Semnan University

Journal of Transportation Infrastructure Engineering

Journal homepage: https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en

ISSN: 2821-0549

Research Article

Investigation of the Effect of Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) and Carbon Fibers (CF) on the Thermal Behavior of Asphalt Mixtures Under Microwave Irradiation

Shahab Hasani Nasab[a] *, Mohsen Zahedi [b] , Hadis Mohammadi Sabet [b]

[a] Assistant Professor, Department of Road and Transportation, Faculty of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, I. R. Iran.
[b] MSc., Department of Road and Transportation, Faculty of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2026-06-15

Revised: 2026-07-31

Accepted: 2026-08-09

Keywords:

Asphalt,
Microwave heating,
Styrene-butadiene-styrene,
Carbon fibers.

ABSTRACT

A modern method to improve pavement thermal performance is using induction heating or microwave radiation. Asphalt mixtures have low thermal conductivity due to the insulating nature of aggregates and bitumen. This causes a severe temperature gradient between the surface and depth of the asphalt layer when heated by microwaves. To overcome this, using various additives to create a uniform heat transfer network has attracted many researchers. The main objective of this study is to investigate the effect of styrene-butadiene-styrene (SBS) and carbon fibers (CF) on heating rate and temperature distribution of asphalt samples under microwave radiation and to evaluate their mechanical properties. To study the heating process, asphalt samples were placed in a microwave for 30, 60, 90, 120, and 150 seconds, and the temperature on the surface and inside the samples was examined. Results showed that carbon fibers increase heating rate and provide more uniform temperature distribution than the control sample, while SBS reduced the average surface and internal temperature and weakened temperature distribution uniformity. Furthermore, a three-point bending test was used to evaluate and compare the effect of these additives on mechanical properties. Results showed that SBS increases sample strength by 180% compared to control samples. Carbon fibers reduced asphalt sample strength by approximately 21% compared to control samples. Overall, samples made with both SBS and CF have better performance than other asphalt samples; they have a strength about 164% of control samples, as well as more uniform temperature distribution and higher heating rate.

*** Corresponding author.**
E-mail address: s.hasani.ac.ir

How to cite this article: Hasani Nasab, Sh., Zahedi, M., and Mohammadi Sabet, H.,. (2026). Investigation of the effect of Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) and Carbon Fibers (CF) on the thermal behavior of asphalt mixtures under microwave irradiation. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering, 12(2), pp.25-47.*

DOI: https://doi.org/ 10.22075/jtie.2026.41621.1774

© 2026 The Author(s). Journal of Transportation Infrastructure Engineering published by Semnan University Press.
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

مجله زیرساخت های حمل و نقل

وبسایت نشریه : https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en

شاپا: 2821-0549

مقاله پژوهشی

بررسی تأثیر استایرن- بوتادین- استایرن (SBS) و الیاف کربن (CF) بر رفتار حرارتی مخلوط‌های آسفالتی تحت امواج مایکروویو

سید شهاب حسنی نسب [۱*]، محسن زاهدی[۲]، حدیث محمدی ثابت[۲]

[۲] استادیار، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

[۱] دانش آموخته کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۵/۰۳/۲۵

بازنگری مقاله: ۱۴۰۵/۰۵/۰۹

پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۵/۱۸

واژه‌های کلیدی:

گرمایش مایکروویو،

استایرن- بوتادین- استایرن،

الیاف کربن،

آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای.

چکیده

یکی از روش‌های نوین در زمینه بهبود عملکرد حرارتی روسازی، استفاده از روش گرمایش با امواج مایکروویو است. مخلوط‌های آسفالتی به دلیل ماهیت عایق سنگدانه‌ها و قیر، ضریب هدایت حرارتی پایینی دارند. این ویژگی در هنگام گرمایش با امواج مایکروویو منجر به ایجاد گرادیان دمایی شدید میان سطح و عمق لایه‌ی آسفالت می‌شود. برای غلبه بر این محدودیت، استفاده از افزودنی‌های مختلف جهت ایجاد یک شبکه انتقال حرارت یکنواخت مورد توجه محققین بسیاری قرار گرفته است. هدف اصلی این تحقیق بررسی تأثیر استایرن- بوتادین- استایرن (SBS) و الیاف کربن (CF) بر نرخ گرمایش و توزیع دمایی نمونه‌های آسفالتی تحت تابش امواج مایکروویو است. به منظور بررسی فرایند گرمایش، نمونه‌های آسفالتی در مدت زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰و ۱۵۰ ثانیه، در داخل دستگاه مایکروویو قرار گرفتند و سپس دمای ایجاد شده در سطح و داخل نمونه‌ها، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که الیاف کربن باعث افزایش نرخ گرمایش و توزیع یکنواخت‌تر دمای نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های شاهد می‌گردد. همچنین، SBS دمای متوسط سطح و داخل نمونه‌های آسفالتی را کاهش داد و یکنواختی توزیع دما را ضعیف‌تر کرد. علاوه بر این، به منظور ارزیابی و مقایسه تأثیر این افزودنی‌ها بر خواص مکانیکی مخلوط آسفالتی از آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای استفاده گردید. نتایج نشان داد که SBS منجر به افزایش ۱۸۰ درصدی مقاومت نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های شاهد می‌گردد. همچنین، الیاف کربن مقاومت نمونه‌های آسفالتی را تقریباً ۲۱ درصد نسبت به نمونه‌های شاهد کاهش داد. به‌طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که نمونه‌های ساخته شده با ترکیب دو افزودنی SBS و CF، دارای عملکرد بهتری نسبت به سایر نمونه‌های آسفالتی می‌باشند؛ به‌طوری که دارای مقاومتی حدود ۱۶۴ درصد مقاومت نمونه‌های شاهد بوده و همچنین دارای توزیع دمایی یکنواخت‌تر و نرخ گرمایش بیشتری نسبت به نمونه‌های شاهد می‌باشند.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: s.hasani.ac.ir

استناد به این مقاله: حسنی نسب، سید شهاب.، زاهدی، محسن و محمدی ثابت حدیث. بررسی تأثیر استایرن- بوتادین- استایرن (SBS) و الیاف کربن (CF) بر رفتار حرارتی مخلوط‌های آسفالتی تحت امواج مایکروویو. *مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل*، ۱۲ (۲)، ۲۵-۴۷.

DOI: https://doi.org/ 10.22075/jtie.2026.41621.1774

۱. مقدمه

امروزه هزینه‌های زیاد تعمیر و نگهداری راه‌ها، محققین را به سمت بهره‌گیری از فناوری‌های نوین جهت افزایش طول عمر خدمت‌دهی و کاهش دوره‌های مرمت سوق داده است (لیانگ و همکاران، ۲۰۲۱). یکی از روش‌های پیشرفته در این زمینه، استفاده از گرمایش با امواج مایکروویو است (نورامبوئنا-کنتراس و گارسیا، ۲۰۱٦). از جمله روش‌های گرمایش آسفالت، می‌توان روش‌های گرمایش به وسیله امواج مایکروویو، گرمایش به وسیله امواج الکترومغناطیس (گرمایش القایی) و گرمایش به وسیله نور خورشید را برشمرد که هرکدام مزایا و معایبی دارند. بنابراین محققین به دنبال روشی برای گرمایش آسفالت هستند که کمترین آثار زیست‌محیطی را داشته باشد و از لحاظ سرعت افزایش دما، تجهیزات، سهولت به‌کارگیری و هزینه مناسب‌تر باشد (آیار و همکاران، ۲۰۱٦). فناوری گرمایش با امواج مایکروویو به دلیل سرعت بالا، عدم تولید مستقیم گازهای گلخانه‌ای در محل و قابلیت نفوذ در لایه‌های روسازی، به عنوان یکی از امیدوارکننده‌ترین روش‌های نگهداری نوین مطرح شده است (گولیسانو و گالگو، ۲۰۲۱). با این حال، کارایی این روش به شدت به یکنواختی توزیع دما و سرعت گرمایش وابسته است. توزیع غیریکنواخت دما منجر به ایجاد نقاط داغ موضعی، اکسیداسیون قیر و تسریع پیرشدگی و در نتیجه کاهش دوام روسازی می‌شود (شا و همکاران، ۲۰۲۲). با وجود پتانسیل‌های عملیاتی، چالش اصلی در استفاده از مایکروویو، ماهیت دی‌الکتریک ضعیف مصالح سنگی و قیر است که منجر به راندمان حرارتی کم و اتلاف انرژی می‌گردد (وانگ و همکاران، ۲۰۲۲). در واقع، چنین می‌توان گفت که مخلوط‌های آسفالتی به دلیل ماهیت عایق سنگدانه‌ها و قیر، ضریب هدایت حرارتی پایینی دارند. این ویژگی در هنگام استفاده از امواج مایکروویو منجر به ایجاد گرادیان دمایی شدید میان سطح و عمق لایه می‌شود. تجمع حرارت در سطح می‌تواند باعث پیرشدگی شدید و اکسیداسیون قیر گردد، در حالی که دمای بخش‌های داخلی برای رسید

ن به تعادل دمایی لازم کفایت نمی‌کند (گائو و همکاران، ۲۰۱۹). به این معنی که لایه‌های زیرین آسفالت به دلیل ضریب هدایت حرارتی پایین مخلوط، همچنان سرد باقی می‌مانند (لو و همکاران، ۲۰۲٤). برای غلبه بر این محدودیت، استفاده از افزودنی‌های رسانای الکترومغناطیس جهت ایجاد یک شبکه انتقال حرارت یکنواخت در آسفالت مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است (لیو و همکاران، ۲۰۱۸؛ گائو و همکاران، ۲۰۱۹؛ لو و همکاران، ۲۰۲۱). در این راستا، به منظور افزایش سرعت گرمایش مخلوط آسفالتی از افزودنی‌های مختلفی استفاده شده است که این افزودنی‌ها، رسانایی مخلوط آسفالتی را افزایش داده و در نتیجه مخلوط را برای انتقال حرارت حساس‌تر می‌کنند و مصرف انرژی را کاهش می‌دهند (گارسیا ، ۲۰۱۲). برای نمونه، در یک تحقیق، راندمان گرمایش القایی و چگونگی توزیع حرارت در بتن آسفالتی با مواد افزودنی رسانای مختلف شامل الیاف فولادی، شن فولادی و سرباره فولادی به عنوان افزودنی‌های رسانا برای تهیه بتن‌های آسفالتی القایی مورد بررسی قرار گرفت، به این منظور، راندمان گرمایش القایی بتن آسفالتی با دوربین مادون قرمز اندازه-گیری شد. نتایج آن‌ها نشان داد که خواص حرارتی بتن آسفالتی با افزودن مواد رسانا تغییر می‌کند، به‌طوری که بتن آسفالتی با الیاف فولادی بهترین قابلیت گرمایش القایی را دارد، در حالی که بتن آسفالتی با سرباره فولادی دارای سرعت گرمایش القایی بسیار کمی است (لی و همکاران، ۲۰۱۹). برخی دیگر از پژوهشگران نیز اعتقاد دارند که ترکیب سنگدانه‌های سرباره فولادی و الیاف پشم در مخلوط‌های آسفالتی می‌تواند تا حدود زیادی باعث افزایش نرخ گرمایش با امواج مایکروویو گردد (لوریرو و همکاران، ۲۰۲۳). استفاده از افزودنی‌هایی که

دارای شباهت‌های ساختاری با قیر هستند نیز در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه محققین مختلف قرار گرفته است. کربن، یکی از موادی است که می‌توان آن را به لحاظ ساختاری بسیار شبیه به قیر توصیف کرد. فیبر کربن که عمدتاً از اتم‌های کربن ساخته شده است، یکی از مواد جامد پایه کربنی است که به منظور افزایش بازده گرمایش با امواج مایکروویو، چند سالی است که در تحقیقات در زمینه قیر و آسفالت مد نظر محققین قرار گرفته است (وانگ و همکاران، ۲۰۱٦). الیاف کربن، با کاهش مقاومت الکتریکی مخلوط، نرخ جذب انرژی را افزایش داده و به عنوان پل‌های حرارتی، انتقال گرما از سطح به عمق را تسهیل می‌کنند و در نتیجه توزیع انرژی را یکنواخت می‌سازند (وانگ و همکاران، ۲۰۱٦؛ رن و همکاران، ۲۰۲٤). گروهی از محققین به بررسی تأثیر کربن فعال بر فرایند گرمایش مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از امواج مایکروویو پرداختند، آنها از کربن فعال به عنوان یک افزودنی حساس به میدان الکترومغناطیس استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که نرخ گرمایش مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با کربن فعال تحت گرمایش با امواج مایکروویو ۵۵ درصد بیشتر از نمونه‌های بدون افزودنی است. همچنین، توزیع دما در نمونه‌های اصلاح شده با کربن فعال یکنواخت بوده و می‌تواند به صورت همگن‌تری دمای تمام قسمت‌های نمونه را افزایش دهد (امانی و همکاران، ۲۰۲۰). در تحقیق دیگری، تأثیر سه نوع الیاف مختلف شامل فیبر کربن، الیاف فولاد و پشم فولاد به عنوان مواد جاذب مایکروویو بر نرخ گرمایش مخلوط آسفالتی با استفاده از امواج مایکروویو مورد بررسی قرار گرفت، نتایج نشان داد که مخلوط آسفالت اصلاح شده با الیاف کربن، نرخ گرمایش بیشتری دارد (یانگ و همکاران، ۲۰۲۳). همچنین، در تحقیق دیگری، مشخص شد که با به‌کارگیری ۰/۲ درصد وزن کل مخلوط آسفالتی فیبر کربن، اختلاف دمای سطحی و داخلی نمونه‌های آسفالتی تحت گرمایش با امواج مایکروویو تا مقدار زیادی کاهش می‌یابد (حسامی و همکاران، ۲۰۱۷). همچنین، پژوهش‌های اخیر ارتباط مستقیم میان حضور الیاف کربن و بهبود عملکرد خودترمیمی را تأیید کرده‌اند. در یک مطالعه، تأثیر الیاف کربن بر رفتار ترمیم القایی چندمرحله‌ای مخلوط آسفالتی بررسی شد و نتایج نشان داد که افزودن ۱ درصد وزنی این الیاف (نسبت به قیر) با افزایش رسانایی گرمایی و بهبود انتقال حرارت، بازده ترمیم را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد، به‌گونه‌ای که حتی پس از ۵ چرخه شکست-ترمیم، بیش از ۳۰ درصد از انرژی شکست اولیه بازیابی می‌شود (یی و همکاران، ۲۰۲۳). در تحقیق دیگری، ترکیب الیاف کربن با سرباره فولاد در مخلوط آسفالتی بررسی شد و نتایج نشان داد که حضور این الیاف با بهبود یکنواختی توزیع دما و افزایش بازده گرمایش مایکروویو، به ترمیم مؤثر ترک‌ها به‌ویژه در مراحل اولیه گسترش ترک (ابعاد کمتر از ٤۰۰ میکرون) منجر می‌شود (وانگ و همکاران، ۲۰۲۵). از سوی دیگر، حفظ یکپارچگی سازه‌ای و مقاومت در برابر بارگذاری‌های متناوب در طول عمر خدمت‌دهی آسفالت، نیازمند استفاده از اصلاح‌کننده‌های پلیمری است. پلیمرهای مورد استفاده برای اصلاح آسفالت باید دارای ثبات کافی برای حفظ ساختار خود در طول فرآیند اختلاط و ایجاد یک شبکه پلیمری پیوسته با آسفالت باشند (پولاکو و همکاران، ۲۰۰٦). پلیمر استایرن-بوتادین- استایرن (SBS) به دلیل قابلیت بهبود خواص رئولوژیکی و افزایش دامنه عملکردی قیر، به عنوان یکی از رایج‌ترین پلیمرهای مورد استفاده در اصلاح قیر شناخته می‌شود (لی و همکاران، ۲۰۲۲؛ منگ و همکاران، ۲۰۲٦).

به‌طور کلی، علاوه بر بهبود رفتار حرارتی، ارتقای خواص مکانیکی مخلوط آسفالتی نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. پلیمر استایرن- بوتادین- استایرن از جمله موثرترین اصلاح‌کننده‌های الاستومری است که با

تشکیل یک شبکه سه‌بعدی در قیر، مقاومت در برابر شیارشدگی و ترک‌خوردگی را افزایش می‌دهد (خدایی و مهرآرا، ۲۰۰۹؛ هی و همکاران، ۲۰۲۵). تحقیقات بسیاری در زمینه بررسی تأثیر افزودن SBS بر خواص قیر و مخلوط‌های آسفالتی صورت گرفته است. برای نمونه، در یک تحقیق، محققین به بررسی و ارزیابی بهبود مشخصات فیزیکی و رئولوژیکی قیرهای اصلاح شده با SBS پرداختند . به این منظور، از قیر PG 64-22 و SBS در مقادیر مختلف ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی قیر استفاده کردند. سپس، با استفاده از آزمایش‌های ویسکومتر چرخشی (RV)، رئومتر برشی دینامیکی (DSR) و رئومتر برشی خمشی (BBR)، خواص قیر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان داد که افزودن SBS به قیر منجر به افزایش ویسکوزیته می‌شود. علاوه بر این مشاهده کردند که افزودن SBS به طور قابل توجهی مقاومت شیارشدگی قیر را بهبود می‌بخشد (همتی و همکاران، ۲۰۲۳). در تحقیق دیگری، تأثیر پلیمر استایرن- بوتادین- استایرن (SBS) با مقادیر ٤، ٥ و ١٠ درصد وزنی قیر بر قابلیت گرمایش آسفالت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان داد که اصلاح آسفالت با پلیمر SBS، قابلیت گرمایش آسفالت را کاهش می‌دهد و در نتیجه دمای متوسط سطح کمتر و یکنواختی توزیع دما ضعیف‌تر می‌شود. همچنین، مشاهده کردند که نمونه‌های اصلاح‌شده با SBS، از مقاومت خمشی بالاتری نسبت به نمونه‌های ساخته شده با قیر خالص برخوردار هستند (فخری و همکاران، ۲۰۲۱). در یک مطالعه مروری، نتایج آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی، ویسکوزیته و شکل‌پذیری قیرهای اصلاح‌شده با SBS که توسط محققین مختلف در دو بازه ۲ تا ٤.٥ درصد و ٤.٥ تا ٨ درصد وزنی قیر بررسی شده بود، گردآوری شد. بر اساس تحلیل این نتایج، محدوده بهینه SBS برای دستیابی به بیشترین بهبود در خواص قیر، ٤.٥ تا ٨ درصد وزنی تعیین گردید (لی و همکاران، ۲۰۲۲).

با وجود مطالعات گسترده روی هر یک از این الیاف رسانا (که بر رفتار حرارتی تمرکز دارند) و پلیمر استایرن- بوتادین- استایرن (که بر رفتار مکانیکی تمرکز دارد) در شرایط تابش مایکروویو بر توزیع دمایی آسفالت کمتر مورد توجه محققین قرار گرفته است. از این رو، پژوهش حاضر با هدف رفع چالش عدم یکنواختی توزیع دما در روش‌های نوین نگهداری، به بررسی آزمایشگاهی عملکرد مکانیکی و حرارتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی دو افزودنی SBS و الیاف کربن می‌پردازد. در این راستا، پلیمر SBS به‌منظور بهبود مقاومت خمشی و الیاف کربن به‌منظور افزایش نرخ گرمایش و یکنواختی توزیع دما تحت تابش مایکروویو به‌کار رفته‌اند. علت به‌کارگیری هم‌زمان این دو ماده، تأمین هم‌زمان دو نیاز اساسی روسازی‌های ترمیم‌پذیر یعنی دوام سازه‌ای و قابلیت گرمایش با دو راهکار مستقل است که هر یک به تنهایی قادر به تأمین آن‌ها نیستند. در این تحقیق، چهار نوع آسفالت مختلف شامل آسفالت بدون مواد افزودنی، آسفالت اصلاح شده با استایرن- بوتادین- استایرن، آسفالت اصلاح شده با الیاف کربن و آسفالت اصلاح شده با هردو ماده استایرن- بوتادین- استایرن و الیاف کربن ساخته شده است و پس از شکست نمونه‌های نیم- استوانه‌ای در آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای، تحت گرمایش با امواج مایکروویو قرار گرفته‌اند. سپس، دمای ایجاد شده در سطح و داخل نمونه‌های آسفالتی در اثر امواج مایکروویو مورد بررسی قرار گرفته است. از این منظر، برخلاف مطالعات پیشین که هر یک از این مواد را جداگانه بررسی کرده‌اند، نوآوری پژوهش حاضر در بررسی هم‌زمان این دو افزودنی با اهداف عملکردی مشخص و ارزیابی تأثیر آن‌ها بر مقاومت خمشی و رفتار حرارتی مخلوط آسفالتی تحت تابش مایکروویو است. یافته‌های این مطالعه می‌تواند دیدگاه‌های جدیدی در طراحی مخلوط‌های آسفالتی نوین با قابلیت گرمایش هدفمند و عمر خستگی زیاد ارائه دهد که علاوه بر

پایداری مکانیکی بالا، فرآیند تعمیرات آن‌ها با حداقل آسیب حرارتی به بافت آسفالت امکان‌پذیر باشد.

۲. مصالح مصرفی

۲-۱. قیر

قیر مورد استفاده در ساخت تمامی نمونه‌های این تحقیق از نوع PG 64-22 است. از این قیر برای تهیه نمونه‌های شاهد و نمونه‌های اصلاح شده استفاده شده که مشخصات آن در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. خصوصیات قیر مورد استفاده

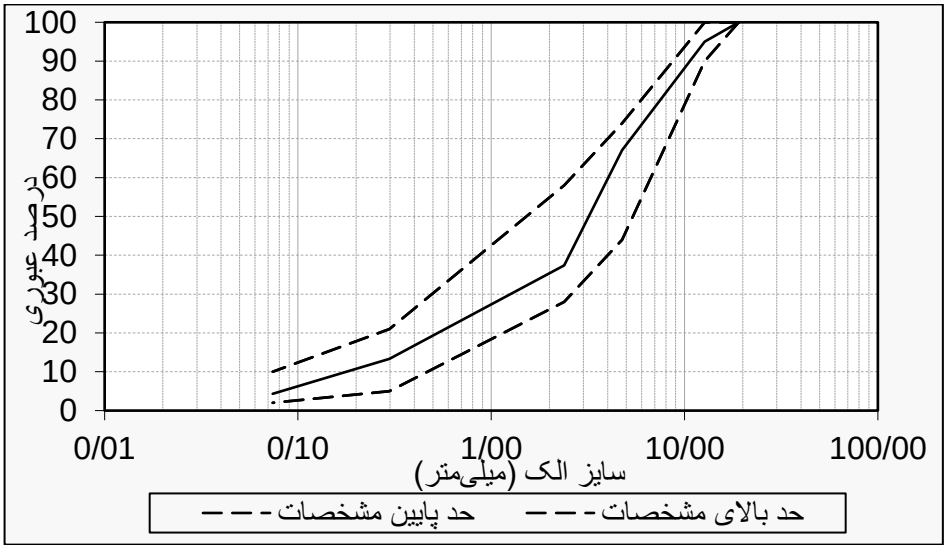
خصوصیات	مقدار	روش استاندارد	واحد
وزن مخصوص در ۲۵ درجه سلسیوس	۱.۰۲	ASTM D70	گرم بر سانتی‌متر مکعب
درجه نفوذ در ۲۵ درجه سلسیوس	٦۱	ASTM D5	دهم میلی‌متر
نقطه نرمی	۵۱	ASTM D36	درجه سلسیوس
نقطه اشتعال	۳۰۹	ASTM D92	درجه سلسیوس
کندروانی کینماتیک در ۱۳۵ درجه سلسیوس	۳۲۸	ASTM D2170	سانتی استوکس

۲-۲. سنگدانه

مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق برای ساخت نمونه‌های آسفالتی از کارخانه نوین راه آزادگان استان کرمانشاه تهیه شده و از نوع سنگدانه‌های شکسته آهکی است که مشخصات فیزیکی آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. دانه‌بندی مورد استفاده در این تحقیق برای ساخت نمونه‌های آسفالتی مطابق با منحنی دانه‌بندی شماره ٤ نشریه ۲۳٤ برای آستر و رویه، در شکل ۱ نشان داده شده است. میانه حد بالا و حد پایین درصد عبوری از هر الک مطابق نشریه به عنوان معیار طرح اختلاط نمونه‌های آسفالتی در این تحقیق، مد نظر قرار گرفت.

جدول ۲. خصوصیات مصالح سنگی مورد استفاده

شرح آزمایش	نتایج	مقدار مجاز آیین‌نامه	روش آزمایش	واحد
افت وزنی به روش لوس‌آنجلس	۱۹	کمتر از ۲۵	ASTM C131	درصد
افت وزنی در مقابل سولفات سدیم	۰/۳۹	کمتر از ۸	ASTM C88	درصد
شکستگی مصالح سنگی در دو جبهه روی الک شماره ٤	۱۰۰	حداقل ۷۵	ASTM D5821	درصد
حداکثر درصد جذب آب (مصالح درشت دانه)	۰/٦	–	AASHTO T85	درصد
حداکثر درصد جذب آب (مصالح ریزدانه)	۱/۳	–	AASHTO T84	درصد
وزن مخصوص واقعی مصالح سنگی درشت دانه	۲/٦۸	–	ASTM C127	گرم برسانتی‌متر مکعب
وزن مخصوص واقعی مصالح سنگی ریزدانه	۲/٦٦	–	ASTM C128	گرم برسانتی‌متر مکعب



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی

۲-۳. افزودنی پلیمری

کاربرد پلیمر برای اصلاح خواص قیرهای مورد استفاده در روسازی راه‌ها به اوایل دهه ۱۹۷۰ میلادی برمی‌گردد و در دهه‌های اخیر رو به گسترش است.

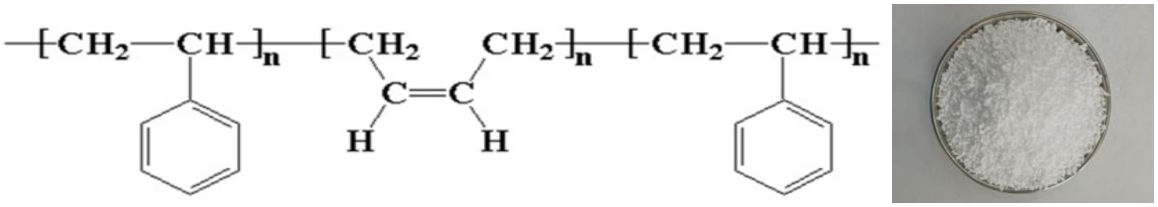
در میان انواع پلیمرهای موجود، پلیمر استایرن- بوتادین- استایرن (SBS)، یکی از رایج‌ترین اصلاح‌کننده‌ها در صنعت می‌باشد که به عنوان اصلاح کننده قیر استفاده می‌شود. SBS نوعی لاستیک سخت و کوپلیمر است. از این‌رو به آن کوپلیمر قطعه‌ای می‌گویند. این مواد با ظاهری گرانولی مانند گرانول‌های سفیدرنگ پفکی و جامد و همچنین دمای عملکردی بیشتر از ۱۲۰ درجه سلسیوس می‌باشند. مورفولوژی SBS (منظور شکل و ساختار اصلی سلولی) از دو فاز تشکیل شده است که شامل پلی‌استایرن (قسمت سخت) و پلی‌بوتادین (قسمت نرم) می‌باشد. در ترکیب SBS، پلیمر استایرن در دمای اتاق سخت و جامد است؛ اما پلیمر بوتادین از استایرن نرم‌تر است و در دمای اتاق خاصیتی شبیه به لاستیک دارد. در واقع می‌توان گفت استایرن‌ها به سختی SBS کمک می‌کنند و بوتادین‌ها باعث می‌شوند اگر این مواد در معرض حرارت و گرما قرار بگیرند، جریان یابند (سو و همکاران، ۲۰۲۲).

استایرن- بوتادین- استایرن مورد استفاده در این تحقیق، از نوع SBS 3411 بوده که توسط شرکت LCY Group تایوان تولید شده است. مطابق با توضیحات این شرکت، این محصول یک کوپلیمر بلوکی استایرن بوتادین شعاعی نامحلول در آب، بدون بو و بدون روغن و با ویسکوزیته بالا و نسبت بوتادین به استایرن ۷۰/۳۰ است و برای تقویت و ترکیب در آسفالت طراحی شده است. مشخصات فیزیکی و ساختار شیمیایی این ماده به ترتیب در جدول ۳ و شکل ۲ ارائه شده است.

مطابق توضیحات شرکت سازنده، جهت تولید آسفالت، باید قبل از اختلاط قیر با مصالح سنگی، استایرن- بوتادین- استایرن به قیر اضافه گردد و میزان مصرف آن بسته به کاربرد و نوع قیر متفاوت می‌باشد. در این تحقیق، مقدار SBS به‌کاررفته برای اصلاح خواص قیر، شامل ٤، ٥/٥، ٧ و ٨/٥ درصد نسبت به وزن قیر می‌باشد که در نهایت با توجه به نتایج حاصل‌شده از آزمایش‌های انجام شده روی قیرهای اصلاح شده با مقادیر مختلف SBS، یک مقدار بهینه به عنوان درصد بهینه نهایی برای ساخت نمونه‌های آسفالتی تعیین می‌گردد.

جدول ۳. خصوصیات SBS مورد استفاده در تحقیق

مقدار استایرن (درصد وزنی)	ساختار مولکولی	وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	نقطه اشتعال (درجه سلسیوس)	Ash (درصد)
۳۰	خطی	۰/۹٤	۲۸۸	۰/۳



شکل ۲. ساختار شیمیایی استایرن- بوتادین- استایرن (اسلام و همکاران، ۲۰۲۲)

۲-٤. افزودنی الیاف کربن[1] (CF)

فیبر کربن که عمدتاً از اتم‌های کربن ساخته شده است، یکی از مواد جامد پایه کربنی است که به منظور افزایش بازده گرمایش با امواج مایکروویو، می‌توان آن را با مخلوط آسفالتی ترکیب نمود (وانگ و همکاران، ۲۰۱٦). فیبر کربن رشته الیافی است که از حرارت دادن مواد آلی که قسمت عمده‌ی آن کربن می‌باشد در محیط گازهای بی اثر به دست می‌آید. الیاف کربن (CF) از طریق پیرولیز مواد اولیه آلی که به شکل الیاف هستند، ساخته می‌شود. انجام عملیات حرارتی موجب حذف عناصری مانند اکسیژن، نیتروژن و هیدروژن و باقی ماندن کربن به شکل الیاف می‌شود. فیبر کربن به رنگ سیاه، غیر حلال در آب و بدون بو بوده که دارای مقاومت بسیار بالایی در برابر مواد خورنده مثل اسیدها، بازها و مواد آلی می‌باشند. از خصوصیات مهم الیاف کربن می‌توان به مقاومت کششی بالا، مقاومت مناسب در برابر خستگی ناشی از بارهای دینامیکی، نسبت بالای مدول کششی الاستیسیته به وزن، ضریب انبساط حرارتی بسیار پایین، مقاومت در برابر خوردگی، مقاومت در برابر محیط‌های خورنده و مواد شیمیایی و در نتیجه دوام بالاتر، وزن سبک و ابعاد کوچک، مدول الاستیسیته بالا، مقاوم در برابر حرارت و تغییر طول کم را نام برد.

الیاف کربن مورد استفاده در این تحقیق، توسط شرکت FIBER-LINE تولید شده است. این الیاف از پیش‌ماده پلی‌اکریلونیتریل (PAN) ساخته شده‌اند. وضعیت ظاهری این الیاف به صورت خرد شده و الیاف تک‌رشته‌ای مقاوم می‌باشد. طول این الیاف به‌طور متوسط ٦/٤ میلی‌متر می‌باشد و نقطه ذوب این الیاف بیش از ۱۰۰۰ درجه سلسیوس است؛ به این معنی که در طول فرایند اختلاط، این الیاف ذوب نمی‌شوند. همچنین، مقدار مصرف این الیاف با توجه به ماهیت ماده‌ی مورد نظر و میزان مقاومت مورد نیاز متفاوت است. مطابق با تحقیقات پیشین، در این تحقیق، مقدار بهینه‌ی الیاف کربن حدود ۰/۲ درصد وزن کل مخلوط آسفالتی برای ساخت نمونه‌های آسفالتی انتخاب گردید (حسامی و همکاران، ۲۰۱۷). همچنین، مطابق توضیحات شرکت سازنده، دو روش اصلی برای مخلوط کردن الیاف کربن با مخلوط آسفالت وجود دارد: الف) روش خشک: در این روش ابتدا الیاف کاملاً با سنگدانه‌هایی که از قبل در آون گرم شده‌اند مخلوط می‌شود و سپس قیر اضافه می‌گردد. ب)

1- Carbon Fiber

روش مرطوب: در این روش، ابتدا الیاف را با قیر مخلوط کرده و سپس به سنگدانه اضافه می‌کنند.

در این تحقیق، به منظور جلوگیری از چسبیدن الیاف به هم، از روش خشک استفاده شده و اختلاط الیاف کربن با مصالح سنگی به صورت دستی انجام شده است. همچنین، مشخصات الیاف کربن مورد استفاده در این تحقیق در جدول ٤ ارائه شده است.

جدول ٤. مشخصات الیاف کربن مورد استفاده در تحقیق

طول (میلی‌متر)	وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	نقطه ذوب (درجه سلسیوس)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	مدول کششی (گیگاپاسکال)
٦.٤	١.٨٠	$\geq$ ١٠٠٠	٤١٠٠	٢٣٠

۳. آزمایش‌ها

۳-۱. ساخت قیرهای اصلاح شده

استفاده از SBS به عنوان اصلاح کننده در قیر می‌تواند باعث بهبود مقاومت قیر در دماهای بالا و پایین شده و کارایی آن را تسهیل کند (همتی و همکاران، ۲۰۲۳).

مطابق با تحقیقات پیشین، مقدار بهینه افزودنی SBS در محدوده ۸/۰ – ٤/٥ درصد وزنی قیر است که با توجه به این مقدار بهینه، می‌توان دریافت که افزودنی SBS در مقادیر کاربردی کم می‌تواند خواص آسفالت را تا حد قابل قبولی بهبود بخشد (لی و همکاران، ۲۰۲۲). در این تحقیق، به منظور بررسی تأثیر افزودنی استایرن بوتادین استایرن (SBS)، بر خواص قیر خالص PG 64-22، چهار مقدار متفاوت از این افزودنی شامل ٤، ٥/٥، ۷ و ۸/٥ درصد برحسب وزن قیر، به قیر خالص اضافه شد و آزمایش‌های مختلف شامل آزمایش درجه نفوذ[1]، نقطه نرمی[2]، نقطه اشتعال[3] و کندروانی کینماتیک[4] روی قیر خالص و قیرهای اصلاح شده با چهار درصد مختلف SBS ذکر شده، انجام شد که در نهایت با توجه به نتایج حاصل شده از آزمایش‌های انجام شده روی قیرهای اصلاح شده با مقادیر مختلف SBS، یک مقدار بهینه به عنوان درصد بهینه نهایی برای ساخت نمونه‌های آسفالتی تعیین گردید. فرایند اختلاط SBS با قیر به مدت ۹۰ دقیقه در دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس با سرعت برشی ٦٠٠٠rpm با دستگاه همزن دور تند انجام شد. همچنین، قیر پایه نیز در دما و زمان مشابه در میکسر قرار داده شد تا تأثیر شرایط پیرشدگی مشابه با قیرهای اصلاح شده را تجربه کند.

۳-۲. طرح اختلاط

در این تحقیق، طرح اختلاط نمونه‌ها بر اساس روش مارشال (AASHTO T245) انجام گرفت. به منظور تعیین درصد قیر بهینه، نمونه‌های مخلوط آسفالتی مارشال با قطر ٤ اینچ (۱۰ سانتی‌متر) و ارتفاع ۲/٥ اینچ (٦/۲٥ سانتی‌متر) با پنج درصد مختلف قیر (۳/٥، ٤/۰، ٤/٥، ٥/۰ و ٥/٥ درصد) و با اعمال ۷٥ ضربه به هر طرف نمونه به روش مارشال تهیه گردید. سپس وزن مخصوص نمونه‌های مخلوط آسفالتی متراکم بر اساس استاندارد AASHTO-T166 و مقدار استحکام و روانی نمونه‌ها بر اساس استاندارد AASHTO-T245 تعیین گردید. همچنین، مقادیر درصد فضای خالی[5] آسفالت متراکم، درصد فضای خالی مصالح سنگی (VMA) و درصد

1- Penetration
2- Softening point
3- Flash point
4- Kinematic viscosity
5- Air void

فضای خالی مصالح سنگی پرشده با قیر (VFA) با استناد به محاسبات مندرج در نشریه MS-2 انستیتو آسفالت محاسبه گردید. سپس با استفاده از نتایج به‌دست آمده، منحنی‌های تغییرات وزن مخصوص واقعی آسفالت، استحکام مارشال، درصد حجمی فضای خالی آسفالت، درصد حجمی فضای خالی پرشده با قیر، درصد حجمی فضای خالی مخلوط مصالح سنگی و تغییر شکل نسبی آسفالت (روانی) نسبت به درصدهای مختلف قیر به دست آمد. با توجه به منحنی‌های حاصل از آزمایش مارشال، مقدار قیر بهینه مخلوط آسفالتی برابر ٤/٦ درصد (نسبت به وزن مخلوط آسفالتی) به دست آمد. این مقدار با محدوده‌های مجاز مندرج در نشریه ٢٣٤ (و همچنین نشریه ١٠١) مطابقت کامل دارد و در محدوده توصیه‌شده نشریه MS-2 نیز قرار می‌گیرد.

لازم به ذکر است که در این تحقیق، به‌منظور کنترل متغیرها و امکان مقایسه مستقیم تأثیر افزودنی‌ها بر عملکرد مکانیکی و حرارتی مخلوط‌ها، میزان قیر بهینه ٤/٦ درصد برای ساخت تمام نمونه‌های ساخته شده بدون افزودنی و با افزودنی ثابت در نظر گرفته شد. با این حال، تعیین جداگانه درصد قیر بهینه برای مخلوط‌های اصلاح‌شده می‌تواند نتایج دقیق‌تری ارائه دهد که به‌عنوان یک پیشنهاد برای مطالعات آتی مطرح می‌شود.

۳-۳. آماده سازی نمونه‌ها

مطابق درصد اختلاط مصالح سنگی و درصد قیر انتخابی (٤/٦ درصد) به‌دست آمده از طرح اختلاط آسفالت، نمونه‌های استوانه‌ای بر اساس روش مارشال با اعمال ۷۵ ضربه در هر طرف نمونه‌ها تهیه گردید. لازم به ذکر است که برای تهیه نمونه‌های آسفالتی حاوی افزودنی SBS از مقدار بهینه ۷ درصد مطابق نتایج آزمایش‌های قیر و SBS و همچنین از مقدار بهینه الیاف کربن برابر ۰/۲ درصد وزن کل مخلوط آسفالتی بر مبنای تحقیقات پیشین انجام شده در ساخت نمونه‌های آسفالتی استفاده گردید (حسامی و همکاران، ۲۰۱۷). به‌منظور ترکیب الیاف کربن با مخلوط آسفالتی، از روش اختلاط خشک استفاده شد؛ به این صورت که الیاف کربن پس از گرم‌شدن سنگدانه‌ها تا دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس و پیش از افزودن قیر به مخلوط اضافه گردید تا توزیع یکنواخت در میان مصالح سنگی حاصل شود و از تجمع و گلوله‌شدن الیاف جلوگیری گردد.

به طورکلی، در این تحقیق چهار نوع نمونه‌ی آسفالتی مختلف شامل: نمونه‌های شاهد مطابق با طرح اختلاط (بدون مواد افزودنی)، نمونه‌ها مطابق طرح اختلاط با درصد قیر انتخابی اصلاح شده با مقدار بهینه استایرن- بوتادین- استایرن (۷ درصد از وزن قیر)، نمونه‌ها مطابق طرح اختلاط با الیاف کربن (۰/۲ درصد وزن کل مخلوط آسفالتی) و نمونه‌های مطابق طرح اختلاط با مواد استایرن- بوتادین- استایرن (۷ درصد وزن قیر) و الیاف کربن (۰/۲ درصد وزن مخلوط آسفالتی) تهیه گردید. بعد از ساخت نمونه‌های مارشال، در مرحله بعد، نمونه‌های تهیه شده از وسط قاعده استوانه برش داده شده و به دو نمونه نیم‌استوانه‌ای تقسیم شدند. همچنین، جهت کنترل ترک ناشی از آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای به جهت اینکه ترک در وسط نمونه ایجاد گردد، شیاری به عرض ٤ میلی‌متر و عمق ۵ میلی‌متر در نمونه‌ها ایجاد شد تا در زمان بارگذاری، ترک در محل شیار ایجاد شود. لازم به ذکر است که جهت انجام آزمایش‌ها، از هر یک از آسفالت‌های فوق‌الذکر، دو نمونه استوانه‌ای مارشال (معادل ٤ نمونه نیم‌استوانه‌ای) برای هر دوره زمانی گرمایش تهیه گردید. با توجه به چهار نوع مخلوط و پنج دوره گرمایش مختلف (۳۰، ٦۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ ثانیه)، در مجموع ٤۰ نمونه استوانه‌ای مارشال (معادل ۸۰ نمونه نیم‌استوانه‌ای) ساخته شد.

۳-٤. آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای[1]

آزمایش مقاومت خمشی سه‌نقطه‌ای یکی از آزمایش‌های مناسب برای تعیین تغییرات خواص مواد آسفالتی و پیش‌بینی پیدایش ترک‌ها در نمونه‌های مخلوط آسفالتی است (کیو و همکاران، ۲۰۱۲). در این تحقیق، به منظور ارزیابی تأثیر افزودنی‌های SBS و CF بر میزان مقاومت خمشی نمونه‌های آسفالتی و مقایسه آن با مقاومت خمشی نمونه‌های بدون افزودنی، آزمون خمش سه‌نقطه‌ای انجام شد. در این تست، نمونه‌های نیم‌استوانه‌ای مارشال با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت ٦۲/۵ میلی‌متر در دمای ۲۰ درجه سلسیوس تحت آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای قرار گرفتند. سرعت بارگذاری در این آزمایش ۵ میلی‌متر بر دقیقه اعمال گردید (ژو و همکاران، ۲۰۲۰). اگرچه استانداردهای مرسوم SCB برای نمونه با قطر ۱۵۰ میلی‌متر تدوین شده‌اند، استفاده از نمونه مارشال با قطر ۱۰۰ میلی‌متر در مطالعات متعددی به‌عنوان روشی معتبر به‌کار رفته و نتایج آن با نمونه‌های استاندارد قابل مقایسه است (لو و همکاران، ۲۰۲۱). همچنین، لازم به ذکر است که بارگذاری تا زمان ایجاد ترک در نمونه ادامه یافت و به محض ایجاد ترک در محل شیار، نیرو ثابت و بارگذاری به صورت اتوماتیک قطع گردید. ترک ایجادشده در این آزمایش، یک ترک کنترل‌شده و یکسان در تمامی نمونه‌ها بود که به‌منظور شبیه‌سازی وضعیت ترک‌خوردگی پیش از عملیات ترمیم مورد استفاده قرار گرفت. از آنجا که در کاربردهای اجرایی، گرمایش مایکروویو برای ترمیم مقاطع ترک‌خورده به کار می‌رود، حضور ترک بر الگوی توزیع دما اثرگذار است و ارزیابی حرارتی روی نمونه‌های سالم، نتایج را از شرایط واقعی عملیات ترمیم دور می‌کند. به این ترتیب، آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای ضمن اندازه‌گیری مقاومت خمشی، با ایجاد ترک کنترل‌شده، شرایط لازم برای ارزیابی واقع‌گرایانه‌ی عملکرد گرمایش مایکروویو را در روسازی‌های ترک‌خورده امکان‌پذیر ساخت.

۳-۵. گرمایش مایکروویو

یکی از روش‌های ایجاد گرما در آسفالت، استفاده از امواج مایکروویو می‌باشد. گرمایش مایکروویو منجر به توزیع یکنواخت‌تر دما در مخلوط آسفالتی نسبت به سایر روش‌های گرمایش آسفالت همچون روش القایی می‌گردد (لیو و همکاران، ۲۰۱۸). امواج مایکروویو دارای طول موجی بین ۳ میلی‌متر تا ۳ متر هستند که متناظر با فرکانسی بین 100 MHz تا 100 GHz می‌باشند (گالگو و همکاران، ۲۰۱۳). در این تحقیق، به منظور گرمایش نمونه‌ها تحت امواج مایکروویو، بعد از آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای، نمونه‌های ترک خورده را پس از چسباندن به یکدیگر، روی یک صفحه‌ی شیشه‌ای قرار داده و در مدت زمان‌های ۳۰، ٦۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ ثانیه به منظور گرمایش، در داخل دستگاه مایکروویو قرار گرفتند. در این مطالعه، مایکروویو مولینکس مدل Optiquick Duo Y82 با فرکانس ۲/٤۵ گیگاهرتز و قدرت گرمایش ۷۰۰ وات برای گرم کردن نمونه‌های آسفالت مورد استفاده قرار گرفت. به منظور گرمایش نمونه‌ها با استفاده از امواج مایکروویو، روش کار به این ترتیب بود که هر یک از نمونه‌های آسفالتی در زمان‌های گرمایش مورد نظر درون مایکروویو قرار داده شدند. سپس، هر ۳۰ ثانیه (حین گرمایش مایکروویو) دمای سطح آن‌ها با دماسنج لیزری اندازه‌گیری شد. پس از هر زمان گرمایش، چهار دما به صورت تصادفی از سطح نمونه‌ی آزمایش گرفته شده و میانگین آن‌ها برای ٤ نمونه تکرار محاسبه گردید. همچنین، برای اندازه‌گیری دمای ایجاد شده در داخل نمونه‌ها، پس از هر زمان گرمایش، دماسنج داخل نمونه فرو برده شد. سپس با استفاده از یک دماسنج ترمومتر، دمای داخل نمونه‌ها اندازه‌گیری گردید.

1- Three-point bending test

این مراحل پنج مرتبه برای نمونه‌های آزمایش در کل مدت زمان گرمایش (۱۵۰ ثانیه) انجام گرفت. لازم به توضیح است که با توجه به چهار نمونه تکرار برای هر مخلوط و ثبت دمای ٤ نقطه تصادفی روی سطح هر نمونه، مبنای هر نقطه از نمودارهای دما–زمان، میانگین ١٦ اندازه‌گیری مستقل بوده است که این تعداد تکرار، اثر نوسانات موضعی دما ناشی از ناهمگنی مخلوط را کاهش داده و اعتبار نتایج مربوط به یکنواختی توزیع دما را افزایش می‌دهد.



شکل ۳. مراحل ساخت و آزمایش مقاومت خمشی



شکل٤. گرمایش با امواج مایکروویو

٤. نتایج و بحث

٤-١. بررسی تأثیر استایرن- بوتادین- استایرن بر خواص فیزیکی و رئولوژیکی قیر

نتایج حاصل از چهار آزمایش درجه نفوذ، نقطه نرمی، نقطه اشتعال و کندروانی کینماتیک روی قیر خالص و قیرهای اصلاح شده با چهار درصد وزنی مختلف SBS در جدول ٤ قابل مشاهده است.

با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام شده روی قیر خالص و قیر اصلاح شده با SBS می‌توان دریافت که SBS درجه نفوذ قیر را کاهش می‌دهد و با افزایش میزان SBS، تغییرات درجه نفوذ قیر رفته‌رفته کاهش می‌یابد، به‌طوری که اختلاف تغییرات بین میزان درجه نفوذ قیر با ۷ و ۸/۵ درصد SBS، کمتر از تغییرات بین ٤ و۵/۵ درصد SBS می‌باشد. همچنین، با افزودن مقدار SBS، نقطه نرمی قیر و ویسکوزیته قیر نیز افزایش می‌یابد. به‌طوری که این میزان افزایش در ویسکوزیته قیر بسیار محسوس است. همچنین درجه اشتعال قیر، به ازای افزایش میزان SBS تغییر محسوسی نداشته و تغییرات آن به ازای درصدهای مختلف SBS ، بسیار جزئی و قابل چشم‌پوشی است .این یافته‌ها با نتایج پژوهش‌های پیشین همخوانی کامل دارد. در یک مطالعه مروری، پژوهش‌های متعدد نشان دادند که افزودن SBS در مقادیر ۲ تا ۸ درصد وزنی قیر، به‌طور پیوسته باعث کاهش درجه نفوذ، افزایش نقطه نرمی و افزایش ویسکوزیته قیر می‌شود (لی و همکاران، ۲۰۲۲). همچنین، در تحقیق دیگری با بررسی تأثیر مقادیر ۵ تا ۱۵ درصد وزنیSBS ، روند مشابهی از تغییرات در خواص قیر گزارش شده است (همتی و همکاران، ۲۰۲۳). با توجه به چگونگی تغییرات خواص قیر با درصدهای مختلف SBS، و با توجه به اینکه خواص قیر شامل: نقطه نرمی، درجه نفوذ و نقطه اشتعال قیر به ازای تغییر میزان SBS از ۷ درصد به ۸/۵ درصد، تغییرات چندانی نداشته‌اند و همچنین با توجه به اینکه میزان ویسکوزیته قیر بیش از حد بالا نباشد چرا که با افزایش میزان ویسکوزیته قیر، عملیات پخش و تراکم آسفالت دشوار می‌شود، بنابراین، در این تحقیق از مقدار بهینه ۷ درصد SBS برای ساخت نمونه‌های آسفالتی استفاده شده است.

٤-٢. آزمایش مقاومت خمشی سه‌نقطه‌ای

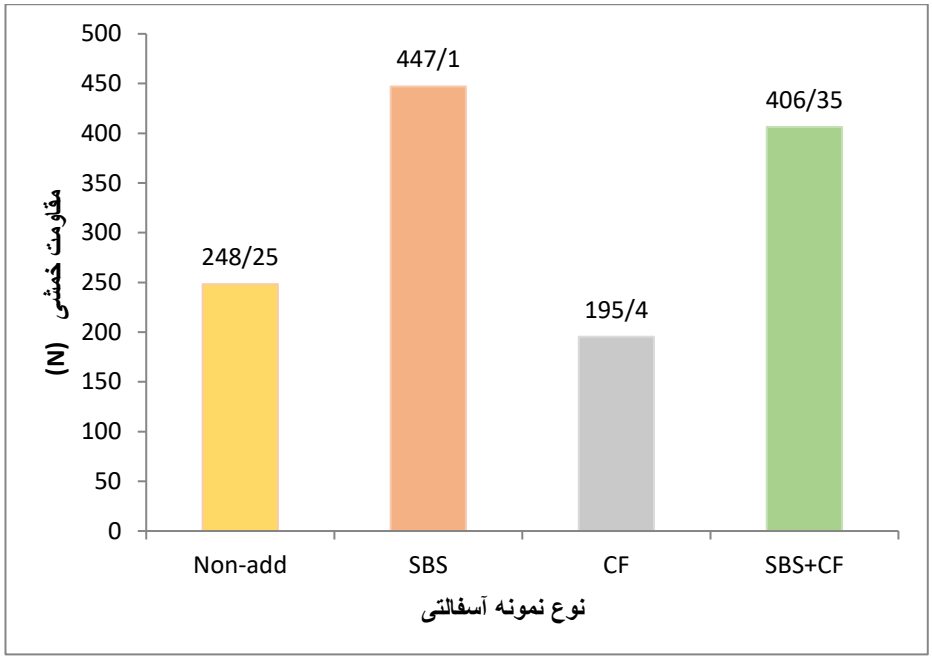
نتایج آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای روی نمونه‌های نیم‌استوانه‌ای مارشال در شکل ۵ قابل مشاهده است. مطابق نتایج حاصل شده، مشاهده می‌شود که SBS مقاومت خمشی نمونه‌های آسفالتی را تا حد زیادی افزایش داده است. به‌طوری که میانگین مقاومت خمشی نمونه‌های ساخته شده با SBS، حدود ۱۸۰ درصد میانگین مقاومت خمشی نمونه‌های شاهد است. این افزایش قابل‌توجه، با یافته‌های فخری و همکاران (۲۰۲۱) همخوانی کامل دارد. در پژوهش آن‌ها نیز نمونه‌های اصلاح‌شده با SBS مقاومت خمشی بالاتری نسبت به نمونه شاهد از خود نشان دادند. در مقابل، الیاف کربن، تأثیر منفی بر مقاومت نمونه‌های آسفالتی داشته و منجر به کاهش تقریباً ۲۱ درصدی مقاومت نمونه‌های آسفالتی نسبت به نمونه‌های شاهد شده است. همچنین، مقاومت خمشی نمونه‌ها با ترکیب دو افزودنی SBS و CF نسبت به نمونه‌های شاهد افزایش یافته است؛ اما این مقدار نسبت به مقاومت خمشی نمونه‌های ساخته شده با SBS به میزان کمی کاهش یافته و به حدود ١٦٤ درصد مقاومت نمونه شاهد رسیده است. بنابراین، ترکیب هم‌زمان SBS و الیاف کربن توانسته است کاهش مقاومت ناشی از الیاف را جبران کند و مقاومت را همچنان در سطحی بالا حفظ نماید.

در توضیح این اتفاق چنین می‌توان گفت که الیاف کربن، مقاومت آسفالت را به دلیل قرار گرفتن الیاف بین قیر و سنگدانه‌ها و جدا کردن پیوند بین قیر و سنگدانه ، کاهش می دهد. همچنین همان‌طور که مشاهده شد،

SBS مقاومت مخلوط آسفالتی را تا حد زیادی افزایش داد که این بهبود چشمگیر در میزان مقاومت مخلوط آسفالتی را می‌توان به افزایش خاصیت چسبندگی بین قیر و سنگدانه‌های مخلوط نسبت داد. بنابراین چنین می‌توان برداشت نمود که پلیمر SBS با ایجاد پیوندهای قوی میان سنگدانه و قیر، مقاومت در برابر گسترش ترک خوردگی را تا حد زیادی افزایش می‌دهد. لازم به ذکر است که کاهش مقاومت خمشی در نمونه‌های حاوی الیاف کربن با یافته‌های مطالعات پیشین همخوانی کامل دارد و بر اساس رفتار فیزیکی این الیاف در ریزساختار مخلوط قابل توضیح است (وانگ و همکاران، ۲۰۱٦). در روش اختلاط خشک که در این پژوهش به کار رفته است، الیاف کربن به دلیل سطح صاف و تمایل ذاتی به چسبیدن به یکدیگر، پیش از توزیع یکنواخت در مخلوط، باعث تشکیل توده‌های فشرده در مخلوط می‌شوند. در نتیجه، این توده‌ها به‌جای ایفای نقش تقویت‌کنندگی، به‌صورت نقاط تمرکز تنش عمل کرده و شروع و گسترش ترک را تسهیل می‌کنند. همچنین، این توده‌ها عمدتاً در سطح تماس قیر و سنگدانه متمرکز می‌شوند و با ایجاد یک لایه جداکننده، پیوند چسبندگی میان قیر و سنگدانه را تضعیف می‌کنند. علاوه بر این، افزودن الیاف به سنگدانه‌های داغ پیش از قیر، فرصت کافی برای ترشدگی و برقراری پیوند مؤثر میان الیاف و فاز قیر را فراهم نمی‌کند. سطح نسبتاً صاف الیاف کربن نیز مانع از ایجاد اتصال شیمیایی قوی با قیر می‌شود. در نتیجه، الیاف نقش تقویت‌کنندگی مؤثری ایفا نمی‌کنند. همچنین، قطر ۱۰۰ میلی‌متری نمونه مارشال با محدود کردن فضای توزیع همگن الیاف، اثر مخرب تمرکز تنش ناشی از توده‌های تشکیل شده در مخلوط را تشدید کرده است. عامل دیگری که در تفسیر این نتایج باید مورد توجه قرار گیرد، ثابت بودن درصد قیر بهینه برای همه مخلوط‌هاست. الیاف کربن به دلیل سطح ویژه بالا، بخشی از قیر موجود در مخلوط را جذب می‌کنند. از آنجا که درصد قیر بهینه برای مخلوط شاهد (٤/٦ درصد) برای مخلوط‌های حاوی الیاف نیز به‌کار رفته، این جذب می‌تواند به کاهش قیر مؤثر در سطح تماس با سنگدانه‌ها منجر شده باشد و در نتیجه کمبود موضعی قیر، پیوند چسبندگی را بیش از پیش تضعیف کرده و به افت مقاومت خمشی منجر شده است. بنابراین، می‌توان گفت که کاهش ۲۱ درصدی مقاومت خمشی مشاهده‌شده در نمونه‌ها، نه به عملکرد ذاتی الیاف، بلکه به مجموعه عوامل فوق قابل انتساب است. با این وجود، نتایج این تحقیق به‌روشنی نشان داد که ترکیب هم‌زمان SBS و الیاف کربن، این افت را به‌طور کامل جبران کرده و مقاومت خمشی را تا حدود ١٦٤ درصد نمونه شاهد حفظ می‌کند. این دستاورد مؤید آن است که با طراحی مناسب مخلوط و استفاده از یک اصلاح‌کننده پلیمری در کنار الیاف، می‌توان از مزایای گرمایشی الیاف کربن بهره برد، بدون آنکه مقاومت سازه‌ای کاهش یابد.

جدول ٤. نتایج آزمایش‌های قیر خالص و قیر اصلاح شده با SBS

آزمایش	روش استاندارد	قیر خالص	4% SBS	5.5% SBS	7% SBS	8.5% SBS
درجه نفوذ (دهم میلی‌متر)	ASTM D5	٦١	٣٩/٦	٣٥/٣	٣١/٢	٢٩/٣
نقطه نرمی (درجه سلسیوس)	ASTM D36	٥١	٧٠	٨٦/٢	٩٨/٥	١٠٢/٦
نقطه اشتعال (درجه سلسیوس)	ASTM D92	٣٠٩	٣٢١	٣٢٢	٣٢٥	٣٢٦
کندروانی کینماتیک در ١٣٥ درجه سلسیوس (سانتی استوکس)	ASTM D2170	٣٢٨	١٥٢٣/٨	٢٤٢١	٣٣٧٨	٤٢٧٧



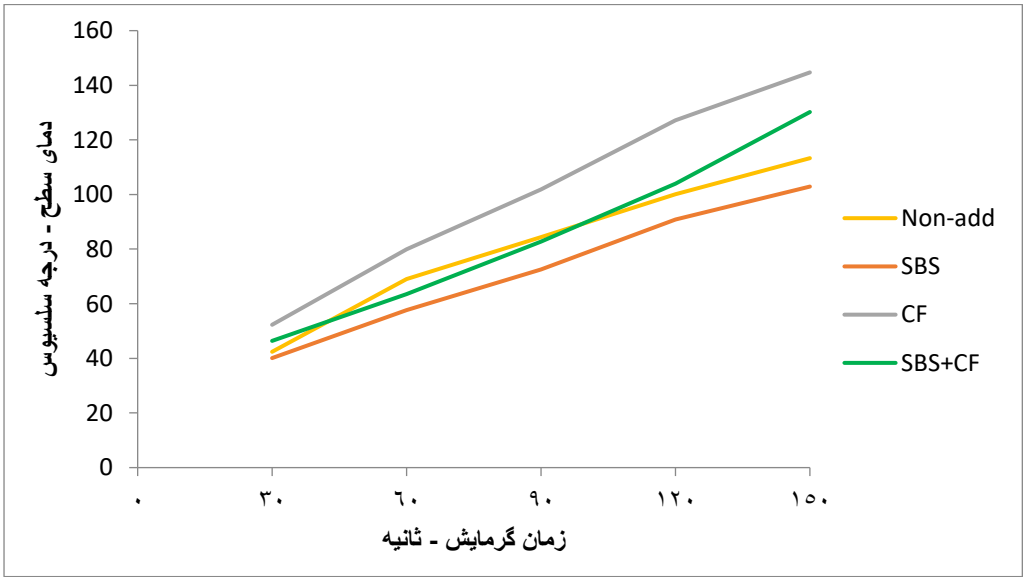
شکل ۵. مقایسه مقاومت خمشی نمونه‌های آسفالتی

٤-٣. ارزیابی رفتار حرارتی و توزیع دما تحت گرمایش مایکروویو

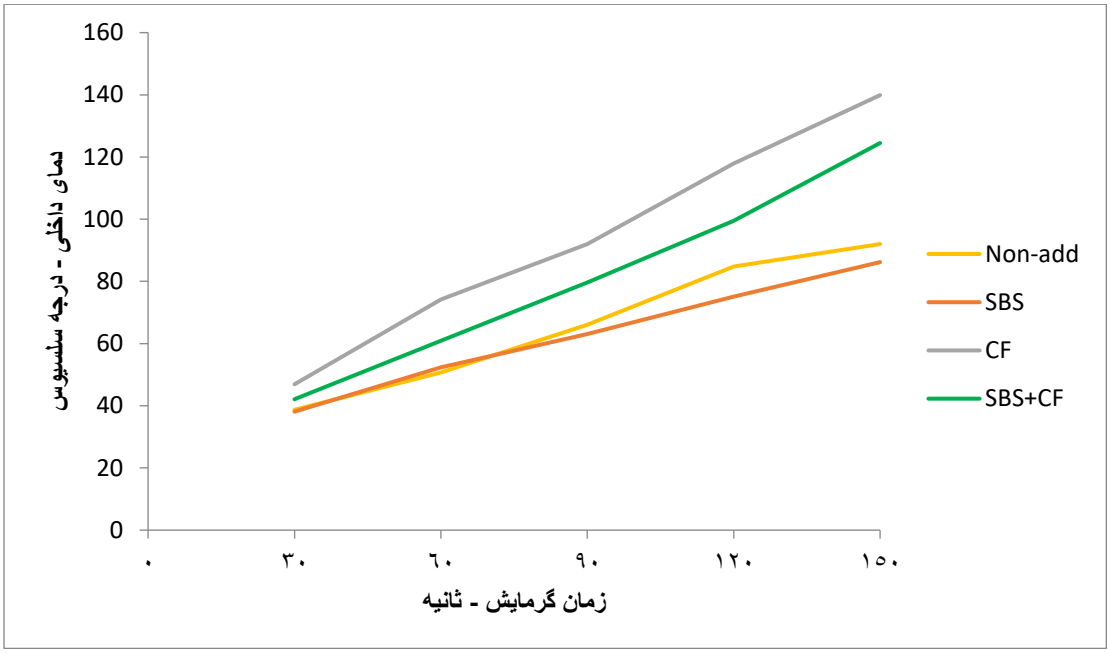
در این بخش، رفتار حرارتی نمونه‌ها بر پایه دو معیار یکنواختی توزیع دما و روند افزایش دما تحلیل شده است. اهمیت این دو معیار از آن روست که توزیع غیریکنواخت می‌تواند با تمرکز حرارت در سطح و ایجاد نقاط داغ موضعی، موجب اکسیداسیون قیر و پیرشدگی زودرس و در نهایت تخریب زودهنگام روسازی شود. در مقابل، افزایش سریع‌تر دما به‌معنای کاهش زمان لازم برای رسیدن به دمای مؤثر ترمیم است که ضمن کاهش آسیب حرارتی، بازده عملیات ترمیم را افزایش می‌دهد. با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده دمای سطح نمونه‌ها، مشاهده می‌شود که در اثر تابش امواج مایکروویو به هر چهار نوع آسفالت مورد آزمایش در این تحقیق، دماهای متغیری در نقاط مختلف سطح یک نمونه ایجاد شده است. در توضیح علت این تفاوت دمایی، می‌توان گفت که تابش امواج مایکروویو روی اجزای مختلف آسفالت شامل قیر و سنگدانه تأثیر متفاوتی دارد. بنابراین، می‌توان گفت احتمالاً دماهای بیشتر مربوط به قسمت قیر و دماهای کمتر مربوط به قسمت سنگدانه از نمونه آسفالتی است. از سوی دیگر، بدیهی است که یک نمونه آسفالتی یک جسم همگن و یکدست نیست و قسمت‌های مختلف آن دارای درصد قیر، دانه‌بندی و ترکیب متفاوتی با یکدیگر هستند و همین موضوع باعث می‌شود تا دما در قسمت‌های با تراکم بیشتر، پایین‌تر و در قسمت‌های با تراکم کمتر، بالاتر باشد. همچنین، افزودنی‌های استفاده شده شامل استایرن- بوتادین- استایرن و الیاف کربن نیز روی دمای ایجاد شده در نمونه‌ها و توزیع دمایی تأثیرگذار هستند. بنابراین، با توجه به دلایل ذکر شده، دمای سطح در نقاط مختلف یک نمونه آسفالتی متفاوت خواهد بود، که این اختلاف دما با گذشت زمان به دلیل تبادل گرمایی بین اجزای آسفالت، کمتر شده و در نتیجه دمای نقاط مختلف سطح به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شوند و هر چه زمان بیشتری بگذرد، دمای نقاط مختلف سطح یک نمونه، به یک دمای ثابت نزدیک‌تر می‌شود. نتایج گرمایش مایکروویو در شکل‌های ٦ و ٧ نشان داده شده است. با توجه به نمودارهای مربوط به تغییرات دمای سطحی و دمای داخلی نمونه‌ها که به ترتیب در شکل ٦ و شکل ٧ ارائه شده است، می‌توان دریافت که در هر چهار نوع آسفالت ساخته شده، با افزایش زمان گرمایش، دمای سطح و دمای داخلی افزایش یافته است. همچنین،

با مقایسه چهار دمای ثبت شده در سطح هر نمونه در زمان‌های گرمایش مختلف، بیشترین پراکندگی میان مقادیر دمای سطحی در نمونه شاهد مشاهده گردید. اما در نمونه‌های ساخته شده با الیاف کربن، این اختلاف دمایی، بین نقاط مختلف سطح کاهش یافته است؛ به طوری که در این نمونه‌ها، دمای نقاط سطح به یکدیگر نزدیک‌تر شده و تغییرات دما بین مقادیر دمای ثبت شده در نقاط مختلف سطح یک نمونه کمتر است. بنابراین، می‌توان چنین دریافت که الیاف کربن باعث توزیع بهتر و بیشتر دما در سطح نمونه‌های آسفالت می‌شود. همچنین در نمونه‌های شاهد، بیشترین میزان تفاوت بین مقادیر دمای سطح و دمای داخلی مشاهده می‌شود. اما در نمونه‌های ساخته شده با الیاف کربن، این تفاوت دمایی کاهش یافته و مقادیر دمای سطح و دمای داخل نمونه‌ها به یکدیگر نزدیک‌تر می‌باشد. با مقایسه بین مقادیر دمای سطح و دمای داخلی مشاهده می‌شود که تغییرات دما در داخل نمونه‌های آسفالتی نسبت به تغییرات دما در سطح نمونه‌ها کمتر است؛ در توضیح این امر چنین می‌توان گفت که در داخل نمونه‌ها، به علت بسته بودن فضای داخلی و ارتباط هر جزء در داخل نمونه با مواد آسفالتی، تعادل گرمایی با سهولت و سرعت بیشتری انجام می‌شود؛ اما در سطح نمونه‌های آسفالتی، چون سطح نمونه‌ها با هوا در تماس هستند، در نتیجه تبادل گرمایی بین نقاط مختلف سطح کندتر اتفاق می‌افتد و همین موجب اختلاف بیشتر دما بین نقاط مختلف سطح می گردد.

با توجه به نمودارهای تغییرات دمای سطحی و دمای داخلی نمونه‌های آسفالتی (شکل‌های ٦ و ٧)، و مقایسه‌ی روند تغییرات دما برحسب زمان گرمایش (سرعت گرمایش)، در نمونه‌های شاهد و نمونه‌های حاوی مواد افزودنی استایرن- بوتادین- استایرن و الیاف کربن، مشاهده می‌شود که الیاف کربن موجب افزایش چشمگیری در سرعت گرمایش و بازده مایکروویو می‌شود. به این معنی که به ازای زمان ثابتی از تابش امواج مایکروویو، نمونه‌های آسفالتی ساخته شده با الیاف کربن، افزایش دمای بیشتری نسبت به دیگر نمونه‌های آسفالتی دارند. علاوه بر این، همان‌طور که مشاهده می‌شود، SBS تأثیر منفی بر سرعت گرمایش آسفالت دارد؛ به‌طوری که به ازای زمان ثابتی از تابش امواج مایکروویو، نمونه‌های آسفالت با SBS، حتی سرعت گرمایش کمتری نسبت به نمونه‌های شاهد دارند. همچنین، می‌توان مشاهده کرد که سرعت گرمایش داخلی نمونه‌ها با ترکیب دو افزودنی SBS و CF، بیشتر از سرعت گرمایش نمونه‌های شاهد و نمونه‌های ساخته شده با SBS است.



شکل ٦. دمای سطحی نمونه‌های آسفالت



شکل ۷. دمای داخلی نمونه‌های آسفالت

با مقایسه بین نمودارهای شکل ۸ و شکل ۹، می‌توان چنین دریافت که میزان افزایش دمای سطح و دمای داخل نمونه‌های آسفالتی ساخته شده با الیاف کربن، از دیگر نمونه‌های آسفالتی بیشتر است. بنابراین، چنین می‌توان گفت که الیاف کربن، نقش مهمی در افزایش دمای نمونه‌های آسفالتی دارد. از سوی دیگر، همان‌طور که پیشتر نیز گفته شد، الیاف کربن باعث کاهش میزان تفاوت دمایی بین نقاط مختلف سطح و داخل نمونه‌های آسفالتی می‌گردد. بنابراین، همان‌طور که مشاهده شد، نمونه‌های ساخته شده با الیاف کربن، دارای توزیع دمایی یکنواخت‌تری نسبت به سایر نمونه‌ها هستند. در نمونه‌های با الیاف کربن، بیشترین مقادیر دمای سطحی و دمای داخلی و در نمونه‌های با SBS کمترین مقادیر دمای سطحی و دمای داخلی ثبت شده است؛ که در توضیح علت آن می‌توان گفت که الیاف کربن به عنوان یک جزء رسانا در مخلوط آسفالتی، موجب افزایش جذب میدان الکترومغناطیس شده و همین باعث افزایش دما و سرعت گرمایش آسفالت می‌شود. از سوی دیگر، SBS با کاهش درجه نفوذ و حساسیت دمایی قیر و افزایش نقطه نرمی، موجب سفت شدن قیر می‌شود، که همین موضوع باعث می‌شود دمای قیر دیرتر افزایش یافته و سرعت گرمایش آسفالت، کاهش یابد. همچنین در نمونه‌های با ترکیب دو افزودنی SBS و CF دماهای کمتری در نقاط مختلف سطح و داخل نسبت به نمونه‌ها با CF ثبت شد. که در توضیح این امر، چنین می‌توان گفت که SBS با افزایش نقطه نرمی و ویسکوزیته قیر، مقاومت آن را در برابر نرم‌شدن افزایش داده و جنبش مولکول‌های قیر را که نقشی کلیدی در سازوکار گرمایش مایکروویو (به‌ویژه از طریق چرخش دوقطبی) ایفا می‌کنند، کاهش می‌دهد. از سوی دیگر، شبکه پلیمری تشکیل‌شده در فاز قیر می‌تواند الیاف کربن را درون ساختار خود احاطه کند و با ایجاد یک پوشش عایق‌گونه، تماس مستقیم آن‌ها با امواج مایکروویو را محدود ساخته و از تشکیل یک شبکه رسانای پیوسته برای انتقال حرارت جلوگیری نماید. افزون بر این، حضور SBS با پر کردن فضای خالی، به افزایش تراکم مخلوط می‌انجامد و جنبش مولکولی را محدودتر می‌کند، چرا که جنبش

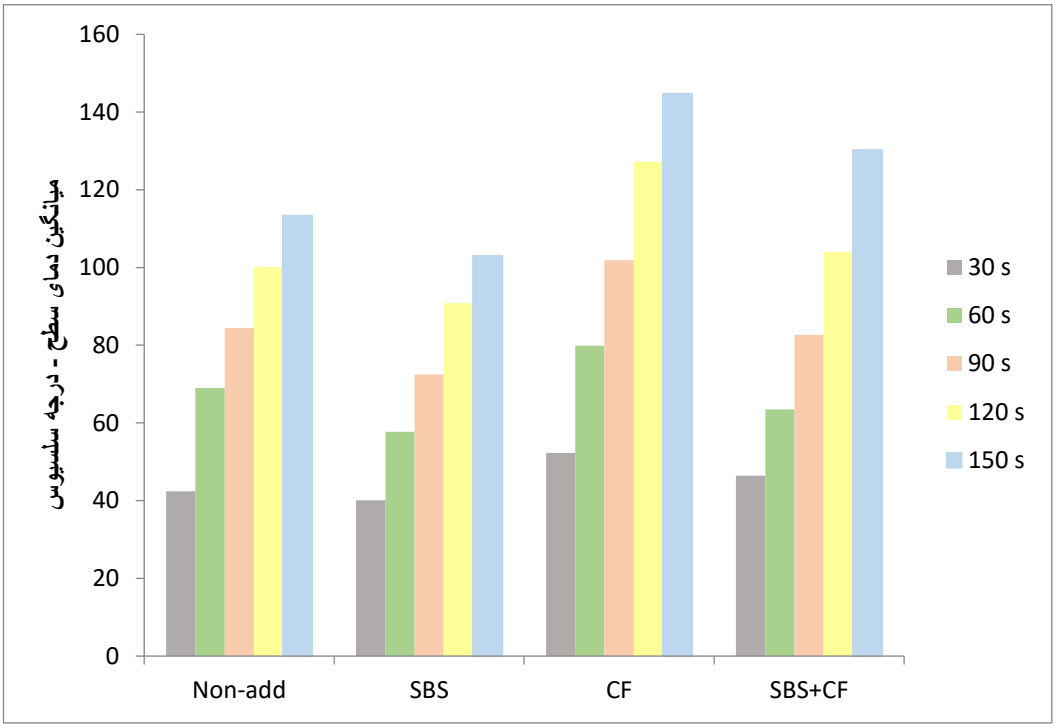
مولکولی در اثر تابش امواج مایکروویو، در یک جسم متراکم‌تر نسبت به جسم با تراکم کمتر، سخت‌تر اتفاق می‌افتد و در نتیجه نرخ گرمایش کاهش می‌یابد. بنابراین، آنچه مشاهده می‌شود حاصل هم‌افزایی این عوامل است که مجموعاً سرعت افزایش دما را در این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های فاقد پلیمر کاهش می‌دهد. لازم به ذکر است که این یافته‌ها در تطابق با نتایج پژوهش‌های پیشین می‌باشد. کاهش سرعت و یکنواختی گرمایش در نمونه‌های حاوی SBS، مطابق با نتایج فخری و همکاران (۲۰۲۱) است که نشان دادند اصلاح آسفالت با این پلیمر، دمای متوسط سطح را کاهش داده و توزیع دما را ضعیف‌تر می‌کند. در مقابل، بهبود چشمگیر نرخ گرمایش در نمونه‌های حاوی الیاف کربن با نتایج یانگ و همکاران (۲۰۲۳) که الیاف کربن را دارای بالاترین نرخ گرمایش در میان الیاف‌های رسانا معرفی کردند، مطابقت دارد. همچنین، کاهش اختلاف دمای سطح و داخل که در این تحقیق برای نمونه‌های حاوی ۰/۲ درصد الیاف کربن ثبت شد، با یافته‌های حسامی و همکاران (۲۰۱۷) هم‌جهت است. آن‌ها نیز گزارش کردند که این مقدار الیاف کربن، اختلاف دمای سطحی و داخلی را به‌طور محسوسی کاهش می‌دهد و توزیع یکنواخت‌تری از حرارت در عمق نمونه ایجاد می‌کند.

٤-٤. تحلیل اقتصادی و کاربردی

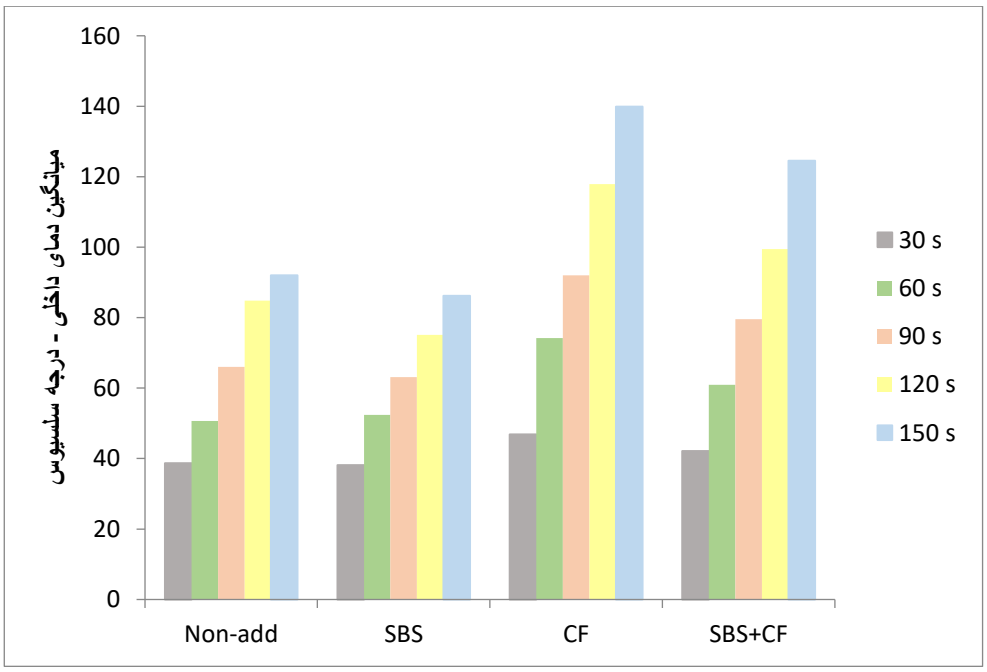
نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده مجزا از هر یک از افزودنی‌ها با محدودیت همراه است. الیاف کربن با وجود بهبود نرخ و یکنواختی گرمایش، مقاومت خمشی را به میزان ۲۱ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش می‌دهد که در بلندمدت به افزایش پتانسیل ترک‌خوردگی و دفعات تعمیر و نگهداری منجر می‌شود. از سوی دیگر، SBS با وجود افزایش چشمگیر مقاومت (١٦٤ درصد نمونه شاهد)، سرعت گرمایش را کند می‌کند. با این حال، ترکیب این دو ماده توانست هر دو محدودیت را همزمان برطرف سازد؛ به‌گونه‌ای که مخلوط حاوی SBS و الیاف کربن ضمن حفظ مقاومت خمشی در محدوده ١٦٤ درصد نمونه شاهد، توزیع دمایی یکنواخت‌تر و نرخ گرمایش بالاتری نسبت به نمونه شاهد ارائه داد.

کاهش دفعات تعمیر و نگهداری ناشی از افزایش مقاومت خمشی تا ١٦٤ درصد نمونه شاهد، پیامدهای اقتصادی و زیست‌محیطی قابل‌توجهی به همراه دارد. از منظر اقتصادی، هر بار تعمیر یک روسازی آسفالتی شامل هزینه‌های مستقیم نظیر تهیه و اجرای مصالح جدید، نیروی کار و تجهیزات، و هزینه‌های غیرمستقیم مانند مدیریت ترافیک، انسداد مسیر، استهلاک خودروها و تأخیر کاربران است. با کاهش دفعات نیاز به این عملیات، تمامی این هزینه‌ها به‌طور متناسب کاهش می‌یابد. از دیدگاه زیست‌محیطی نیز تولید آسفالت جدید مستلزم استخراج منابع طبیعی شامل سنگدانه و قیر، مصرف سوخت‌های فسیلی در فرایند تولید و حمل‌ونقل، و انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های هوا است. افزایش عمر خدمت‌دهی روسازی و کاهش دفعات تعمیر و نگهداری، مستقیماً مصرف این منابع و انتشار آلاینده‌ها را کاهش می‌دهد و با اهداف توسعه پایدار همسو است. در کنار این مزایا، حضور الیاف کربن نیز با افزایش سرعت گرمایش، مدت زمان هر عملیات ترمیم حرارتی را به‌طور محسوسی کاهش می‌دهد. کاهش زمان گرمایش نه‌تنها انرژی مصرفی دستگاه مایکروویو را در هر سیکل ترمیم پایین می‌آورد، بلکه مدت انسداد مسیر و اختلال در ترافیک را نیز کوتاه‌تر می‌کند و به تبع آن هزینه‌های بهره‌برداری و اجتماعی کاهش می‌یابد. همچنین، توزیع یکنواخت‌تر دما که در حضور الیاف کربن حاصل می‌شود، از بروز نقاط داغ موضعی و تخریب حرارتی مخلوط آسفالتی جلوگیری کرده و به حفظ بیشتر دوام روسازی کمک می‌کند. بدین ترتیب، اگرچه افزودن هم‌زمان SBS و الیاف کربن هزینه اولیه ساخت را نسبت به آسفالت معمولی افزایش می‌دهد، اما در یک نگاه کلی

به مجموع هزینه‌ها در طول عمر خدمت‌دهی روسازی، کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری، کاهش زمان و هزینه عملیات ترمیم و صرفه‌جویی در مصرف منابع و انرژی، این هزینه اولیه را جبران می‌کند و ترکیب این دو افزودنی را به یک راهکار پایدار و مقرون به‌صرفه در طول عمر روسازی تبدیل می‌نماید.



شکل ۸. تغییرات دمای سطح نمونه‌ها در دوره‌های گرمایش مختلف



شکل ۹. تغییرات دمای داخل نمونه‌ها در دوره‌های مختلف گرمایش

۵. نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بررسی تأثیر مواد افزودنی SBS و CF بر قابلیت گرمایش آسفالت تحت روش گرمایش با امواج مایکروویو و همچنین تأثیر این مواد بر میزان مقاومت خمشی نمونه‌های آسفالتی انجام شده است.

در این تحقیق، رفتار حرارتی و عملکرد توزیع دمای چهار نمونه آسفالتی مختلف شامل نمونه‌های آسفالتی بدون افزودنی، با افزودنی SBS، با افزودنی CF و با هر دو افزودنی SBS و CF، تحت گرمایش با امواج مایکروویو بررسی شد. بررسی‌ها تأثیر مثبت الیاف کربن به عنوان یک افزودنی رسانا بر نرخ گرمایش آسفالت و بهبود توزیع دمایی بین سطح و عمق را در نمونه‌های حاوی ۰/۲ درصد الیاف کربن نشان می‌دهد. همچنین، آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای به منظور ارزیابی و کنترل میزان مقاومت نمونه‌های آسفالتی انجام شد. برخورداری از مقاومت بالای نمونه‌ها حاوی SBS نشان می‌دهد که ترکیب SBS و CF به عنوان یک راهکار بهینه برای روسازی‌های آسفالتی پیشنهاد می‌شود که همزمان دارای مقاومت بالا، قابلیت گرمایش سریع و توزیع دمایی یکنواخت‌تری می‌باشد. خلاصه نتایج تحقیق به صورت زیر بیان می‌شود:

- افزودن SBS به قیر موجب کاهش درجه نفوذ و افزایش نقطه نرمی و ویسکوزیته شد. با افزایش مقدار SBS از ۷ درصد به ۸/۵ درصد وزنی، تغییرات درجه نفوذ و نقطه نرمی ناچیز بود؛ اما ویسکوزیته همچنان روند افزایشی خود را حفظ کرد. از آنجا که افزایش بیشتر ویسکوزیته می‌تواند کارایی آسفالت را در مراحل پخش و تراکم کاهش دهد، مقدار بهینه SBS در این مطالعه ۷ درصد وزنی قیر تعیین گردید.
- میانگین مقاومت خمشی نمونه‌های ساخته شده با SBS، حدود ۱۸۰ درصد میانگین مقاومت خمشی نمونه‌های شاهد است. الیاف کربن باعث کاهش تقریباً ۲۱ درصدی مقاومت نمونه‌های آسفالتی نسبت به نمونه‌های بدون افزودنی شده است. همچنین، مقاومت خمشی نمونه‌ها با ترکیب دو افزودنی SBS و CF تقریباً ١٦٤ درصد مقاومت اولیه نمونه‌های شاهد است.
- تفاوت در عملکرد مکانیکی دو افزودنی SBS و CF، ریشه در نحوه توزیع و برهم‌کنش آن‌ها در مخلوط آسفالتی دارد. SBS با حل شدن در فاز قیر و تشکیل یک شبکه پلیمری پیوسته، از یک سو چسبندگی میان قیر و سنگدانه را تقویت کرده و از سوی دیگر با افزایش قابل‌توجه ویسکوزیته و نقطه نرمی، ساختار قیر را سفت‌تر و مقاوم‌تر می‌کند که باعث افزایش مقاومت خمشی مخلوط می‌شود. در مقابل، الیاف کربن به‌دلیل ساختار رشته‌ای و توزیع تصادفی، عمدتاً در سطح تماس قیر و سنگدانه قرار می‌گیرند و با ایجاد یک لایه جداکننده، پیوند چسبندگی را تضعیف کرده و از مقاومت خمشی می‌کاهند. همچنین، این الیاف تمایل به گلوله‌شدن و تشکیل توده‌های فشرده دارند که این توده‌ها با ایجاد نقاط تمرکز تنش، شروع و گسترش ترک را تسهیل می‌کنند.
- در اثر تابش امواج مایکروویو، دماهای متغیری در نقاط مختلف سطح و داخل نمونه‌ها ایجاد می‌گردد. با افزایش زمان گرمایش، دمای سطح و دمای داخلی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. تغییرات دما در داخل نمونه‌ها نسبت به تغییرات دما در سطح کمتر است.
- در نمونه‌های شاهد، بیشترین تغییرات بین مقادیر دمای سطحی و دمای داخلی در نقاط مختلف مشاهده می‌شود؛ اما در نمونه‌های با

الیاف کربن این اختلاف دمایی بین نقاط مختلف سطح و همچنین داخل نمونه‌ها کاهش یافته است و دمای نقاط مختلف به یکدیگر نزدیک‌تر است. بنابراین، می‌توان چنین دریافت که الیاف کربن باعث توزیع یکنواخت‌تر و بیشتر دما در سطح نمونه‌های آسفالت می‌شود.

- الیاف کربن موجب افزایش چشمگیر در سرعت گرمایش و بازده مایکروویو می‌گردد. به این معنی که به ازای زمان ثابتی از تابش امواج مایکروویو، نمونه‌ها با الیاف کربن، افزایش دمای بیشتری نسبت به سایر نمونه‌های آسفالتی دارند.
- اگرچه SBS عملکرد مقاومت نمونه‌های آسفالت را تا حد زیادی بهبود بخشید (حدود ۱۸۰ درصد مقاومت نمونه‌های شاهد)، اما دمای متوسط سطح و داخل نمونه‌های آسفالتی را کاهش داد و یکنواختی توزیع دما را ضعیف‌تر کرد.
- رفتار حرارتی مشاهده‌شده در نمونه‌ها مستقیماً با ساختار و خواص فیزیکی SBS و CF مرتبط است. الیاف کربن با قابلیت بالای جذب امواج مایکروویو، انرژی الکترومغناطیس را به گرما تبدیل کرده و نرخ گرمایش را افزایش می‌دهد. پراکنش نسبتاً یکنواخت این الیاف، شبکه‌ای از مسیرهای رسانای حرارتی ایجاد می‌کند که توزیع همگن دما را تسهیل کرده و اختلاف دمای سطح و داخل را کاهش می‌دهد. از سوی دیگر، SBS با افزایش ویسکوزیته و تشکیل شبکه پلیمری، جنبش مولکول‌های قیر را که نقشی کلیدی در سازوکار گرمایش مایکروویو (چرخش دوقطبی‌ها) دارند، کاهش می‌دهد. همچنین، این شبکه پلیمری می‌تواند الیاف کربن را درون ساختار خود احاطه کرده و با ایجاد یک پوشش عایق‌گونه، تماس مؤثر آن‌ها با امواج را محدود سازد. این عوامل در کنار افزایش تراکم مخلوط، مجموعاً سرعت گرمایش را در نمونه‌های حاوی SBS کاهش می‌دهد.

به‌طورکلی، نتایج این پژوهش نشان داد که به‌کارگیری همزمان SBS با هدف بهبود مقاومت خمشی و الیاف کربن با هدف افزایش سرعت و یکنواختی گرمایش، می‌تواند به ترکیبی با عملکرد موفق منجر شود. این ترکیب ضمن حفظ مقاومت خمشی در سطح بالا (حدود ۱٦٤ درصد مقاومت نمونه‌های شاهد)، توزیع دمایی یکنواخت‌تر و سرعت گرمایش بیشتری نسبت به نمونه شاهد ارائه داد. بهینه‌سازی نسبت‌های این دو افزودنی با ابزارهای تحلیل چندمعیاره می‌تواند در مطالعات آتی مورد بررسی قرار گیرد.

٦. تقدیر و قدردانی

ندارد.

۷. تأییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می‌شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده‌اند.

۸. مشارکت‌های نویسندگان

حدیث محمدی ثابت: تهیه مواد اولیه، انجام آزمایش، تحلیل نتایج، نوشتن نسخه اولیه مقاله

سید شهاب حسنی نسب: معرفی موضوع، هدایت و راهنمایی، بررسی و تصحیح نسخه نهایی

محسن زاهدی:هدایت و مشاوره، مشاوره در خصوص نسخه نهایی

۹. منابع مالی

منابع مالی قائم به پژوهشگران بوده است.

۱۰. تعارض منافع

نویسندگان مقاله اعلام می‌کنند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

۱۱. مراجع

Amani, S., Kavussi, A., & Karimi, M. M. (2020). “Effects of aging level on induced heating-healing properties of asphalt mixes”. Constr. Build. Mater., 263: 120105.

Ayar, P., Moreno-Navarro, F., & Rubio-Gámez, M. C. (2016). “The healing capability of asphalt pavements: A state of the art review”. J. Clean. Prod., 113: 28-40.

Fakhri, M., Javadi, S., Sedghi, R., Sassani, A., Arabzadeh, A., & Baveli Bahmai, B. (2021). “Microwave induction heating of polymer-modified asphalt materials for self-healing and deicing”. Sustainability, 13(18): 10129.

Gallego, J., del Val, M. A., Contreras, V., & Páez, A. (2013). “Heating asphalt mixtures with microwaves to promote self-healing”. Constr. Build. Mater., 42: 1-4.

Gao, J., Guo, H., Wang, X., Wang, P., Wei, Y., Wang, Z., ... & Yang, B. (2019). “Microwave deicing for asphalt mixture containing steel wool fibers”. J. Clean. Prod., 206: 1110-1122.

García, Á. (2012). “Self-healing of open cracks in asphalt mastic”. Fuel, 93: 264-272.

Gulisano,F.,& Gallego, J. (2021). “Microwave heating of asphalt paving materials: Principles, current status and next steps”. Constr. Build. Mater., 278: 121993.

He, Q., Li, Z., Huang, J., Chen, J., Zhao, L., Xing, C., Cui, T., & Zou, J. (2025). “Synergistic effects of high-modulus additives on sbs-modified asphalt: Microstructural, rheological enhancement, and dosage-dependent performance optimization”. Mater., 18(20): 4724.

Hemmati, N., Vigneswaran, S., Kim, H. H., Lee, M. S., & Lee, S. J. (2023). “Laboratory evaluation of asphalt binders containing styrene-butadiene-styrene (SBS) and processed oil”. Mater., 16(3): 1235.

Hesami, S., Hesami, E., & Gholi Pour Goodarzi, M. (2017). “Investigation of the microwave heating effect on self-healing of asphalt mixtures containing conductive fibers”. J. Transport. Infrastruct. Eng., 2(4): 1-22.

Islam, S. S., Singh, S. K., RN, G. R., & Ravindranath, S. S. (2022). “Performance deterioration of sbs-modified asphalt mix: Impact of elevated storage temperature and sbs concentration of modified binder”. J. Mater. Civ. Eng., 34(3): 04021475.

Khodaii, A., & Mehrara, A. (2009). “Evaluation of permanent deformation of unmodified and SBS modified asphalt mixtures using dynamic creep test”. Constr. Build. Mater., 23(7): 2586-2592.

Li, H., Yu, J., Liu, Q., Li, Y., Wu, Y., & Xu, H. (2019). “Induction heating and healing behaviors of asphalt concretes doped with different conductive additives”. Adv. Mater. Sci. Eng., 2019(1): 2190627.

Li, H., Cui, C., Temitope, A. A., Feng, Z., Zhao, G., & Guo, P. (2022). “Effect of SBS and crumb rubber on asphalt modification: A review of the properties and practical application”. J. Traffic Transport. Eng. (English Edition), 9(5): 836-863.

Liang, B., Fang, L., Kai, S., Qian, G., Liu, Z., & Zheng, J. (2021). “Review on the self-healing of asphalt materials: Mechanism, affecting factors, assessments and improvements”. Constr. Build. Mater., 266: 120453.

Liu, Q., Chen, C., Li, B., Sun, Y., & Li, H. (2018). “Heating characteristics and induced healing efficiencies of asphalt mixture via induction and microwave heating. Mater., 11(6): 913.

Lou, B., Sha, A., Barbieri, M. A., Liu, Zh., & Zhang, F. (2021). “Microwave heating properties of steel slag asphalt mixture using a coupled electromagnetic and heat transfer model”. Constr. Build. Mater., 291: 123248.

Loureiro, C. D., Silva, H. M., Oliveira, J. R., Costa, N. L., & Palha, C. A. (2023). “The effect of microwave radiation on the self-healing performance of asphalt mixtures with steel slag aggregates and steel fibers”. Mater., 16(10): 3712.

Lu, D. X., Nguyen, N. H., Saleh, M., & Bui, H. H. (2021). “Experimental and numerical investigations of non-standardised semi-circular bending test for asphalt concrete mixtures”. Int. J. Pavement Eng., 22(8): 960-972.

Lu, D., Jiang, X., & Leng, Z. (2024). “Sustainable microwave-heating healing asphalt concrete fabricated with waste microwave-sensitive fillers”. J. Clean. Prod., 434: 140343.

Meng, Y., Chen, P., Pang, Y., Huang, K., Wan, C., & Shen, T. (2026). “Performance, modification mechanism and cost-benefit analysis of SBS/terminal blended rubberized composite high viscosity modified asphalt”. Constr. Build. Mater., 507: 145105.

Norambuena-Contreras, J., & Garcia, A. (2016). “Self-healing of asphalt mixture by microwave and induction heating”. Mater. Design, 106: 404-414.

Polacco, G., Stastna, J., Biondi, D., & Zanzotto, L. (2006). “Relation between polymer architecture and nonlinear viscoelastic behavior of modified asphalts”. Current Opinion Colloid Interface Sci., 11(4): 230-245.

Qiu, J., Molenaar, A. A. A., Van de Ven, M. F. C., Wu, S., & Yu, J. (2012). “Investigation of self-healing behaviour of asphalt mixes using beam on elastic foundation setup”. Mater. Struct., 45(5): 777-791.

Ren, X., Sha, A., Li, J., Jiang, W., Jiao, W., Wu, W., & Ling, X. (2024). “Carbon fiber powder in sustainable asphalt pavements: Improving microwave self-healing capacity and low-temperature performance”. J. Clean. Prod., 440: 140828.

Sha, A., Lou, B., Barbieri, D. M., & Hoff, I. (2022). “Microwave heating as an innovative road maintenance technology: Aging effect on binder and feasibility evaluation”. Mater., 15(1): 316.

Su, M., Zhou, J., Lu, J., Chen, W., & Zhang, H. (2022). “Using molecular dynamics and experiments to investigate the morphology and micro-structure of SBS modified asphalt binder”. Mater. Today Commun., 30: 103082.

Wang, Z., Dai, Q., Porter, D., & You, Z. (2016). “Investigation of microwave healing performance of electrically conductive carbon fiber modified asphalt mixture beams”. Constr. Build. Mater., 126: 1012-1019.

Wang, F., Zhu, H., Shu, B., Li, Y., Gu, D., Gao, Y., Chen, A., Feng, J., Wu, S., Liu, Q., & Li, C. (2022). Microwave heating mechanism and self-healing performance of asphalt mixture with basalt and limestone aggregates. Constr. Build. Mater., 342, 127973.

Wang, Z., Feng, Z. G., Cui, Q., Li, X., Zhang, L., Yang, X., & Li, X. (2025). “Crack monitoring and self-healing properties of multifunctional asphalt mixture containing steel slag and carbon fiber towards sustainable pavement”. Sustain. Mater. Technol., 45: e01511.

Yang, H., Ouyang, J., Jiang, Z., & Ou, J. (2023). “Effect of fiber reinforcement on self-healing ability of asphalt mixture induced by microwave heating”. Constr. Build. Mater., 362: 129701.

Ye, X., Xiao, Z., He, C., Li, W., Lin, P., Meng, Y., & Hu, C. (2023). “Roles of waste carbon fibers on the efficiency of multiple induction heating healing behavior in asphalt mixture for sustainable infrastructure”. J. Clean. Prod., 423: 138694.

Zhu, H., Yuan, H., Liu, Y., Fan, S., & Ding, Y. (2020). “Evaluation of self-healing performance of asphalt concrete for macrocracks via microwave heating”. J. Mater. Civ. Eng., 32(9): 04020248.