بهبود عملکرد آسفالت‌های بازیافتی بهینه‌سازی الیاف پلی‌اولفین-شیشه براساس مشخصات عملکردی و پیرشدگی

مقاله علمی – پژوهشی

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

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

دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۵- پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۲

صفحه ۱۰۶-۹۱

چکیده

در راستای کاهش هزینه‌ها و استفاده بهینه از منابع طبیعی، استفاده از مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی (RAP) به‌عنوان یک راهکار پایدار در صنعت روسازی به‌طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته است. این تحقیق به بررسی تأثیر الیاف پلی‌اولفین-شیشه (PGF) بر خواص مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۵۰ درصد RAP در شرایط مختلف پیرشدگی (بدون پیرشدگی، پیرشدگی کوتاه‌مدت و بلندمدت) پرداخته است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در حالت بدون پیرشدگی، مقادیر بالای مدول الاستیسیته و طول عمر خستگی به‌دست آمده است، که تأثیر مثبت PGF را در بهبود خواص مکانیکی تأیید می‌کند. همچنین، در شرایط پیرشدگی کوتاه‌مدت، با وجود کاهش برخی مشخصات، PGF به حفظ استحکام و پایداری کمک کرد و در نهایت، در شرایط پیرشدگی بلندمدت، با مقدار بهینه PGF، بهبود قابل‌توجهی در عملکرد مخلوط‌ها مشاهده شد. نتایج نشان می‌دهد که مقدار بهینه PGF برای هر حالت پیرشدگی متفاوت است: ۰,۱۲۰۰ برای بدون پیرشدگی، ۰,۰۹۰ برای پیرشدگی کوتاه‌مدت و ۰,۱۱۵۰ برای پیرشدگی بلندمدت. این تحقیق نشان می‌دهد که PGF می‌تواند به‌عنوان یک افزودنی مؤثر در بهینه‌سازی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی در شرایط مختلف عمل کند. نتایج به‌دست‌آمده می‌تواند به مهندسان و محققان در طراحی و توسعه مخلوط‌های آسفالتی با دوام و پایدار در پروژه‌های عمرانی کمک کند. علاوه بر این، استفاده از PGF به کاهش مصرف مواد بکر و کاهش اثرات زیست‌محیطی نیز منجر می‌شود، که این خود به عنوان یک مزیت مهم در راستای توسعه پایدار در صنعت ساخت و ساز تلقی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آسفالت بازیافتی، الیاف پلی‌اولفین-شیشه، خواص مکانیکی، پیرشدگی، بهینه‌سازی، مخلوط‌های آسفالتی

۱-مقدمه

توسعه پایدار مستلزم استفاده کمتر از مواد خام طبیعی به دلیل هزینه بالا و مصرف انرژی برای استخراج و حمل و نقل است. همچنین انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهد و از مواد قابل بازیافت بدون به خطر انداختن الزامات استاندارد استفاده می‌کند. از جمله اهداف ساخت جاده‌های پایدار، تضمین سفر ایمن، راحت، مقرون به صرفه، کاهش تولید زباله و کاهش مصرف مواد خام و استفاده از مواد زائد به عنوان جایگزین از منابع طبیعی می‌باشد. استفاده از مواد زائد در ساخت و ساز جاده می‌تواند اثرات کلی محیطی را کاهش دهد و موجب توسعه فناوری روسازی با انرژی کارآمد و سازگار با محیط زیست شود(Amini & Imaninasab, 2018; Amini, Ziari, & Goli, 2018; Ziari, Amini, & Goli, 2020b). صنعت آسفالت به طور مداوم به دنبال پیشرفت تکنولوژی برای تولید مخلوط‌های پایدار، مقرون به صرفه و سازگار با محیط زیست است. یکی از راهکارهای تولید آسفالت پایدار و صرفه‌جویی اقتصادی، استفاده از مقادیر بالاتر RAP در روسازی‌های بازیافتی است

(Amini & Parvizi, 2024). پیرشدگی می‌تواند در طول تولید، حمل و نقل و اجرای مخلوط‌های آسفالتی که به عنوان پیرشدگی کوتاه مدت شناخته می‌شود، یا در زمان سرویس آن که به عنوان پیرشدگی طولانی مدت شناخته می‌شود، رخ دهد. پیرشدگی منجر به افزایش ویسکوزیته و متعاقباً سفتی قیرها و مخلوط‌های آسفالتی می‌شود که بر خواص عملکردی آنها تأثیر می‌گذارد. پیرشدگی کوتاه مدت و بلند مدت را می‌توان در قیرها و مخلوط‌های آسفالتی شبیه‌سازی کرد (Chen, Zhang, Zhang, Zhang, & Zhang, 2021; Ziari, Amini, & Goli, 2020a). مواد روسازی آسفالت احیا شده حاوی ترکیبات ارزشمندی از قیر و سنگدانه‌ها هستند. استخراج بیش از حد سنگ‌ها و سنگدانه‌ها منجر به تخریب کوه‌ها و رودخانه‌ها شده است که ممکن است مشکلات زیست‌محیطی زیادی را برای انسان به همراه داشته باشد. از سوی دیگر افزایش قیمت قیر پروژه‌های روسازی آسفالت را با مشکل مالی مواجه کرده است (Antunes, Neves, & Freire, 2021; Moniri, Ziari, Amini, & Hajiloo, 2022; Wang, Riccardi, Jafari, Falchetto, & Wistuba, 2021; Ziari, Amini, Moniri, & Habibpour, 2021; Ziari et al., 2023).

بنابراین، ضرورت و تمایل به استفاده از منابع پایدار موجود به سرعت در حال افزایش است. در نتیجه، مواد RAP در حال حاضر با جزئیات بیشتری برای استفاده بالقوه آنها در لایه‌های پایه روسازی جاده‌های انعطاف پذیر مورد بررسی قرار می‌گیرند. انتظار مزایای اقتصادی، زیست محیطی و پایداری مشابه برای استفاده از مواد RAP در لایه‌های پایه سازه‌های روسازی جاده منطقی است، در حالی که بررسی تأثیر بر رویه‌های طراحی کلی روسازی مورد نیاز است. فراتر از مزایای اقتصادی و زیست محیطی مواد RAP ادغام شده در سازه‌های روسازی، آگاهی از رفتار و عملکرد سازه‌ای آنها از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به گنجاندن RAP در لایه‌های روسازی محدود، بررسی‌های آزمایشگاهی و درجا نشان داده‌اند که با طراحی مناسب، مخلوط‌هایی از جمله مواد RAP می‌توانند به لایه‌های روسازی متصل با طول عمر و کیفیت مشابه در مقایسه با همان لایه‌های حاوی مصالح سنگدانه بکر دست پیدا کنند (H. Goli, Latifi, & Sadeghian, 2022; F. Hong, Chen, & Mikhail, 2010).

۲- پیشینه تحقیق

با وجود مزایای استفاده از مخلوط‌های RAP، فرآیند تولید آن‌ها شامل مراحل اضافی برای پردازش و هزینه‌های مرتبط با حمل و نقل است که می‌تواند بر اقتصاد تأثیر بگذارد. این هزینه‌ها ممکن است بیشتر از مزایای اولیه باشند، اما در صورت استفاده مجدد از مواد در محل یا ارائه مشوق‌های اقتصادی، هزینه‌های اضافی جبران می‌شود. استفاده مجدد از مواد آسفالت بازیافتی نه تنها به صرفه‌جویی در مواد بکر و کاهش هزینه‌های زیست‌محیطی ناشی از استخراج کمک می‌کند، بلکه به کاهش زباله‌های صنعتی و صرفه‌جویی در انرژی و فضای دفن زباله نیز منجر می‌شود. همچنین، بازیافت آسفالت به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند، به‌ویژه با استفاده از تکنیک‌های دمای پایین که می‌تواند انتشار را تا ۳۰ تا ۵۰ درصد کاهش دهد(Ziari et al., 2023; Ziari, Nasiri, Amini, & Ferdosian, 2019). مزایای اقتصادی، زیست‌محیطی و طراحی استفاده از RAP در لایه‌های محصور شناخته شده و مورد پشتیبانی تحقیقات است، اما اطلاعات درباره گنجاندن RAP در لایه‌های روسازی نامحدود محدود است. این موضوع اهمیت دارد زیرا دسترسی به سنگدانه‌های بکر برای همه لایه‌ها به تدریج دشوارتر می‌شود. در نتیجه، یافتن روشی برای کاهش استفاده از سنگدانه و قیر در تولید آسفالت می‌تواند از نظر زیست‌محیطی و مالی کارآمد باشد. قیر موجود در RAP معمولاً شکننده است و به دلیل اکسیداسیون و تبخیر شدن و سخت شدن ناشی از پیرشدگی، خاصیت ارتجاعی خود را از دست داده است. بنابراین استفاده از مقدار بالای مواد RAP باعث افزایش شکنندگی آسفالت و متعاقباً تضعیف رفتار ترک خوردگی روسازی می‌شود. تحقیقات بیشتر برای توسعه روش‌هایی برای استفاده حداکثر۴۰٪ از RAP 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 RAP در راهسازی را بهینه کنند (R. Bonaquist, 2005; R. F. Bonaquist, 2011). استراتژی‌های مختلفی برای بهبود عملکرد خستگی و ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی مانند استفاده از قیر نرم‌تر، افزایش درصد قیر بکر و استفاده از عوامل بازیافت یا جوان‌کننده‌ها وجود دارد.

با این حال، جوان‌کننده‌ها مؤثرتر بودند زیرا هم ویژگی‌های فیزیکی و هم شیمیایی بایندر قدیمی را بهبود می‌دادند. جوان کننده‌ها به عنوان تکنیکی برای بازیابی ویژگی‌های از دست رفته قیر کهنه مواد RAP به منظور اجازه‌دادن درصد بالاتر مواد RAP در مخلوط‌ها معرفی می‌شوند. در فرآیند پیرشدگی، ترکیب‌های آروماتیک قیر به آسفالتین تبدیل می‌شود و اجزای آسفالتین افزایش می‌یابد (Farooq, Mir, & Sharma, 2018; Pan, Kuang, Hu, & Zhang, 2018). در سال ۲۰۲۰، هانگ و همکاران (W. Hong et al., 2020) با بررسی تأثیر جوان ساز ترکیبی حاوی روغن آروماتیک و پلیمر SBS بر خواص قیرهایRAP نشان دادند که ترکیب پلیمر و جوان ساز بهبود قابل توجهی در خواص فیزیکی، رئولوژیکی و عملکرد دمای بالا و پایین قیرهای بازیافتی دارد. ردی و همکاران (Reddy, Ramesh, & Ramayya, 2022) سال ۲۰۲۲ با ارزیابی تاثیر مواد WMA بر مقاومت ترک‌خوردگی آسفالت حاوی RAP ادعا کردند که استفاده از ۳٪ ساسوبیت موجب افزایش قابل‌توجه مقاومت ترک‌خوردگی، کاهش عمق شیارشدگی و بهبود مقاومت رطوبتی می شود. کاستا و همکاران (Beserra Costa, de Medeiros Melo Neto, Christiane de Figueiredo Lopes Lucena, Elísio de Figueiredo Lopes Lucena, & Maria Sousa Gonçalves Luz, 2023) سال ۲۰۲۳ تأثیر مواد جوانساز و روش‌های بازیافت را بر مقاومت شکست و حساسیت رطوبتی آسفالت با مقدار RAP بالا را بررسی کردند. بر همین اساس، عملکرد شکست و مقاومت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر بالای RAP با استفاده از آزمایش‌های مکانیکی مقاومت کششی، مدول ارتجاعی، چرخه‌های یخ و ذوب و عمر خستگی تجزیه و تحلیل شد. نتایج این تحقیق حاکی از آن بود که استفاده از روغن موتور ضایعاتی امکان استفاده از RAP75% را فراهم می‌کند و افزودن مواد جوانساز به طور مستقیم به قیر عملکرد بهتری نسبت به سایر روش های نشان داد. از تحقیقات قبلی استنباط می‌شود که قیر بکر اصلاح شده پلیمری در بهبود خستگی و مقاومت در برابر ترک خوردگی مخلوط های RAP کارآمد است. با این حال قیر پلیمری برای مخلوط‌های با RAP بالا مؤثر نخواهد بود، زیرا میزان قیر بکر در این مخلوط‌ها بسیار کم است. بنابراین، از آنجایی که الیاف مستقیماً به مخلوط‌ها اضافه می‌شوند، می‌توانند جایگزینی برای جبران تأثیر منفی مواد RAP در مخلوط‌ها باشند. بر اساس نتایج قبلی، الیاف باعث بهبود خستگی و مقاومت در برابر ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی می‌شوند.

ترکیب پلی اولفین و الیاف شیشه یکی الیاف‌های ترکیبی است که اخیراً به صنعت آسفالت معرفی شده است.

ابوطالبی اصفهانی و نام آور جهرمی نشان دادند که استفاده از الیاف پلی اولفین–شیشه بر پایداری مارشال، استحکام کششی غیرمستقیم و مدول ارتجاعی مخلوط‌های آسفالتی تأثیر مثبت و معناداری دارد. همچنین مشخص شد که رفتار مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی وابستگی زیادی به طول الیاف دارد و الیاف با طول‌های ٦ تا ١٢ میلی‌متر بهترین عملکرد را نشان می‌دهند. انیب و همکاران (Enieb, Aboelkasim, & and Yang, 2021) به بررسی ویژگی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت مخلوط‌های آسفالت تقویت‌شده با الیاف شیشه پرداختند. آزمایش‌ها شامل مقاومت کششی غیرمستقیم، انرژی شکست، حساسیت به رطوبت، تطابق خزش و مدول الاستیسیته بود. نتایج آنها نشان داد که در مخلوط‌هایی با همان قیر، استفاده از الیاف شیشه ١٢ میلی‌متری تغییرات قابل توجهی در ویژگی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت نسبت به الیاف ٦ میلی‌متری ایجاد نمی‌کند. به طور کلی، الیاف شیشه می‌توانند ویژگی‌های مثبتی مانند افزایش مقاومت، مقاومت در برابر شیارشدگی، کاهش حساسیت به آسیب‌های رطوبتی، کاهش ترک‌خوردگی ناشی از خستگی و بهبود قابلیت ترمیم را به مخلوط آسفالت بدهند. همچنین، استفاده از الیاف شیشه در مخلوط‌های آسفالت می‌تواند به تولید روسازی‌های آسفالتی با دوام کمک کند. هرچند که ساخت روسازی‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه ممکن است در ابتدا هزینه‌بر باشد، اما با گذشت زمان می‌توان از مزایای آن مانند افزایش عمر مفید و کاهش هزینه‌های نگهداری بهره‌برداری کرد. نیگوین و همکاران (Nguyen et al., 2021) با توجه به نتایج پروژه تحقیقاتی به توسعه یک روش طراحی منطقی برای روسازی‌های تقویت‌شده پرداختند. آزمایش‌های آزمایشگاهی و شتاب‌زده در مقیاس کامل برای تعیین رابطه بین مقاومت خستگی نمونه‌های تقویت‌شده و غیرتقویت‌شده بر اساس موقعیت شبکه انجام شد و یک معیار طراحی خستگی کالیبره شد. مثال‌های طراحی با استفاده از روش پیشنهادی نشان می‌دهند که تقویت روسازی‌ها منجر به کاهش ضخامت آسفالت نسبت به راه‌حل‌های غیرتقویت‌شده می‌شود. همچنین، تأثیرات زیست‌محیطی شامل ارزیابی چرخه عمر، انتشار ذرات و بازیافت راه‌حل‌های روسازی تقویت‌شده بررسی شد. لین و همکاران (Lin et al., 2022) در تحقیقی پودر کامپوزیت GFRP بر پایه

اپوکسی به‌عنوان یک جایگزین پرکننده معدنی برای ساخت ماستیک‌های آسفالت بازیافت کردند و خواص ماستیک‌های آسفالت حاوی پودر GFRP بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که پودر GFRP زباله دارای سطح خاص بیشتری و چگالی کمتری نسبت به پرکننده‌های سنگ آهک است. ذرات استوانه‌ای منظم در پودر GFRP اثر ضد لغزش را نشان می‌دهند که عملکرد آسفالت ماستیک را در دماهای متوسط و بالا، مقاومت در برابر شیارشدگی و مقاومت در برابر خستگی بهبود می‌بخشد. با این حال، چگالی پایین پودر GFRP زباله که نسبت به پرکننده سنگ آهک در همان نسبت وزنی، حجم بیشتری را در ماستیک‌های آسفالت اشغال می‌کند، تأثیر منفی بر عملکرد در دماهای پایین دارد. همچنین، پودر GFRP زباله می‌تواند مقاومت به پیرشدگی و رطوبت ماستیک‌های آسفالت را بهبود بخشد. این تحقیق یک راه‌حل قابل اجرا برای بازیافت زباله‌های GFRP با مصرف انرژی و تولید آلودگی کم ارائه می‌دهد و به توسعه پایدار ساخت زیرساخت‌های روسازی کمک می‌کند. راج و همکاران (Abhijith, Raj, Varma, Ayyar, & Krishnan, 2023) سال ۲۰۲۳ ابتدا، یک روش فشرده‌سازی جدید برای ادغام شبکه‌های الیاف شیشه‌ای در مخلوط‌های آسفالت با استفاده از کمپکتور جعبه‌ای توسعه دادند. سپس، یک معیار جدید شکست خستگی پیشنهاد کردند تا اثر تقویت‌کننده شبکه الیاف شیشه‌ای را در آزمایش‌های خستگی آشکار کند.

به جای استفاده از کل انرژی اتلافی مربوط به هر چرخه بارگذاری، انرژی اتلاف‌شده به دلیل آسیب خستگی در محاسبه عمر خستگی مخلوط‌های آسفالت استفاده می‌شود. در نهایت، تأثیر واضحی از شبکه‌ها که در فاصله‌ای از محور بارگذاری قرار دارند. رامش و همکاران سال ۲۰۲۲ تلاش کردند تا طراحی مخلوط برای یک آسفالت گرم جدید (WMA) با افزودنی گرم Sasobit، دانه‌های بازیافتی آسفالت (RAP) و الیاف شیشه‌ای نانو (GF) را توسعه دهند. در این تحقیق، ترکیب‌های مخلوط‌های آسفالت با جایگزینی بالای ۷۰٪ RAP و نسبت‌های افزایشی GF از ۰,۲٪ تا ۰,٤٪ با گام‌های ۰,۱٪ انتخاب شد. یافته‌های آنها نشان داد که مخلوط‌های حاوی ۷۰٪ RAP و ۰,۳٪ GF نشان‌دهنده ۳,۳ برابر بار اوج پایدار، ۱,۷٦ برابر انرژی شکست و ۱,۸ برابر انرژی آزادسازی تنش بحرانی در مقایسه با مخلوط آسفالت مرجع بودند که اثربخشی این اصلاحات را تأیید می‌کند. همچنین، این مخلوط در زمینه نسبت مقاومت کششی (TSR)، مدول الاستیسیته و مقاومت در برابر شیارشدگی عملکرد رضایت‌بخشی نشان داد. دیلان و همکاران (Kılıç et al., 2025) سال ۲۰۲۵ به بررسی خواص مکانیکی، دوام و میکروساختاری کامپوزیت‌های فعال‌شده قلیایی (AAC) تقویت‌شده با الیاف شیشه‌ای (GF) و شامل دانه‌های بازیافتی آسفالت (RAP) به عنوان جایگزینی برای شن رودخانه‌ای (RS) پرداختند. سرباره کوره بلند آسیاب‌شده (GBFS) به عنوان قیر اصلی استفاده شده و RAP به میزان ۲۵٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ به‌صورت حجمی جایگزین RS شده است.

GF در سطوح مختلف ۰٪، ۰,۵٪ و ۱٪ اضافه شده است. نتایج نشان داد که جایگزینی RS با ۲۵٪ RAP منجر به بالاترین مقاومت فشاری شده است. همچنین، جایگزینی RS با ۵۰٪ RAP نیز باعث افزایش مقاومت فشاری نسبت به مخلوط مرجع شد. با این حال، وقتی RS با ۱۰۰٪ RAP جایگزین شد، کاهش جزئی در مقاومت فشاری مشاهده شد که مستقل از شرایط عمل‌آوری یا افزودن GF بود. مخلوط حاوی ۲۵٪ RAP و ۰٪ GF بالاترین مقاومت فشاری را نشان داد، در حالی که مخلوط با ۱۰۰٪ RAP و ۱٪ GF پایین‌ترین مقاومت فشاری را تحت شرایط محیطی و عمل‌آوری در ۸۰ درجه سانتی‌گراد داشت. GF به‌طور قابل توجهی مقاومت خمشی مخلوط‌های AAC را افزایش داد، به‌طوری که مخلوط حاوی ۱٪ GF و ۲۵٪ RAP حداکثر مقاومت خمشی را با افزایش ۲٤,۲۷٪ نسبت به مخلوط مرجع به‌دست آورد. این مطالعه پتانسیل استفاده از RAP در کامپوزیت‌های فعال‌شده قلیایی را برای توسعه مصالح ساختمانی دوستدار محیط زیست مورد تأکید قرار می‌دهد.

با توجه به کمبود منابع طبیعی و افزایش قیمت قیر، مهندسان روسازی به سمت استفاده از مواد روسازی آسفالتی احیا شده (RAP) روی آورده‌اند. این تغییر در ترکیب مواد، به ویژه با محتوای بالای RAP، مشکلاتی نظیر کاهش عملکرد در خستگی و ترک‌خوردگی را به همراه دارد. به‌طور خاص، وجود قیر سفت در RAP می‌تواند کارایی مخلوط‌های جدید را تحت تأثیر قرار دهد. در این راستا، تحقیق حاضر با استفاده از الیاف ترکیبی شیشه–پلی‌الفین (PGF) به بررسی تأثیر این مواد بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۵۰ درصد RAP پرداخته است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده بهینه از PGF موجب بهبود خواص مکانیکی و عملکرد مخلوط‌ها در برابر پیرشدگی می‌شود.

هدف اصلی این تحقیق، بررسی تأثیر درصدهای مختلف الیاف پلی‌اولفین-شیشه (PGF) در مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۵۰ درصد مواد روسازی آسفالتی احیا شده (RAP) و تحلیل اثر پیرشدگی بر خواص مکانیکی این مخلوط‌ها است. با توجه به شکاف‌های موجود در مطالعات پیشین، این تحقیق به دنبال تعیین درصد بهینه PGF برای بهبود عملکرد خستگی، ترک‌خوردگی و سایر خواص مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی است. استفاده از آزمون‌های مدول ارتجاعی، خزش دینامیکی و آزمایش‌های شکست خمشی نیمه دایره‌ای (SCB) به‌عنوان ابزارهای ارزیابی، به شفاف‌سازی تأثیرات مختلف بر عملکرد مخلوط‌ها کمک خواهد کرد. نوآوری این تحقیق در استفاده از ترکیب خاصی از الیاف و بررسی اثرات آن در شرایط پیرشدگی است که تاکنون به‌طور جامع مورد مطالعه قرار نگرفته است. این رویکرد به‌ویژه در زمینه بهینه‌سازی مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی با محتوای بالا از RAP اهمیت دارد. نتایج این تحقیق می‌تواند به توسعه روش‌های جدید در طراحی و تولید آسفالت‌های اصلاح‌شده با الیاف کمک کند و به بهبود عملکرد و دوام آن‌ها در شرایط مختلف آب و هوایی و ترافیکی منجر شود. با این حال، علی‌رغم پیشرفت‌های صورت‌گرفته، هنوز تحقیقات کافی درباره درصد بهینه این الیاف در مخلوط‌های حاوی RAP و تأثیرات پیرشدگی بر خواص مختلف مخلوط‌های آسفالتی وجود ندارد. این شکاف در دانش علمی ضرورت انجام تحقیق حاضر را نمایان می‌کند، زیرا تعیین درصدهای مناسب PGF می‌تواند به بهبود عملکرد آسفالت‌های بازیافتی کمک کند. به‌ویژه، ارزیابی تأثیر پیرشدگی بر خواص مکانیکی مخلوط‌ها با استفاده از آزمون‌های مختلف، زمینه‌ساز توسعه روش‌های بهینه‌سازی در طراحی مخلوط‌های آسفالتی خواهد بود.

۳-روش تحقیق و مصالح آزمایشگاهی قیر و مواد آزمایشگاهی

در این تحقیق از قیر PG 64-22 تهیه شده از شرکت نفت جی به عنوان قیر بکر استفاده شد. برای تولید مخلوط آسفالتی از سنگدانه‌های آهکی به دست آمده از معادن شرکت اسکانده واقع در شرق اصفهان استفاده شده است. برای تقویت نمونه‌های آسفالت از الیاف شیشه- پلی الفین (PGF) ترکیبی با ترکیب الیاف شیشه/پودر الفین با نسبت ۲۵/۷۵ استفاده شده است.

نقطه ذوب، وزن مخصوص و طول الیاف شیشه مصرفی به ترتیب ۸۷۰ درجه سانتی‌گراد، ۱/۱۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب و ۱۲ میلی‌متر بوده است.

در حالی که وزن مخصوص و نقطه ذوب پودر مصرفی به ترتیب ۰/۹۲ گرم بر سانتی متر مکعب و ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد بود. برای تهیه RAP از آسفالت جاده کاشان- اردستان- نایین که دارای قیر ۶۰/۷۰ می‌باشد استفاده شده است. همچنین استخراج قیر از مواد RAP در دو مرحله انجام شده است.

ابتدا قیر موجود در RAP 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. دانه بندی سنگدانه‌های استخراج شده از مواد RAP در محدوده مجاز ASTM D2172 برای حداکثر اندازه اسمی سنگدانهئ .کگ/گجچ= ۱۹ میلی‌متر بود. همچنین، از سایکولوژن به عنوان عامل جوانساز مواد RAP استفاده شد. غلظت جوان ساز بر اساس رده عملکرد قیر پیر شده با درصدهای مختلف بازیافت شده از مواد RAP تعیین شد (Zaumanis, Mallick, & Frank, 2014). رده عملکردی قیر RAP معادل PG82-10 بود که با افزودن ۶٪ سایکولوژن به PG70-16 ارتقا یافت.

۴-طرح اختلاط آسفالت

روش طراحی مخلوط مارشال برای تعیین طراحی مخلوط و خواص حجمی مخلوط‌های حاوی ۵۰ درصد مواد RAP بر اساس AASHTO T245 استفاده شد. برای این منظور، ابتدا مصالح بکر و مواد RAP به ترتیب به مدت ۱۶ و ۲ ساعت در دمای ۱۷۵ درجه سانتیگراد اوون نگهداری شدند. سپس جوان کننده مستقیماً به مواد RAP اضافه شد و مواد RAP جوان شده با سنگدانه‌های بکر مخلوط شدند. سپس PGF به تدریج به سنگدانه‌ها اضافه شد. در نهایت، RAP و سنگدانه‌ها با قیر بکر مخلوط شدند. سپس کل مخلوط ها به مدت دو ساعت در دمای تراکم قرار گرفتند. نمونه های با پیرشدگی کوتاه مدت (STA) و با پیرشدگی طولانی مدت (LTA) در دمای ۱۳۵ به مدت چهار ساعت قبل از فشرده سازی قرار گرفتند. پس از آن، همه نمونه‌ها توسط متراکم کننده ژیراتوری فشرده شدند تا به فضای خالی هوای هدف برسند (۷٪ برای آزمایش‌های خزش دینامیکی، حساسیت به رطوبت و آزمایش‌های شکست و ۴٪ برای آزمایش‌های مدول ارتجاعی و خستگی). سپس نمونه‌های LTA در دمای ۸۵ درجه سانتیگراد به مدت ۱۲۰ ساعت برای پیرشدگی LTA قرار گرفتند. تمام مراحل آماده سازی نمونه بر اساس توصیه‌های AASHTO R30 انجام شد (Aashto, 2002). قابل ذکر است که دمای اختلاط و تراکم بر اساس

ویسکوزیته قیر (۵۰ درصد قیر RAP با جوانساز و ۵۰ درصد قیر بکر) به ترتیب ۱۶۰ درجه سانتیگراد و ۱۳۵ درجه سانتیگراد انتخاب شد.

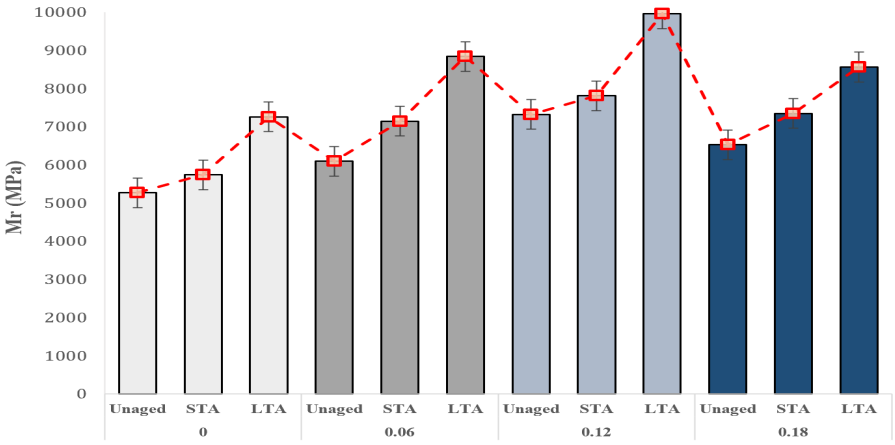
٤-١-آزمایش‌های عملکردی

مدول ارتجاعی به عنوان یک مشخصه اساسی مخلوط‌های آسفالتی در نظر گرفته می‌شود که به عنوان ورودی برای طراحی سازه‌های روسازی استفاده می‌شود. این ویژگی با استفاده از استاندارد ASTM D7369 و محاسبه نسبت انحراف محوری مکرربه کرنش محوری قابل بازیافت تعیین می‌شود. برای این منظور یک بار خطی چرخه‌ای با زمان بارگذاری ۱۰۰ میلی ثانیه و دوره استراحت ۹۰۰ میلی ثانیه بر روی نمونه‌های استوانه‌ای در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد اعمال شد(Ziari, Divandari, Hajiloo, & Amini, 2019). برای بررسی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر رطوبت از آزمایش لاتمن اصلاح شده بر اساس AASHTO T283استفاده شد. معیار حساسیت به رطوبت به عنوان نسبت استحکام کششی (TSR) تعریف می‌شود. روش تهویه رطوبت شامل اشباع نمونه‌ها تا سطح ۷۰ تا ۸۰ درصد، غوطه ور کردن آنها در ۱۰ متر آب و قرار دادن آنها در فریزر ۱۸ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۶ ساعت و سپس در حمام آب ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت بود. سپس تمام مخلوط‌های خشک شده قبل از آزمایش به مدت ۲ ساعت در دمای محیط ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند (Amini, Ziari, Saadatjoo, Hashemifar, & Goli, 2021). مقاومت شیارشدگی نمونه‌های آسفالتی از طریق آزمایش خزش دینامیکی و مطابق با استاندارد NCHRP 9-19 تعیین شد. شرایط این آزمایش شامل تنش ۴۰۰ کیلو پاسکال با بارگذاری ۰,۱ ثانیه و دوره استراحت ۰,۹ ثانیه و دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد بود (A. Goli, Ziari, & Amini, 2017). عمر خستگی نمونه‌های آسفالتی از طریق آزمایش خستگی کششی غیرمستقیم (ITFT) و بر اساس استاندارد EN 12697 تعیین شد. مشخصات اعمال شده در این آزمایش شامل بارگذاری با زمان ۱۰۰ میلی‌ثانیه و دوره استراحت ۴۰۰ میلی‌ثانیه اعمال شد. آزمایش در شرایط کنترل تنش با سطوح تنش ۲۵۰ کیلو پاسکال و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. معیار مقاومت در برابر خستگی به عنوان چرخه باری تعریف شد که در آن نمونه شکست می‌خورد یا کرنش کششی حاصل به دو برابر مقدار خود در سیکل ۱۰۰ می‌رسد (Ziari et al., 2020a). عملکرد ترک خوردگی نمونه‌های آسفالتی با استفاده از آزمون شکست SCB در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد ارزیابی شد. نمونه SCB یکی از مناسب‌ترین هندسه‌های نمونه برای انجام آزمایش‌های شکست مخلوط آسفالتی است. نمونه‌هایSCB با برش نمونه‌های استوانه‌ای آسفالت مطابق با ASTM D 8044 آماده شدند. سپس آزمون‌های شکست SCB با مد I با اعمال بار یکنواخت با سرعت ثابت ۰,۵ میلی‌متر در دقیقه با استفاده از دستگاه فشاری کششی انجام شد(Moniri et al., 2022).

٤-٢-مدول برجهندگی

نتایج آزمایش مدول برجهندگی در شکل ۱ ارائه شده است. با توجه به روند نتایج، آشکار است که مدول ارتجاعی همه مخلوط‌های بازیافتی با پیر شدگی افزایش می‌یابد و مدول ارتجاعی مخلوط‌های بازیافتی نسبت به مخلوط اصلاح شده با PGF به پیرشدگی حساس‌تر است. با مقایسه جوان‌کننده‌ها، همچنین مشاهده می‌شود که مدول مدول ارتجاعی نمونه‌های حاوی ۰,۱۲درصد PGF تقریباً ٤٠٪ افزایش یافته است. در حالی که افزایش مقدار اصلاح کننده از ۰,۱۲٪ به ۰,۱۸٪ منجر به کاهش قابل توجهی در مدول ارتجاعی شد. با این حال، اعداد بدست آمده برای مخلوط‌های با ۰,۱۸٪ الیاف پلی اولفین–شیشه هنوز بیشتر از مخلوط کنترل بود. افزایش مدول ارتجاعی عمدتاً به دلیل اثر سفت کنندگی پلی اولفین بر روی قیر بود. پراکندگی سه بعدی الیاف شیشه در مخلوط همچنین بر مقاومت مخلوط در برابر تغییر شکل و متعاقباً مدول ارتجاعی آن تأثیر می‌گذارد، به ویژه هنگامی که تحت بار کششی غیرمستقیم قرار می‌گیرد.

کاهش مدول ارتجاعی، که زمانی رخ داد که ۰,۱۸٪ از الیاف استفاده شد، می تواند به تجمع الیاف شیشه در طول تولید نسبت داده شود.



شکل ۱. نتایج آزمایش مدول برجهندگی

٤-٣-حساسیت رطوبتی

نتایج مقادیر خشک و مرطوب ITS انجام شده در طول آزمایش لاتمن اصلاح شده در شکل ۲ ارائه شده است. می‌توان مشاهده کرد که افزایش مقدار PGF از ۰,۰٦ به ۰,۱۲ درصد سبب افزایش مقدار ITS شده است. مقادیر ITS همان روند مدول ارتجاعی را دنبال کردند و با افزودن PGF بیشتر کاهش یافتند. با این حال، روند تغییرات TSR با افزایش مقدار PGF رابطه مشخصی ندارد. بطوری که در نمونه‌های پیرنشده، افزایش مقدار الیاف به ۱۲.۰ و ۰,۱۸ درصد تاثیر مثبت محسوسی بر بهبود مقاومت رطوبتی و افزایش TSR داشته است. در حالی که برای نمونه‌های پیرشده، تغییرات TSR با افزایش مقدار PGF رابطه مشخص نداشته است. بطوری که محدوده TSR برای نمونه‌های پیرشده و تحت تاثیر استفاده از PGF با مقادیر مختلف در بین محدوده ۷۵ تا ۸۰ بوده است. به عبارت دیگر، افزایش مقدار الیاف مصنوعی از ۰,۱۲٪ به ۰,۱۸٪ تاثیر محسوسی بر مقاومت مخلوط در برابر رطوبت نداشته است. نتایج همچنین نشان می‌دهد که پیرشدگی باعث کاهش جزئی مقاومت در برابر رطوبت مخلوط‌ها می‌شود. این تاثیرگذاری در نمونه‌های حاوی ۰,۱۲ و ۰,۱۸ درصد الیاف بیشتر نمایان است و پیرشدگی مقدار TSR را تا ۱۰ درصد کاهش داده است. دلیل آن این است که پیرشدگی منجر به ایجاد حفره‌های به هم پیوسته بیشتری در مخلوط‌ها می‌شود که رطوبت می‌تواند از طریق آنها جریان یابد و خرابی شدیدتری ایجاد کند. این اتفاق در نمونه‌های حاوی الیاف بیشتر نمایان است.

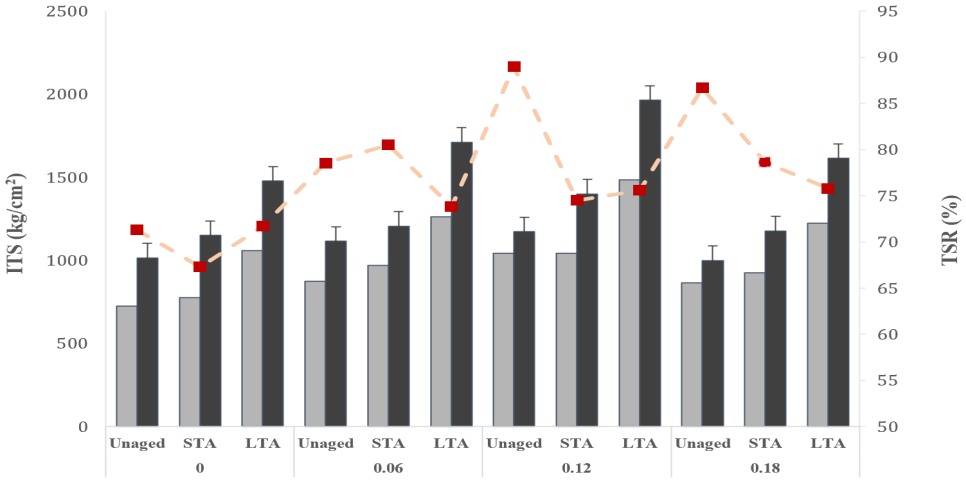
٤-٤-مقاومت شیارشدگی

شکل ۳ نتایج آزمایش خزش دینامیکی را برای بررسی شیارشدگی مخلوط های آسفالتی نشان داده است. افزودن PGF منجر به کاهش متوسط کرنش دائمی شده است و با افزایش مقدار آن، مخلوط ها در برابر شیارشدگی مقاوم‌تر می‌شوند. این عملکرد عمدتاً به دلیل اثر سفت‌کنندگی پودرهای پلی‌الفین بر روی قیر و متعاقباً روی مخلوط است. مطالعات قبلی در مورد تأثیر پلیمرهای پلی الفین بر روی خواص قیر، افزایش مدول پیچیده و بهبود پتانسیل ضد شیار شدگی قیرها را هنگام اصلاح با پلی‌اولفین نشان داده است (Roman & Garcia-Morales, 2017). علاوه بر این، جدا از اثر جزئی پلی الفین، تقویت الیاف شیشه نیز می‌تواند بر مقاومت شیارشدگی مخلوط های آسفالتی تأثیر بگذارد (Fazaeli, Samin, Pirnoun, & Dabiri, 2016). همچنین، با مقایسه نتایج آزمایش خزش و نتایج ITS و Mr می‌توان نتیجه گرفت که افزایش مقدار PGF تاثیر مثبت بر بهبود مقاومت شیارشدگی داشته است. در آزمایش خزش دینامیکی، بارگذاری فشاری بر روی نمونه اعمال می‌شود و کرنش کششی در هیچ جهتی تجربه نمی‌شود. بنابراین، از آنجایی که الیاف در کرنش‌های کششی کارآمدتر هستند، تجمع در آزمایش‌های ITS و مدول ارتجاعی مضرتر بود. ترکیب هم افزایی پودر الفین و الیاف شیشه تاثیر محسوسی بر افزایش مقدار FN و کاهش شیارشدگی داشته است. همچنین، پیرشدگی مخلوط‌ها را در برابر شیارشدگی مقاوم‌تر کرده است. با این حال، اثر آن برای مخلوط‌های مختلف مورد مطالعه مشابه نیست. بطوری که تاثیر LTA نسبت به STA بر افزایش عدد روانی و مقاومت در برابر شیارشدگی به مراتب بیشتر بوده است و مخلوط‌ها افزایش شدید FN هنگام قرار گرفتن در شرایط LTA تجربه کردند.

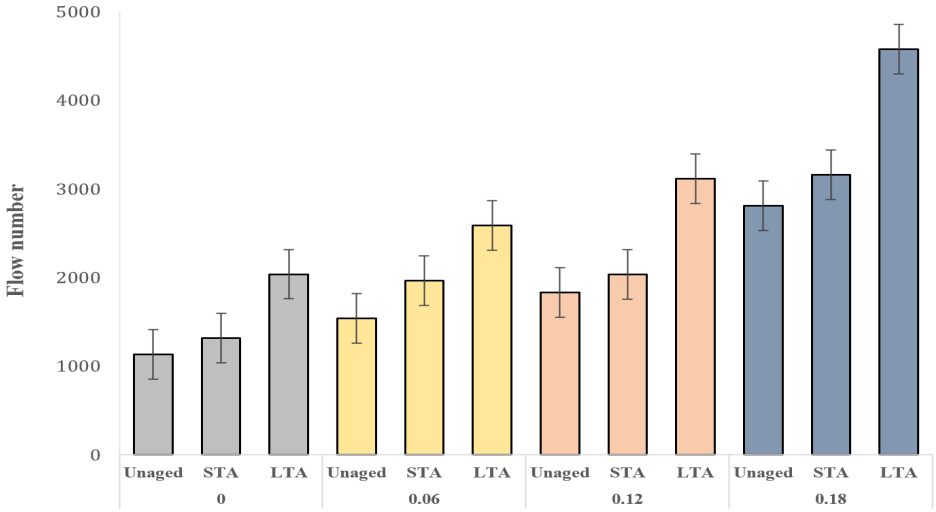
٤-٥-عمر خستگی

نتایج آزمایش‌های ITFT در شکل ۳ نشان داده که افزودن ۰/۱۲ درصد PGF در مخلوط‌های آسفالتی، عمر خستگی را افزایش داده است. در حالی که عمر خستگی مخلوط‌ها با افزایش محتوای فیبر از ۰,۱۲٪ به ۰,۱۸٪ کاهش می‌یابد. افزایش عمر خستگی عمدتاً به دلیل توزیع سه بعدی الیاف شیشه در مخلوط و انسجام بیشتر بین ماستیک و سنگدانه‌ها با افزودن الیاف شیشه است که منجر به تمرکز تنش کمتر و متعاقباً مقاومت در برابر خستگی بیشتر می‌شود. همچنین می‌توان از نتایج استنباط کرد که افزودن الیاف برای بهبود عمر خستگی موثر است. این رفتار را می‌توان به تأثیر ذرات پلی الفین بر روی خواص رئولوژیکی قیر نسبت داد که منجر به کاهش پتانسیل خستگی قیر و مخلوط‌های مربوط می‌شود (Roman & Garcia-Morales, 2017).

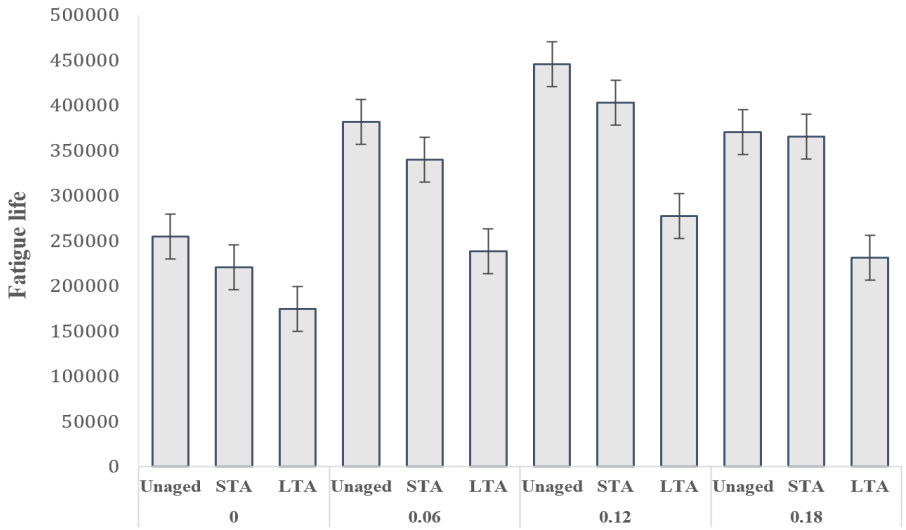
همچنین، افزایش شدت پیرشدگی عمر خستگی را کاهش داده است که این کاهش برای نمونه‌های LTA با شدت بیشتری تاثیر گذاشته است. بطوری که بیشترین عمر خستگی در نمونه‌های پیرنشده اصلاح شده با ۰,۱۲ درصد PGF مشاهده شده است.



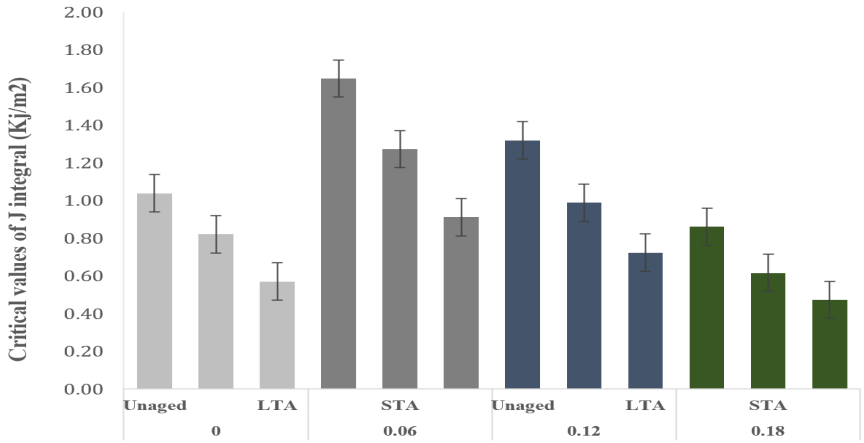
شکل ۲. نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی



شکل ۳. نتایج آزمایش خزش دینامیکی



شکل ٤. نتایج آزمایش عمر خستگی



شکل ۵. نتایج آزمایش مقاومت شکست

٤-٦-مقاومت شکست

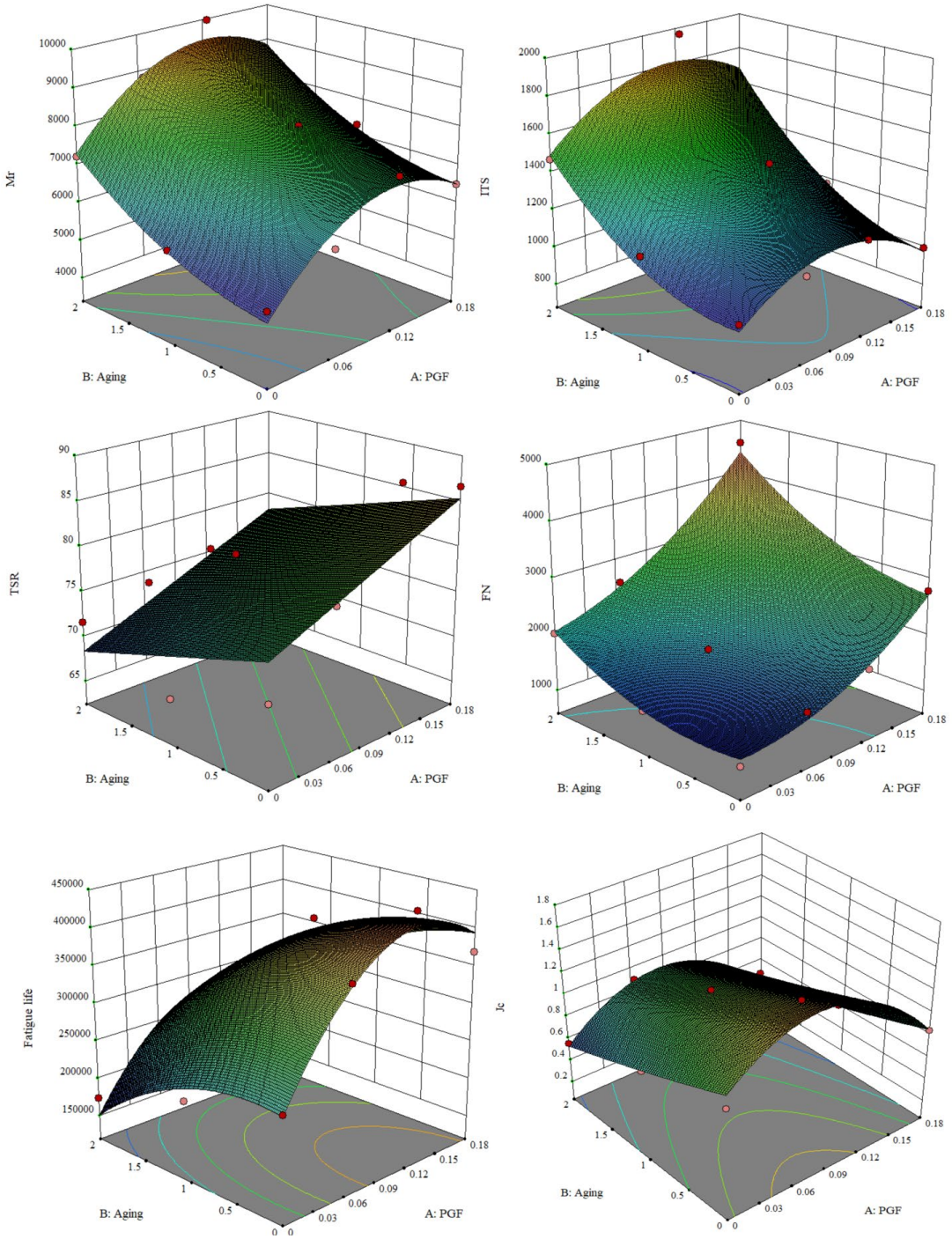
مقادیر بحرانی انتگرال J در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، نتایج Jc و مقاومت ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی با افزودن PGF بهبود می‌یابد. البته این بهبود تا ۰/۱۲ درصد PGF مشهود بوده و افزایش مقدار بیشتر آن سبب کاهش مقاومت ترک خوردگی شده است. این عملکرد عمدتاً نتیجه تقویت مخلوط‌های آسفالتی با الیاف شیشه‌ای با مقاومت بالا است که به عنوان پل بر روی ترک‌ها عمل کرده و از انتشار آنها جلوگیری می‌کند (Roman & Garcia-Morales, 2017). با این حال، مقدار بیش از حد اصلاح کننده منجر به کاهش Jc به دلیل تجمع الیاف و شکنندگی مخلوط شد. همچنین مشاهده شده است که پیرشدگی تأثیر مخربی بر ترک‌خوردگی دارد. به طوری که بالاترین و کمترین مقاومت ترک خوردگی به ترتیب مربوط به نمونه‌های پیرنشده حاوی PGF0.06 و پیرشده بلند مدت حاوی PGF0.18 است.

تحلیل نمودارهای سه بعدی

در شکل ٦ نمودارهای هم افزایی شدت پیرشدگی و مقدار PGF بر مشخصات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی نشان داده شده است. با توجه به کیفی بودن شدت پیرشدگی، برای عدم اعمال پیرشدگی، STA و LTA به ترتیب اعداد ۰، ۱ و ۲ منظور شد. با توجه به نمودارها، مشخص است همه مشخصات مکانیکی به جز شاخص TSR تحت تاثیر تعاملی شدت پیرشدگی و مقدار PGF و رابطه غیرخطی می‌باشند. در حالی که تاثیر PGF و پیرشدگی بر TSR مستقل بوده و خطی بوده است.

در حالت بدون پیرشدگی، نتایج نشان‌دهنده عملکرد بهینه الیاف PGF در مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی است. مقادیر مدول الاستیسیته (Mr) به ٦٩٥١ و مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) به ١١٤٥ رسیده است که نشان‌دهنده استحکام و پایداری مناسب مخلوط است. همچنین، نسبت مقاومت کششی (TSR) برابر با ٨٤ و طول عمر خستگی (Fatigue life) به ٤٣٤١٢٩ افزایش یافته که نشان‌دهنده قابلیت بالای این مخلوط‌ها در برابر خستگی و ترک‌خوردگی است. این نتایج تأیید می‌کند که PGF می‌تواند به‌طور مؤثری خواص مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی را بهبود بخشد و نشان‌دهنده پتانسیل بالای این الیاف در بهینه‌سازی عملکرد آسفالت‌های بازیافتی است.

در حالت STA، نتایج نشان می‌دهد که PGF همچنان تأثیر مثبتی بر روی خواص مکانیکی دارد، اما برخی از مشخصات کاهش یافته است. مقادیر Mr به ۷۵۹۰ و ITS به ۱۲۳۳ رسیده‌اند که هر دو بالاتر از حالت بدون پیرشدگی هستند. با این حال، TSR به ۷۵ کاهش یافته است، که ممکن است نشان‌دهنده ضعف در چسبندگی مخلوط در شرایط پیرشدگی کوتاه‌مدت باشد. همچنین، طول عمر خستگی به ۳۸۰۷٦۸ کاهش یافته که نشان‌دهنده کاهش قابلیت دوام مخلوط‌ها در برابر خستگی است. این نتایج اهمیت مدیریت شرایط پیرشدگی و نیاز به بهینه‌سازی بیشتر مخلوط‌ها برای حفظ عملکرد در برابر پیرشدگی را نشان می‌دهد. در حالت پیرشدگی بلندمدت، نتایج به‌طور کلی بهبود قابل‌توجهی را نشان می‌دهد. مقادیر Mr به ٩٦٤٣ و ITS به ١٨٦٩ افزایش یافته‌اند، که نشان‌دهنده بهبود در استحکام و چسبندگی مخلوط است. TSR در این حالت به ٧٤ نزول کرده، اما نسبت به حالت STA بهتر است، که ممکن است به دلیل بهبود خاصیت الاستیکی و مقاومت در برابر خستگی ناشی از PGF باشد. همچنین، طول عمر خستگی به ٢٦٨٠١٩ کاهش یافته که می‌تواند به تأثیر منفی پیرشدگی بلندمدت بر روی عملکرد مخلوط‌ها اشاره کند. این نتایج نشان می‌دهد که PGF می‌تواند در شرایط پیرشدگی بلندمدت به بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی کمک کند. نتایج بهینه‌سازی مقدار PGF در سه حالت مختلف پیرشدگی نشان‌دهنده تأثیرات قابل توجه این الیاف بر خواص مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی است. در حالی که PGF در حالت بدون پیرشدگی و حتی در حالت STA به بهبود قابل‌توجهی در خصوصیات مکانیکی کمک می‌کند، تأثیر آن در حالت LTA نیز قابل توجه است. این نتایج به مهندسان و محققان کمک می‌کند تا با توجه به شرایط مختلف پیرشدگی، بهترین ترکیب PGF را برای بهینه‌سازی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی انتخاب کنند. به طور کلی، استفاده از PGF می‌تواند به عنوان راهکاری مؤثر در بهبود دوام و عملکرد آسفالت‌های بازیافتی در شرایط مختلف عمل کند.



شکل ٦. اثرات هم افزایی PGF و شدت پیرشدگی بر مشخصات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی

بهینه‌سازی مقدار الیاف

با توجه به نتایج متناقض در خصوص تاثیر افزایش مقدار PGF بر مشخصات مکانیکی آسفالت‌های بازیافتی، در این بخش تلاش شد تا مقدار بهینه PGF در شدت‌های مختلف پیرشدگی تعیین شود. ارزیابی آماری و بهینه‌سازی چند هدفه در این مطالعه برای شناسایی موثرترین مقدار PGF به کار گرفته شد که منجر به ایجاد یک مخلوط آسفالتی با بهترین ویژگی‌ها می‌شود. بنابراین، پاسخ‌های هدف شامل Mr، ITS، TSR، FN، عمر خستگی و Jc همگی به حداکثر مقادیر خود تنظیم شدند. جدول ۱، خلاصه نتایج بهینه سازی مقدار PGF در مخلوط‌های بازیافتی در شدت های مختلف پیرشدگی نشان داده است.

در حالت بدون پیرشدگی، مشخصات مکانیکی شامل مدول الاستیسیته (Mr)، مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS)، نسبت مقاومت کششی (TSR)، و طول عمر خستگی (Fatigue life) به ترتیب مقادیر بالایی را نشان می‌دهند. این نتایج تأیید می‌کند که استفاده از PGF در مخلوط‌های بازیافتی به بهبود خواص مکانیکی کمک می‌کند و نشان‌دهنده پتانسیل بالای این الیاف در افزایش عملکرد مخلوط‌ها است. در حالت پیرشدگی STA، افزایش مقدار PGF تأثیر مثبتی بر روی مشخصات مکانیکی دارد، به‌طوری‌که مقادیر مدول الاستیسیته و ITS به ۷۵۹۰ و ۱۲۳۳ افزایش یافته است. با این حال، TSR و طول عمر خستگی نسبت به حالت بدون پیرشدگی کاهش یافته است، که ممکن است به دلیل ضعف در ترکیب مواد پس از پیرشدگی کوتاه‌مدت باشد. این نکته حاکی از این است که در شرایط پیرشدگی، نیاز به توجه بیشتری به طراحی مخلوط‌ها وجود دارد تا عملکرد آن‌ها حفظ شود. در حالت پیرشدگی LTA، نتایج نشان می‌دهد که PGF به‌طور قابل توجهی بر روی مشخصات مکانیکی تأثیر می‌گذارد. افزایش مقادیر Mr به ۹۶۴۳ و ITS به ۱۸۶۹ نشان‌دهنده بهبود در عملکرد مخلوط‌های آسفالتی است، در حالی که TSR و طول عمر خستگی نیز در مقایسه با حالت STA افزایش یافته‌اند. این بهبود در شرایط پیرشدگی طولانی‌مدت می‌تواند به دلیل بهبود خاصیت الاستیکی و مقاومت در برابر خستگی ناشی از PGF باشد. به‌طور کلی، این جدول نتایج مهمی درباره تأثیر PGF بر ویژگی‌های مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی ارائه می‌دهد. مشخص است که شرایط پیرشدگی تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد مخلوط‌ها دارد و بهینه‌سازی مقدار PGF می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی در وضعیت‌های مختلف پیرشدگی کمک کند. این نتایج می‌تواند به مهندسان و محققان در طراحی مخلوط‌های آسفالتی کمک کند تا کارایی و دوام آن‌ها را در شرایط مختلف بهبود بخشند. جدول نشان می‌دهد که برای هر حالت پیرشدگی (بدون پیرشدگی، پیرشدگی کوتاه‌مدت و پیرشدگی بلندمدت)، مقادیر مختلفی از PGF استفاده شده و نتایج بهینه‌سازی بر اساس این سطوح بررسی شده است. تحلیل دقیق هر یک از این سطوح می‌تواند به درک بهتر چگونگی تأثیر PGF بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی کمک کند.

در حالت بدون پیرشدگی ، مقدار بهینه PGF برابر با ۰,۱۲۰۰ است. این سطح PGF موجب دستیابی به بالاترین مقادیر در مدول الاستیسیته (Mr) و طول عمر خستگی (Fatigue life) شده است. به‌طور خاص، این مقدار بهینه به عملکرد مناسب مخلوط‌ها در شرایط بدون پیرشدگی کمک می‌کند و نشان‌دهنده این است که PGF می‌تواند به تقویت خواص مکانیکی آسفالت‌های بازیافتی کمک کند.

در این STA ، مقدار بهینه PGF برابر با ۰,۰۹۰ است. با این که این مقدار نسبت به حالت بدون پیرشدگی کاهش یافته است، همچنان تأثیر مثبتی بر روی مشخصات مکانیکی مخلوط‌ها دارد. در این حالت، افزایش PGF به ۰,۰۹۰ منجر به افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) و مدول الاستیسیته (Mr) می‌شود، اما TSR کاهش یافته است. این نکته حاکی از این است که در شرایط پیرشدگی کوتاه‌مدت، بهینه‌سازی دقیق PGF می‌تواند به حفظ تعادل بین خواص مکانیکی و چسبندگی کمک کند.

برای حالت LTA ، مقدار بهینه PGF برابر با ۰,۱۱۵۰ است. این مقدار بهینه نشان‌دهنده افزایش عملکرد مخلوط‌ها در برابر پیرشدگی بلندمدت است. مقادیر بالاتر مدول الاستیسیته و مقاومت کششی غیرمستقیم در مقایسه با حالت STA نشان می‌دهد که PGF به بهبود خواص آسفالت در شرایط پیرشدگی طولانی‌مدت کمک می‌کند. این بهینه‌سازی می‌تواند به کاهش تأثیرات منفی پیرشدگی بر روی عملکرد مخلوط‌ها منجر شود.

مقادیر بهینه PGF در هر سه حالت پیرشدگی نشان‌دهنده اهمیت تنظیم دقیق درصد الیاف در طراحی مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی است. این مقادیر بهینه نه تنها بر روی خواص مکانیکی مخلوط تأثیر می‌گذارند، بلکه بر روی چسبندگی و عملکرد کلی آسفالت نیز تأثیر دارند. به‌طور کلی، استفاده از مقادیر بهینه PGF می‌تواند به بهبود دوام و کارایی مخلوط‌های آسفالتی در شرایط مختلف کمک کند.

جدول ۱. خلاصه نتایج بهینه سازی مقدار PGF در مخلوط‌های بازیافتی در شدت‌های مختلف پیرشدگی

Factor	Aging severity	Name	Level	Low Level	High Level	Std. Dev.	Coding
A	Unaged	PGF	0.1200	0	0.18	0	Actual
A	STA	PGF	0.090	0	0.18	0	Actual
A	LTA	PGF	0.1150	0	0.18	0	Actual
Response	Predicted Mean	Std Dev	SE Mean	95% CI low	95% CI high	95% TI low	95% TI high
Aging severity: Unaged							
Mr	6951	539.56	402	1838.1	12065	-17752.8	31656.7
ITS	1145	42.6032	31	742.0	1549	-804.818	3096.52
TSR	84	4.20563	2.2	74.23	93	29.5697	138.592
FN	208	239.399	130	1523.	2643	-1019.7	5186.21
Fatigue life	434129	16774.3	12512.	275147	593110	-333913	1.20E+06
Jc	1.28	0.1396	0.104	-0.0363219	2.61	-5.10613	7.6802
Aging severity: STA							
Mr	7590	86.49	69.22	6711.01	8470	3600.62	11580.7
ITS	1233	113.0	56.50	1053.56	1413	250.465	2216.27
TSR	75	5.635	2.817	63.1103	87.3	2.9168	147.55
FN	2119	307.8	153.9	1457.34	2782.	-1831.58	6071.02
Fatigue life	380768	10230.	8188.3	276725	4848	-91171.2	852708
Jc	0.78	0.0791	0.0633	-0.0184677	1.591	-2.86548	4.43885
Aging severity: LTA							
Mr	9643	458.64	338.92	5337.41	13950	-11335.9	30623.6
ITS	1869	138.8	102.63	565.525	3173.	-4483.43	8222.61
TSR	74	0.6937	0.3816	73.3089	76.59	65.9465	83.9555
FN	3496	354.5	195.03	2657.61	4335.	-1104.81	8098.37
Fatigue life	268019	13610.7	10057.9	140220	395817	-354578	890615
Jc	0.386	0.02642	0.01953	0.138768	0.6350	-0.822033	1.59589

۵-نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، تأثیر هم افزایی شدت پیرشدگی و الیاف ترکیبی پلی الفین- شیشه بر مشخصات مکانیکی و عملکردی مخلوط های آسفالتی بازیافتی بررسی شد. همچنین، RSM برای انجام بهینه‌سازی مقدار PGF استفاده شد.

نتایج خلاصه شده به شرح زیر است:

-استفاده از الیاف پلی‌اولفین-شیشه (PGF) در مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی به طور قابل توجهی موجب افزایش مدول الاستیسیته و مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) می‌شود. این بهبودها نشان‌دهنده پتانسیل PGF در تقویت استحکام و دوام مخلوط‌ها هستند.

-نتایج نشان می‌دهد که PGF می‌تواند طول عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی را افزایش دهد. در شرایط بدون پیرشدگی، بالاترین طول عمر خستگی به دست آمده است، که نشان‌دهنده توانایی PGF در کاهش خطر ترک‌خوردگی است.

-پیرشدگی کوتاه‌مدت و بلندمدت تأثیرات متفاوتی بر روی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی دارد. در حالی که PGF به بهبود خواص مکانیکی در حالت بدون پیرشدگی و بلندمدت کمک می‌کند، در حالت پیرشدگی کوتاه‌مدت نیاز به دقت بیشتری در تنظیم مقدار PGF وجود دارد.

-نتایج نشان می‌دهد که مقادیر بهینه PGF برای هر حالت پیرشدگی متفاوت است: ۰٫۱۲۰۰ برای بدون پیرشدگی، ۰٫۰۹۰ برای پیرشدگی کوتاه‌مدت و ۰٫۱۱۵۰ برای پیرشدگی بلندمدت. این نتایج تأکید بر اهمیت تنظیم دقیق درصد الیاف در طراحی مخلوط‌ها دارند.

-با استفاده از PGF، تأثیرات منفی ناشی از پیرشدگی بر مشخصات مکانیکی مخلوط‌ها کاهش می‌یابد. به‌خصوص در

حالت بلندمدت، PGF به بهبود مقاومت در برابر خستگی و ترک‌خوردگی کمک می‌کند.

-استفاده از PGF در مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی نه تنها به بهبود عملکرد کمک می‌کند، بلکه می‌تواند به کاهش مصرف مواد بکر و کاهش ردپای کربن در پروژه‌های عمرانی منجر شود. این ویژگی‌ها PGF را به گزینه‌ای جذاب و پایدار در صنعت ساخت و ساز تبدیل می‌کند.

۶-سپاسگزاری

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از آزمایشگاه شرکت شیمی تجارت نقش جهان که در تهیه مصالح مصرفی آزمایشگاهی و انجام آزمایش‌های قیر همکاری لازم را داشتند، کمال قدردانی و تشکر را نمایند.

۷-مراجع

-Aashto, R. (2002). Standard practice for mixture conditioning of hot mix asphalt (HMA). *American Association of State Highway and Transportation Officials: Washington, DC, USA*.

-Abhijith, B. S., Raj, A., Varma, R., Ayyar, P., & Krishnan, J. M. (2023). Influence of glass fibre grid and its placement on the fatigue damage of asphalt mixture. *Materials and Structures, 56*(7), 140. **doi:10.1617/s11527-023-02221-w**

-Amini, A., & Imaninasab, R. (2018). Investigating the effectiveness of Vacuum Tower Bottoms for Asphalt Rubber Binder based on performance properties and statistical analysis. *Journal of Cleaner Production, 171*, 1101-1110.

-Amini, A., & Parvizi, H. (2024). Combined effect of gilsonite, sasobit, and soft binder on performance characterization of high RAP binder. *Construction and Building Materials, 451*, 138714. **doi:.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138714**

-Amini, A., 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.

-Amini, A., Ziari, H., Saadatjoo, S. A., Hashemifar, N. S., & Goli, A. (2021). Rutting resistance, fatigue properties and temperature susceptibility of nano clay modified asphalt rubber binder. *Construction and Building Materials, 267*, 120946.

-Antunes, V., Neves, J., & Freire, A. C. (2021). Performance assessment of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in road surface mixtures. *Recycling, 6*(2), 32.

-Beserra Costa, D., de Medeiros Melo Neto, O., Christiane de Figueiredo Lopes Lucena, L., Elísio de Figueiredo Lopes Lucena, A., & Maria Sousa Gonçalves Luz, P. (2023). Effects of recycling agents and methods on the fracture and moisture resistance of asphalt mixtures with high RAP contents. *Construction and Building Materials, 367*, 130312. **doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130312**

-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.*

-Chen, Z., Zhang, D., Zhang, Y., Zhang, H., & Zhang, S. (2021). Influence of multi-dimensional nanomaterials composite form on thermal and ultraviolet oxidation aging resistances of SBS modified asphalt. *Construction and Building Materials, 273*, 122054.

-Enieb, M., Aboelkasim, D., & and Yang, X. (2021). Short- and long-term properties of glass fiber reinforced asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Engineering, 22*(1), 64-76. **doi:10.1080/10298436.2019.1577421**

-Farooq, M. A., Mir, M. S., & Sharma, A. (2018). Laboratory study on use of RAP in WMA pavements using rejuvenator. *Construction and Building Materials, 168*, 61-72.

-Fazaeli, H., Samin, Y., Pirnoun, A., & Dabiri, A. S. (2016). Laboratory and field evaluation of the warm fiber reinforced high performance asphalt mixtures (case study Karaj–Chaloos Road). *Construction and Building Materials, 122*, 273-283.

-Goli, A., Ziari, H., & Amini, A. (2017). Influence of carbon nanotubes on performance properties and storage stability of SBS modified asphalt binders. *Journal of Materials in Civil Engineering, 29*(8), 04017070.

-Goli, H., Latifi, M., & Sadeghian, M. (2022). Moisture characteristics of warm mix asphalt containing reclaimed asphalt pavement (RAP) or steel slag. *Materials and Structures, 55*(2), 53.

-Hong, F., Chen, D.-H., & Mikhail, M. M. (2010). Long-term performance evaluation of recycled asphalt pavement results from Texas: Pavement studies category 5 sections from the long-term pavement performance program. *Transportation Research Record, 2180*(1), 58-66.

-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.

-Kılıç, D., Öz, A., Benli, A., Tortum, A., Kaplan, G., & Aydın, A. C. (2025). Integration of reclaimed asphalt aggregates into glass fiber-reinforced alkali-activated composites: Mechanical

-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.
-Ziari, H., Amini, A., & Goli, A. (2020a). The effect of different aging conditions and strain levels on relationship between fatigue life of asphalt binders and mixtures. *Construction and Building Materials, 244*, 118345.
-Ziari, H., Amini, A., & Goli, A. (2020b). Investigation of blending conditions effect on GTR dissolution and rheological properties of rubberized binders. *Construction and Building Materials, 242*, 117828.
-Ziari, H., Amini, A., 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., Mojaradi, B., Saadatjoo, S. A., Amini, A., Najafi Moghaddam Gilani, V., & Hosseinian, S. M. (2023). Laboratory Investigation of Reclaimed Asphalt Mixtures Containing Cyclogen and Vacuum Bottom Rejuvenators. *Advances in Civil Engineering, 2023*(1), 6223569.
doi.org/10.1155/2023/6223569
-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.
performance and durability. *Construction and Building Materials, 458*, 139645.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139645
-Lin, J., Guo, Z., Hong, B., Xu, J., Fan, Z., Lu, G., Oeser, M. (2022). Using recycled waste glass fiber reinforced polymer (GFRP) as filler to improve the performance of asphalt mastics. *Journal of Cleaner Production, 336*, 130357.
doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130357
-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.
-Nguyen, M. L., P., H., Q., L. X., M., D., L., L., C., C., and Godard, E. (2021). Development of a rational design procedure based on fatigue characterisation and environmental evaluations of asphalt pavement reinforced with glass fibre grid. *Road Materials and Pavement Design, 22*(sup1), S672-S689.
doi:10.1080/14680629.2021.1906304
-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.
-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.
-Roman, C., & Garcia-Morales, M. (2017). Linear rheology of bituminous mastics modified with various polyolefins: a comparative study with their source binders. *Materials and Structures, 50*, 1-12.
-Wang, D., Riccardi, C., Jafari, B., Falchetto, A. C., & Wistuba, M. P. (2021). Investigation on the effect of high amount of Re-recycled RAP with Warm mix asphalt (WMA) technology. *Construction and Building Materials, 312*, 125395.

Improving the Performance of Recycled Asphalts Optimization of Polyolefin-Glass Fibers Based on Performance and Aging Characteristics

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

E-mail: amiramini@iau.ac.ir

Received: September 2025- Accepted: February 2026

ABSTRACT

In order to reduce costs and make optimal use of natural resources, the use of recycled asphalt pavement (RAP) has increasingly gained attention as a sustainable solution in the paving industry. This study investigates the effect of glass-polyolefin fibers (PGF) on the mechanical properties of asphalt mixtures containing 50% RAP under different aging conditions (unaged, short-term aging, and long-term aging). The results of the tests indicated that in the unaged condition, high values of modulus of elasticity and fatigue life were achieved, confirming the positive impact of PGF on improving mechanical properties. Moreover, under short-term aging conditions, despite a reduction in some characteristics, PGF helped maintain the strength and stability of the mixtures. Finally, under long-term aging conditions, a significant improvement in the performance of the mixtures was observed with the optimal PGF amount. The results show that the optimal PGF amount varies for each aging condition: 0.1200 for unaged, 0.090 for short-term aging, and 0.1150 for long-term aging. This research demonstrates that PGF can serve as an effective additive for optimizing the performance of recycled asphalt mixtures under various conditions. The findings can assist engineers and researchers in designing and developing durable and sustainable asphalt mixtures for construction projects. Additionally, the use of PGF contributes to the reduction of virgin material consumption and minimizes environmental impacts, which is considered an important advantage for sustainable development in the construction industry.

Keywords: Recycled Asphalt Pavement (RAP), Glass-Polyolefin Fibers (PGF), Mechanical Properties, Aging, Optimization, Asphalt Mixtures