

ارزیابی ترمیم ترک‌های آسفالتی حاوی قیر لاستیکی و الیاف فولادی با گرمایش مایکروویو

امیر کاووسی^۱، علی کاسب^{۲*}، امید حاجی نژاد^۳

۱- استاد گروه راه و ترابری، kavussia@modares.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی راه و ترابری، ali.kaseb@modares.ac.ir

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی ایمنی راه و ترابری، omid.hajinezhad@modares.ac.ir

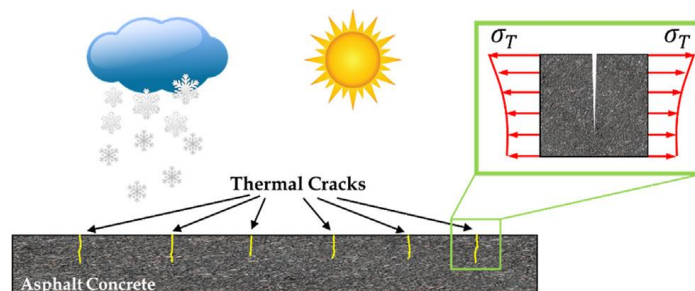
چکیده

ترک خوردگی یکی از خرابی‌های اصلی روسازی آسفالتی است که موجب کاهش عمر خدمت و افزایش هزینه‌های نگهداری راه می‌شود. در مطالعات اخیر، استفاده از روش‌های ترمیم مبتنی بر تحریک حرارتی، به‌ویژه گرمایش مایکروویو، به‌عنوان روشی مؤثر برای افزایش قابلیت ترمیم ترک‌های آسفالتی مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش، قابلیت ترمیم ترک در مخلوط‌های آسفالتی حاوی قیر لاستیکی و الیاف فولادی تحت گرمایش مایکروویو بررسی شد. ابتدا درصد بهینه قیر و پودر لاستیک با استفاده از آزمایش مارشال تعیین و سپس مخلوط‌های حاوی قیر خالص و قیر اصلاح‌شده با ۲۰ درصد پودر لاستیک و مقادیر ۰، ۲، ۴ و ۶ درصد الیاف فولادی تهیه شدند. عملکرد مخلوط‌ها در شرایط پیرنشده و پیرشده و همچنین وضعیت خشک و ذوب‌ویخ با استفاده از مقاومت کششی غیرمستقیم، حساسیت رطوبتی، پاسخ حرارتی و شاخص ترمیم ارزیابی شد. همچنین، تغییرات درجه نفوذ و نقطه نرمی قیرها پیش و پس از گرمایش مایکروویو بررسی شد. نتایج نشان داد که افزایش مقدار الیاف فولادی موجب بهبود پاسخ حرارتی و افزایش دمای مخلوط‌ها شد. در شرایط خشک، شاخص ترمیم مخلوط حاوی قیر لاستیکی از ۵۲ درصد در نمونه فاقد الیاف به ۷۴ و ۷۵ درصد در نمونه‌های حاوی ۴ و ۶ درصد الیاف افزایش یافت. با در نظر گرفتن هم‌زمان عملکرد حرارتی، مکانیکی و ترمیمی، مقدار ۴ درصد الیاف فولادی به‌عنوان ترکیب مناسب انتخاب شد. در این ترکیب، دمای نمونه پس از ۱۲۰ ثانیه گرمایش به ۱۴۲ درجه سانتی‌گراد رسید و شاخص ترمیم در شرایط خشک و ذوب‌ویخ به ترتیب ۷۴ و ۶۸ درصد به‌دست آمد. همچنین، افزودن الیاف فولادی موجب کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها شد. بررسی تصویری نمونه‌ها نشان داد که ترک‌هایی با عرض تقریبی ۵ میلی‌متر پس از ۱۲۰ ثانیه گرمایش و ۲۴ ساعت نگهداری در دمای محیط، بسته‌شدن ظاهری کامل داشتند. در مجموع، ترکیب قیر لاستیکی و ۴ درصد الیاف فولادی مناسب‌ترین توازن میان پاسخ حرارتی، مقاومت مکانیکی و قابلیت بازیابی ترک را فراهم کرد.

کلمات کلیدی: گرمایش مایکروویو، قیر لاستیکی، الیاف فولادی، مخلوط آسفالتی، حساسیت رطوبتی، ترمیم ترک

۱- مقدمه

ترک‌خوردگی یکی از مهم‌ترین و متداول‌ترین خرابی‌ها در روسازی‌های آسفالتی است که می‌تواند با کاهش عمر خدمت روسازی و افت کیفیت رانندگی، هزینه‌های قابل‌توجهی را به سیستم راه و ترابری تحمیل کند. با وجود پیشرفت‌های گسترده در زمینه طراحی و ساخت روسازی‌های آسفالتی، کنترل و کاهش ترک‌خوردگی همچنان یکی از چالش‌های اساسی در افزایش دوام و عملکرد روسازی به شمار می‌رود. در سال‌های اخیر، روش‌های مختلفی به‌منظور بهبود خواص مکانیکی و افزایش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر ترک‌خوردگی مورد استفاده قرار گرفته است که یکی از مهم‌ترین آن‌ها، اصلاح مخلوط آسفالتی با استفاده از مواد افزودنی است. در این میان، پودر لاستیک حاصل از بازیافت لاستیک‌های فرسوده به‌عنوان یکی از اصلاح‌کننده‌های مؤثر، مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از این ماده در مخلوط‌های آسفالتی می‌تواند با بهبود برخی ویژگی‌های مکانیکی و افزایش انعطاف‌پذیری، به کاهش آسیب‌پذیری روسازی در برابر ترک‌خوردگی، افزایش عمر خدمت و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری کمک کند و در عین حال، با استفاده مجدد از لاستیک‌های فرسوده، گامی در جهت توسعه پایدار در صنعت راه‌سازی باشد [۱]. تعمیرات متداول روسازی‌های آسفالتی معمولاً با نیاز به انسداد بخشی از مسیر، افزایش اختلالات ترافیکی و کاهش ایمنی همراه است و مستلزم صرف زمان، استفاده از تجهیزات و نیروی متخصص و تحمیل هزینه‌های قابل‌توجه است. از این‌رو، توسعه روش‌های نوین و سریع ترمیم روسازی، به‌ویژه روش‌هایی که بتوانند بدون عملیات گسترده اجرایی، ترک‌های آسفالتی را با صرف زمان و هزینه کمتر ترمیم کنند، مورد توجه قرار گرفته است [۲]. یکی از این روش‌ها، خودترمیمی مخلوط آسفالتی می‌باشد. این روش از سال ۱۹۶۰ مورد بررسی قرار گرفته است. خودترمیمی یک ویژگی ذاتی در روسازی‌های انعطاف‌پذیر (روسازی آسفالتی) است که می‌تواند موجب ترمیم ترک‌ها شود. این ویژگی به‌طور طبیعی در تابستان‌های بسیار گرم اتفاق می‌افتد که با گرم شدن قیر موجب جاری شدن آن و پر شدن ترک‌ها می‌شود البته ذکر این نکته ضروری است که روند این فرآیند به دما، نوع مصالح، میزان رطوبت و پیری آسفالت نیز بستگی دارد [۳]. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود. ترک‌های حرارتی معمولاً در روسازی‌های مناطق سردسیر یا مناطقی با نوسانات شدید دمایی ایجاد می‌شوند و می‌توانند با کاهش دوام، عمر خدمت روسازی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهند. این ترک‌ها اغلب به‌صورت عرضی و از سطح به عمق روسازی توسعه می‌یابند و بر اساس سازوکار ایجاد، به دو گروه ترک‌های حرارتی تک‌رویدادی^۱ ناشی از سرمای شدید و ترک‌های خستگی حرارتی^۲ ناشی از تکرار تغییرات دمایی تقسیم می‌شوند. کاهش احتمال ایجاد این ترک‌ها و بهبود قابلیت ترمیم آن‌ها، مستلزم استفاده از مصالح مناسب و روش‌های نوین ترمیم در روسازی‌های آسفالتی است [۴].



شکل ۱- نحوه به وجود آمدن ترک‌های حرارتی [۴].

10th international Congress on

**Development of Technological
Infrastructure in Civil**

Engineering, Architecture and Urban of iran

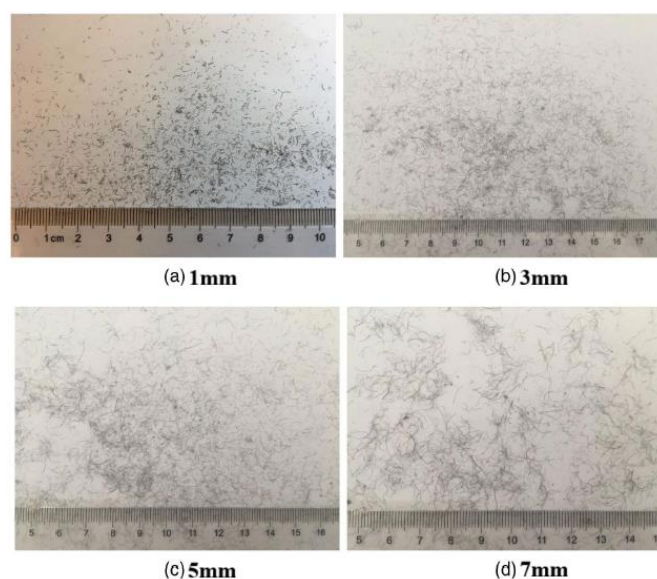
دهمین کنگره بین‌المللی

**توسعه زیرساخت‌های فناوری مهندسی
عمران، معماری و شهرسازی ایران**

¹ Single Event Thermal Cracks

² Thermal Fatigue Cracks

الیاف فولادی به دلیل رسانایی الکتریکی و قابلیت ایجاد گرمایش القایی، و با قطر ۷۲ میکرومتر و با طول‌های ۱، ۳، ۵ و ۷ میلی‌متر که در شکل ۲ قابل مشاهده می‌باشد به‌عنوان یکی از مواد مؤثر در توسعه مخلوط‌های آسفالتی خودترمیم‌شونده مورد توجه قرار گرفته‌اند. افزایش مقدار الیاف فولادی می‌تواند موجب افزایش نرخ گرمایش القایی مخلوط شود و در نتیجه، قابلیت ترمیم ترک‌ها را بهبود دهد. همچنین، استفاده از الیاف فولادی با طول ۵ میلی‌متر و مقدار ۴ درصد وزنی، عملکرد مطلوبی در ترمیم القایی داشته و نرخ بازیابی عمر خستگی را تا حدود ۷۰.۷۷ درصد افزایش داده است. با این حال، با افزایش تعداد چرخه‌های ترمیم، سرعت بازیابی کاهش می‌یابد که بیانگر تأثیر هم‌زمان مقدار و طول الیاف فولادی بر عملکرد ترمیم القایی مخلوط‌های آسفالتی است [۵]. بر اساس نتایج آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای، افزودن الیاف فولادی با طول ۳۵ و قطر ۱ میلی‌متر، پس از پنج چرخه ذوب‌ویخ، موجب افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر ترک‌خوردگی و دستیابی به قابلیت ترمیم بیش از ۸۰ درصد شد [۲۷]. هدف این پژوهش، ارزیابی اثر قیر لاستیکی و مقادیر مختلف الیاف فولادی بر پاسخ حرارتی، مقاومت کششی، حساسیت رطوبتی و قابلیت بازیابی ترک مخلوط‌های آسفالتی تحت گرمایش مایکروویو در شرایط پیرشده و پیرنشده است.



شکل ۲ - نمونه‌هایی از الیاف فولادی با ابعاد ۱، ۳، ۵ و ۷ میلی‌متر

ترکیب پودر لاستیک با قیر می‌تواند با افزایش خاصیت الاستیک و بهبود رفتار چسبندگی، مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر ترک‌خوردگی و قابلیت ترمیم آن را افزایش دهد. از این‌رو، استفاده از پودر لاستیک در اصلاح قیر و مخلوط‌های آسفالتی می‌تواند به افزایش عمر خدمت روسازی و کاهش نیاز به تعمیرات کمک کند. همچنین، به‌کارگیری این ماده بازیافتی ضمن بهره‌گیری مجدد از لاستیک‌های فرسوده، می‌تواند در کاهش آثار زیست‌محیطی و تحقق توسعه پایدار در صنعت روسازی مؤثر باشد. [۲۶،۶].

۲- پیشینه تحقیق

خودترمیمی مخلوط‌های آسفالتی به قابلیت بازیابی ترک‌ها در اثر اعمال حرارت گفته می‌شود که می‌تواند با کاهش نیاز به تعمیرات، عمر خدمت روسازی را افزایش داده و هزینه‌های نگهداری را کاهش دهد. مطابق جدول ۱، مخلوط‌های خودترمیم‌شونده نسبت به مخلوط‌های معمولی از دوام و قابلیت بازیابی بیشتری برخوردارند، درحالی‌که روش‌های متداول ترمیم ترک به عملیات اجرایی و تعمیرات مکرر نیاز دارند. بنابراین، خودترمیمی حرارتی می‌تواند موجب افزایش دوام روسازی و کاهش هزینه‌های نگهداری شود. [۷].

فرآیند خودترمیمی در مخلوط‌های آسفالتی به میزان تماس میان سطوح ترک وابسته است؛ به‌گونه‌ای که حفظ تماس و نزدیکی سطوح ترک، شرایط لازم را برای اثرگذاری نیروهای خارجی و بازگشت پیوستگی میان آن‌ها فراهم می‌کند. در مقابل، هنگامی که عرض ترک افزایش یافته و سطوح آن به‌طور کامل از یکدیگر فاصله بگیرند، امکان برقراری مجدد پیوستگی و ترمیم مؤثر ترک کاهش می‌یابد [۸]. جوان‌سازها^۱ با نفوذ در قیر و بهبود تعادل اجزای آن، به‌ویژه نسبت مالتن به آسفالتین، می‌توانند ویسکوزیته و انعطاف‌پذیری قیر را اصلاح کرده و در نتیجه قابلیت ترمیم ترک و عمر خدمت روسازی را افزایش دهند. این مواد به‌ویژه در احیای قیرهای پیرشده و مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی کاربرد مؤثری دارند [۹]. میزان ترمیم ترک‌های آسفالتی با استفاده از بازیابی مقاومت یا انرژی شکست و همچنین روش‌های تصویربرداری ارزیابی می‌شود. عواملی مانند درصد قیر، مدول مخلوط، نوع مصالح، انرژی اعمال‌شده و پیرشدگی بر قابلیت ترمیم ترک تأثیرگذار هستند [۱۰].

جدول ۱- مقایسه آسفالت معمولی و مخلوط آسفالتی با قابلیت ترمیم گرمایش القایی

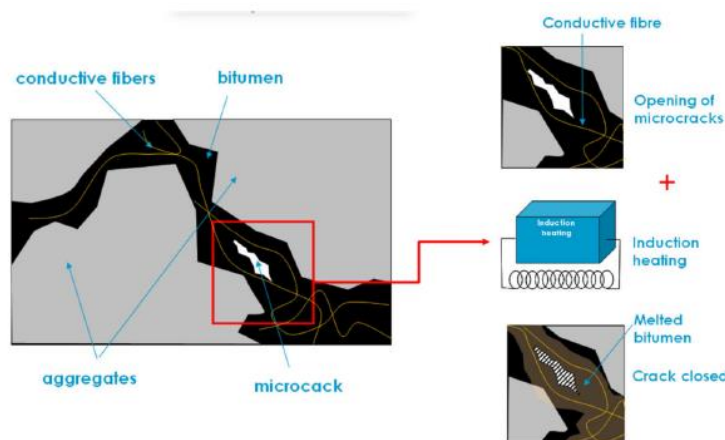
ویژگی	آسفالت معمولی	آسفالت خودترمیم‌شونده
عمر مفید	۱۰-۱۵ پایین	۲۰-۳۰ بالا
تعمیر و نگهداری	بالا	پایین
آسیب‌های زیست محیطی	بالا	پایین
هزینه در طول زمان	بالا	متوسط
مکانیزم تعمیر	دستی	خودکار
هزینه اولیه	پایین	بالا

۲-۱- خودترمیمی با استفاده از گرمایش القایی میکروویو

گرمایش القایی برای روسازی‌های آسفالتی، اولین بار در سال ۱۹۶۸ ارائه شد. این ایده برای یخ‌زدایی با استفاده از گرافیت به‌عنوان افزودنی رسانای الکتریکی با استفاده از امواج الکترومغناطیسی انجام شد [۱۱]. گرمایش القایی مخلوط آسفالتی روشی است که با گرم کردن ذرات رسانای الکتریکی داخل مخلوط (مانند الیاف یا ذرات فولاد)، به وسیله یک دستگاه گرم‌کن مثل دستگاه میکروویو، بتوان مخلوط آسفالتی را گرم کرد که با گرم شدن مخلوط، قیر به حالت روان درآمده و ترک‌ها را ترمیم می‌کند [۱۲]. در فرآیند گرمایش القایی، اعمال انرژی خارجی موجب افزایش دمای مخلوط و تحریک قابلیت ترمیم آن می‌شود؛ بنابراین، میزان ترمیم القایی به دمای ایجاد شده در مخلوط وابسته بوده و با افزایش دما، امکان ترمیم ترک‌ها و

¹ Rejuvenating Encapsulated

بازیابی ساختار مخلوط بهبود می‌یابد. [۱۳]. مراحل ترمیم مخلوط آسفالتی حاوی الیاف فولادی رسانا تحت گرمایش القایی در شکل ۳ نشان داده شده است. مخلوط آسفالتی حاوی الیاف فولادی پس از ایجاد ترک تحت گرمایش القایی قرار می‌گیرد که در اثر افزایش دما، دو سطح ترک به تدریج به یکدیگر نزدیک شده و فرآیند بسته شدن ترک رخ می‌دهد. حضور الیاف در مخلوط، انتقال و رسانایی حرارتی را بهبود می‌بخشد، افزودن الیاف می‌تواند موجب افزایش درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی نیز شود. [۱۲].



شکل ۳- فرآیند گرمایش القایی با الیاف فولادی [۱۲].

گرمایش مایکروویو و القایی از روش‌های نوین در ترمیم ترک‌های روسازی آسفالتی به شمار می‌روند که با تبدیل انرژی الکترومغناطیسی به انرژی حرارتی، موجب افزایش دمای مخلوط و بهبود جریان‌پذیری قیر می‌شوند. در این فرآیند، استفاده از مواد رسانا و القاپذیر، قابلیت جذب و انتقال انرژی حرارتی را افزایش داده و شرایط مناسب‌تری برای ترمیم ترک فراهم می‌کند. الیاف فولادی در مخلوط آسفالتی امکان تولید گرمای موضعی تحت میدان القایی را فراهم می‌سازد. در نتیجه، با افزایش دمای قیر و فعال شدن مجدد قابلیت جریان‌پذیری آن، بسته شدن و بازیابی ترک‌ها بدون نیاز به مصالح ترمیمی اضافی امکان‌پذیر می‌شود [۱۴]. نوع دیگری از سیستم گرمایش القایی، گرمایش القایی سیم‌پیچی^۱ است که در آن، حرارت‌دهی با استفاده از سیم‌پیچی متصل به دستگاه گرمایش القایی بر روی نمونه انجام می‌شود. در این روش، مشابه گرمایش مایکروویو، با ایجاد میدان الکترومغناطیسی، مخلوط آسفالتی گرم شده و شرایط لازم برای ترمیم ترک‌ها فراهم می‌شود. این روش امکان بررسی و ارزیابی فرآیند ترمیم القایی را در شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی فراهم می‌کند [۱۵].



شکل ۴- اجرای سیستم سیم گرمایش الیاف کربن [۱۵].

^۱ Induction Heating Coil

سیستم‌های گرمایش الکتریکی روسازی مبتنی بر میدان مغناطیسی و گرمایش ژول، عمدتاً با هدف گرم کردن و یخ‌زدایی روسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند و در آن‌ها از شبکه‌های رسانا، نظیر الیاف کربن، در ساختار روسازی استفاده می‌شود که نحوه استقرار آن‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است [۱۶]. با توجه به هزینه اولیه بالای این سامانه‌ها، کاربرد آن‌ها با محدودیت‌هایی همراه است. همچنین، پایش دمای مخلوط در حین گرمایش القایی، به‌منظور کنترل افزایش دما، مدیریت مصرف انرژی و تعیین زمان مناسب گرمایش انجام می‌شود. مطابق داده‌های ارائه‌شده در جدول ۲ زمان گرمایش حدود ۱۲۰ ثانیه در نظر گرفته شده و دمای نمونه در فواصل ۲۰ تا ۳۰ ثانیه اندازه‌گیری می‌شود. با وجود مطالعات انجام‌شده درباره گرمایش میکروویو و کاربرد مواد رسانا در مخلوط‌های آسفالتی، بررسی هم‌زمان اثر قیر لاستیکی، درصد الیاف فولادی، پیرشدگی و شرایط ذوب‌ویخ بر پاسخ حرارتی و بازیابی مقاومت کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی اثر هم‌زمان این عوامل و تعیین ترکیب مناسب برای ترمیم ترک انجام شد.

جدول ۲- شرایط گرمایش در مطالعات ترمیم حرارتی مخلوط‌های آسفالتی

نوع مخلوط مورد آزمایش	نوع ابزار تعیین حرارت	جمع آوری داده ها (ثانیه)	زمان کل گرمایش (ثانیه)	مرجع
مخلوط آسفالتی داغ ^۱ و گرم پلیمری	تصویرگر حرارتی مادون قرمز ^۲	۲۰	۸۰	[۱۷]
مخلوط آسفالتی داغ حاوی الیاف فولادی	تصویرگر حرارتی مادون قرمز	۳۰	۱۲۰	[۵]
مخلوط آسفالتی داغ حاوی فلزات ضایعاتی ^۳	دوربین ترموگرافی	۲۰	۱۰۰	[۱۸]

۳- روش تحقیق

در این پژوهش، به‌منظور ارزیابی ترمیم با استفاده از گرمایش میکروویو ترک‌های روسازی آسفالتی حاوی قیر لاستیکی و الیاف فولادی، مجموعه‌ای از آزمایش‌های آزمایشگاهی انجام شد. ابتدا با استفاده از آزمایش مارشال، درصد بهینه قیر و پودر لاستیک تعیین شد؛ سپس با آزمایش کشش غیرمستقیم، ترک کنترل‌شده در نمونه‌ها ایجاد و میزان بازیابی پس از ترمیم ارزیابی گردید. فرآیند ترمیم با استفاده از گرمایش میکروویو و اعمال شرایط حرارتی مشخص انجام شد و در نهایت، اثر پیرشدگی و ویژگی‌های مصالح و قیر بر عملکرد ترمیم القایی با استفاده از دستگاه میکروویو مورد بررسی قرار گرفت.

۳-۱- مواد و مصالح

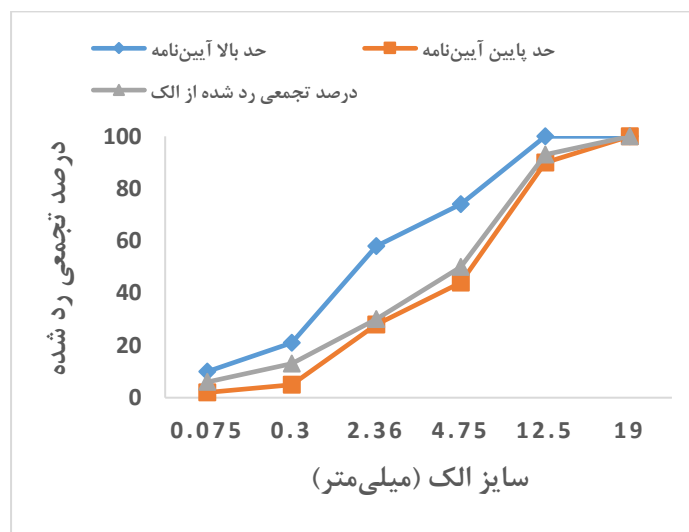
به‌منظور بهبود خواص قیر و تقویت قابلیت ترمیم القایی، به‌ترتیب از پودر لاستیک و الیاف فولادی در ساخت مخلوط آسفالتی استفاده شد. مصالح سنگی مورد استفاده از نوع سنگدانه‌های سیلیسی بوده و دانه‌بندی آن‌ها مطابق محدوده دانه‌بندی

^۱ Hot Mix Asphalt (HMA)

^۲ Infrared Thermal Imager

^۳ Waste Metals

متراکم مندرج در نشریه ۲۳۴ آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران انتخاب شد [۱۹]. منحنی دانه‌بندی مصالح در شکل ۵ ارائه شده است همچنین، مشخصات فیزیکی مصالح سنگی، شامل وزن مخصوص و سایر ویژگی‌های مورد نیاز، در جدول ۳ ارائه شده است. مصالح مورد استفاده از نظر ویژگی‌های فیزیکی و دانه‌بندی، حداقل الزامات فنی تعیین شده در استانداردهای ASTM و AASHTO باشند. برخورداری مصالح از مشخصات فیزیکی و دانه‌بندی مناسب، شرایط لازم برای تهیه مخلوط آسفالتی با عملکرد مطلوب و ارزیابی قابلیت ترمیم القایی ترک‌ها را فراهم می‌کند.



شکل ۵- دانه‌بندی مصالح سنگی مورد استفاده

جدول ۳- مشخصات فیزیکی مصالح سنگی مورد استفاده

شرح آزمایش	استاندارد آزمایش	نوع مصالح	واحد	مقدار
وزن مخصوص	ASTM-D1184	ریزدانه و درشت دانه	Kg/m ³	۲۵۰۲
ارزش ضربه ایی مصالح	BS 812-112	ریزدانه و درشت دانه	%	۸۱
ارزش ماسه ای	ASTM-D2419	ریزدانه	%	۷۵
شکستگی در دو جبهه	ASTM-D5821	درشت دانه	%	۹۶
افت وزنی لس آنجلس	ASTM-C131	درشت دانه	%	۱۸
میزان جذب آب	ASTM-C127	ریزدانه و درشت دانه	%	۲
چسبندگی با قیر	ASTM-D3625	درشت دانه	%	۱۰۰-۹۵

۳-۲- قیر

قیر مورد استفاده در این پژوهش از نوع قیر خالص ۸۵-۱۰۰ بوده است. با توجه به هدف پژوهش و تمرکز بر ترمیم حرارتی با گرمایش میکروویو ترک‌های روسازی آسفالتی، این نوع قیر با در نظر گرفتن شرایط متداول ایجاد ترک در روسازی

و الزامات مورد نیاز برای فرآیند ترمیم انتخاب شد. مشخصات فیزیکی قیر خالص مصرفی، شامل درجه نفوذ، نقطه نرمی، وزن مخصوص و نقطه اشتعال، در جدول ۴ ارائه شده است.

قیر مورد استفاده دارای درجه نفوذ نسبتاً بالا و نقطه نرمی پایین بوده که نشان‌دهنده رفتار مناسب آن در شرایط دمایی پایین است. این ویژگی‌ها می‌تواند با حفظ انعطاف‌پذیری مناسب قیر، شرایط مطلوبی را برای عملکرد مخلوط آسفالتی فراهم کند. همچنین، نقطه اشتعال قیر در حدود ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد تعیین شده است. مقدار بالای نقطه اشتعال، از نظر ایمنی، شرایط مناسبی را برای فرایندهای حرارتی و آماده‌سازی نمونه‌ها در آزمایشگاه فراهم می‌کند.

جدول ۴- مشخصات قیر خالص ۸۵/۱۰۰ مورد استفاده.

شرح آزمایش	استاندارد آزمایش	واحد	مقدار
نقطه نرمی	ASTM-D36	°C	۴۵.۷
وزن مخصوص قیر	ASTM-D70	kg/m ³	۱۰۱۰
درجه نفوذ ۲۵°C	ASTM-D5	0.1mm	۹۶
نقطه اشتعال	ASTM-D92	°C	۲۵۰
حلالیت قیر در تری‌کلرواتیلن	ASTM-D2042	%	۹۹.۵
شکل‌پذیری قیر ۲۵°C	ASTM-D113	cm	۱۰۰-۱۱۰
اثر لکه مواد قیری	AASHTO-T102	-	منفی

۳-۳- پودر لاستیک

پودر لاستیک از دهه ۱۹۵۰ به‌عنوان یکی از افزودنی‌های مورد استفاده در اصلاح قیر مطرح شد. استفاده از پودر لاستیک در فرآیند تر، به‌گونه‌ای که پیش از اختلاط قیر با مصالح سنگی به قیر افزوده می‌شود، نیز از دهه ۱۹۶۰ در ایالات متحده آمریکا مورد توجه قرار گرفت [۲۰]. قیر لاستیکی با استفاده از ۲۰ درصد پودر لاستیک بازیافتی تهیه شد؛ پودر لاستیک مورد استفاده از آزمایشگاه روسازی دانشگاه تربیت مدرس تأمین و پس از آماده‌سازی، باقیمانده روی الک شماره ۵۰ به‌عنوان اندازه ذرات مورد استفاده قرار گرفت. اختلاط پودر لاستیک و قیر در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد، با سرعت ۴۰۰۰ دور بر دقیقه و به مدت ۴۵ دقیقه در همزن دور بالا انجام شد؛ درصد پودر لاستیک بر مبنای جرم قیر پایه تعیین گردید. پودر لاستیک به‌عنوان اصلاح‌کننده قیر، با افزایش خاصیت الاستیکی، بهبود مقاومت در برابر ترک‌خوردگی، خستگی و شیارشدگی و تقویت چسبندگی قیر و سنگدانه، عملکرد مخلوط‌های آسفالتی را بهبود می‌دهد. همچنین، استفاده از این ماده بازیافتی ضمن کاهش مصرف منابع و آثار محیط‌زیستی، به توسعه پایدار کمک می‌کند. در فرآیند اختلاط نیز، ترکیبات سبک و روغنی قیر توسط ذرات لاستیک جذب شده و موجب تورم آن‌ها می‌شوند. با تغییر ساختار قیر، ویسکوزیته آن، به‌ویژه در دماهای بالا، افزایش می‌یابد. به‌منظور بررسی اثر پودر لاستیک بر ویژگی‌های قیرمعمولی، قیرهای لاستیکی با درصدهای مختلف اصلاح‌کننده تهیه و مشخصات فیزیکی آن‌ها ارزیابی شد. آزمون‌های درجه نفوذ و نقطه نرمی قیر حاوی ۲۰ درصد پودر لاستیک و وزن مخصوص قیرهای اصلاح‌شده با ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد پودر لاستیک در جدول ۵ ارائه شده است. این نتایج تأثیر افزایش پودر لاستیک بر ویژگی‌های فیزیکی و رفتار دمایی قیرهای اصلاح‌شده را نشان می‌دهد. به‌منظور بررسی پایداری این تغییرات در فرآیند ترمیم، ویژگی‌های قیرهای لاستیکی پس از اعمال گرمایش میکروویو نیز ارزیابی شد.

جدول ۵- مشخصات فیزیکی قیر لاستیکی اصلاح‌شده با پودر لاستیک بر پایه قیر ۸۵/۱۰۰

شرح آزمایش	استاندارد آزمایش	درصد پودر لاستیک	واحد	مقدار
نقطه نرمی	ASTM-D36	۲۰٪	°C	۵۱.۶
درجه نفوذ در دمای ۲۵°C	ASTM-D5	۲۰٪	0.1mm	۱۱۰
وزن مخصوص قیر	ASTM-D70	۱۵٪	kg/m ³	۱۰۱۵
وزن مخصوص قیر	ASTM-D70	۲۰٪	kg/m ³	۱۰۲۰
وزن مخصوص قیر	ASTM-D70	۲۵٪	kg/m ³	۱۰۳۰

۳-۴- الیاف فولادی مورد استفاده در مخلوط آسفالتی

الیاف فولادی موج‌دار با طول ۳۵ و قطر ۱ میلی‌متر به‌عنوان عامل القاپذیر در مخلوط آسفالتی به کار گرفته شدند. این الیاف با قابلیت جذب انرژی الکترومغناطیسی، زمینه ایجاد گرما در ساختار مخلوط و فعال‌سازی فرآیند ترمیم القایی با استفاده از دستگاه مایکروویو را فراهم می‌کنند. نمای ظاهری این الیاف در شکل ۶ ارائه شده است. قابلیت گرمایش و ویژگی‌های الکتریکی الیاف از طریق بررسی رفتار آن‌ها تحت تابش مایکروویو و اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی ارزیابی شد تا عملکرد حرارتی آن‌ها در فرآیند ترمیم مورد بررسی قرار گیرد.



شکل ۶- الیاف فولادی مورد استفاده در پژوهش

مطابق جدول ۶، الیاف فولادی از نظر وزن مخصوص و مقاومت کششی دارای ویژگی‌های مناسبی برای استفاده به‌عنوان افزودنی رسانا در مخلوط آسفالتی هستند. با توجه به نقش الیاف در افزایش سرعت گرمایش و انتقال حرارت در فرآیند مایکروویو، درصدهای ۲، ۴ و ۶ درصد بر اساس مقادیر به‌کاررفته در مطالعات پیشین برای بررسی اثر میزان الیاف بر عملکرد ترمیم القایی انتخاب شدند. با هدف تعیین مقدار مؤثر الیاف و بررسی تأثیر آن بر فرآیند ترمیم و خواص مخلوط آسفالتی مورد ارزیابی قرار گرفت.

جدول ۶- مشخصات الیاف فولادی مورد استفاده در پژوهش

مقدار	واحد	مشخصات الیاف فولادی موج‌دار
۷۸۵۰	Kg/m ³	وزن مخصوص
۱۰۰۰	MPa	مقاومت کششی
۱	mm	قطر
۳۵	mm	طول

۳-۵- تعیین درصد بهینه قیر و پودر لاستیک در مخلوط آسفالتی

درصد بهینه قیر و پودر لاستیک با استفاده از آزمایش مارشال و بر اساس تحلیل پارامترهای حاصل از این آزمون تعیین شد. برای این منظور، نمونه‌های شاهد و نمونه‌های حاوی قیر لاستیکی با درصدهای مختلف قیر و پودر لاستیک تهیه و مورد ارزیابی قرار گرفتند و جزئیات طرح اختلاط و تعداد نمونه‌های مورد بررسی در جدول ۷ ارائه شده است. برای هر یک از طرح‌های اختلاط، سه نمونه مشابه تهیه و آزمایش شد و نتایج حاصل از آن‌ها به منظور افزایش قابلیت اطمینان و کاهش پراکندگی داده‌ها در تحلیل نهایی مورد استفاده قرار گرفت. بر اساس نتایج حاصل از پارامترهای آزمایش مارشال، درصد بهینه قیر و پودر لاستیک تعیین شد و اثر درصدهای مختلف الیاف فولادی بر عملکرد و قابلیت ترمیم القایی مخلوط آسفالتی با استفاده از مقادیر بهینه به دست آمده مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت.

جدول ۷- نمونه‌های تعیین درصد بهینه قیر و اصلاح کننده

شماره نمونه	درصد قیر	درصد پودر لاستیک	شماره نمونه	درصد قیر	درصد پودر لاستیک
۱	۴.۵٪	۰٪	۱۱	۴.۵٪	۲۰٪
۲	۵.۰٪	۰٪	۱۲	۵.۰٪	۲۰٪
۳	۵.۵٪	۰٪	۱۳	۵.۵٪	۲۰٪
۴	۶.۰٪	۰٪	۱۴	۶.۰٪	۲۰٪
۵	۶.۵٪	۰٪	۱۵	۶.۵٪	۲۰٪
۶	۴.۵٪	۱۵٪	۱۶	۴.۵٪	۲۵٪
۷	۵.۰٪	۱۵٪	۱۷	۵.۰٪	۲۵٪
۸	۵.۵٪	۱۵٪	۱۸	۵.۵٪	۲۵٪
۹	۶.۰٪	۱۵٪	۱۹	۶.۰٪	۲۵٪
۱۰	۶.۵٪	۱۵٪	۲۰	۶.۵٪	۲۵٪

در ارزیابی طرح اختلاط، معیار انتخاب ترکیب مناسب، هم‌زمانی الزامات مقاومتی و حجمی مخلوط آسفالتی در چارچوب روش مارشال در نظر گرفته شد. مقاومت مارشال^۱، روانی، وزن مخصوص، درصد فضای خالی، فضای خالی مصالح سنگی و

^۱ ASTM-D1559

درصد فضای خالی پر شده با قیر^۱ به عنوان شاخص‌های اصلی این ارزیابی مورد استفاده قرار گرفتند [۲۱]. بررسی این پارامترها امکان شناسایی ترکیبی را فراهم کرد که از نظر پایداری، ویژگی‌های حجمی و رفتار مکانیکی، شرایط مطلوبی برای مخلوط آسفالتی مورد مطالعه داشته باشد. وزن مخصوص نیز به عنوان یکی از پارامترهای مؤثر در تعیین ویژگی‌های حجمی مخلوط، مطابق رابطه (۱) محاسبه شد.

$$G_{mb} = \frac{A}{B - C} \quad (1)$$

در این رابطه پارامترهای مختلف عبارتند از:

G_{mb} : وزن مخصوص آسفالت بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب

A : وزن نمونه خشک مخلوط آسفالتی بر حسب گرم

B : وزن نمونه اشباع مخلوط آسفالتی بر حسب گرم

C : وزن نمونه مخلوط آسفالتی در حالت غوطه وری بر حسب گرم

۳-۶- روانی مارشال و درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی

روانی مارشال مطابق استاندارد^۲ به عنوان شاخصی از تغییر شکل پذیری مخلوط آسفالتی تحت بارگذاری تعیین شد. نمونه‌ها پس از قرارگیری در حمام آب با دمای 60°C به مدت ۳۰ دقیقه، با نرخ بارگذاری ۲ اینچ بر دقیقه در دستگاه مارشال آزمایش شدند و مقادیر پایداری و روانی در لحظه گسیختگی ثبت شد. درصد فضای خالی نیز به عنوان یکی از شاخص‌های اصلی ویژگی‌های حجمی مخلوط، نشان‌دهنده حجم حفره‌های هوای موجود در نمونه متراکم شده است و مقدار آن با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد. بر اساس الزامات نشریه ۲۳۴، محدوده قابل قبول درصد فضای خالی ۳ تا ۵ درصد در نظر گرفته شد.

$$V_a = \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}}\right) \times 100 \quad (2)$$

در این رابطه پارامترهای مختلف عبارتند از:

V_a : درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی متراکم شده

G_{mb} : وزن مخصوص آسفالت بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب

G_{mm} : وزن مخصوص تئوری بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب که از رابطه (۳) بدست می‌آید.

$$G_{mm} = \frac{A}{A + D - E} \quad (3)$$

در این رابطه پارامترهای مختلف عبارتند از:

¹ ASTM-D2041

² ASTM D6927

G_{mm} : وزن مخصوص تئوری بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب

A : وزن نمونه خشک مخلوط آسفالتی بر حسب گرم

D : وزن ارلن و درپوش پر شده با آب بر حسب گرم

E : وزن ظرف، درپوش و نمونه بر حسب گرم

درصد فضای خالی مصالح سنگی از پارامترهای مهم در ارزیابی ویژگی‌های حجمی و تعیین طرح اختلاط بهینه مخلوط آسفالتی است. این پارامتر بیانگر فضای موجود بین سنگدانه‌های مخلوط بوده و مطابق رابطه (۴) محاسبه می‌شود [۲۲].

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} \times P_s}{G_{sb}} \quad (4)$$

در این رابطه پارامترهای مختلف عبارتند از:

VMA : درصد فضای خالی مصالح سنگی

G_{mb} : وزن مخصوص آسفالت بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب

P_s : درصد مصالح سنگی نسبت به کل مخلوط آسفالتی

G_{sb} : وزن مخصوص بالک دانه‌های سنگی بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب که از رابطه (۵) بدست می‌آید.

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \frac{P_3}{G_3}} \quad (5)$$

در این رابطه پارامترهای مختلف عبارتند از:

G_{sb} : وزن مخصوص بالک دانه‌های سنگی بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب

P_1, P_2, P_3 : درصد مصالح سنگی استفاده شده در مخلوط شامل: درشت دانه، ریزدانه و فیلر

G_1, G_2, G_3 : وزن مخصوص مصالح سنگی استفاده شده در مخلوط شامل: درشت دانه، ریزدانه و فیلر

درصد فضای خالی پر شده با قیر که بر اساس استاندارد ۲ تهیه شده است، یک پارامتر برای کنترل تعیین درصد بهینه قیر و اصلاح کننده می‌باشد و لازم است مناسب ترین مخلوط آسفالتی مطابق با استاندارد مربوط انتخاب شود. برای تعیین درصد فضای خالی پر شده با قیر از رابطه (۶) استفاده می‌شود [۲۲].

$$VFA = \frac{VMA - V_a}{VMA} \times 100 \quad (6)$$

در این رابطه پارامترهای مختلف عبارتند از:

VFA : درصد فضای خالی پر شده با قیر

VMA : درصد فضای خالی مصالح سنگی

V_a : درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی متراکم شده

۴- آزمایش‌ها

در این پژوهش، فرآیند ترمیم در مخلوط‌های آسفالتی حاوی قیر خالص و قیر لاستیکی با استفاده از گرمایش مایکروویو بررسی شد. نمونه‌ها در دو وضعیت پیرنشده و پیرشده و در شرایط مختلف حرارتی، با استفاده از آزمون کشش غیرمستقیم مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای ساخت نمونه‌ها، پس از اختلاط یکنواخت قیر، سنگدانه‌ها و الیاف فولادی، مخلوط در قالب‌های استوانه‌ای با قطر ۴ اینچ و ارتفاع ۷۵ میلی‌متر، در دمای حدود ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد و با ۷۵ ضربه در هر وجه متراکم شد. در مجموع، ۱۲ گروه در حالت پیرنشده و ۱۲ گروه در حالت پیرشده طرح اختلاط مورد بررسی قرار گرفت که مشخصات آن‌ها در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول ۸- نمونه مخلوط‌های آسفالتی بررسی شده در فرآیند ترمیم با استفاده از گرمایش مایکروویو

شماره نمونه	نوع قیر	درصد الیاف	نوع آزمایش	نوع بررسی	شماره نمونه	نوع قیر	درصد الیاف	نوع آزمایش	نوع بررسی
۱	خالص	۰٪	خشک	پیرنشده	۱۳	خالص	۰٪	خشک	پیرشده
۲	خالص	۲٪	خشک	پیرنشده	۱۴	خالص	۲٪	خشک	پیرشده
۳	خالص	۴٪	خشک	پیرنشده	۱۵	خالص	۴٪	خشک	پیرشده
۴	خالص	۶٪	خشک	پیرنشده	۱۶	خالص	۶٪	خشک	پیرشده
۵	لاستیکی	۰٪	خشک	پیرنشده	۱۷	لاستیکی	۰٪	خشک	پیرشده
۶	لاستیکی	۲٪	خشک	پیرنشده	۱۸	لاستیکی	۲٪	خشک	پیرشده
۷	لاستیکی	۴٪	خشک	پیرنشده	۱۹	لاستیکی	۴٪	خشک	پیرشده
۸	لاستیکی	۶٪	خشک	پیرنشده	۲۰	لاستیکی	۶٪	خشک	پیرشده
۹	لاستیکی	۰٪	دوب‌ویخ	پیرنشده	۲۱	لاستیکی	۰٪	دوب‌ویخ	پیرشده
۱۰	لاستیکی	۲٪	دوب‌ویخ	پیرنشده	۲۲	لاستیکی	۲٪	دوب‌ویخ	پیرشده
۱۱	لاستیکی	۴٪	دوب‌ویخ	پیرنشده	۲۳	لاستیکی	۴٪	دوب‌ویخ	پیرشده
۱۲	لاستیکی	۶٪	دوب‌ویخ	پیرنشده	۲۴	لاستیکی	۶٪	دوب‌ویخ	پیرشده

۴-۱- آزمایش کشش غیرمستقیم

آزمایش کشش غیرمستقیم به منظور ارزیابی مقاومت کششی و ایجاد ترک کنترل‌شده در نمونه‌های آسفالتی انجام شد [۲۳]. نمونه‌ها در دو شرایط عادی و چرخه دوب‌ویخ^۱ مورد آزمایش قرار گرفتند؛ در شرایط عادی، نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت نگهداری در دمای محیط با سرعت بارگذاری ۵۰.۸ میلی‌متر بر دقیقه آزمایش شدند. برای شبیه‌سازی شرایط دوب‌ویخ، نمونه‌ها پس از هواگیری، به مدت ۱۶ ساعت در دمای ۲۰°C- منجمد و سپس ۲۴ ساعت در دمای ۶۰°C قرار گرفتند و پس از آماده‌سازی، تحت بارگذاری مقاومت کششی غیرمستقیم قرار گرفتند. و بر اساس حداکثر بار شکست مطابق رابطه (۷) محاسبه شد.

^۱ ASTM-D6931

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi D t} \times 1000 \quad (7)$$

در این رابطه پارامترهای مختلف عبارتند از:

σ_t : مقاومت کششی غیرمستقیم (تنش کششی) بر حسب کیلوپاسکال

P : حداکثر بار شکست بر حسب نیوتن

t : ارتفاع نمونه بر حسب میلی‌متر

D : قطر نمونه بر حسب میلی‌متر

۴-۲- فرآیند ترمیم با استفاده از گرمایش میکروویو

به منظور ارزیابی قابلیت ترمیم القایی ترک‌های مخلوط‌های آسفالتی، از دستگاه میکروویو با توان ۱۰۰۰ وات استفاده شد. پس از ایجاد ترک کنترل شده در نمونه‌ها با استفاده از آزمایش کشش غیرمستقیم، نمونه‌ها تحت تابش امواج الکترومغناطیسی قرار گرفتند تا افزایش دما موجب کاهش ویسکوزیته قیر و جریان آن در ناحیه ترک و در نتیجه بازیابی ترک شود. پس از فرآیند گرمایش، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط نگهداری شدند تا فرآیند ترمیم تکمیل شود. روند کلی آماده‌سازی، ایجاد ترک و ترمیم القایی نمونه‌ها در شکل ۷ ارائه شده است.

زمان گرمایش میکروویو با توجه به دمای موردنظر نمونه تعیین شد و دمای نمونه در فواصل ۳۰ ثانیه‌ای و در چند نقطه اندازه‌گیری شد؛ میانگین دما به عنوان دمای نمونه ثبت گردید و همین زمان گرمایش برای سایر طرح‌های اختلاط نیز اعمال شد. نمونه‌ها پس از گرمایش به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط نگهداری و سپس مجدداً تحت آزمایش کشش غیرمستقیم قرار گرفتند. درصد ترمیم بر اساس نسبت مقاومت پس از ترمیم به مقاومت اولیه، مطابق رابطه (۸) محاسبه شد.

$$\text{درصد ترمیم نمونه} = \frac{\text{مقاومت کششی بعد از ترمیم}}{\text{مقاومت کششی قبل از ترمیم}} \times 100 \quad (8)$$

در این رابطه پارامترهای مختلف عبارتند از:

درصد ترمیم نمونه: مقدار ترمیم نمونه بر حسب درصد

مقاومت کششی قبل از ترمیم: مقاومت کششی غیرمستقیم اولیه نمونه (کیلوپاسکال).

مقاومت کششی بعد از ترمیم: مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه پس از فرآیند ترمیم (کیلوپاسکال).

انتخاب زمان گرمایش میکروویو از اهمیت بالایی برخوردار است؛ زیرا گرمایش ناکافی موجب کاهش کارایی فرآیند ترمیم و گرمایش بیش از حد می‌تواند باعث آسیب حرارتی نمونه‌ها شود. از این رو، زمان گرمایش بر اساس دستیابی به شرایط مناسب ترمیم تعیین شد. در این پژوهش، دمای نمونه‌ها در فواصل ۳۰ ثانیه‌ای و در چند نقطه اندازه‌گیری و میانگین مقادیر به عنوان دمای نمونه ثبت شد.



(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۷- شماتیک فرآیند خودترمیمی مخلوط آسفالتی تقویت‌شده با الیاف فولادی تحت گرمایش میکروویو. (الف) نمونه اولیه. (ب) نمونه ترک‌خورده. (ج) گرمایش نمونه در میکروویو. (د) نمونه ترمیم‌شده

۳-۴- بررسی اثر پیرشدگی و گرمایش میکروویو بر خواص قیر و مخلوط آسفالتی

به‌منظور شبیه‌سازی پیرشدگی مخلوط‌های آسفالتی، نمونه‌های متراکم‌شده به مدت ۵ شبانه‌روز در دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد در آون آزمایشگاهی قرار گرفتند تا شرایط پیرشدگی بلندمدت معادل حدود ۷/۵ سال شبیه‌سازی شود. [۲۴]. پس از پایان فرآیند پیرشدگی، نمونه‌ها تا رسیدن به دمای محیط نگهداری شدند و نمای ظاهری نمونه‌های پیرشده و پیرنشده در شکل ۸ ارائه شد. همچنین، به‌منظور بررسی اثر گرمایش میکروویو مورد استفاده در فرآیند ترمیم بر خواص فیزیکی قیر، آزمون‌های درجه نفوذ و نقطه نرمی بر روی قیر خالص و قیر لاستیکی پس از گرمادهی تا دمای ۱۴۰ تا ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام و نتایج با مقادیر اولیه مقایسه شد. [۲۵].



(ب)



(الف)

شکل ۸- تغییرات ظاهری نمونه‌های آسفالتی در اثر پیرشدگی. (الف) نمونه پیرنشده. (ب) نمونه پیرشده

۵- نتایج و بحث

بر اساس نتایج آزمایش مارشال، درصد قیر بهینه مخلوط برابر با ۵۰٫۵ درصد وزنی مخلوط و مقدار بهینه پودر لاستیک برابر با ۲۰ درصد وزنی قیر تعیین شد. سپس، اثر افزودن صفر، ۲، ۴ و ۶ درصد الیاف فولادی بر مقاومت کششی غیرمستقیم، تحلیل حساسیت رطوبتی طبق استاندارد^۱ رفتار حرارتی و قابلیت بازیابی نمونه‌ها پس از گرمایش میکروویو بررسی شد. نتایج در دو وضعیت پیرنشد و پیرشده و برای نمونه‌های حاوی قیر خالص و قیر لاستیکی ارزیابی شدند.

۵-۱- نتایج مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی حاوی قیر لاستیکی و الیاف فولادی

نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های پیرنشد، محاسبه شده بر اساس رابطه ۷، در شکل ۹ ارائه شده است. مقاومت اولیه مخلوط‌های حاوی قیر لاستیکی کمتر از نمونه‌های حاوی قیر خالص بود. مقاومت نمونه بدون الیاف حاوی قیر لاستیکی در شرایط خشک تقریباً ۱۲ درصد کمتر از نمونه متناظر حاوی قیر خالص بود. این رفتار می‌تواند ناشی از کاهش سختی مخلوط در اثر اصلاح قیر با پودر لاستیک باشد. بنابراین افت محدود مقاومت کششی در این نمونه لزوماً به معنای تضعیف کلی عملکرد نیست و باید همراه قابلیت تغییر شکل، مقاومت در برابر شرایط محیطی و ظرفیت ترمیم آن بررسی شود. افزایش مقدار الیاف فولادی در هر دو گروه قیر خالص و لاستیکی با افزایش تدریجی مقاومت کششی اولیه همراه بود. در مخلوط حاوی قیر خالص، افزودن ۲، ۴ و ۶ درصد الیاف به ترتیب باعث افزایش حدود ۵، ۷ و ۱۲ درصدی مقاومت کششی نسبت به نمونه بدون الیاف شد. مقادیر متناظر برای مخلوط حاوی قیر لاستیکی تقریباً ۸، ۱۱ و ۱۷ درصد بود. این روند نشان می‌دهد که افزایش الیاف، به‌ویژه در مقدار ۶ درصد، می‌تواند آرایش داخلی و تراکم مخلوط را تحت تأثیر قرار دهد. حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها مطابق رابطه (۹) محاسبه شد مطابق شکل ۱۰، اعمال شرایط ذوب‌ویخ موجب کاهش مقاومت کششی مخلوط‌های حاوی قیر لاستیکی شد. در مقابل، مخلوط‌های حاوی ۲، ۴ و ۶ درصد الیاف رفتار متعادل‌تری نشان دادند. این نتیجه بیانگر آن است که اثر مثبت الیاف بر گرمایش باید در کنار اثر آن بر تراکم، مقاومت اولیه و دوام محیطی بررسی شود.

$$TSR = \frac{ITS_{Conditioned}}{ITS_{dry}} \times 100 \quad (9)$$

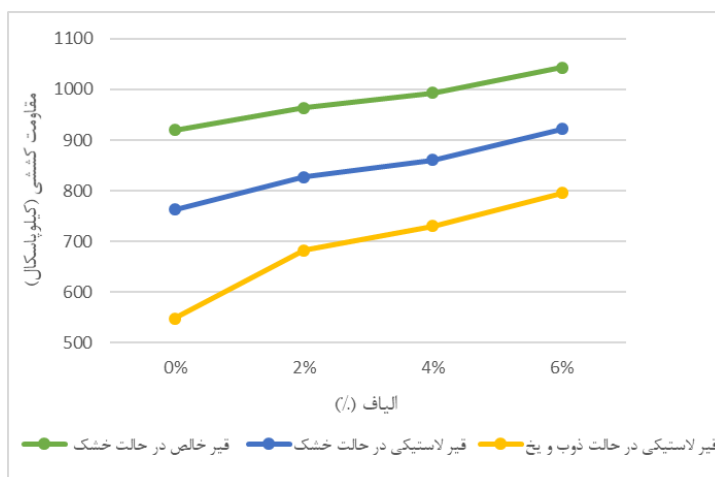
در این رابطه پارامترهای مختلف عبارتند از:

TSR: میزان حساسیت رطوبتی حالت عادی نسبت به حالت ذوب‌ویخ بر حسب درصد

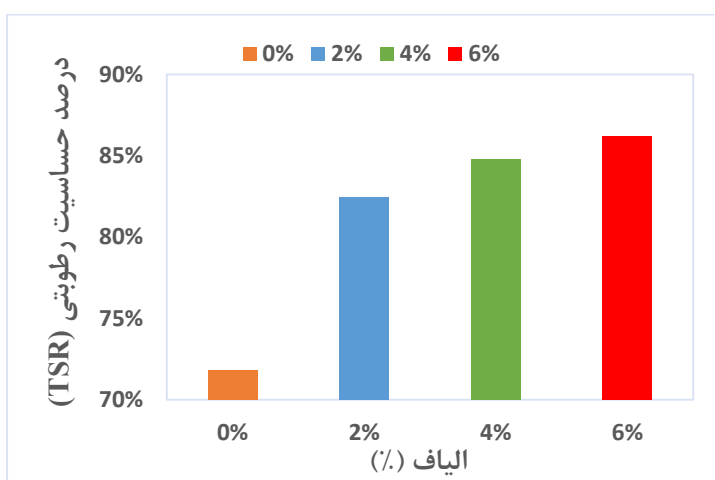
ITS_{dry} : مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها در حالت خشک بر حسب کیلوپاسکال

$ITS_{Conditioned}$: مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها پس از اعمال شرایط ذوب‌ویخ بر حسب کیلوپاسکال

¹ ASTM-D4867



شکل ۹- مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی پیرنشده قبل از ترمیم



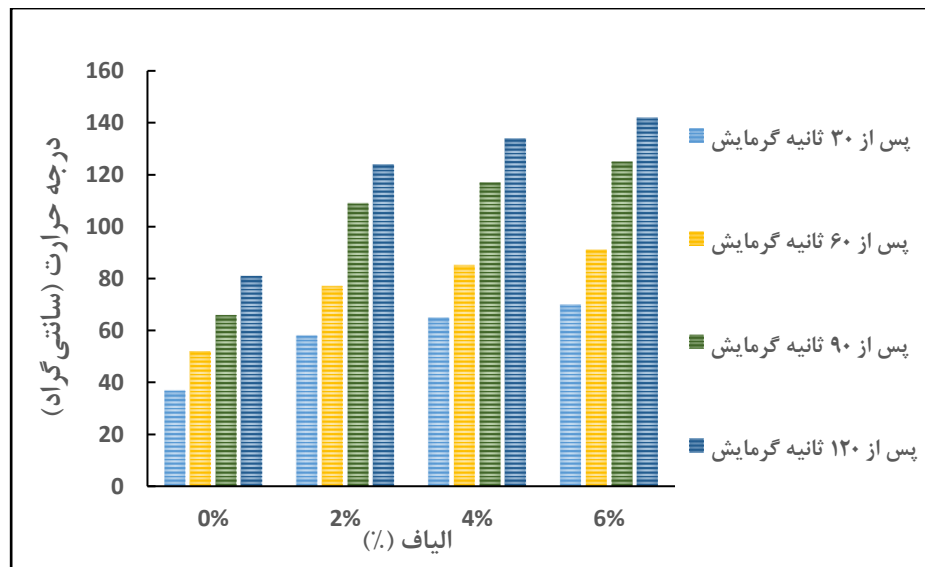
شکل ۱۰- حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی قیر لاستیکی در حالت پیرنشده

شاخص مقاومت کششی نمونه‌های حاوی قیر لاستیکی پس از اعمال شرایط ذوب و یخ نسبت به حالت خشک برای مقادیر صفر، ۲، ۴ و ۶ درصد الیاف به ترتیب حدود ۷۲، ۸۲، ۸۵ و ۸۶ درصد بود. افزودن الیاف موجب افزایش TSR و کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط شد. اما نسبت ۴ درصد الیاف به ۶ درصد محدود بود. بدین ترتیب، مجموعه نتایج مکانیکی اولیه نشان می‌دهد که مقدار ۴ درصد، حد مناسبی برای بهره‌گیری از قابلیت گرمایشی الیاف با بهبود مقاومت و دوام مخلوط است.

۵-۲- پاسخ حرارتی مخلوط‌های آسفالتی تحت گرمایش میکروویو

نتایج آزمون گرمایش میکروویو نشان داد که افزودن الیاف فولادی موجب تغییر قابل توجه پاسخ حرارتی مخلوط‌های آسفالتی می‌شود. دمای سطحی الیاف فولادی پس از ۱۲۰ ثانیه گرمایش به حدود ۲۹۳ درجه سانتی‌گراد رسید که بیانگر قابلیت بالای این الیاف در جذب انرژی الکترومغناطیسی و تبدیل آن به حرارت است. در مخلوط‌های حاوی قیر خالص، دمای نمونه‌های دارای ۰، ۲، ۴ و ۶ درصد الیاف پس از ۱۲۰ ثانیه به ترتیب ۸۱، ۱۲۴، ۱۳۴ و ۱۴۲ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. افزایش

مقدار الیاف فولادی موجب افزایش سرعت گرمایش و دمای نهایی نمونه‌ها شد. روند تغییرات دما در این گروه در شکل ۱۱ ارائه شده است.

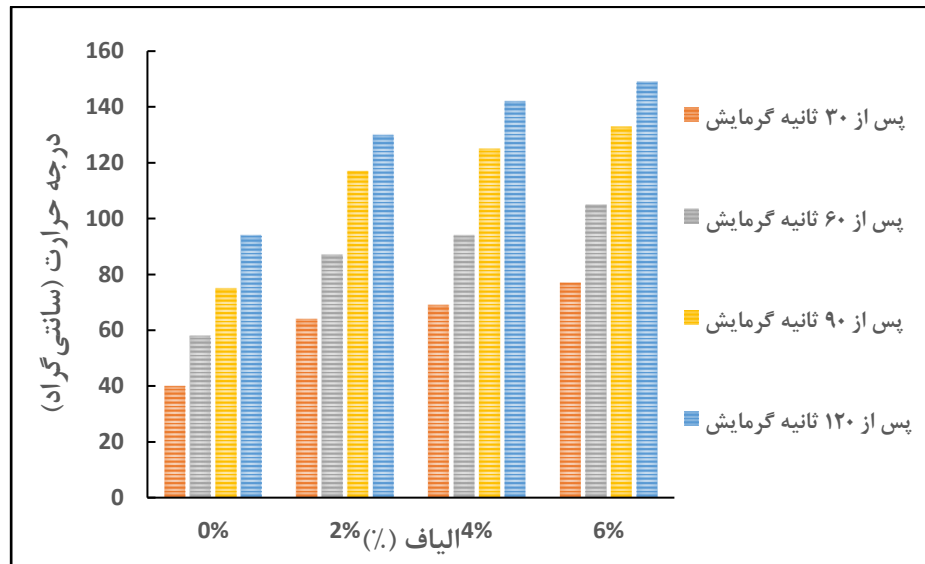


شکل ۱۱- تغییرات دمایی مخلوط‌های آسفالتی حاوی قیر خالص تحت گرمایش میکروویو در شرایط پیرنشده

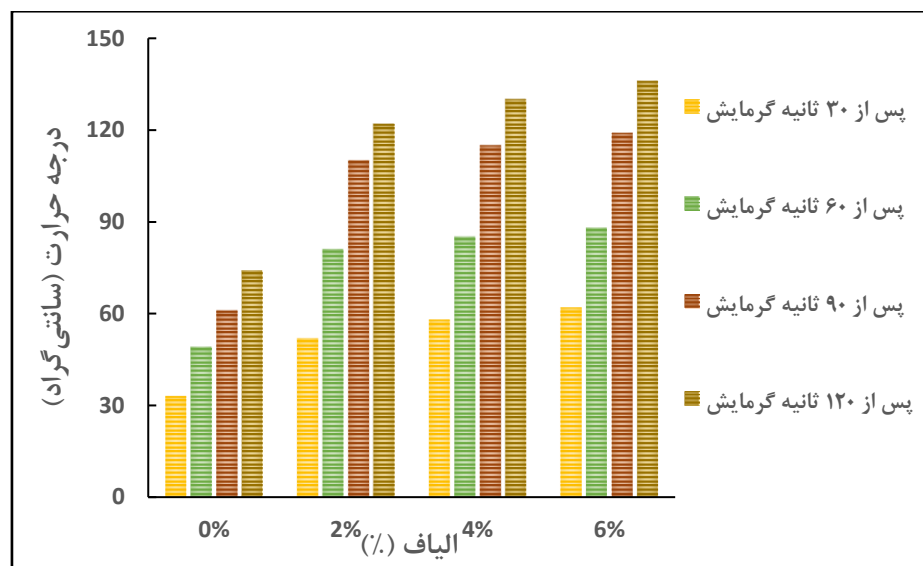
در مخلوط‌های حاوی قیر لاستیکی نیز روند مشابهی مشاهده شد، با این تفاوت که دمای نهایی نمونه‌ها در مقادیر یکسان الیاف افزایش بیشتری داشت. دمای نمونه‌های دارای ۰، ۲، ۴ و ۶ درصد الیاف پس از ۱۲۰ ثانیه به ترتیب ۹۴، ۱۳۰، ۱۴۲ و ۱۴۹ درجه سانتی‌گراد رسید (شکل ۱۲). مقایسه دو گروه نشان می‌دهد که جایگزینی قیر خالص با قیر لاستیکی، در کنار حضور الیاف فولادی، شرایط حرارتی مطلوب‌تری ایجاد می‌کند؛ به‌طوری‌که دمای نمونه حاوی ۴ درصد الیاف و قیر لاستیکی ۱۴۲ درجه سانتی‌گراد با نمونه حاوی ۶ درصد الیاف و قیر خالص برابر شد. این رفتار نشان‌دهنده امکان دستیابی به دمای موردنیاز فرآیند ترمیم با مقدار کمتری از الیاف فولادی در حضور قیر لاستیکی است.

بررسی نمونه‌های حاوی قیر لاستیکی پس از شرایط ذوب‌ویخ نیز حفظ پاسخ حرارتی الیاف فولادی را نشان داد. پس از ۱۲۰ ثانیه، دمای نمونه‌های دارای ۰، ۲، ۴ و ۶ درصد الیاف به ترتیب ۷۴، ۱۲۲، ۱۳۰ و ۱۳۶ درجه سانتی‌گراد رسید (شکل ۱۲). نتایج شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ نشان داد که درصد الیاف فولادی و نوع قیر، عوامل مؤثر بر پاسخ حرارتی مخلوط‌های آسفالتی تحت گرمایش میکروویو هستند. حضور الیاف فولادی موجب افزایش قابل‌توجه دمای نمونه‌ها شد و با افزایش مقدار الیاف، روند افزایشی دما حفظ گردید؛ به‌طوری‌که ترکیب قیر لاستیکی و ۴ درصد الیاف فولادی امکان دستیابی به دمای مناسب ترمیم را در زمان کوتاه‌تر فراهم کرد. بر این اساس، زمان ۱۲۰ ثانیه به‌عنوان زمان گرمایش مرحله ترمیم انتخاب شد. در این مدت نمونه‌های فاقد الیاف با قیر خالص و قیر لاستیکی به ترتیب به ۸۱ و ۹۴ درجه سانتی‌گراد رسیدند و نمونه‌های الیاف‌دار نیز در محدوده دمایی مناسب فرآیند ترمیم قرار گرفتند.

بررسی گرمایش طولانی‌تر نمونه حاوی ۴ درصد الیاف نشان داد که در ۱۸۰ ثانیه دما به حدود ۱۸۵ درجه سانتی‌گراد رسیده و در ۳۰۰ ثانیه با رسیدن دما به حدود ۲۸۷ درجه سانتی‌گراد، آسیب حرارتی شدید در نمونه ایجاد شد. بنابراین، کنترل هم‌زمان زمان و دمای گرمایش برای دستیابی به شرایط مناسب ترمیم و حفظ یکپارچگی مخلوط ضروری است.



شکل ۱۲- تغییرات دمایی مخلوط‌های آسفالتی حاوی قیر لاستیکی تحت گرمایش مایکروویو در شرایط پیرنشده

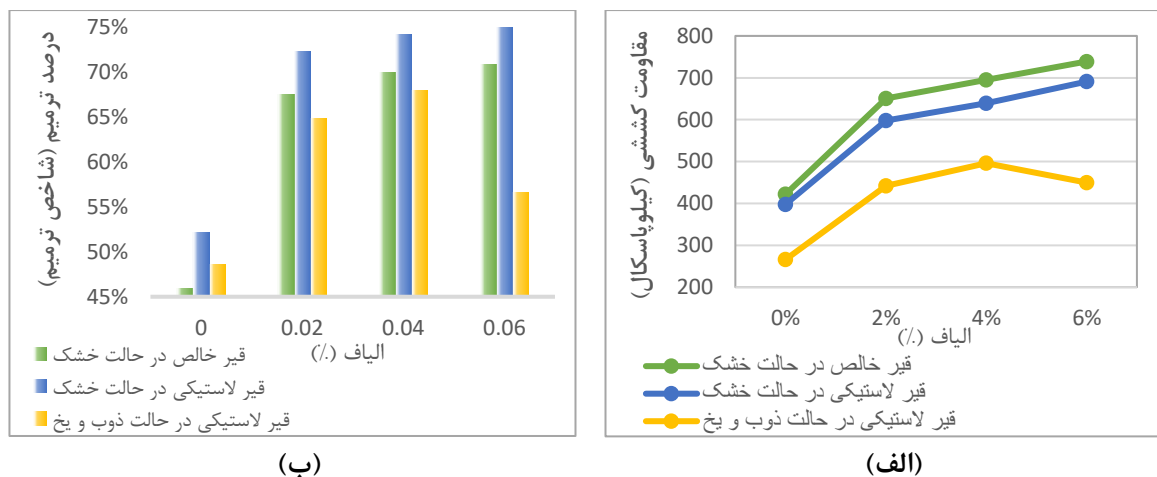


شکل ۱۳- تغییرات دمایی مخلوط‌های آسفالتی پیرنشده حاوی قیر لاستیکی تحت گرمایش مایکروویو پس از شرایط ذوب‌ویخ

۵-۳- ارزیابی مقاومت و شاخص ترمیم مخلوط‌های آسفالتی پس از گرمایش مایکروویو

پس از ایجاد ترک اولیه، نمونه‌ها به مدت ۱۲۰ ثانیه تحت گرمایش مایکروویو قرار گرفتند و پس از ۲۴ ساعت نگهداری در دمای محیط، مقاومت کششی غیرمستقیم آن‌ها مجدداً ارزیابی شد. نتایج نشان داد که افزایش مقدار الیاف فولادی تا ۶ درصد در حالت خشک با افزایش مقاومت پس از ترمیم همراه بوده و در هر دو نوع قیر خالص و قیر لاستیکی، بیشترین

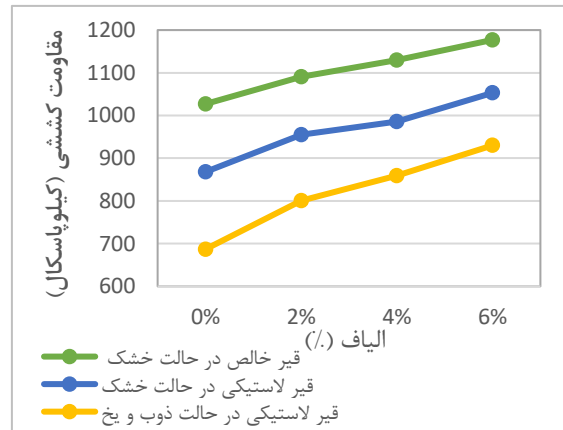
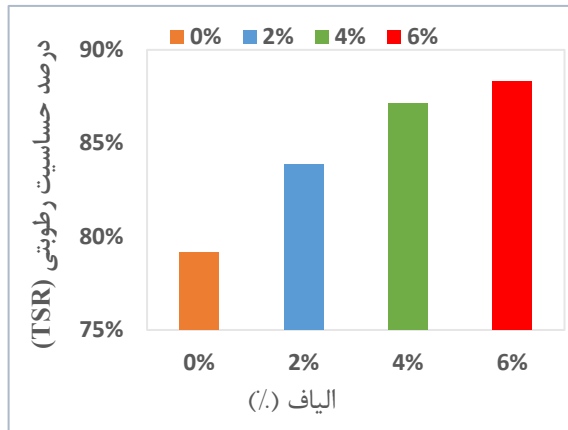
مقاومت بازیابی شده در این مقدار الیاف حاصل شد. با افزایش مقدار الیاف از ۴ به ۶ درصد، اگرچه دمای گرمایش افزایش یافت، روند بازیابی مقاومت تغییر محدودی نشان داد. نتایج مقاومت کششی بعد از ترمیم و تغییرات شاخص ترمیم در شکل ۱۴ (الف و ب) ارائه شده است. شاخص ترمیم نمونه‌های فاقد الیاف در شرایط خشک برای قیر خالص و قیر لاستیکی به ترتیب ۴۶ و ۵۲ درصد بود. با افزایش مقدار الیاف به ۲، ۴ و ۶ درصد، این شاخص در مخلوط‌های حاوی قیر خالص به ترتیب به ۶۸، ۷۰ و ۷۱ درصد و در مخلوط‌های حاوی قیر لاستیکی به ۷۲، ۷۴ و ۷۵ درصد رسید. اگرچه بالاترین شاخص ترمیم در نمونه‌های حاوی ۶ درصد الیاف به دست آمد، اختلاف آن با مقدار ۴ درصد محدود بود و در این مقدار، مقاومت اولیه و عملکرد محیطی مخلوط نیز شرایط مطلوب‌تری داشت. پس از چرخه ذوب و یخ، نمونه حاوی ۴ درصد الیاف و قیر لاستیکی با شاخص ترمیم ۶۸ درصد، توازن مناسبی میان قابلیت گرمایش، بازیابی مقاومت و عملکرد ترمیمی نشان داد.



شکل ۱۴- نتایج ارزیابی ترمیم مخلوط‌های آسفالتی پیر نشده. (الف) مقاومت کششی غیرمستقیم بعد از ترمیم و (ب) شاخص ترمیم

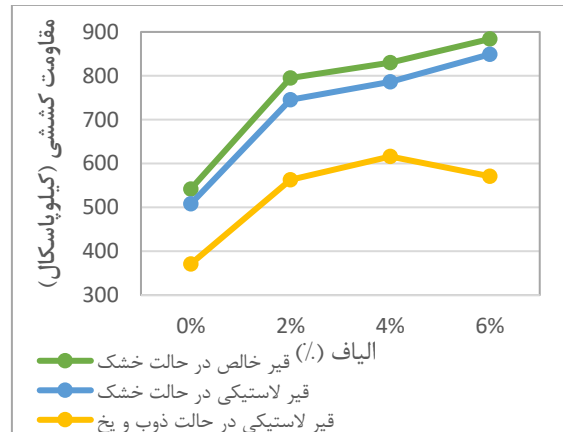
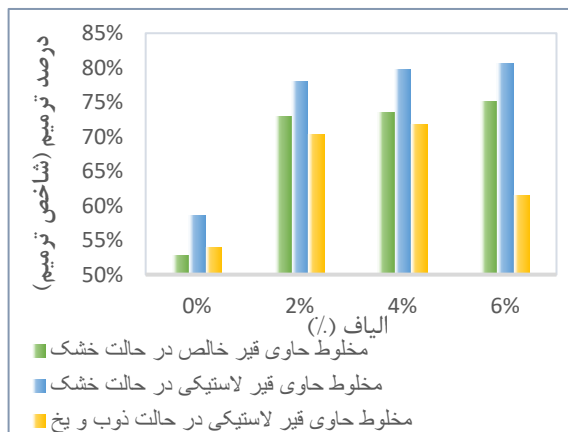
۵-۴- اثر پیرشدگی بر مقاومت کششی و قابلیت ترمیم مخلوط‌های آسفالتی

پیرشدگی موجب افزایش مقاومت کششی اولیه مخلوط‌های آسفالتی شد که می‌توان آن را به افزایش سختی قیر در اثر فرآیند پیرشدگی نسبت داد. در نمونه‌های پیر شده، مقاومت کششی مخلوط‌های حاوی قیر لاستیکی در مقایسه با قیر خالص کمتر بود و با افزایش مقدار الیاف، تغییرات مشخصی در مقاومت اولیه مشاهده شد؛ به‌طوری‌که مقاومت نمونه فاقد الیاف حاوی قیر لاستیکی حدود ۱۶ درصد کمتر از نمونه متناظر حاوی قیر خالص بود. پس از فرآیند گرمایش و ترمیم، نمونه حاوی ۶ درصد الیاف فولادی در هر دو نوع قیر بالاترین مقاومت کششی را نشان داد. اما درصد بهبود ترمیم نمونه‌های حاوی ۶ درصد الیاف در مقایسه با نمونه‌های حاوی ۴ درصد الیاف، محدود بود. شاخص مقاومت کششی نمونه‌های پیر شده حاوی ۰، ۲، ۴ و ۶ درصد الیاف پس از اعمال شرایط ذوب و یخ نسبت به حالت خشک به ترتیب حدود ۷۹، ۸۴، ۸۷ و ۸۸ درصد به دست آمد که نشان داد افزودن الیاف فولادی موجب بهبود حساسیت رطوبتی می‌شود و نتایج مقاومت کششی و حساسیت رطوبتی در شکل ۱۵ (الف و ب) ارائه شده است. شاخص ترمیم در نمونه‌های پیر شده در سطوح مطلوبی قرار داشت و تغییرات آن تحت تأثیر مقدار الیاف فولادی و شرایط محیطی ارزیابی شد.



(ب)

(الف)



(د)

(ج)

شکل ۱۵- نتایج مخلوط‌های آسفالتی پیرشده. (الف) مقاومت کششی غیرمستقیم. (ب) حساسیت رطوبتی

مخلوط‌های حاوی قیر لاستیکی. (ج) مقاومت کششی غیرمستقیم قبل از ترمیم. (د) درصد ترمیم

در مجموع، افزایش مقدار الیاف تا ۶ درصد در حالت خشک و تا ۴ درصد پس از اعمال شرایط ذوب و یخ با بهبود شاخص ترمیم همراه بود. نمونه حاوی ۴ درصد الیاف فولادی در شرایط مختلف، توازن مناسبی میان بازیابی مقاومت و قابلیت ترمیم نشان داد. این رفتار را می‌توان به تأثیر هم‌زمان الیاف فولادی بر تولید گرما و فراهم شدن شرایط مناسب برای جریان قیر و اتصال مجدد سطوح ترک نسبت داد. روند تغییرات مقاومت قبل از ترمیم و شاخص ترمیم در شکل ۱۵ (ج و د) ارائه شده است.

۵-۵- اثر گرمایش مایکروویو بر مشخصات قیر

مقایسه مشخصات فیزیکی قیر قبل و بعد از گرمایش مایکروویو نشان داد که نقطه نرمی و درجه نفوذ در هر دو نوع قیر تغییرات اندکی داشته است. نقطه نرمی قیر خالص از ۴۵.۷ به ۴۵.۹ درجه سانتی‌گراد و قیر لاستیکی از ۵۱.۶ به ۵۱.۷ درجه

سانتی‌گراد افزایش یافت؛ همچنین درجه نفوذ قیر خالص از ۹۶ به ۹۷ و قیر لاستیکی از ۱۱۰ به ۱۱۲ واحد ۰.۱ میلی‌متر رسید. این تغییرات نشان می‌دهد که گرمایش میکروویو به مدت ۱۲۰ ثانیه در شرایط آزمایش، ضمن فراهم کردن دمای موردنیاز برای فرآیند ترمیم، تغییر قابل توجهی در مشخصات فیزیکی قیر ایجاد نکرده و ویژگی‌های مورد بررسی قیر پس از گرمایش تا حد زیادی حفظ شده‌اند. نتایج نقطه نرمی و درجه نفوذ قیر خالص و قیر لاستیکی قبل و بعد از گرمایش میکروویو در جدول ۹ ارائه شده است.

جدول ۹- نقطه نرمی و درجه نفوذ قیر خالص و قیر لاستیکی

آزمایش	نوع قیر	واحد	قبل از گرمایش	بعد از گرمایش
نقطه نرمی	خالص	°C	۴۵.۷	۴۵.۹
نقطه نرمی	لاستیکی ۲۰٪	°C	۵۱.۶	۵۱.۷
درجه نفوذ	خالص	0.1 mm	۹۶	۹۷
درجه نفوذ	لاستیکی ۲۰٪	0.1 mm	۱۱۰	۱۱۲

۵-۶- ارزیابی خودترمیمی ترک در مخلوط‌های آسفالتی تحت گرمایش میکروویو

بررسی تصاویر نمونه حاوی قیر لاستیکی و ۴ درصد الیاف فولادی نشان داد که ترک اولیه با عرض حدود ۵ میلی‌متر پس از ۱۲۰ ثانیه گرمایش میکروویو و ۲۴ ساعت نگهداری در دمای محیط، از نظر ظاهری بسته شد. مقایسه تصاویر پیش و پس از فرآیند ترمیم در شکل ۱۶ (الف و ب)، کاهش عرض ترک و بازیابی پیوستگی سطحی مخلوط را نشان می‌دهد. این رفتار ناشی از تولید گرمای موضعی توسط الیاف فولادی، افزایش دمای قیر و بهبود جریان‌پذیری آن در ناحیه ترک است که موجب تماس مجدد و پیوستگی سطوح آسیب‌دیده می‌شود. در ترک‌های با عرض بیشتر از ۵ میلی‌متر، میزان ترمیم ظاهری با افزایش عرض اولیه کاهش یافت؛ زیرا افزایش فاصله میان سطوح ترک، تماس مؤثر آن‌ها را محدود می‌کند. بنابراین، عرض اولیه ترک یکی از عوامل مؤثر بر قابلیت خودترمیمی بوده و نتایج تصویری، همراه با مقاومت کششی و شاخص ترمیم، عملکرد مناسب این ترکیب را در بازیابی پیوستگی ترک‌ها تحت گرمایش میکروویو تأیید می‌کند.



(ب)



(الف)

شکل ۱۶- نمای ترک نمونه آسفالتی. (الف) قبل از ترمیم. (ب) ترمیم بعد از گرمایش

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که افزودن الیاف فولادی موجب بهبود پاسخ حرارتی، افزایش سرعت گرمایش و ارتقای قابلیت بازیابی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی تحت گرمایش مایکروویو می‌شود. اگرچه نمونه‌های حاوی ۶ درصد الیاف بیشترین دمای نهایی و مقاومت اولیه را نشان دادند، اختلاف عملکرد ترمیمی آن‌ها با نمونه‌های حاوی ۴ درصد الیاف محدود بود. همچنین، استفاده از قیر لاستیکی با وجود کاهش مقاومت اولیه، موجب بهبود پاسخ حرارتی و قابلیت ترمیم ترک در مقایسه با قیر خالص شد. در مجموع، ترکیب قیر لاستیکی و ۴ درصد الیاف فولادی، مناسب‌ترین توازن میان عملکرد حرارتی، مقاومت مکانیکی و قابلیت ترمیم را فراهم کرد. در مجموع، مهم‌ترین نتایج و یافته‌های حاصل از این پژوهش به شرح زیر جمع‌بندی می‌شود:

۱. اثر الیاف فولادی: افزودن الیاف فولادی موجب افزایش دمای نمونه‌ها، بهبود پاسخ حرارتی و افزایش شاخص ترمیم مخلوط‌های آسفالتی تحت گرمایش مایکروویو شد.
۲. عملکرد قیر لاستیکی: استفاده از قیر لاستیکی، با وجود کاهش مقاومت اولیه، موجب افزایش دمای ایجادشده تحت گرمایش مایکروویو و بهبود قابلیت ترمیم ترک شد. به‌طوری‌که شاخص ترمیم نمونه پیرنشده حاوی ۴ درصد الیاف به ۷۴ درصد رسید.
۳. تعیین مقدار بهینه الیاف: با توجه به افزایش محدود شاخص ترمیم در مقدار ۶ درصد الیاف نسبت به ۴ درصد و با در نظر گرفتن هم‌زمان پاسخ حرارتی، مقاومت مکانیکی و قابلیت ترمیم، مقدار ۴ درصد الیاف فولادی به‌عنوان ترکیب مناسب انتخاب شد.
۴. عملکرد تحت شرایط پیرشدگی و ذوب‌ویخ: مخلوط حاوی قیر لاستیکی و ۴ درصد الیاف فولادی، در شرایط پیرشدگی و ذوب‌ویخ، قابلیت بازیابی مناسبی نشان داد و عملکرد قابل قبولی در شرایط محیطی مختلف داشت.
۵. حساسیت رطوبتی و ترمیم ترک: افزودن الیاف فولادی موجب کاهش حساسیت رطوبتی و بهبود عملکرد مخلوط‌ها شد. همچنین، نمونه حاوی قیر لاستیکی و ۴ درصد الیاف فولادی توانست ترک‌هایی با عرض حدود ۵ میلی‌متر را پس از فرآیند گرمایش مایکروویو، از نظر ظاهری و سطحی ترمیم کند.

۷- مراجع

- [1] Alsheyab, Mohammad Ahmad, Mohammad Ali Khasawneh, Anas Abualia, and Ansam Sawalha. "A critical review of fatigue cracking in asphalt concrete pavement: a challenge to pavement durability." *Innovative Infrastructure Solutions* 9, No. 10 (2024): 386.
- [2] Yao, Hui, Yiran Wang, Pengrui Ma, Xin Li, and Zhanping You. "A literature review: asphalt pavement repair technologies and materials." In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability*, Vol. 177, No. 5, pp. 259–273. Emerald Publishing Limited, (2024).
- [3] Varma, Remya, Romain Balieu, and Nicole Kringos. "A state-of-the-art review on self-healing in asphalt materials: Mechanical testing and analysis approaches." *Construction and Building Materials* 310 (2021): 125197.
- [4] Kim, Y. Richard. *Modeling of Asphalt Concrete*. McGraw Hill Professional, Technology & Engineering, 320 pages (2008).
- [5] Liu, Ziming, Sang Luo, Yongdan Wang, and Huaxin Chen. "Induction heating and fatigue-damage induction healing of steel fiber–reinforced asphalt mixture." *Journal of Materials in Civil Engineering* 31, No. 9 (2019): 04019180.
- [6] Mashaan, N. S., A. Chegenizadeh, H. Nikraz, and A. Rezagholilou. "Investigating the engineering properties of asphalt binder modified with waste plastic polymer." *Ain Shams Engineering Journal* 12 (2021): 1569–1574.
- [7] Chen, Y.P. "Discussion on the Maintenance and Repair Technology of Asphalt Pavement Crack and Pit." *J. Guangdong Commun. Polytech.* (2016): 15–17.
- [8] Sun, Daquan, Guoqiang Sun, Xingyi Zhu, Alvaro Guarin, Bin Li, Ziwei Dai, and Jianming Ling. "A comprehensive review on self-healing of asphalt materials: Mechanism, model, characterization and enhancement." *Advances in Colloid and Interface Science* 256 (2018): 65–93.
- [9] Chávez-Delgado, Manuel, Jose L. Concha, Silvia Caro, Luis E. Arteaga-Pérez, and Jose Norambuena-Contreras. "Enhancing rheological and self-healing properties of aged bitumen using a pyro-rejuvenator from waste tyres." *Construction and Building Materials* 470 (2025): 140639.
- [10] Zhang, Lei, Inge Hoff, Xuemei Zhang, Jianan Liu, Chao Yang, and Fusong Wang. "A methodological review on development of crack healing technologies of asphalt pavement." *Sustainability* 15, No. 12 (2023): 9659.
- [11] Minsk, L. David. "Electrically conductive asphalt for control of snow and ice accumulation." *Highway Research Record* 227 (1968).
- [12] García, Alvaro, J. Norambuena-Contreras, and Manfred N. Partl. "Experimental evaluation of dense asphalt concrete properties for induction heating purposes." *Construction and Building Materials* 46 (2013): 48–54.
- [13] Jahanbakhsh, H., M.M. Karimi, B. Jahangiri, and F.M. Nejad. "Induction heating and healing of carbon black modified asphalt concrete under microwave radiation." *Construction and Building Materials* 174 (2018): 656–666.
- [14] Sun, Yihan, Lijuan Zheng, Yudong Cheng, Fengxia Chi, Kai Liu, and Tongbao Zhu. "Research on maintenance equipment and maintenance technology of steel fiber modified

asphalt pavement with microwave heating." *Case Studies in Construction Materials* 18 (2023): e01965.

[15] Su, Xin, Yong Lai, Yan Liu, Daoxun Ma, and Peng Wang. "Research of deicing and melting snow on airport asphalt pavement by carbon fiber heating wire." *Advances in Materials Science and Engineering* 2020, No. 1 (2020): 5209350.

[16] Chen, Feng, and Romain Balieu. "A state-of-the-art review of intrinsic and enhanced electrical properties of asphalt materials: Theories, analyses and applications." *Materials & Design* 195 (2020): 109067.

[17] Fakhri, Mansour, Sajad Javadi, Reza Sedghi, Alireza Sassani, Ali Arabzadeh, and Behnam Baveli Bahmai. "Microwave induction heating of polymer-modified asphalt materials for self-healing and deicing." *Sustainability* 13, No. 18 (2021): 10129.

[18] Yalcin, Erkut. "Effects of microwave and induction heating on the mechanical and self-healing characteristics of the asphalt mixtures containing waste metal." *Construction and Building Materials* 286 (2021): 122965.

۱۹. آیین‌نامه روسازی راه‌های ایران، نشریه ۲۳۴، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی ایران، چاپ اول، (۲۰۱۱).

[20] Way, George B. "Asphalt-rubber 45 years of progress." In *Proceedings of the Asphalt Rubber 2012 Conference*, Munich, Germany. (2012).

[21] Aksoy, Atakan, Erol Iskender, and H. Tolga Kahraman. "Application of the intuitive k-NN Estimator for prediction of the Marshall Test (ASTM D1559) results for asphalt mixtures." *Construction and Building Materials* 34 (2012): 561–569.

[22] Azarhoosh, Alireza. "Modeling Marshall test results of hot mix asphalt using nonlinear genetic programming techniques." *AUT Journal of Civil Engineering* 5, No. 1 (2021): 171–182.

[23] Islam, M.R., M.I. Hossain, and R.A. Tarefder. "A study of asphalt aging using Indirect Tensile Strength test." *Construction and Building Materials* 95 (2015): 218–223.

[24] Elwardany, M.D., F. Yousefi Rad, C. Castorena, and Y.R. Kim. "Evaluation of asphalt mixture laboratory long-term ageing methods for performance testing and prediction." *Road Materials and Pavement Design* 18 (sup1) (2017): 28–61.

[25] Ye, Zhoujing, Wenjuan Ren, Hailu Yang, Yinghao Miao, Fengyan Sun, and Linbing Wang. "An improved asphalt penetration test method." *Materials* 14, No. 1 (2020): 147.

۲۶. کاوسی امیر، دوستی مهردخت، و آذر نیا مهدی. "ارزیابی حساسیت رطوبتی و مقاومت خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی پودر لاستیک و پودر لاستیک فرآوری شده." (۲۰۲۱): ۱۵۳-۱۶۶.

[27] Yang, Hanwen, Jian Ouyang, Zhao Jiang, and Jinping Ou. "Effect of fiber reinforcement on self-healing ability of asphalt mixture induced by microwave heating." *Construction and Building Materials* 362 (2023): 129701.