

بررسی آزمایشگاهی خواص یخ‌زدایی و خودترمیمی آسفالت‌های نیمه‌گرم حاوی فیلر سرباره روی

منصور فخری*، استاد، دانشکده عمران و نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی،

تهران

سجاد جوادی، دانشجو دکتری راه و ترابری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

Email: fakhri@kntu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۰۵ - پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۰۷

چکیده

امروزه، با توجه به کمبود و غیرقابل تجدیدپذیر بودن منابع طبیعی و همچنین مسائل محیط‌زیستی، استفاده از مواد دورریختنی (به‌خصوص سرباره روی) در مخلوط آسفالتی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. احتمال می‌رود که با توجه به ماهیت رسانایی سرباره روی، مخلوط‌های حاوی سرباره روی دارای پتانسیل مناسبی برای جذب زیاد امواج ماکروویو باشند. هدف اصلی این تحقیق، امکان‌سنجی استفاده از سرباره روی به عنوان فیلر در مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم برای بررسی پتانسیل یخ‌زدایی و خودترمیمی با استفاده از گرمایش ماکروویو می‌باشد. به همین منظور، آزمایش‌های پتانسیل یخ‌زدایی مخلوط آسفالتی با گرمادهی ماکروویو شامل آزمایش‌های سرعت ذوب شدن یخ، زمان افتادن یخ، بررسی خودترمیمی حین یخ‌زدایی و پایداری برای نمونه‌های آسفالتی نیمه‌گرم حاوی فیلر سرباره روی (صفر، ۳۵، ۷۰ و ۱۰۰ درصد کل وزن فیلر) مد نظر قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که اگر ۱۰۰ درصد فیلر سرباره روی در مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم استفاده شود، میزان خودترمیمی حین یخ‌زدایی بهترین حالت خود را داشته و از طرفی میزان سرعت ذوب شدن یخ برای مخلوط‌های حاوی ۱۰۰٪ فیلر سرباره روی ۰/۱۸ گرم بر ثانیه (۶۸٪) بیشتر از مخلوط کنترلی است.

واژه‌های کلیدی: آسفالت نیمه‌گرم، گرمادهی ماکروویو، فیلر سرباره روی، یخ‌زدایی، خودترمیمی

۱. مقدمه

بررسی قرار گشت که نتایج نشان داد حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی تحت سیکل ذوب و یخ با وجود نانو روی اکسید در قیر بهبود می‌یابد (سالتان و همکاران، ۲۰۱۸). همچنین در تحقیق آکناش و اصلان (۲۰۱۶) اثر سرباره روی به عنوان ماده دورریختنی و در حالت فیلری جایگزین فیلر سنگدانه‌ای عادی در آسفالت ماستیک سنگدانه‌ای SMA بررسی شد که نشان داد سرباره روی اگرچه مقاومت مارشال مخلوط SMA را بهبود می‌بخشد، ولی مقاومت مخلوط در برابر حساسیت رطوبتی را کاهش می‌دهد.

در زمینه بررسی اثر افزودن مواد فلزی بر توانایی انتقال گرما و خودترمیمی آسفالت تحقیقات زیادی صورت گرفته است. در تحقیقی توسط نعلبندیان و همکاران (۲۰۲۱) انواع روش‌های خودترمیمی و گرمادهی در تحقیقات دهه اخیر مورد بررسی قرار گرفت. در تحقیقی دیگر در سال ۲۰۲۰ توسط کُنچا و نورامبوئنا کنتراس، خواص خودترمیمی آسفالت حاوی الیاف فلزی و اثرات گرمادهی در محیط و شبیه‌سازی گرمادهی با امواج مختلف بررسی شد. همچنین، در تحقیقی دیگر که توسط نورامبوئنا کنتراس و همکاران (۲۰۱۸) صورت گرفت، اثر افزودنی مواد دورریختنی فلزی از قبیل الیاف فلزی و خرده آهن بر خواص فیزیکی حرارتی، رسانایی و ویژگی‌های خودترمیمی ترک در مخلوط آسفالتی با گرمادهی ماکروویو مد نظر قرار گرفت. ویژگی‌های خودترمیمی حرارتی مخلوط آسفالتی از منظر انتقال گرما با ماکروویو بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده این است که افزودنی‌های فلزی دورریختنی به صورت غیریکنواخت در مخلوط پخش شده و نقش مهمی در ویژگی‌های خودترمیمی با استفاده از گرمادهی به وسیله ماکروویو دارند. در تحقیق شو و همکاران در سال ۲۰۲۰ به تأثیر انواع درشت‌دانه و ریزدانه سرباره آهن در پتانسیل خودترمیمی آسفالت داغ پرداخته شد. نتایج نشان داد که در صورت استفاده از تکنیک گرمادهی ماکروویو، وجود

به دنبال افزایش مواد دورریختنی و توسعه روزافزون جمعیت جهان در سال‌های اخیر، حفاظت و نگهداری از محیط‌زیست اهمیت بیشتری پیدا کرده است. محققان توجه بسیاری به اثرات منفی وارد بر محیط‌زیست توسط این مواد دورریختنی داشته‌اند. جهت جلوگیری از ضرر رساندن این مواد دورریختنی به طبیعت، به عنوان راهی پایدار و اقتصادی‌تر، بسیاری از مراجع به دنبال وادار کردن صنایع جهت استفاده دوباره از مواد دورریختنی می‌باشند (آبرت و همکاران، ۲۰۰۶). مواد زیادی از قبیل شیشه، آلومینیوم و کاغذ به عنوان مواد بازیافتی در صنعت برای اهداف مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند. علاوه بر این، استفاده از مواد دورریختنی به عنوان مواد اولیه در ساخت و ساز، به‌خصوص در آسفالت، مد نظر قرار گرفته است (سیر و همکاران، ۲۰۰۴). در مهندسی عمران و به‌خصوص ساخت بزرگراه‌ها، از مصالح دورریختنی مختلف به صورت گسترده و در بازه‌های زمانی مختلف استفاده شده است (پرز و همکاران، ۲۰۱۱؛ چن و همکاران، ۲۰۱۶).

استفاده از فلز روی (به‌صورت نانو، سرباره و یا ترکیبات حاوی روی) چند سالی است که در تحقیقات در زمینه صنعت قیر و آسفالت مد نظر قرار گرفته است. در تحقیق طاهرخانی و وهابی کمسری (۲۰۲۰) به بررسی خواص محیط‌زیستی و رئولوژیک ماستیک حاوی فیلر خاکستر روی و مقایسه آن با ماستیک حاوی فیلر آهکی پرداخته شد. در این تحقیق، آزمایش‌های دینامیک قیر هم مد نظر قرار گرفت. در تحقیق اویانگ و همکاران (۲۰۰۶) نشان داده شد که قیر حاوی روی (در واکنش با فسفات) در شرایط مختلف دارای پیرشدگی کمتری نسبت به قیر خالص بوده و قیر حاوی روی (در واکنش با فسفات) مقابل اکسید شدن مقاومت بیشتری دارد. در تحقیقی دیگر، حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی گرم با قیر حاوی نانو روی اکسید (به‌عنوان ضد عریان‌شدگی) مورد

مصرف سوخت‌های فسیلی و ۱۰ درصد بخارهای شیمیایی ایجاد شده را کاهش می‌دهد و ۲- آسفالت نیمه‌گرم تا ۱۵ درصد اثر محیط‌زیستی آسفالت گرم را کاهش می‌دهد (لارسن و همکاران، ۲۰۰۴). در سال‌های اخیر، توجه به خاصیت خودترمیمی آسفالت‌های نیمه‌گرم افزایش یافته، به طوری که در تحقیق فخری و همکاران (۲۰۲۰) مشخص شد که الیاف فلزی می‌تواند بر خواص خودترمیمی آسفالت نیمه‌گرم (مشابه آسفالت داغ) تأثیر مثبت زیادی داشته باشد.

با توجه به تحقیقات پیشین، می‌توان گفت که توجه به استفاده از مواد دورریختنی فلزی در آسفالت به منظور کاهش مصرف انرژی در فرایند خودترمیمی و یخ‌زدایی بسیار مهم بوده است. از یک سو، با توجه به افزایش استفاده از آسفالت نیمه‌گرم در روسازی راه‌ها و از سوی دیگر با توجه به اهمیت خواص فلزی سرباره روی در رسانایی گرمایی، به‌خصوص برای مناطق سردسیر، در این تحقیق، ویژگی‌های یخ‌زدایی و خودترمیمی مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم حاوی فیلر سرباره روی بررسی شده است. شایان ذکر است که در این تحقیق از تکنیک گرمادهی ماکروویو جهت شبیه‌سازی گرمادهی میدانی استفاده شده است.

۲. مواد و مصالح

۲-۱. قیر

قیر استفاده شده در این پژوهش، قیر خالص با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ از شرکت نفت جی است. این قیر برای تهیه نمونه‌های مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم مورد استفاده قرار گرفته که خصوصیات آن در جدول ۱ آمده است.

سرباره آهن در آسفالت تأثیر به‌سزایی بر خواص خودترمیمی آسفالت دارد.

رسانایی حرارتی در مخلوط‌های آسفالتی پارامتری کلیدی در جهت تقویت پتانسیل یخ‌زدایی آسفالت می‌باشد. فیلرهای رسانای گرما برای افزایش خواص گرمایی آسفالت به کار می‌روند؛ به طوری که خواص انتقال حرارت آسفالت را بهبود می‌بخشد (چن و همکاران، ۲۰۱۰). فناوری یخ‌زدایی با استفاده از آسفالت‌های هادی مبنای توسعه روش‌های خودترمیمی آسفالت هستند (مینسک، ۱۹۶۸). در تحقیق سان و همکاران (۲۰۱۸) خصوصیات ذوب یخ و برف مخلوط‌های آسفالت خودترمیم با استفاده از القای گرمایی و گرمادهی ماکروویو مورد بررسی قرار گرفت. عملکرد خودترمیمی مخلوط آسفالتی حین فرایند ذوب یخ با استفاده از تست خمش سه‌نقطه‌ای بررسی شد. نتایج نشان داد که افزایش سرعت یخ‌زدایی آسفالت‌های خودترمیم با تکنیک گرمادهی مناسب، بسیار قابل توجه بوده است. در این تحقیق، کارایی شیوه گرمادهی ماکروویو در جهت ذوب یخ محسوس بود.

در سال‌های اخیر، فناوری‌هایی در جهت کاهش دمای تولید و تراکم بتن آسفالتی در محل توسعه یافته که منجر به استفاده از آسفالت نیمه‌گرم شده است. اختراع‌های مختلفی در جهت توسعه آسفالت نیمه‌گرم با استفاده از تکنیک فوم، یا افزودنی آرگانیک و یا افزودنی شیمیایی توسعه داده شده است (زومانیس، ۲۰۱۰). این تحقیقات سبب کاهش دمای روسازی بین ۲۰ تا ۳۰ درجه سلسیوس و همچنین کاهش ویسکوزیته قیر و افزایش کارایی مخلوط شده است. این حقایق نشان‌دهنده فواید محیط‌زیستی زیادی است: ۱- آسفالت نیمه‌گرم نسبت به آسفالت گرم تا ۲۴ درصد اثر آلودگی هوا، تا ۱۸ درصد

جدول ۱. خصوصیات قیر مورد استفاده

واحد	روش آزمایش	قیر ۶۰/۷۰	خصوصیات قیر
کیلوگرم بر متر مکعب	ASTM D3289	۱۰۱۷	وزن مخصوص در ۶۰ درجه فارنهایت
دهم میلی متر	ASTM D5	۶۵	درجه نفوذ در ۲۵ درجه سلسیوس
درجه سلسیوس	ASTM D36	۴۹/۸	نقطه نرمی
سانتی متر	ASTM D113	بیشتر از ۱۰۰	انگمی در ۲۵ درجه سلسیوس
درجه سلسیوس	ASTM D92	۳۳۴	نقطه اشتعال

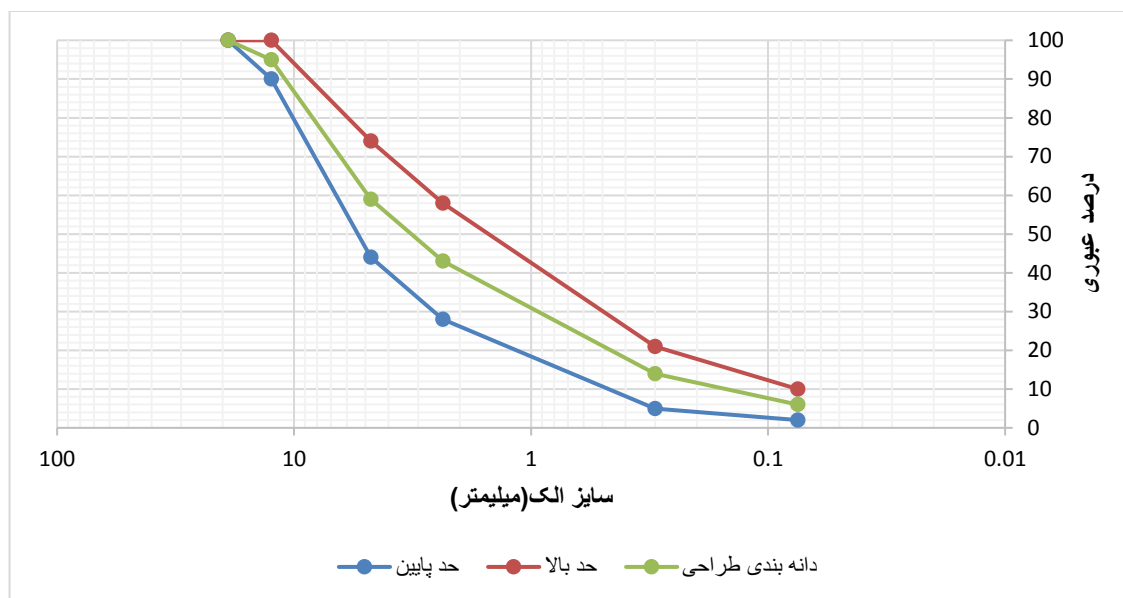
۲-۲. سنگدانه

است. در این تحقیق، میانه حد بالا و پایین آیین نامه ای درصد عبوری از هر الک (به عنوان معیار طرح اختلاط) مد نظر قرار گرفت. در این تحقیق، از فیلر سرباره روی از معدن روی زنجان به صورت وزنی و به عنوان جایگزین فیلر آهکی در مخلوط به میزان ۳۵، ۷۰ و ۱۰۰ درصد استفاده شده که این مقادیر بر مبنای تحقیق نیون و خبیری (۲۰۱۶) بوده است.

مصالح سنگی استفاده شده در این پژوهش برای ساخت نمونه های آسفالتی از نوع سنگدانه های شکسته آهکی از معدن اسپچران هستند که خواص فیزیکی آنها در جدول ۲ آمده است. دانه بندی مصرفی (برای آستر و رویه) برای ساخت نمونه ها و درصد عبوری از هر الک برای حالت پایه در شکل ۱ (بر مبنای آیین نامه ۲۳۴) نشان داده شده

جدول ۲. خصوصیات مصالح سنگی مورد استفاده

واحد	نتایج آزمایش	حدود آیین نامه ای	نتایج آزمایش	شرح
درصد	AASHTO T96	کمتر از ۵۰	۲۲/۳	آزمایش سایش لس آنجلس
درصد	BS 812	کمتر از ۴۰	۱۶	حداکثر ضریب تورق
درصد	ASTM D5821	حداقل ۷۵	۹۳	حداقل شکستگی در دو جبهه روی الک شماره ۴
درصد	AASHTO T85	-	۲/۲	حداکثر درصد جذب آب (مصالح درشت دانه)
درصد	AASHTO T84	-	۲/۴	حداکثر درصد جذب آب (مصالح ریزدانه)
گرم بر سانتی متر مکعب	ASTM C127	-	۲/۵۹	وزن مخصوص واقعی مصالح سنگی درشت دانه
گرم بر سانتی متر مکعب	ASTM C128	-	۲/۳۲	وزن مخصوص واقعی مصالح سنگی ریزدانه



شکل ۱. دانه‌بندی سنگدانه‌های نمونه‌های نیمه‌گرم در این تحقیق

۳. آزمایش‌ها

۳-۱. ساخت

نمونه‌های ساخته شده آسفالتی نیمه‌گرم در این تحقیق بر مبنای افزودن ساسوبیت به میزان ۱/۵ درصد وزنی قیر به مخلوط می‌باشد (بر مبنای تحقیقات شیائو و همکاران، ۲۰۱۲؛ فخری و همکاران، ۲۰۱۹). در این تحقیق، ابتدا فرآیند طراحی اختلاط مارشال بر مبنای AASHTO T245 برای تعیین قیر بهینه برای درصدهای مختلف فیلر سرباره روی اجرا شده و سپس آزمایش‌ها روی نمونه‌ها انجام گرفت. جهت انجام آزمایش‌ها، از هر نمونه سه عدد ساخته شد. نتایج تست مارشال برای هر نوع مخلوط در به‌دست آوردن قیر بهینه به این صورت بود که نمونه عادی بدون فیلر سرباره روی دارای ۵/۲ درصد قیر بهینه، نمونه دارای ۳۵٪ فیلر سرباره روی دارای ۵/۳ درصد قیر بهینه، نمونه دارای ۷۰٪ فیلر سرباره روی دارای ۵/۴ درصد قیر بهینه و نمونه دارای ۱۰۰٪ فیلر سرباره روی دارای ۵/۵ درصد قیر بهینه بوده‌اند.

۳-۲. زمان افتادن یخ

برای شبیه‌سازی وجود لایه یخ در سطح روسازی در زمستان، به‌خصوص در شرایط به شدت نامناسب مانند تگرگ شدید و برف کوبیده شده و آب باران یخ‌زده شده، یخی با ضخامت ۳ سانتی‌متر روی نمونه تشکیل داده شد. به این منظور، یک صفحه پلاستیک در اطراف نمونه مارشال قرار داده شده و با تسمه فلزی محکم شد. ضخامت لایه قبل از قرارگیری نمونه در فریزر و زمان ریختن آب در پوشش پلاستیکی اندازه‌گیری شده است. مراحل آماده‌سازی لایه یخ و انجام تست در شکل ۲ نشان داده شده است. در این تست، لایه یخ بعد از گرمادهی روسازی تحت گرمای ماکروویو سقوط می‌کند و زمان گرمادهی تا افتادن یخ اندازه‌گیری و گزارش می‌شود (گائو و همکاران، ۲۰۱۹).



شکل ۲. مراحل ساخت و آزمایش زمان افتادن یخ

(لیو و همکاران، ۲۰۱۹). در زمان انجام این تست، دمای اتاق ۲۵ درجه سلسیوس بود. سرعت ذوب یخ بر مبنای رابطه (۱) محاسبه شد. فرایند ذوب شدن یخ تحت گرمادهی ماکروویو در شکل ۳ نشان داده شده است.

$$IMS = (m_1 - m_2) / t$$

(۱)

که IMS سرعت ذوب یخ (گرم بر ثانیه)، m_1 جرم نمونه و یخ قبل از گرمادهی (گرم)، m_2 جرم نمونه و یخ بعد از گرمادهی (گرم) و t زمان گرمادهی (ثانیه) است.

۳-۳. سرعت ذوب شدن یخ

در این تست، نمونه مارشال (قطر ۱۰۱,۶ میلی‌متر و ارتفاع ۶۳/۵ میلی‌متر) و ۲۴۰ گرم آب در دمای ۱۵- درجه سلسیوس در فریزر قرار داده شد (تا یک قطعه یخ هم-مقطع با نمونه مارشال و با ارتفاع ۳ سانتی‌متر تشکیل گردد). بعد از ۲۴ ساعت، یخ روی سطح نمونه آسفالتی با دمای ۱۵- درجه قرار داده شد و وزن کل نمونه و یخ قبل از گرمادهی ماکروویو اندازه‌گیری شد. سپس، هر ۲۰ ثانیه (حین گرمادهی ماکروویو) دمای نمونه اندازه‌گیری شد. مجموع زمان گرمادهی نمونه و یخ ۱۲۰ ثانیه می‌باشد.



شکل ۳. سرعت ذوب شدن یخ نمونه آسفالتی

۳-۴. پایداری

فریزر قرار داده شدند. بعد از فرایند ذوب یخ-ترمیم، نمونه نیم استوانه‌ای دوباره در دمای ۲۰- درجه سلسیوس شکسته شده و نیروی بیشینه شکست بعد از ترمیم ثبت گردید.

سیکل ذوب-یخ جهت ایجاد تجربه چرخه‌های ذوب و یخ طبیعی در روسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اثر گرمادهی ماکروویو در مخلوط با مقایسه دمای سطح نمونه، قبل و بعد از سیکل ذوب و یخ بررسی شد. سیکل ذوب و یخ کامل شامل چهار مرحله است. در مرحله اول، نمونه‌ها در دمای اتاق (20 ± 2 درجه سلسیوس) قرار می‌گیرند. در مرحله دوم، به مدت ۱۸۰ دقیقه در آب (همان دمای اتاق) خیس می‌شوند. در مرحله سوم، به مدت دو ساعت در دمای ۱۰- درجه سلسیوس در فریزر قرار داده می‌شوند. در مرحله چهارم، به مدت ۳ دقیقه در ماکروویو گرمادهی می‌شوند. براساس هر اقلیم خاص، این آزمایش می‌بایست با توجه به تعداد سال‌های مورد بررسی که یخبندان در آنها اتفاق افتاده، تکرار شود و بعد از هر دوره تکرار می‌بایست دمای سطح نمونه ثبت شود (گائو و همکاران، ۲۰۱۹).

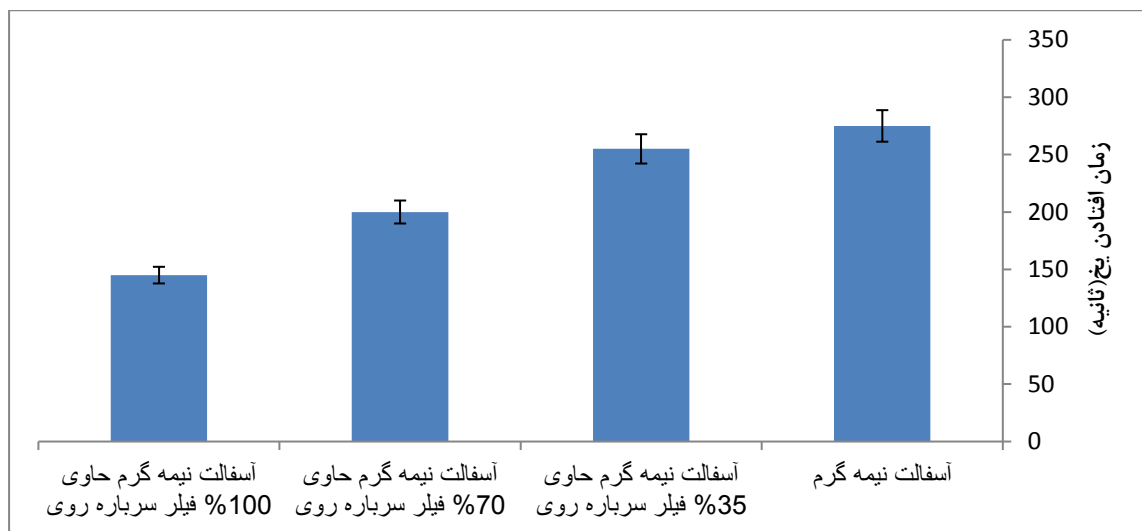
۴. بحث و بررسی نتایج

۴-۱. زمان افتادن یخ

عموماً، فرایند یخ‌زدایی شامل دو مرحله می‌شود. مرحله اول شامل افزایش دما از منفی تا صفر درجه سلسیوس با تابش ماکروویو می‌باشد. به طوری که در این مرحله در سطح بین یخ و آسفالت چسبندگی سختی وجود دارد. در ادامه، روسازی و آب حاصل از ذوب یخ به طور همزمان در مرحله دوم گرم شده، به طوری که لایه یخ بالای نمونه به وسیله تابش پیوسته ماکروویو ذوب می‌شود. در نتیجه، بهترین موقع برای حذف یخ بین مراحل اول و دوم می‌باشد. حذف لایه یخ با استفاده از فناوری گرمادهی جهت حذف چسبندگی بین سطح یخ و رویه راه به کار می‌رود. فرصت مناسب برای یخ‌زدایی ماکروویو در سطح رویه زمانی است که دمای سطح روسازی به دمای صفر درجه سلسیوس برسد. این در حالی است که آب یخ ذوب شده، از یخ زدن مجدد جلوگیری می‌کند. بر خلاف فیلر آهکی، فیلر سرباره روی دارای ظرفیت زیاد یخ‌زدایی ماکروویو بوده و مخلوط آسفالتی حاوی فیلر سرباره روی گرما را بهتر انتقال می‌دهد. با توجه به شکل ۴ می‌توان گفت که افزایش میزان فیلر سرباره روی در مخلوط آسفالتی نیمه گرم باعث شده که زمان جدا شدن یخ از سطح مخلوط آسفالت تحت گرمادهی ماکروویو کاهش یابد. به طوری که با جایگزینی کامل فیلر سرباره روی به جای فیلر آهکی، زمان افتادن یخ ۱۳۰ ثانیه (۸۹٪ نسبت به حالت بدون فیلر سرباره روی) کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه وجود ترکیبات فلزی مانند اکسید آهن و اکسید روی در سرباره روی مشخص است و با توجه به اینکه وجود ترکیب فلزی بیشتر سبب افزایش پتانسیل انتقال گرما در نمونه آسفالتی می‌شود، پس می‌توان نتیجه گرفت که وجود میزان بیشتر فیلر سرباره روی در نمونه آسفالتی سبب افزایش پتانسیل انتقال گرما شده که این نتیجه با تحقیق ژانگ و همکاران (۲۰۱۸) تطابق دارد.

۳-۵. خودترمیمی در حین یخ‌زدایی

از تست خمش در این تحقیق برای بررسی عملکرد خودترمیمی آسفالت خودترمیم حین ذوب یخ استفاده می‌شود. به این منظور، نمونه آسفالتی نیم استوانه‌ای در این آزمایش مد نظر قرار گرفت. نمونه نیم استوانه‌ای در دمای ۲۰- درجه سلسیوس شکسته شده و سپس یخ با ضخامت ۰/۵ سانتی‌متر بالای سطح نمونه قرار گرفت. سپس نمونه آسفالتی و یخ گرما داده می‌شوند تا یخ ذوب شده و ترک ترمیم شود. در مدت زمان گرمادهی، دمای نمونه هر ۱۰ ثانیه یکبار اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به تحقیقات گذشتگان، معمولاً در دمای ۸۰ درجه سلسیوس، قیر حالت مویینه به دست آورده و درون ترک جاری شده و نمونه آسفالتی ترمیم می‌شود (بایرل و همکاران، ۲۰۱۴). بعد از گرمادهی توسط ماکروویو، نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در محیط قرار گرفتند تا به دمای محیط برسند و سپس دوباره به مدت ۲۴ ساعت در

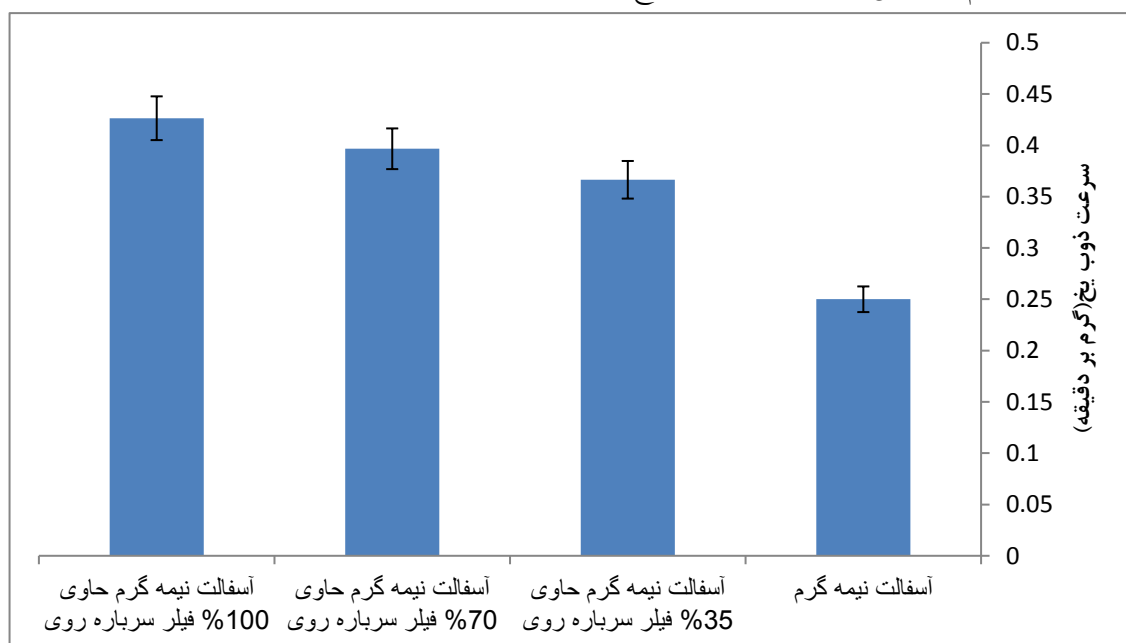


شکل ۴. زمان جدا شدن یخ از نمونه های آسفالتی حین گرمادهی ماکروویو

۴-۲. سرعت ذوب شدن یخ

فرایند ذوب یخ مخلوط آسفالتی نیمه گرم حاوی فیلر سرباره روی تحت تأثیر یخ روی آن با ضخامت ۳ میلی متر، مورد تحقیق قرار گرفت. نتایج نشان می دهد که در هنگام گرمادهی ماکروویو، آب حاصل از ذوب یخ در سطح مشترک بین مخلوط آسفالتی و یخ نقش مهمی در انتقال حرارت از آسفالت به یخ دارد. با توجه به شکل ۵ می توان گفت که افزایش فیلر سرباره روی در مخلوط نیمه گرم سبب می شود که سرعت ذوب یخ

افزایش یابد. این نشان از مناسب بودن استفاده از این فیلر برای یخ زدایی در مناطق دارای برف و یخ زدگی زیاد با استفاده از فرآیند گرمادهی دارد. در واقع، وجود ۱۰۰٪ فیلر سرباره روی در مخلوط آسفالتی باعث وقوع بیشترین سرعت متوسط ذوب یخ می شود که این عدد نسبت به حالت بدون فیلر سرباره روی ۶۸٪ بیشتر است. نتایج این تحقیق با نتایج تحقیق سان و همکاران (۲۰۱۸) مبنی بر افزایش سرعت ذوب یخ با افزایش مواد فلزی افزوده شده به مخلوط آسفالتی منطبق است.

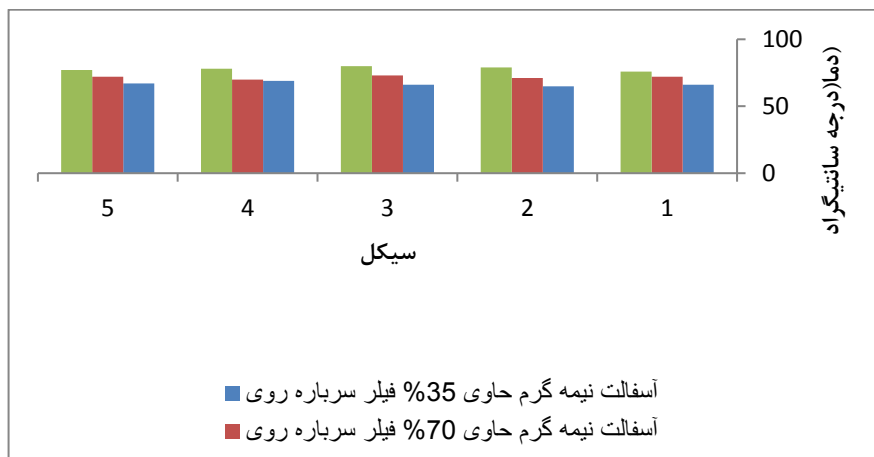


شکل ۵. سرعت ذوب یخ نمونه های آسفالتی حین گرمادهی ماکروویو

۳-۴. پایداری

یخزدگی و بارش برف یکی از چالش های مهم برای راهها در شهرهای بزرگ می باشد. با توجه به اعلام اداره کل هواشناسی استان تهران، از سال ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۷ تعداد روزهای یخبندان با توجه به بارش باران و برف (با دمای زیر صفر) حداقل ۱۳ روز در سال ثبت شده است، که در این دما، پتانسیل تشکیل لایه یخ روی سطح جاده وجود دارد. نمونه های آسفالتی نیمه گرم حاوی ۳۵، ۷۰ و ۱۰۰ درصد فیلر سرباره روی به عنوان نمونه های آزمایشی و دمای سطح روسازی در کل پنج دوره برای سیکل ذوب و یخ مد نظر قرار گرفت. در

این آزمایش (از نظر پایداری)، عملکرد الکترومغناطیسی مخلوط آسفالتی تحت سیکل های تکراری ذوب و یخبندان بررسی شد. در این خصوص، شکل ۶ نشان می دهد که در درصدهای مختلف فیلر سرباره روی تحت تکرار سیکل ذوب و یخ بعد از ۵ سیکل ذوب و یخبندان، به طور میانگین حداکثر ۰/۴۸ درجه سلسیوس انتقال حرارت کاهش می یابد. این موضوع نشان می دهد که سیکل های ذوب و یخ تأثیر کمی بر نمونه های حاوی فیلر سرباره روی دارند (شکل ۶). در واقع، این آزمایش عدم اضمحلال مخلوط آسفالتی تحت سیکل های ذوب و یخ و توانایی انتقال گرما بعد از چند دوره یخبندان و گرمادهی را نشان می دهد.

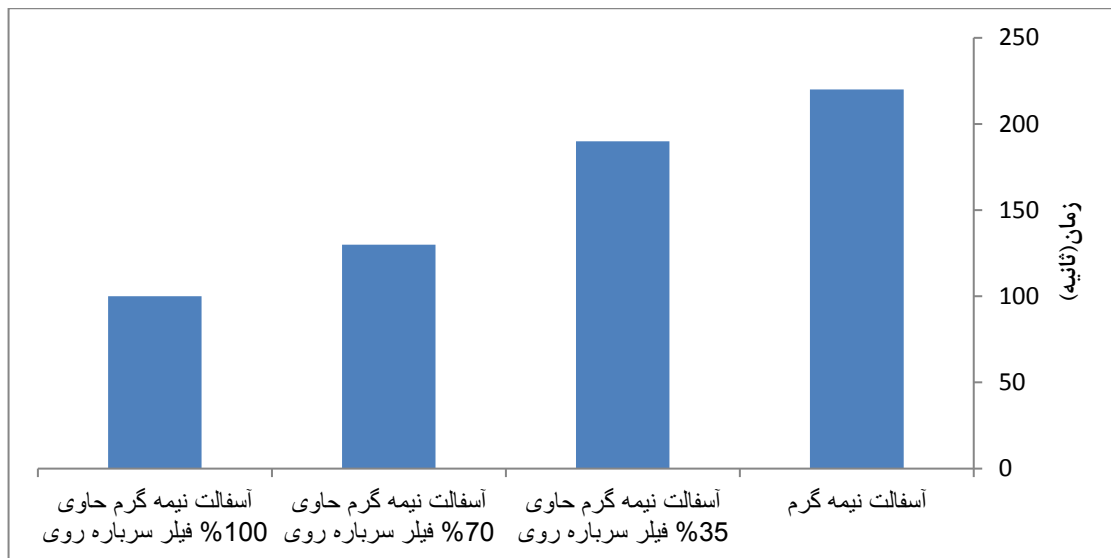


شکل ۶. میزان افزایش دمای نمونه های آسفالتی تحت سیکل های ذوب و یخبندان

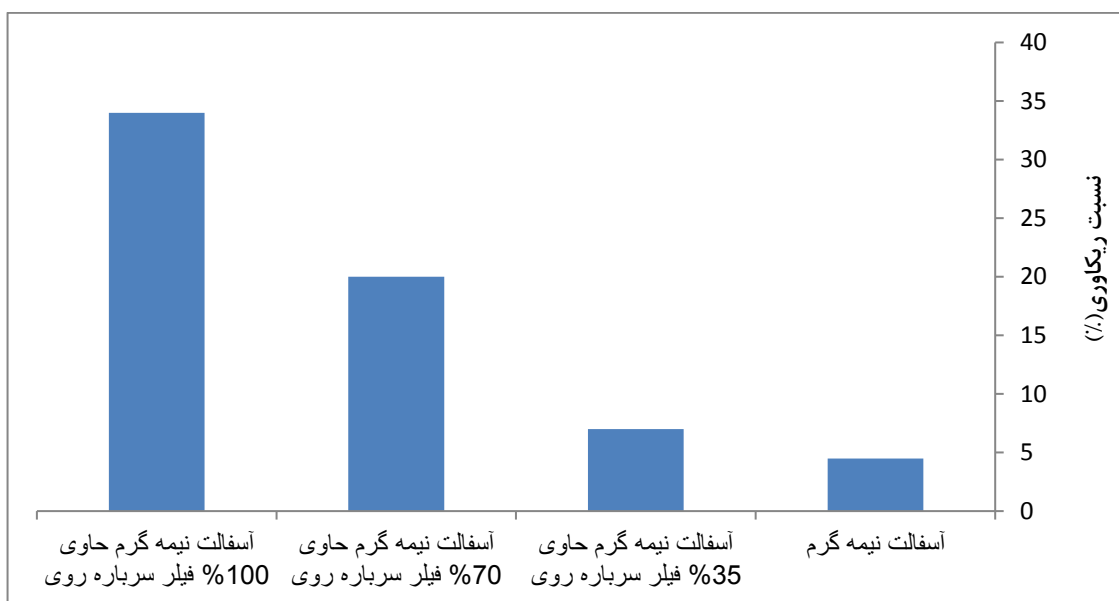
۴-۴. خودترمیمی در حین یخزدایی

بررسی آزمایشگاهی خودترمیمی حین یخزدایی برای نمونه های آسفالتی نشان داد که فیلر سرباره روی به صورت همزمان بر ذوب یخ و ترمیم آسفالت تأثیر داشته است. همچنین، نتایج آزمایش خودترمیمی حین یخزدایی از نظر تغییرات زمان مورد نیاز هر ماده برای ترمیم (شکل ۷) و تغییرات خودترمیمی ماده برای یک سیکل ترمیم (شکل ۸) نشان داده شده است. نتایج شکل ۷ نشان می دهد که به کارگیری ۱۰۰٪ فیلر سرباره روی سبب

کاهش زمان گرمادهی جهت خودترمیمی حین یخزدایی به میزان ۱۲۰ ثانیه نسبت به آسفالت نیمه گرم حاوی فیلر آهکی می شود. همچنین، شکل ۸ نشان می دهد که میزان نسبت خودترمیمی در نمونه های حاوی صفر، ۳۵، ۷۰ و ۱۰۰ درصد فیلر سرباره روی به ترتیب برابر ۰/۰۴۵، ۰/۰۷، ۰/۲ و ۰/۳۴ می باشد. نتایج نشان داد که در مخلوط های آسفالتی حاوی ۱۰۰٪ سرباره روی، یخ زودتر ذوب شده و از سایر نمونه ها (مجدداً پس از شکست) مقاومت بیشتری را می تواند بازیابی کند.



شکل ۷. زمان خودترمیمی در حین یخزدایی مخلوط های آسفالتی



شکل ۸. نسبت خودترمیمی در حین یخزدایی مخلوط های آسفالتی

۵. نتیجه گیری

نیمه گرم تأثیر مثبت داشته، به طوری که در همه موارد آسفالت دارای سرباره روی، میزان ترمیم بهتری نسبت به آسفالت بدون سرباره روی داشت.

- استفاده از مخلوط آسفالتی خودترمیم با اعمال گرمادهی ماکروویو به شدت فرایند یخزدایی را بهبود می بخشد. در این خصوص، متوسط سرعت ذوب یخ برای نمونه های حاوی ۱۰۰٪ فیبر سرباره روی بیشترین میزان سرعت ذوب یخ را نشان داد، به طوری که سرعت یخزدایی در نمونه حاوی فیبر

در این تحقیق، ویژگی های خودترمیمی و یخزدایی چهار نمونه آسفالت نیمه گرم شامل صفر، ۳۵، ۷۰ و ۱۰۰ درصد فیبر سرباره روی (جانشین فیبر آهکی) مورد بررسی قرار گرفت. بررسی ها تأثیر مثبت سرباره روی بر خواص یخزدایی و خودترمیمی آسفالت نیمه گرم را نشان می دهد. خلاصه نتایج تحقیق به صورت زیر بیان می شود:

- با توجه به آزمایش خودترمیمی حین یخزدایی می توان گفت که سرباره روی بر خودترمیمی آسفالت

جهت جدا شدن یخ از نمونه‌های حاوی فیلر سرباره روی نسبت به نمونه‌های فیلر آهکی می‌باشد.

- استفاده از سرباره روی برای تولید آسفالت‌های خودترمیم کاری جدید است که نه تنها سبب کاهش استفاده از مواد معدنی خام (فیلر آهکی) شده، بلکه سبب بهبود سطح ایمنی ترافیک جاده‌ای در زمستان می‌شود. کم بودن دمای اولیه مخلوط آسفالتی حاوی سرباره روی و سرعت زیاد انتقال گرما در نقاط مختلف مخلوط آسفالتی (به سبب وجود فیلر سرباره روی) نشان‌دهنده مناسب بودن مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم حاوی سرباره روی برای یخ‌زدایی می‌باشد.

سرباره روی ۰/۱۸ گرم بر ثانیه نسبت به نمونه بدون فیلر سرباره روی افزایش یافت. این نتیجه کمک می‌کند که یخ‌زدایی مسیرها در فصل زمستان با سرعت بیشتری انجام شود.

- آزمایش زمان افتادن یخ نشان می‌دهد که یخ چسبیده به نمونه‌های حاوی ۱۰۰٪ فیلر سرباره روی، ۱۳۰ ثانیه زودتر تحت گرمایش ماکروویو از نمونه آسفالتی جدا می‌شود. این نتیجه، پتانسیل بالای انتقال حرارت در نمونه‌های حاوی فیلر سرباره روی را نشان داده و همچنین نشان‌دهنده مصرف انرژی کمتر

۶. مراجع

- Aktaş, B. and Aslan, Ş. 2016. "Laboratory evaluation on waste slag produced zinc industry as mineral filler". In: Stone Mastic Asphalt, 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress, 1-3 June 2016, Prague, Czech Republic, <https://doi.org/10.14311/EE.2016.383>
- Aubert, J. E., Husson, B. and Sarramone, N. J. 2006. "Utilization of municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash in blended cement. Part 1: Processing and characterization of MSWI fly ash". J. Hazard. Mater., 136: 624-631.
- Bayerl, T., Duhovic, M., Mitschang, P. and Bhattacharyya, D. 2014. "The heating of polymer composites by electromagnetic induction—a review". Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf., 57: 27-40.
- Chen, M. Y., Wu, S. P., Zhang, Y. and Wang, H. 2010. "Effects of conductive filler on temperature distribution of asphalt pavement". Phys. Scripta, T139.
- Chen, Z., Wu, S., Xiao, Y., Zeng, W., Yi, M. and Wan, J. 2016. "Effect of hydration and silicone resin on basic oxygen furnace slag and its asphalt mixture". J. Clean. Prod., 112: 392-400.
- Concha, J. L. and Norambuena-Contreras, J. 2020. "Thermophysical properties and heating performance of self-healing asphalt mixture with fibres and its application as a solar collector". Appl. Therm. Eng., 178: 115632.
- Cyr, M., Aubert, J. E., Husson, B. and Clastres, P. 2004. "Recycling waste in cement based materials: A studying methodology". Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures - RILEM 2004, pp. 306-315.
- Fakhri, M., Javadi, S., Sedghi, R., Arzjani, D. and Zarrinpour, Y. 2019. "Effects of deicing agents on moisture susceptibility of the WMA containing recycled crumb rubber". Constr. Build. Mater., 227: 116581.
- 1- Fakhri, M., Baveli Bahmai, B., Javadi, S., Sharafi, M. 2020. "An evaluation of the mechanical and self-healing properties of warm mix asphalt containing scrap metal additives". J. Clean. Prod., 253: 119963. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.119963>
- Gao, J., Guo, H., Wang, X., Wang, P., Wei, Y., Wang, Z., Huang, Y. and Yang, B. 2019. "Microwave deicing for asphalt mixture containing steel wool fibers". J. Clean. Prod., 206: 1110-1122.
- Larsen, O., Moen, O., Robertus, O. and Koenders, B. 2004. "WMA foam asphalt production at lower operating temperatures as an environmental friendly alternative to HMA". In: 3rd E & E Congress, Vienna.
- Minsk, L. D. 1968. "Electrically conductive asphalt for control of snow and ice accumulation". Transport. Res. Board, 227: 57-63.
- Nabiun, N. and Khabiri, M. M. 2016. "Mechanical and moisture susceptibility properties of HMA containing ferrite for their use in magnetic asphalt". Constr. Build. Mater., 113: 691-697.
- Nalbandian, K. M., Carpio, M. and González, Á. 2021. "Analysis of the scientific evolution of self-healing asphalt pavements: Toward sustainable road materials". J. Clean. Prod., 293: 126107.
- Norambuena-Contreras, J., Gonzalez, A., Concha, J. L., Gonzalez-Torre, I. and Schlangen, E. 2018. "Effect of metallic waste addition on the electrical, thermophysical and microwave crack-healing properties of asphalt mixtures". Constr. Build. Mater., 187: 1039-1050.

- Ouyang, C., Wang, S., Zhang, Y. and Zhang, Y. 2006. "Improving the aging resistance of asphalt by addition of zinc dialkyldithiophosphate". *Fuel*, 85(7-8): 1060-1066.
- Perez, I., Pasandin, A. R. and Medina, L. 2011. "Hot mix asphalt using C&D waste as coarse aggregates". *Mater. Design*, 36: 840-846.
- Saltan, M., Terzi, S. and Karahancer, S. 2018. "Mechanical behavior of bitumen and hot-mix asphalt modified with zinc oxide nanoparticle". *J. Mater. Civ. Eng.*, 31(3): 04018399.
- Sun, Y., Wu, S., Liu, Q., Hu, J., Yuan, Y. and Ye, Q. 2018. "Snow and ice melting properties of self-healing asphalt mixtures with induction heating and microwave heating". *Appl. Therm. Eng.*, 129: 871-883.
- Taherkhani, H. and Vahabi Kamsari, S. 2020. "Evaluating the properties of zinc production wastes as filler and their effects on asphalt mastic". *Constr. Build. Mater.*, 265: 120748.
- Xiao, F., Punith, V. S. and Amirkhanian, S. N. 2012. "Effects of non-foaming WMA additives on asphalt binders at high performance temperatures". *Fuel*, 94, 144-155.
- Xu, H., Wu, S., Li, H., Zhao, Y. and Lv, Y. 2020. "Study on recycling of steel slags used as coarse and fine aggregates in induction healing asphalt concretes". *Mater.*, 13(4): 889.
- Zaumanis, M. 2010. "Warm mix asphalt investigation". MSc. Thesis, Tech. University of Denmark.
- Zhang, J., Fan, Z., Hu, D., Hu, Z., Pei, J. and Kong, W. 2018. "Evaluation of asphalt-aggregate interaction based on the rheological properties". *Int. J. Pavement Eng.*, 19(7): 586-592.