0148	
B-RAP	0.056	1	0.056	0.5	0.4937	
AB	0.027	1	0.027	0.24	0.6327	
A ²	1.81	1	1.81	16.23	0.0024	
B ²	0.93	1	0.93	8.36	0.0161	
A ² B	1.08	1	1.08	9.7	0.011	
AB ²	0.59	1	0.59	5.33	0.0437	
A ³	0.13	1	0.13	1.12	0.3147	
B ³	1.92E-05	1	1.92E-05	1.72E-04	0.9898	
Residual	1.12	10	0.11			
Cor Total	12.47	19				
R-Squared	0.9105					
Pred R-Squared	0.8299					
Adeq Precision	11.374					
R-Squared	0.9105					

جدول ۳. نتایج تحلیل واریانس برای مدل‌سازی J انتگرال آسفالت بازیافتی

Source	Sum of Squares	Degree of freedom	Mean Square	F-Value	Prob > F	Model performance
Model	14.17	9	1.57	6.85	0.0029	significant
A-Fibre	1.31	1	1.31	5.71	0.038	
B-RAP	0.17	1	0.17	0.75	0.4062	
AB	4.28E-03	1	4.28E-03	0.019	0.8942	
A ²	1.94	1	1.94	8.46	0.0156	
B ²	1.1	1	1.1	4.77	0.054	
A ² B	2.18	1	2.18	9.5	0.0116	
AB ²	0.29	1	0.29	1.27	0.2852	
A ³	0.36	1	0.36	1.57	0.2384	
B ³	0.085	1	0.085	0.37	0.5569	
Residual	2.3	10	0.23			
Cor Total	16.47	19				
R-Squared	0.8604					
Pred R-Squared	0.7348					
Adeq Precision	9.06					
R-Squared	0.8604					

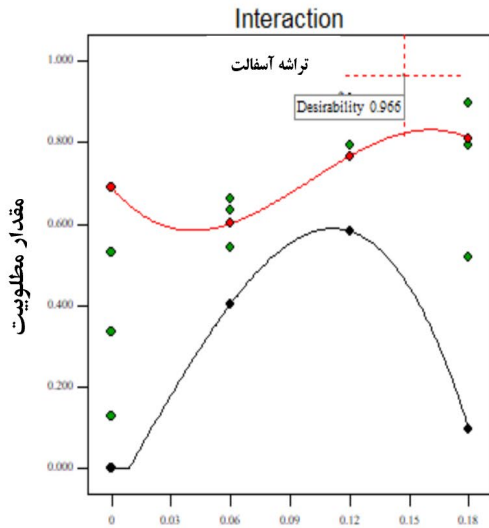
۳-۳- نتایج بهینه‌سازی

آسفالت نشان داده شده است. بنابر نتایج حاصل شده، شرایط بهینه برای بیشینه کردن آسفالت در برابر ترک خوردگی دمای پایین آسفالت برای الیاف برابر ۰/۱۴ درصد و برای تراشه آسفالت برابر ۶۷/۳ درصد تعیین شده است. در این شرایط علاوه بر بهینه‌سازی مقادیر افزودنی‌ها، تعادل مطلوبی بین خصوصیات عملکردی آسفالت از نظر فنی و اقتصادی برقرار شده است. پاسخ سطح مشخصات مکانیکی آسفالت اصلاح شده تحت تأثیر مقادیر بهینه الیاف و تراشه آسفالت در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد در صورت استفاده از ترکیب بهینه شامل ۰/۱۴٪ الیاف و ۶۷٪ تراشه آسفالت می‌توان به انرژی شکست، انرژی کل و J انتگرال برابر ۳/۴۳، ۳/۶۶ و ۳/۲۶ دست یافت. اهمیت استفاده از مقدار بهینه الیاف زمانی مشخص تر می‌شود که عملکرد آسفالت

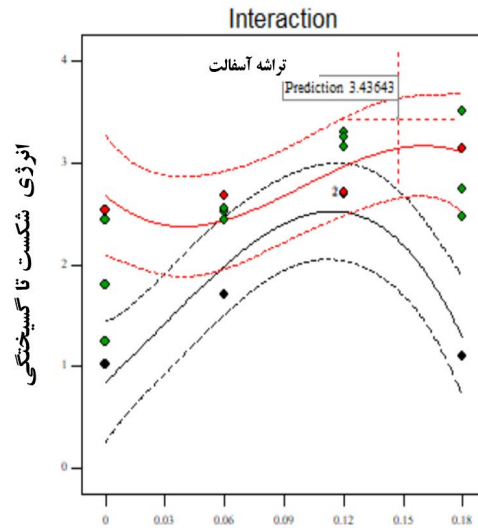
با وجود تأثیر مثبت الیاف بر بهبود مشخصات فنی و ترک خوردگی آسفالت حاوی تراشه آسفالت، ولی به دلایل اقتصادی و کاهش نیاز است مقدار آن با بهینه‌سازی به طور کمی تعیین شود. در این پژوهش هدف بیشینه کردن تولید آسفالت بازیافتی حاوی تراشه آسفالت با عملکرد مناسب در برابر ترک خوردگی و به طور هم‌زمان بهینه‌سازی مقدار الیاف و تراشه آسفالت است. به طور کلی منحنی‌های هم‌پوشانی در شکل ۵ نشان می‌دهد که با افزایش مقدار الیاف مقاومت آسفالت در برابر ترک خوردگی به صورت غیرخطی ابتدا بهبود یافته و سپس کاهش یافته است. در حالی که برای تراشه آسفالت شدت این تأثیرگذاری نسبت به الیاف به مراتب کمتر بوده است. در شکل ۶ محدوده تغییرات متغیرهای مستقل شامل درصد الیاف و تراشه آسفالت و نتایج بهینه‌سازی فرآیند اصلاح خواص

۲۳۶٪، ۲۵۴٪ و ۱۰۶۱٪ افزایش داده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با بیشینه کردن مقاومت آسفالت در برابر شکست نتایج بهینه‌سازی حاصل منجر به افزایش کیفیت روسازی و صرفه‌جویی اقتصادی می‌شود.

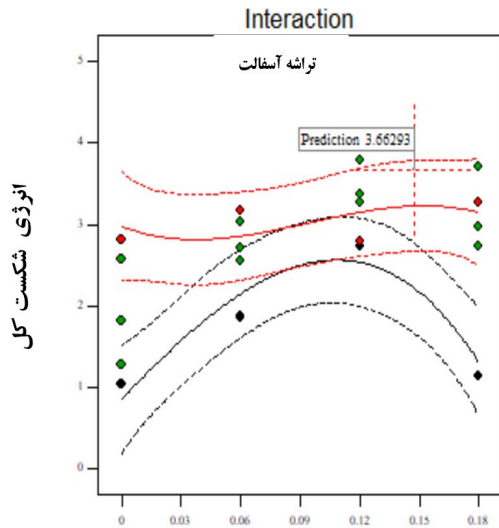
تحت تأثیر ترکیب بهینه از نظر انرژی شکست، انرژی کل و J انتگرال نسبت به مقدار متوسط به ترتیب ۴۰٪، ۳۹٪ و ۵۹٪ افزایش یافته است. درحالی‌که این تاثیرگذاری در مقایسه نتایج بهینه و حداقل بیشتر می‌شود و استفاده از ترکیب بهینه‌سازی شده انرژی شکست، انرژی کل و J انتگرال آسفالت را به ترتیب



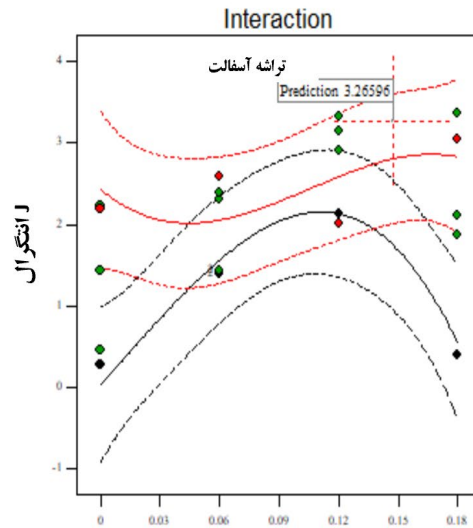
الیاف



الیاف

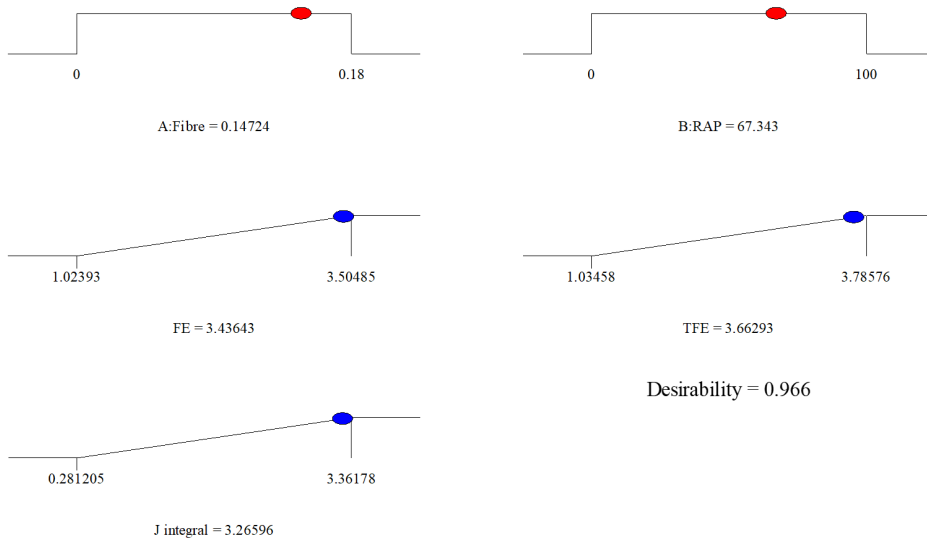


الیاف

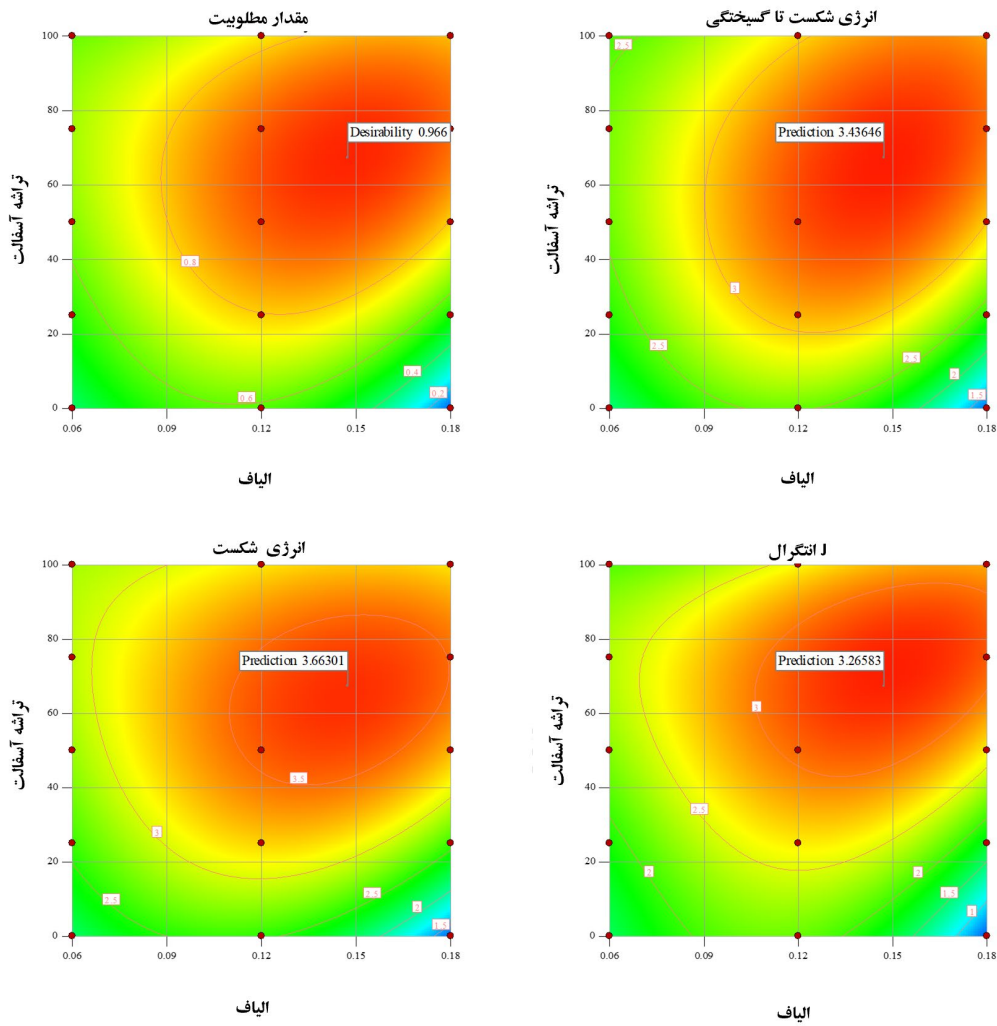


الیاف

شکل ۵. منحنی‌های هم‌پوشانی عملکرد آسفالت بازیافتی تحت تأثیر تراشه آسفالت و الیاف



شکل ۶. مقادیر بهینه متغیرهای مستقل و پاسخ متغیرهای خروجی در حالت بهینه‌سازی شده



شکل ۷. پاسخ سطح رفتار شکست آسفالت بازیافتی تحت تأثیر مقادیر بهینه تراشه آسفالت و الیاف

۵- نتیجه گیری

هدف این تحقیق ارائه مدل پیش‌بینی و بهینه‌سازی خصوصیات شکست آسفالت بازیافتی حاوی درصد تراشه آسفالت بالا و الیاف در دمای پایین بود. برای این منظور، ۰/۰۶٪، ۰/۱۲٪ و ۰/۱۸٪ الیاف شیشه به مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۲۵٪، ۵۰٪ و ۷۵٪ و ۱۰۰٪ از تراشه آسفالت اضافه شد و انرژی شکست، انرژی کل شکست و انتگرال J در دمای ۱۵- درجه سانتی‌گراد تعیین شد. سپس بر اساس مشخصه‌های شکست آسفالت و با استفاده از روش پاسخ سطح مقدار بهینه تراشه آسفالت و الیاف شیشه پیش‌بینی شد. نتایج به‌دست‌آمده به شرح زیر خلاصه شده است: -تراشه آسفالت تأثیر مثبتی بر انرژی شکست و مقدار Jc مخلوط‌های آسفالتی داشت و پارامترهای شکست با افزایش محتوای تراشه آسفالت بهبود یافت. همچنین، الیاف شیشه تأثیر مثبتی بر عملکرد شکست مخلوط‌های بازیافتی داشت و می‌تواند به‌عنوان مکمل و اصلاح‌کننده در مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالت استفاده شود.

-مقادیر پارامتر R² برای مدل‌های پیش‌بینی انرژی شکست، انرژی کل و J انتگرال به ترتیب برابر ۰/۸۳۳، ۰/۸۲۹ و ۰/۷۳۴ بود. همچنین مقدار پارامتر AP به‌عنوان تابع دقت برای مدل‌های توسعه‌یافته انرژی شکست، انرژی کل و J انتگرال به ترتیب برابر ۱۱/۷۲، ۱۱/۳۷ و ۹/۰۶ بود. با توجه به مقادیر R² و AP می‌توان بیان کرد مدل‌های توسعه‌یافته قابلیت مناسبی در پیش‌بینی خصوصیات شکست آسفالت بازیافتی حاوی الیاف دارند.

-مطابق با نتایج بهینه‌سازی، شرایط بهینه برای بیشینه‌کردن مقاومت شکست آسفالت در برابر ترک‌خوردگی دمای پایین برای الیاف برابر ۰/۱۴ درصد و برای تراشه آسفالت برابر ۶۷/۳ درصد پیشنهاد شد.

-مقایسه پاسخ سطح خصوصیات شکست آسفالت با مقادیر میانگین نشان داد که در صورت استفاده از ترکیب بهینه انرژی شکست، انرژی کل و J انتگرال به ترتیب ۴۰٪، ۳۹٪ و ۵۹٪ افزایش می‌یابند و نتایج حاصل منجر به افزایش کیفیت روسازی و صرفه‌جویی اقتصادی قابل توجه می‌شود.

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.

-Amini, A., & Akrami, M. (2023). Improving the performance and rheological properties of RAP binders using gilsonite/nanoclay and softer binder. *Construction and Building Materials*, 400, 132797.

-Amini, A., & Imaninasab, R. (2018). Investigating the effectiveness of Vacuum Tower Bottoms for Asphalt Rubber Binder based on performance

۷- مراجع

properties and statistical analysis. *Journal of Cleaner Production*, 171, 1101-1110.

-Baqersad, M., & Ali, H. (2021). Recycling of RAP using nanoclay modified asphalt binder. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 14(6), 778-788.

-Bonaquist, R. (2005). Laboratory evaluation of hot mix asphalt (HMA) mixtures containing recycled or waste product materials using performance testing. Retrieved from.

-Bonaquist, R. F. (2011). Mix design practices for warm mix asphalt, Vol. 691. *Transportation Research Board*.

-Brown, E. R., Kandhal, P. S., Roberts, F. L., Kim, Y. R., Lee, D. Y., & Kennedy, T. W. (2009). Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction: NAPA research and education foundation.

-Chen, W.-H., Uribe, M. C., Kwon, E. E., Lin, K. Y. A., Park, Y.-K., Ding, L., & Saw, L. H. (2022). A comprehensive review of thermoelectric generation optimization by statistical approach: Taguchi method, analysis of variance (ANOVA), and response surface methodology (RSM). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 169, 112917.

-Daryaei, D., Habibpour, M., Gulzar, S., & Underwood, B. S. (2021). Combined effect of waste polymer and rejuvenator on performance properties of reclaimed asphalt binder. *Construction and Building Materials*, 268, 121059.

-Fakhri, M., & Mottahed, A. R. (2021). Improving moisture and fracture resistance of warm mix asphalt containing RAP and nanoclay additive. *Construction and Building Materials*, 272, 121900.

-Guo, M., Liu, H., Jiao, Y., Mo, L., Tan, Y., Wang, D., & Liang, M. (2020). Effect of WMA-RAP technology on pavement performance of asphalt mixture: A state-of-the-art review. *Journal of Cleaner Production*, 266, 121704.

-Hadiyat, M. A., Sopha, B. M., & Wibowo, B. S. (2022). Response surface methodology using observational data: a systematic literature review. *Applied Sciences*, 12(20), 10663.

-Hong, W., Mo, L., Pan, C., Riara, M., Wei, M., & Zhang, J. (2020). Investigation of rejuvenation and modification of aged asphalt binders by using aromatic oil-SBS polymer blend. *Construction and Building Materials*, 231, 117154.

-Loise, V., Caputo, P., Porto, M., Calandra, P., Angelico, R., & Oliviero Rossi, C. (2019). A review on Bitumen Rejuvenation: Mechanisms, materials, methods and perspectives. *Applied Sciences*, 9(20), 4316.

-Mansourkhaki, A., Ameri, M., & Daryaei, D. (2019). Application of different modifiers for improvement of chemical characterization and physical-rheological parameters of reclaimed asphalt binder. *Construction and Building Materials*, 203, 83-94.

- Recycled Asphalt Binder With Rejuvenators. *Transportation Research Record*, 03611981221097091.
- Susaimanickam, A., Manickam, P., & Joseph, A. A. (2023). A comprehensive review on RSM-coupled optimization techniques and its applications. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 30(8), 4831-4853.
- Veza, I., Spraggon, M., Fattah, I. R., & Idris, M. (2023). Response surface methodology (RSM) for optimizing engine performance and emissions fueled with biofuel: Review of RSM for sustainability energy transition. *Results in Engineering*, 18, 101213.
- Victory, W. (2022). A review on the utilization of waste material in asphalt pavements. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(18), 27279-27282.
- Williams, B. A., Willis, J. R., & Shacat, J. (2020). *Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2019*. Retrieved from
- Yang, C., Xie, J., Wu, S., Amirkhani, S., Wang, Z., Song, J., Zhang, L. (2021). Enhancement mechanism of induction heating on blending efficiency of RAP - virgin asphalt in steel slag recycled asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 269, 121318.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121318
- Yousefi, A., Behnood, A., Nowruzi, A., & Haghshenas, H. (2021). Performance evaluation of asphalt mixtures containing warm mix asphalt (WMA) additives and reclaimed asphalt pavement (RAP). *Construction and Building Materials*, 268, 121200.
- Zaumanis, M., Mallick, R. B., & Frank, R. (2014). Determining optimum rejuvenator dose for asphalt recycling based on Superpave performance grade specifications. *Construction and Building Materials*, 69, 159-166.
- Zeng, Z., Underwood, B. S., & Kim, Y. R. (2024). A state-of-the-art review of asphalt mixture fracture models to address pavement reflective cracking. *Construction and Building Materials*, 443, 137674.
- Ziari, H., Amini, A., Moniri, A., & Habibpour, M. (2021). Using the GMDH and ANFIS methods for predicting the crack resistance of fibre reinforced high RAP asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 22(10), 2248-2266.
- Ziari, H., Divandari, H., Hajiloo, M., & Amini, A. (2019). Investigating the effect of amorphous carbon powder on the moisture sensitivity, fatigue performance and rutting resistance of rubberized asphalt concrete mixtures. *Construction and Building Materials*, 217, 62-72.
- Ziari, H., Goli, A., & Amini, A. (2016). Effect of crumb rubber modifier on the performance properties of rubberized binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(12), 04016156.
- Meng, Y., Kong, W., Gou, C., Deng, S., Hu, Y., Chen, J., & Fan, L. (2023). A review on evaluation of crack resistance of asphalt mixture by semi-circular bending test. *Journal of Road Engineering*, 3(1), 87-97.
- Moniri, A., Ziari, H., Aliha, M., & Saghafi, Y. (2021). Laboratory study of the effect of oil-based recycling agents on high RAP asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, 22(11), 1423-1434.
- Moniri, A., Ziari, H., Amini, A., & Hajiloo, M. (2022). Investigating the ANN model for cracking of HMA in terms of temperature, RAP and fibre content. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(3), 545-557.
- Morea, F., & Zerbino, R. (2018). Improvement of asphalt mixture performance with glass macro-fibers. *Construction and Building Materials*, 164, 113-120.
- Newcomb, D. E., Brown, E. R., & Epps, J. A. (2007). Designing HMA mixtures with high RAP content: A practical guide: National Asphalt Pavement Association.
- Pan, P., Kuang, Y., Hu, X., & Zhang, X. (2018). A comprehensive evaluation of rejuvenator on mechanical properties, durability, and dynamic characteristics of artificially aged asphalt mixture. *Materials*, 11(9), 1554.
- Pirmohammad, S., Momeni, R., & Khanghahi, S. H. (2024). Effect of SCB specimen size on mode I fracture parameters of asphalt concrete at low and intermediate temperatures. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 130, 104314.
- Pradhan, S. K., & Sahoo, U. C. (2020). Influence of softer binder and rejuvenator on bituminous mixtures containing reclaimed asphalt pavement (RAP) material. *International Journal of Transportation Science and Technology*.
- Qiu, J., Tabasi, E., Hammoud, A., Benjeddou, O., Zarei, M., & Khordehbinan, M. W. (2024). Determining the fracture stiffness of modified Hot and Warm Mix Asphalt using semi-circular bending (SCB) geometry. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 129, 104237.
- Reddy, G. S., Ramesh, A., & Ramayya, V. V. (2022). Effect of Nano-modified Binder on Fracture Properties of Warm Mix Asphalt Containing RAP. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 1-14.
- Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D.-Y., & Kennedy, T. W. (1991). Hot mix asphalt materials, mixture design and construction.
- Saha, G., & Biligiri, K. P. (2016). Fracture properties of asphalt mixtures using semi-circular bending test: A state-of-the-art review and future research. *Construction and Building Materials*, 105, 103-112.
- Samara, M., Offenbacher, D., Mehta, Y., Ali, A., Elshaer, M., & Decarlo, C. (2022). Performance Evaluation and Characterization of Extracted

Modeling and Design Optimization of Recycled Asphalt Containing Fibers at Low Temperature Using Response Surface Method

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

Reza Akbari, Ph.D., Grad., Department of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Ahmad Safari Mohammadi, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

E-mail: amiramini@iaui.ac.ir

Received: April 2025- Accepted: November 2025

ABSTRACT

Asphalt Mixtures containing high percentages of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) often face challenges in production and compaction, which can lead to micro-cracking and premature failures. Therefore, it is essential to improve the technical and performance characteristics of these mixtures. The use of fibers, especially glass fibers, can help enhance fatigue resistance and crack resistance. The aim of this research is to provide a predictive and optimization model for the failure characteristics of recycled asphalt with a high percentage of RAP and fibers at low temperatures using the Response Surface Methodology (RSM). For this purpose, 0.06%, 0.12%, and 0.18% glass fibers were added to asphalt mixtures with different percentages of RAP, and the fracture energy, total fracture energy, and J-integral were measured at -15 degrees Celsius. The results showed that glass fibers have a positive effect on the failure performance of recycled mixtures and can be used as an additive and modifier in RAP-containing mixtures. Additionally, the modeling results indicated that the developed models have a suitable capability in predicting the failure characteristics of fiber-containing recycled asphalt in terms of correlation coefficient and accuracy function. Finally, to maximize the fracture resistance of asphalt against cracking at low temperatures, optimal values of 0.14% for fibers and 67.3% for RAP were recommended. Based on the overall results of the research, if the optimal combination is used, fracture energy, total energy, and the J-integral can increase by 40%, 39%, and 59%, respectively, compared to average laboratory values, leading to improved pavement quality and economic savings.

Keywords: Recycled Asphalt Pavement, Glass Fibers, Cracking Resistance, Optimization, Response Surface Method