



Semnan University



Research Article

Comparison of Induction and Microwave Heating in the Healing Process of Asphalt Mixtures Containing Conductive Materials

Mahmoud Ameri^{a*}, Mansour Sadeghi Avaz^b

^a Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, I. R. Iran.

^b PhD. Candidate of Road and Transportation, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-05-15

Revised: 2024-05-30

Accepted: 2024-06-01

Keywords:

Induction heating;

Microwave heating;

Asphalt mixture healing;

Thermography.

ABSTRACT

One of the well-known methods regarding the return of asphalt mixture failures and, as a result, increasing its lifespan is self-healing, which has always been of interest to researchers due to its many benefits. Applying thermal energy or heating the asphalt mixture leads to self-healing the asphalt mixture by accelerating the bitumen healing process. Two main methods of induction heating and microwave are used in this field. This article compares these two heating-healing methods and introduces the more appropriate option. For this purpose, both induction and microwave heating methods have been used to apply heat to the components of the asphalt mixture, including bitumen, filler, and aggregates. The research results showed that the microwave heating rate of bituminous mastic containing conductive materials is higher than its induction heating rate, so the microwave heating rate of the mastic sample containing 10% by weight of iron powder (0.100 °C/s) was more than three times its induction heating rate (0.031 °C/s). Additionally, bituminous mastic heated with microwaves exhibits a more consistent thermal distribution, which enhances its self-healing properties. Unlike induction heating, which requires conductive additives and aggregates, the microwave method can heat components with or without conductive materials. However, addition of conductive materials can accelerate the microwave heating process. For instance, adding 10% by weight of iron powder to bitumen could increase its microwave heating rate from 0.083 to 0.100. In contrast, achieving the same results with the induction heating method requires several times more energy than the microwave method. Therefore, it is advisable to use the microwave heating method instead of induction heating for thermal healing of asphalt mixtures.

* Corresponding author.

E-mail address: ameri@iust.ac.ir

How to cite this article: Ameri, M., & Sadeghiavaz, M. (2024). The comparison of induction and microwave heating in the healing process of asphalt mixtures containing conductive materials. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 10(1), 1-16. <https://doi.org/10.22075/jtie.2024.34128.1673>



مقاله پژوهشی

مقایسه گرمایش القایی و مایکروویوی در ترمیم مخلوط‌های آسفالتی حاوی مصالح رسانا

محمود عامری^{۱*}، منصور صادقی آواز^۲

استاد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

چکیده

یکی از روش‌های شناخته‌شده در خصوص بازگشت خرابی‌های مخلوط آسفالتی و در نتیجه افزایش طول عمر آن، خودترمیمی است که به دلیل منافع متعدد آن همواره مورد توجه محققین بوده است. اعمال انرژی حرارتی یا گرمایش مخلوط آسفالتی از طریق تسریع فرآیند ترمیم قیر به خودترمیمی مخلوط آسفالتی می‌انجامد. دو شیوه اصلی گرمایش القایی و مایکروویوی در این زمینه به کار رفته‌اند. این مقاله سعی دارد که این دو روش ترمیم گرمایشی را با هم مقایسه و گزینه مناسب‌تر را معرفی کند. برای این منظور، از هر دو روش گرمایش القایی و مایکروویوی برای اعمال حرارت به اجزای تشکیل‌دهنده مخلوط آسفالتی شامل قیر، فیلر و مصالح سنگی استفاده شده است. نتایج تحقیق نشان داد که نرخ گرمایش مایکروویوی ماستیک قیری حاوی مواد رسانا بیشتر از نرخ گرمایش القایی آن است؛ به طوری که نرخ گرمایش مایکروویوی نمونه ماستیک حاوی ۱۰ درصد وزنی پودر آهن ($0/100\text{ }^{\circ}\text{C/s}$) بیشتر از سه برابر نرخ گرمایش القایی آن ($0/031\text{ }^{\circ}\text{C/s}$) بوده است. بعلاوه، ماستیک قیری گرم‌شده با مایکروویو دارای توزیع حرارتی یکنواخت‌تری است که به خودترمیمی آن کمک می‌کند. همچنین، گرمایش القایی قابلیت گرم کردن قیر فاقد افزودنی رسانا و سنگدانه‌های فاقد مواد رسانا (که عمده سنگدانه‌های مصرفی در این گروه‌اند) را ندارد؛ در حالی که روش مایکروویوی برای گرمایش اجزای فاقد/دارای مواد رسانا قابل استفاده است. البته افزودن مواد رسانا می‌تواند نرخ گرمایش مایکروویوی را افزایش دهد؛ به طوری که افزودن ۱۰ درصد وزنی پودر آهن به قیر توانست نرخ گرمایش مایکروویوی آن را از $0/083$ به $0/100$ افزایش دهد. از طرف دیگر، میزان انرژی مصرفی برای حصول نتایج یکسان در روش گرمایش القایی چندین برابر روش مایکروویوی است. از این رو، استفاده از روش گرمایش مایکروویوی به جای گرمایش القایی برای ترمیم گرمایشی مخلوط‌های آسفالتی توصیه می‌شود.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۲۶

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۱۰

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۱۲

واژگان کلیدی:

گرمایش القایی،
گرمایش مایکروویوی،
ترمیم مخلوط آسفالتی،
گرم‌انگاری.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: ameri@iust.ac.ir

استناد به این مقاله: عامری، محمود & صادقی آواز، منصور. (۱۴۰۳). مقایسه گرمایش القایی و مایکروویوی در ترمیم مخلوط‌های آسفالتی حاوی مصالح رسانا. مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، ۱۰(۱)، ۱-۱۶. <https://doi.org/10.22075/jtie.2024.34128.1673>

۱. مقدمه

موجب ترمیم خودش شود (سیبلسکی، ۱۹۹۳؛ اُکووما و آدمودی، ۱۹۹۹؛ فخری و همکاران، ۲۰۲۰). همانطور که خودترمیمی عملاً در دماهای کم رخ نمی‌دهد، دماهای خیلی زیاد هم به دلیل حرکت ثقلی قیر، ممکن است که به کاهش سطح خودترمیمی بیانجامد (لیو و همکاران، ۲۰۱۲). بنابراین، قرارگیری قیر در یک محدوده دمایی خاص، تأثیرات اساسی در سطح خودترمیمی آن دارد. محققین زیادی از فرآیند گرمایش برای بهبود سطح خودترمیمی قیر و مخلوط‌های آسفالتی استفاده کرده‌اند (لیو و همکاران، ۲۰۱۰؛ گارسیا و همکاران، ۲۰۱۱؛ گالگو و همکاران، ۲۰۱۳؛ منوزی و همکاران، ۲۰۱۵؛ کریمی و همکاران، ۲۰۱۸). حتی برخی از محققین ثابت کرده‌اند که دما به عنوان نتیجه فرآیند گرمایش، مؤثرترین عامل بر ویژگی‌های خودترمیمی مخلوط‌های آسفالتی است (نورامبوئنا کونترراس و گُنزالز تور، ۲۰۱۷). در این راستا، دو نوع گرمایش به کار رفته است: گرمایش القایی^۱ و گرمایش میکروویوی^۲.

گرمایش القایی بر قرارگیری اجسام رسانا (صرفاً از جنس رسانای فرومغناطیس نظیر آهن، نیکل و کبالت) در میدان مغناطیسی متغیر استوار است (رودنف و همکاران، ۲۰۱۷) که بر اساس این ایده، محققین از ذرات رسانا برای افزایش خاصیت جذب امواج الکترومغناطیسی و در نتیجه افزایش گرمایش القایی مخلوط‌های آسفالتی استفاده کرده‌اند (جهانبخش و همکاران، ۲۰۱۸). استفاده از گرمایش القایی برای ترمیم ماستیک آسفالتی (لیو و همکاران، ۲۰۱۱) و نیز ترمیم انواع مخلوط‌های آسفالتی مؤثر بوده است (لیو و همکاران، ۲۰۱۱؛ دای و همکاران، ۲۰۱۳؛ گارسیا و همکاران، ۲۰۱۳؛ منوزی و همکاران، ۲۰۱۵؛ جهانبخش و همکاران، ۲۰۲۴ b). محققین از دستگاه‌های با توان‌های مصرفی مختلف نظیر ۲/۵ کیلووات (لیو و همکاران، ۲۰۱۹)، ۳ کیلووات (فو و

مخلوط آسفالتی یکی از پُرکاربردترین مواد مصرفی در ساخت روسازی‌ها است (منوزی و همکاران، ۲۰۱۵). با این حال، ساخت روسازی در دماهای زیاد، همراه با فعالیت‌های مورد نیاز برای نگهداری روسازی در طول چرخه عمر آن، موجب مصرف زیاد سوخت‌های فسیلی می‌شود که می‌تواند اثرات زیست‌محیطی متعددی نظیر انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی هوا را به همراه داشته باشد (دینیس آلمیدا و لویز آفونسو، ۲۰۱۵؛ کریمی و همکاران، ۲۰۱۸). استراتژی‌های اقتصادی- زیست- محیطی محققین در طرح، اجرا و نگهداری روسازی‌های آسفالتی، توجه آن‌ها را به پدیده «خودترمیمی» مخلوط- های آسفالتی سوق داده است. ایده استفاده از خودترمیمی برای افزایش عمر روسازی‌ها از دهه ۱۹۶۰ مورد توجه محققین قرار گرفته بود (بازین و سانیر، ۱۹۶۷). خودترمیمی به‌عنوان قابلیت یک ماده در ترمیم و تعمیر آسیب‌های وارد شده به آن ماده در طول عمر بهره‌برداری آن شناخته می‌شود (وایت و همکاران، ۲۰۰۱). مخلوط آسفالتی به‌طور بالقوه دارای خاصیت خودترمیمی است که این قابلیت از خودترمیمی ذاتی قیر نشأت می‌گیرد (دانیل و کیم، ۲۰۰۱؛ کریمی و همکاران، ۲۰۲۱). اما سرعت خودترمیمی در مخلوط آسفالتی کند و محدود است (گارسیا، ۲۰۱۲). از این‌رو، محققین دو رویکرد اصلی برای بهبود خودترمیمی مخلوط آسفالتی اتخاذ کرده‌اند: به‌کارگیری مواد احیاءکننده در قالب ریزکپسول و نظایر آن و اعمال گرمایش برای تسریع فرایند خودترمیم.

دما تأثیر زیادی بر ویژگی‌های ترمیم ذاتی قیر دارد (ژو و همکاران، ۲۰۱۷؛ جهانبخش و همکاران، ۲۰۲۴ a). قیر در دماهای بین ۳۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس شبیه یک سیال نیوتنی رفتار می‌کند و در نتیجه می‌تواند به سرعت

³- Microwave heating

¹- Heal and repair

²- Induction heating

همین راستا، هدف اصلی این مقاله، مقایسه کارایی ترمیم القایی و میکروویوی مخلوط‌های آسفالتی از جنبه‌های زیر است:

- مقایسه نرخ گرمایش اجزای مخلوط آسفالتی با دو شیوه القایی و میکروویوی،
- مقایسه یکنواختی توزیع دما در سطح ماستیک (به‌عنوان عامل اصلی ترمیم) در حین ترمیم گرمایشی با دو شیوه القایی و میکروویوی،
- مقایسه انرژی مصرفی دو نوع شیوه گرمایش القایی و میکروویوی،
- مقایسه فیلرهای (پودر آهن، پودر مگنتیت و پودر سنگ) از نظر جذب انرژی در دو شیوه گرمایش القایی و میکروویوی.

همانطور که پیشتر گفته شد، گرمایش القایی صرفاً برای گرم کردن ذرات رسانای فرومغناطیس قابلیت استفاده دارد. از این‌رو، در این پژوهش، از دو فیلر پودر آهن و پودر مگنتیت که هر دو حاوی عنصر آهن هستند به عنوان ذرات رسانا و پودر سنگ به عنوان فیلر شاهد استفاده شده است.

۲. برنامه آزمایشگاهی

۱-۲. مشخصات مصالح مصرفی

۱-۱-۲. قیر مصرفی

قیر مصرفی در این مطالعه از نوع خالص با رده عملکردی PG58-22 شرکت نفت پاسارگاد بوده که مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده است.

۲-۱-۲. فیلر مصرفی

در این مطالعه، از سه نوع فیلر شامل پودر سنگ، پودر آهن و پودر مگنتیت استفاده شده که مشخصات هر کدام در جدول ۲ و وضعیت ظاهری آنها در شکل ۱ ارائه شده است. برای اینکه میزان سطح تماس فیلر و قیر روی گرمایش ماستیک اثر نداشته باشد، اندازه فیلرهای مختلف به گونه‌ای انتخاب شد که سطح مخصوص ذرات، که از

همکاران، ۲۰۲۲)، ۶/۶ کیلووات (شو و همکاران، ۲۰۲۲)، ۲۴ کیلووات (جیان و همکاران، ۲۰۲۳)، ۳۰ کیلووات (آیار و همکاران، ۲۰۱۶) و ۵۰ کیلووات (لیو و همکاران، ۲۰۱۰) برای گرمایش القایی مخلوط‌های آسفالتی استفاده کرده‌اند. محدودیت اصلی گرمایش القایی این است که این شیوه صرفاً موجب گرمایش مواد رسانای فرومغناطیس می‌شود.

مایکروویوها که نوعی از امواج الکترومغناطیس با طول موج‌های در محدوده ۱ تا ۱۰۰۰ میلی‌متر و فرکانس بین ۰/۳ تا ۳۰۰ گیگاهرتز هستند (گالگو و همکاران، ۲۰۱۳) به شیوه دیگری موجب گرمایش می‌شوند. در گرمایش مایکروویوی، مولکول‌های قطبی در هنگام قرارگیری در میدان مغناطیسی متناوب، تغییر آرایش می‌دهند که این امر با افزایش اصطکاک داخلی موجب بالارفتن دمای ماده می‌شود (نورامبوئنا کونتراس و گنزالز تور، ۲۰۱۶). ترمیم مایکروویوی مخلوط‌های آسفالتی از سال ۱۹۹۸ مورد توجه محققین بوده است (ال‌اهالی و ترل، ۱۹۸۸). بنا به یافته‌های محققین، مخلوط‌های آسفالتی برای گرمایش مایکروویوی نیازی به هیچ افزودنی ندارند (گنزالز و همکاران، ۲۰۱۹). وجود ذرات رسانا با بازتاب مایکروویو صرفاً می‌تواند منجر به تشدید گرمایش مخلوط شود (کولین، ۲۰۰۷). این موضوع، یعنی نیاز یا عدم نیاز به وجود ذرات رسانا در مخلوط آسفالتی تحت گرمایش، یکی از تفاوت‌های احتمالی دو شیوه گرمایش القایی و مایکروویوی است. علاوه بر این، برخی محققین مدعی شده‌اند که کارایی گرمایش مایکروویوی مخلوط‌های آسفالتی نسبت به گرمایش القایی عمدتاً به دلیل کنترل بهتر افزایش دما و جلوگیری از افزایش بیش از حد آن مناسب‌تر است (نورامبوئنا کونتراس و گارسیا، ۲۰۱۶). برخی از محققین نیز توزیع گرمایی مخلوط آسفالتی با شیوه مایکروویوی را یکنواخت‌تر و در نتیجه گرمایش مایکروویوی را کارآتر از گرمایش القایی دانسته‌اند (سان و همکاران، ۲۰۱۷). در

نمونه‌های ماستیک در شکل ۲ ارائه شده است. فیلر و مصالح سنگی نیز پیش از آزمایش به مدت دو ساعت در آون با دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس گرم و سپس در بیرون از آون به دمای اتاق رسیدند تا از این طریق رطوبت اضافی آن‌ها گرفته شود.

رابطه (۱) به دست می‌آید، در هر سه فیلر تقریباً یکسان باشد. در رابطه (۱)، S_e سطح مخصوص ذرات بر حسب $D_m, m^2/g$ میانگین اندازه ذرات بر حسب میکرون و ρ_t وزن مخصوص ذرات بر حسب g/cm^3 است.

$$S_e = \frac{6000}{D_m \rho_t} \quad (1)$$

۲-۲. آماده‌سازی نمونه‌ها

برای تهیه نمونه‌های ماستیک، قیر و فیلر در دمای ۱۶۰ درجه سلسیوس به مدت ۱۵ دقیقه و با همزن با سرعت ۲۸۵ دور در دقیقه با هم مخلوط شدند. سپس ماستیک روی لام‌های شیشه‌ای به ابعاد 76×26 میلی‌متر ریخته و در دمای اتاق سرد شده است. به ازای هر نوع فیلر، دو مجموعه ماستیک با ۵ و ۱۰ درصد وزنی فیلر (مطابق جدول ۳) تهیه و مورد آزمایش قرار گرفت. مراحل تهیه

۳-۲. تجهیزات اندازه‌گیری و آزمایش

در این مطالعه، برای گرمایش القایی از یک دستگاه با توان ۲۱۰۰ وات و برای گرمایش میکروویوی از یک دستگاه میکروویوی در حالت توان ۵۴۰ وات با فرکانس امواج $2/45$ گیگاهرتز استفاده شده است. همچنین، برای اندازه‌گیری دمای سطحی نمونه‌ها، گرمانگار تمام‌رنگ با کیفیت 320×240 پیکسل به کار گرفته شده است.

جدول ۱. خواص قیر مصرفی در این مطالعه

روش آزمایش	مقدار	خصوصیات
ASTM D-6373	PG 58-22	درجه عملکردی
ASTM D-70	۱/۰۲	وزن مخصوص در ۲۵ درجه سلسیوس (g/cm^3)
ASTM D-5	۹۴	درجه نفوذ در ۲۵ درجه سلسیوس (۰/۱ mm)
ASTM D-36	۴۳	نقطه نرمی ($^{\circ}C$)
ASTM D-113	۱۲۴/۸	انگمی در ۲۵ درجه سلسیوس (cm)
ASTM D-92	۳۰۲	نقطه اشتعال ($^{\circ}C$)
ASTM D-70	۳۱۷	نقطه احتراق ($^{\circ}C$)
٪۱۳/۷	ترکیبات اشباع	
٪۴۹/۰۳	آروماتیک‌ها	اجزای شیمیایی تشکیل‌دهنده قیر PG58-22 توسط آزمایش SARA (٪)
٪۲۲/۴۸	رزین‌ها	
٪۱۴/۷۹	آسفالتن‌ها	

جدول ۲. مشخصات فیلرهای مصرفی در این مطالعه

عنوان ویژگی	پودر سنگ	پودر آهن	پودر مگنتیت
وزن مولکولی	-	۵۵/۸۵	-
نقطه ذوب (°C)	۱۴۰۰	۱۵۳۸	۱۵۹۰
نقطه جوش (°C)	-	۲۸۶۲	۲۶۲۳
چگالی (g/cm ³)	۲/۴۵	۷/۸۷۴	۵/۱۷۰
اندازه ذرات (میکرون)	۱۵۰	۴۵	۷۰
سطح مخصوص* (m ² /g)	۱۶۳	۱۶/۹	۱۶/۶

* محاسبه شده با رابطه (۱)



شکل ۱. وضعیت ظاهری انواع فیلرهای مصرفی: (الف) پودر سنگ، (ب) پودر آهن و (پ) پودر مگنتیت



شکل ۲. نحوه آماده‌سازی نمونه‌های ماستیک

جدول ۳. نام‌گذاری نمونه‌های ماستیک

عنوان نمونه	علامت اختصاری	تعریف
نمونه ماستیک حاوی پودر مگنتیت	MMA-5%	Mastic with 5% Magnetite powder
نمونه ماستیک حاوی پودر مگنتیت	MMA-10%	Mastic with 10% Magnetite powder
نمونه ماستیک حاوی پودر آهن	MIR-5%	Mastic with 5% Iron powder
نمونه ماستیک حاوی پودر آهن	MIR-10%	Mastic with 10% Iron powder

۲-۴. برنامه گرمایش نمونه‌ها و تحلیل تصاویر

حرارتی

۲-۴-۱. گرمایش نمونه‌های ماستیک

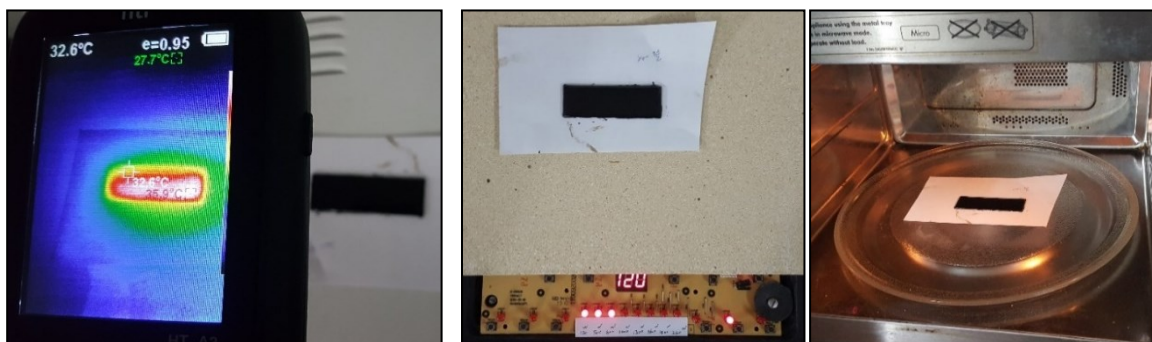
نمونه‌های ماستیک به مدت ۲۴۰ ثانیه با دو دستگاه گرمایش القایی و میکروویوی گرم شده‌اند، به طوری که در هر ۲۰ ثانیه تصاویر حرارتی با کیفیت 320×240 پیکسل توسط گرمانگار ثبت شده است. نحوه گرمایش نمونه‌ها و ثبت تصاویر حرارتی در شکل ۳ نشان داده شده است.

به ازای هر نمونه ماستیک، ۱۳ تصویر حرارتی شامل صفر، ۲۰، ۴۰، ...، ۲۴۰ ثانیه گرمایش القایی و ۱۳ تصویر حرارتی دیگر با گرمایش میکروویوی به دست آمد. به عبارت دیگر، هر نمونه ماستیک به طور مجزا تحت گرمایش القایی و میکروویوی قرار گرفته و در هر ۲۰ ثانیه از سطح آن تصاویر حرارتی با گرمانگار تهیه شده است. هر تصویر حرارتی از مجموعه‌ای نقاط به هم چسبیده (پیکسل) تشکیل شده که هر پیکسل دربردارنده عددی است که معرف دمای آن پیکسل است. بدین ترتیب هر تصویر حرارتی بصورت یک ماتریس دمایی با

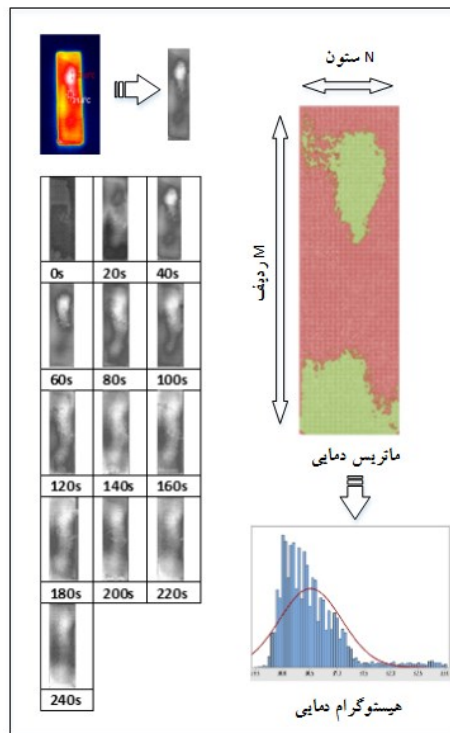
M ردیف و N ستون تعریف شده که قابلیت تشکیل هیستوگرام دمایی با $M \times N$ عدد (دما) را دارد. از میانگین و انحراف معیار هر سری از این داده‌ها (هیستوگرام دمایی هر نمونه) برای تحلیل میانگین و توزیع دمایی نمونه‌ها استفاده شده است. کلیات نحوه استخراج داده‌ها و تحلیل تصاویر حرارتی در شکل ۴ نشان داده شده است.

۲-۴-۲. گرمایش فیلر و مصالح سنگی

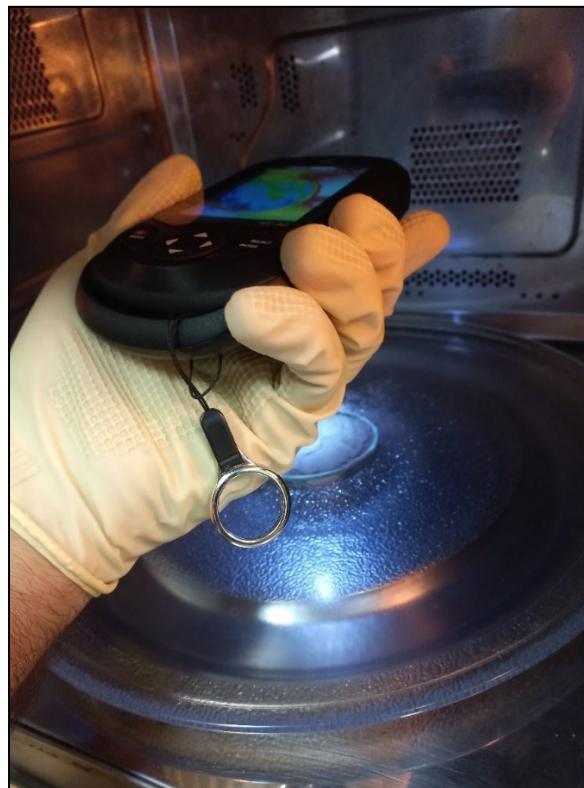
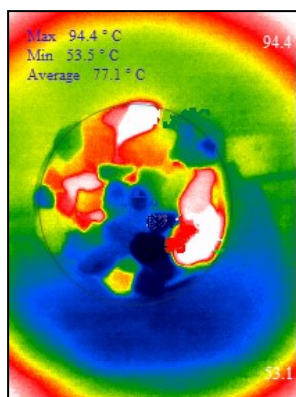
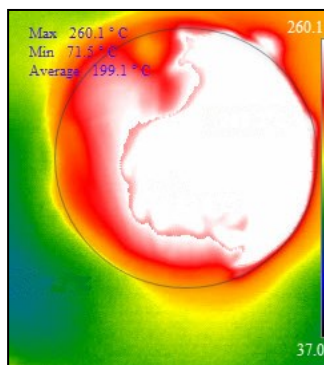
برای ارزیابی گرمایش فیلر و مصالح سنگی، نمونه‌های سنگدانه‌های آهکی و فیلر شامل سه نوع پودر آهن، پودر مگنتیت و پودر سنگ به مدت ۱۲۰ ثانیه تحت گرمایش میکروویوی و نیز القایی قرار گرفتند، به نحوی که در بازه‌های زمانی ۲۰ ثانیه تصاویر حرارتی از سطح نمونه‌ها برداشت شد. نحوه اندازه‌گیری دمای سطحی و نیز نمونه تصاویر حرارتی حاصله در شکل ۵ نشان داده شده است. از میانگین دمای سطح نمونه‌ها که از تصاویر حرارتی به دست آمده، برای ارزیابی گرمایش مصالح استفاده شده است.



شکل ۳. نحوه گرمایش نمونه‌های ماستیک (القایی و میکروویوی) و ثبت تصاویر حرارتی



شکل ۴. فرآیند تحلیل تصاویر حرارتی نمونه‌های ماستیک شامل استخراج ماتریس دمایی و هیستوگرام دمایی برای هر تصویر (صفر تا ۲۴۰ ثانیه گرمایش با دوره‌های ۲۰ ثانیه‌ای)



شکل ۵. نحوه اندازه‌گیری دمایی سطحی نمونه‌های فیلر و مصالح سنگی (تصویر راست)، نمونه تصویر حرارتی فیلر پودر آهن (سمت چپ بالا) و نمونه تصویر حرارتی سنگدانه‌ها (سمت چپ پایین)

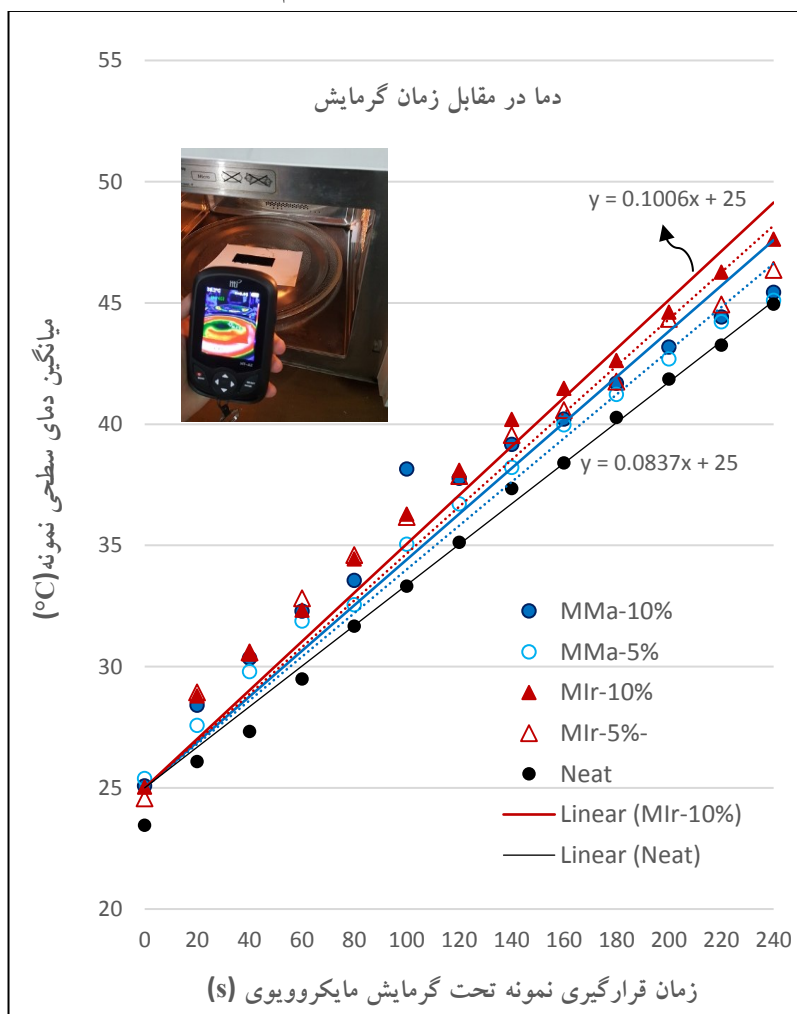
۳. بررسی و تحلیل نتایج

۳-۱. مقایسه نرخ گرمایش در دو شیوه القایی و

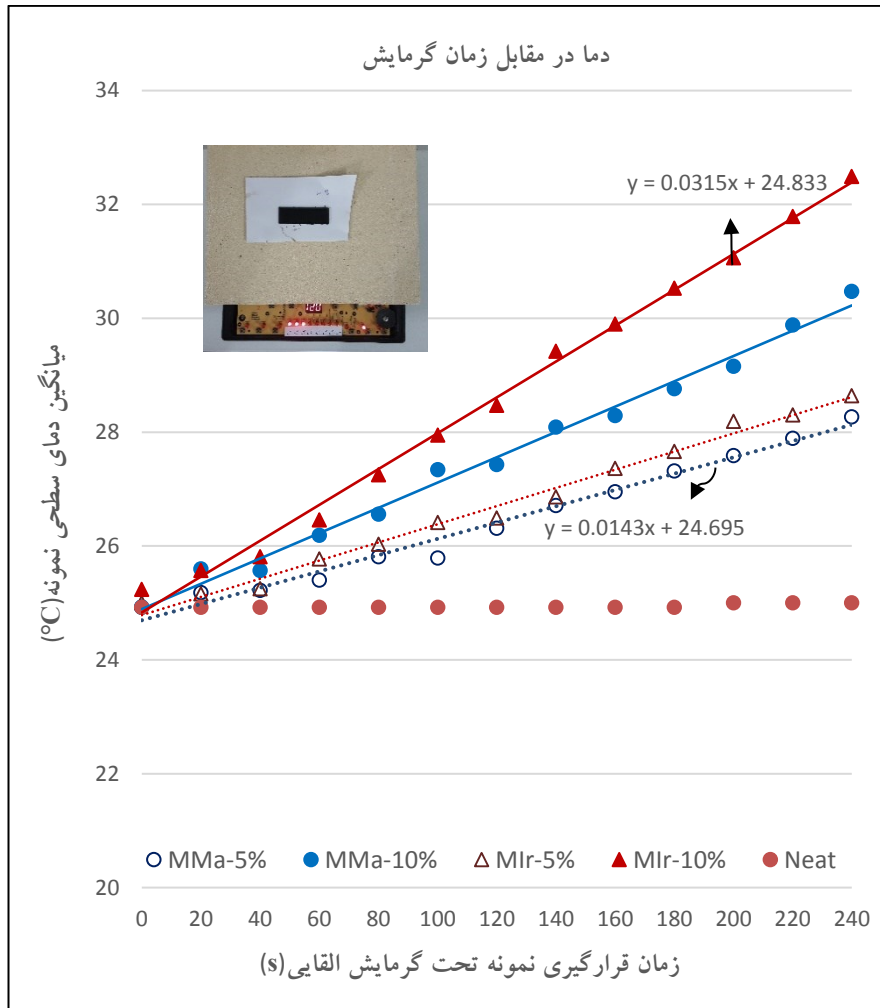
مایکروویوی

برای مقایسه نرخ گرمایش دو شیوه القایی و میکروویوی، همانطور که پیشتر گفته شد، نمونه‌های ماستیک به مدت ۲۴۰ ثانیه تحت گرمایش قرار گرفته و میانگین دمای سطحی نمونه که از میانگین داده‌های ماتریس دمایی به دست آمده، ثبت شده است. در شکل ۶، رابطه زمان گرمایش میکروویوی و دما برای نمونه‌های مختلف (مطابق نام‌گذاری تعیین شده در جدول ۳) و در شکل ۷ این رابطه برای گرمایش القایی ارائه شده است. نتایج حاصل بیانگر این است که اولاً در هر دو شیوه

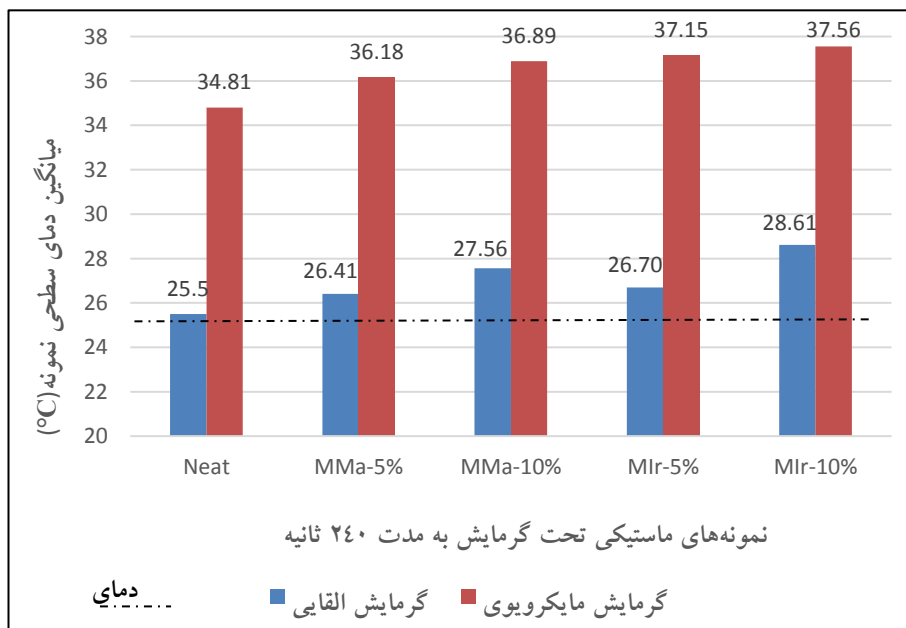
گرمایش، اثر فیلر پودر آهن در افزایش نرخ گرمایش ماستیک بیشتر از پودر مگنتیت است. ثانیاً شیب هر کدام از خطوط برازش که معرف نرخ گرمایش است، نشان می‌دهد که برای هر کدام از نمونه‌های ماستیک نرخ گرمایش میکروویوی بیشتر از نرخ گرمایش القایی آن است. به عنوان نمونه، نرخ گرمایش میکروویوی ماستیک حاوی ۱۰ درصد پودر آهن (۰/۱۰۰)، نزدیک به سه برابر نرخ گرمایش القایی (۰/۰۳۱۵) آن است. این موضوع در شکل ۸ نیز که میانگین دمای سطحی نمونه‌ها بعد از ۲۴۰ ثانیه گرمایش را نشان داده، به نحو دیگری قابل مشاهده است. نکته دیگر اینکه، گرمایش القایی قابلیت گرم کردن قیر خالص را ندارد؛ اما با استفاده از میکروویو، این نمونه قابل گرم شدن است.



شکل ۶. رابطه زمان گرمایش میکروویوی و میانگین دمای سطحی نمونه‌های ماستیک



شکل ۷. رابطه زمان گرمایش القایی و میانگین دمای سطح نمونه‌های ماستیک



شکل ۸. مقایسه گرمایش نمونه‌های ماستیک با دو شیوه القایی و میکروویوی

۲-۳. مقایسه شیوه گرمایش القایی و میکروویوی از نظر یکنواختی توزیع دما در سطح نمونه‌های ماستیک

اصولاً هر چقدر در حین فرآیند گرمایش، دمای ماستیک یکنواخت‌تر باشد، از نظر روانی قیر و در نتیجه ترمیم بهتر ریزترک‌ها شرایط مساعدتری است. برای مقایسه یکنواختی دما در سطح نمونه‌های ماستیک، از داده‌های ماتریس دمایی نمونه‌ها استفاده شده است. این داده‌ها که شامل $M \times N$ عدد (معرف دما) است برای هر نمونه و پس از ۲۴۰ ثانیه گرمایش از ماتریس دمایی استخراج و با محاسبه ضریب تغییرات (CV^1) توزیع داده‌ها بررسی شده است. ضریب تغییرات که بیانگر میزان پراکندگی داده‌ها نسبت به میانگین است، با حذف واحد اندازه‌گیری از انحراف معیار به دست می‌آید؛ به عبارت دیگر، از تقسیم انحراف معیار به میانگین داده‌ها (به صورت درصدی)، ضریب تغییرات حاصل می‌شود (عبدی، ۲۰۱۰). بنابراین، هر چقدر ضریب تغییرات کمتر باشد، دمای ماستیک یکنواخت‌تر و نتیجه مطلوب‌تر است. در شکل ۹، ضریب تغییرات ماتریس دمایی نمونه‌های ماستیک تحت ۲۴۰ ثانیه گرمایش به دو شیوه القایی و میکروویوی با هم مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، اولاً نمونه‌های ماستیک تحت گرمایش میکروویوی از نظر دمای سطح نمونه‌ها تغییرات کمتری (یا توزیع دمایی یکنواخت‌تری) دارد و ثانیاً با افزایش میزان فیلر رسانا (هم پودر آهن و هم پودر مگنتیت) توزیع دمایی

یکنواخت‌تر هم می‌شود. بنابراین، از جنبه یکنواختی توزیع دما، گرمایش میکروویوی مناسب‌تر است.

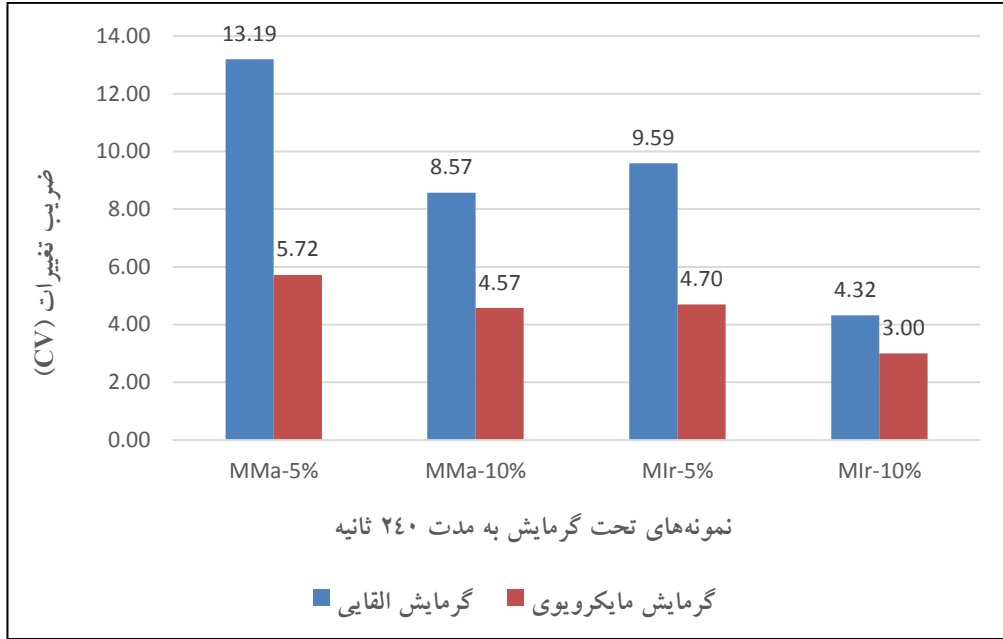
۳-۳. مقایسه انرژی مصرفی دو شیوه گرمایش القایی و میکروویوی

محققین پیشتر به این نتیجه رسیده‌اند که خودترمیمی مخلوط آسفالتی در دماهای ۷۰ تا ۸۵ درجه سلسیوس شدت می‌یابد و تا حدود ۱۰۰ درجه سلسیوس، خودترمیمی آثار مثبتی در بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی داشته است (لیو و همکاران، ۲۰۱۲). از این رو، با در نظر گرفتن اینکه هدف رساندن دمای نمونه‌های ماستیک به ۹۰ درجه سلسیوس باشد، میزان انرژی مصرفی دو شیوه گرمایش القایی و میکروویوی محاسبه و در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، انرژی مصرفی گرمایش القایی بسیار بیشتر از انرژی مصرفی در شیوه میکروویوی است. البته با افزایش مقدار فیلر رسانا این اختلاف کمتر می‌شود.

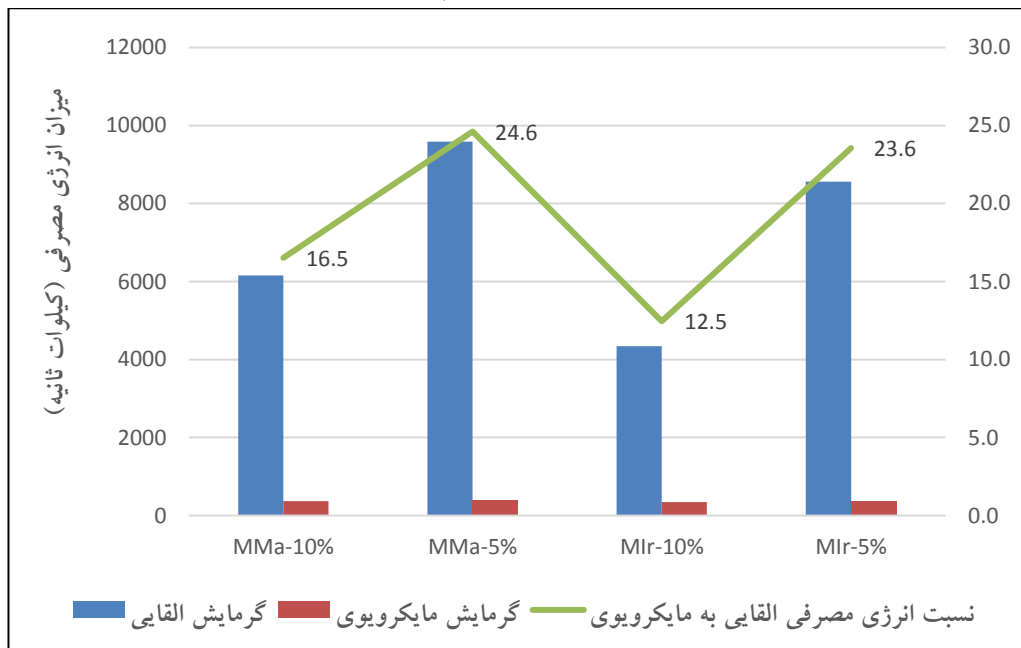
۴-۳. مقایسه گرمایش فیلر و سنگدانه با دو شیوه القایی و میکروویوی

از آنجا که بخش عمده مخلوط آسفالتی، شامل سنگدانه‌ها و فیلر است، گرمایش این اجزا نیز به‌طور مجزا با دو شیوه القایی و میکروویوی انجام شده است. نتایج حاصل از گرمایش القایی و میکروویوی فیلر و سنگدانه در شکل ۱۱ ارائه شده است.

¹- Coefficient of Variation



شکل ۹. مقایسه ضریب تغییرات نمونه‌های ماستیک گرم شده با دو شیوه القایی و میکروویوی

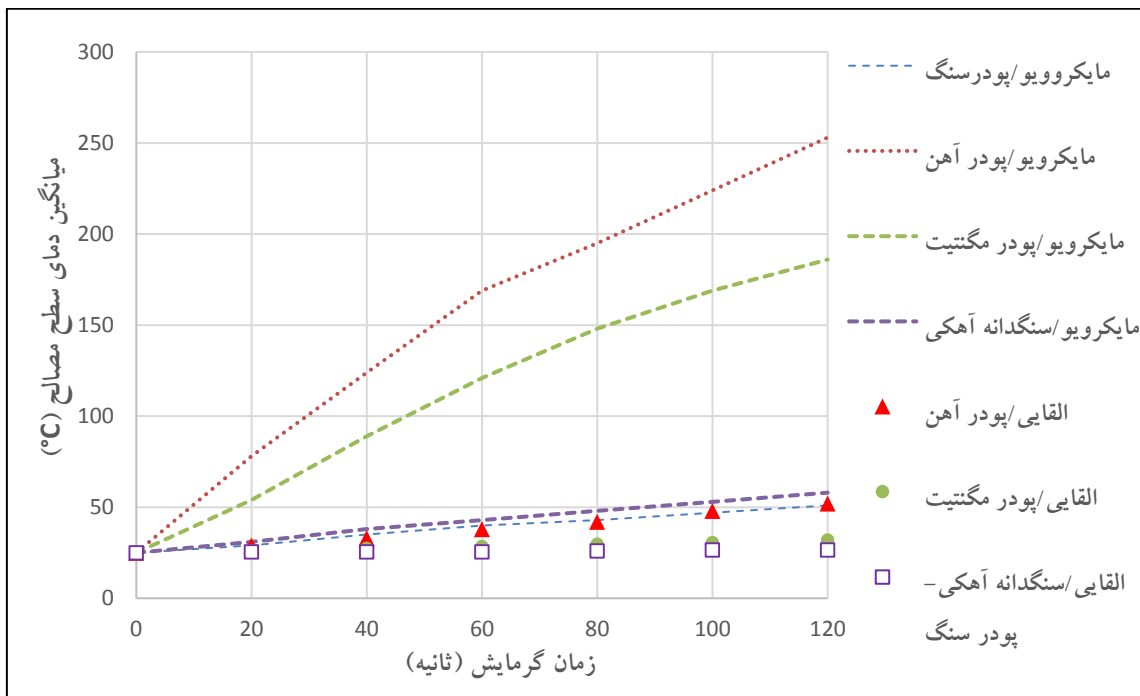


شکل ۱۰. مقایسه انرژی مصرفی دو شیوه القایی و میکروویوی

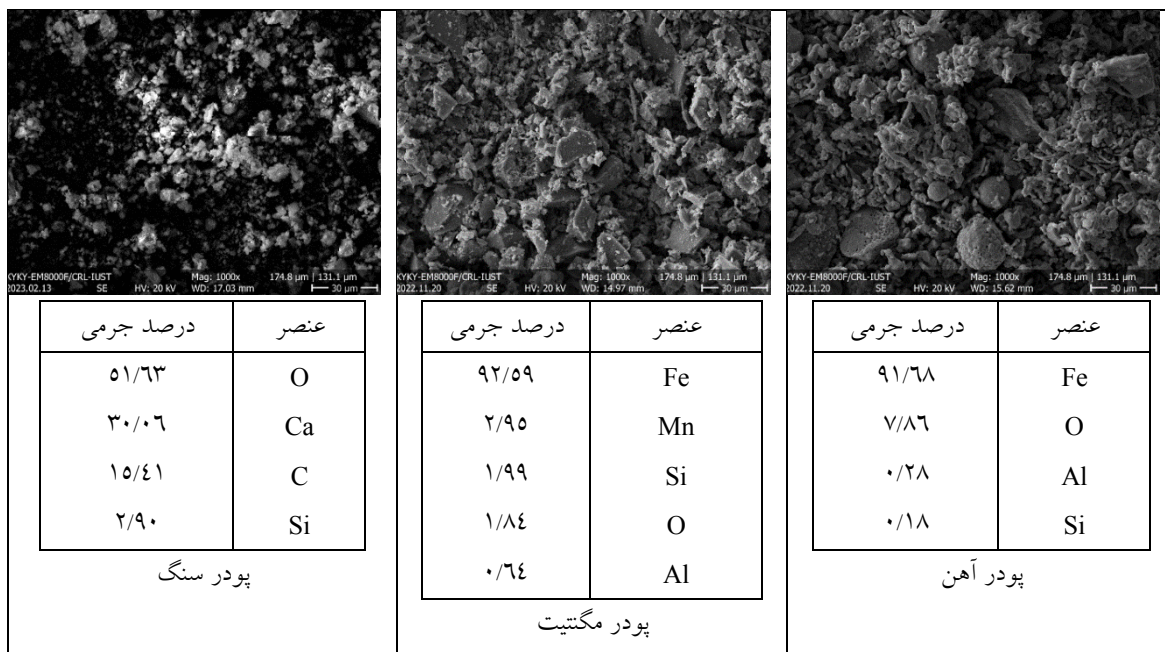
SEM فیلرها با بزرگنمایی ۱۰۰۰ و نیز عناصر تشکیل دهنده آنها در شکل ۱۲ نشان داده شده است. از میان عناصر تشکیل دهنده فیلرها تنها عنصر آهن (Fe) است که از نوع فرومغناطیس بوده و در مواجهه با دستگاه القایی قابلیت گرم شدن را دارد. از آنجا که در ترکیب پودر آهن و مگنتیت این عنصر بیشتر از ۹۰ درصد حضور دارد این دو نوع فیلر به خوبی قابلیت گرمایش القایی دارند. اما

گرمایش القایی فیلرها و مصالح سنگی نشان داد که پودر آهن و پودر مگنتیت قابلیت گرمایش خیلی خوبی دارند، اما پودر سنگ و نیز مصالح سنگی (آهکی) به هیچ وجه به طریق القایی گرم نمی‌شوند. برای بررسی این موضوع، ساختار مورفولوژی فیلرها با استفاده از میکروسکوب الکترونی روبشی بررسی شد. تصاویر

مصالح سنگی و فیلر پودر سنگی فاقد عناصر با خاصیت فرومغناطیس و در نتیجه فاقد قابلیت گرمایش القایی هستند.



شکل ۱۱. مقایسه گرمایش فیلر و سنگدانه با دو شیوه القایی و میکروویوی



شکل ۱۲. ساختار مورفولوژی (تصاویر با بزرگنمایی ۱۰۰۰) و عناصر تشکیل دهنده انواع فیلرها

۴. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

دستگاه القایی چند برابر میکروویو بوده است. - با استخراج ماتریس دمایی از نمونه‌های ماستیک در حین گرمایش و تحلیل داده‌های ماتریس دمایی و محاسبه ضریب تغییرات، میزان یکنواختی دما در سطح نمونه‌ها بررسی شد. نتایج نشان داد که نمونه‌های یکسان ماستیک حاوی مواد رسانا در شیوه گرمایش میکروویو دارای یکنواختی دمایی مناسب‌تری هستند که این موضوع به ترمیم سریع‌تر و بهتر ریزترک‌ها در فرآیند ترمیم خواهد انجامید. - برای رساندن دمای ماستیک قیری به میزان مشخص (۹۰ درجه سلسیوس)، مقدار انرژی مصرفی در شیوه گرمایش القایی چندین برابر گرمایش میکروویو بوده است. علاوه بر نتایج فوق، بررسی‌های گرمایشی بیانگر این است که پودر آهن در هر دو شیوه گرمایش القایی و میکروویو نسبت به پودر مگنتیت باعث افزایش بیشتر دمای نمونه‌های ماستیک و یکنواختی بهتر دما در سطح آن می‌شود. لازم به‌ذکر است که این برتری صرفاً از جنبه گرمایش بوده و برای استفاده باید ویژگی‌های مکانیکی و دوام مخلوط‌های آسفالتی حاوی این افزودنی‌ها نیز بررسی شود.

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از گرمایش میکروویو برای ترمیم مخلوط‌های آسفالتی نسبت به گرمایش القایی مناسب‌تر است، چرا که: - گرمایش میکروویو در اعمال انرژی حرارتی برای تمام اجزای تشکیل‌دهنده مخلوط آسفالتی قابل استفاده است؛ هر چند نرخ گرمایش اجزای مختلف یکسان نیست. همچنین، افزودن مواد رسانا می‌تواند نرخ گرمایش را افزایش دهد؛ به طوری که افزودن ۱۰ درصد وزنی پودر آهن به قیر می‌تواند نرخ گرمایش میکروویو آن را از ۰/۰۸۳ به ۰/۱۰۰ افزایش دهد. - گرمایش القایی صرفاً برای گرم کردن اجزایی از مخلوط آسفالتی قابل استفاده است که دارای مواد رسانا یا افزودنی رسانا از نوع فرومغناطیس (نظیر آهن، نیکل و کبالت) باشد. قیر خالص، پودر سنگ و سنگدانه‌های آهکی با روش القایی گرم نشدند، چرا که فاقد عناصری نظیر آهن بوده‌اند. - نرخ گرمایش در شیوه القایی نسبت به میکروویو کمتر بوده، به طوری که نمونه ماستیک حاوی ۱۰ درصد وزنی پودر آهن دارای نرخ گرمایش القایی و میکروویو به ترتیب ۰/۰۳۱ و ۰/۱۰۰ بوده است. این نتایج در حالی به‌دست آمده که توان مصرفی

۵. مراجع

- Abdi, H. 2010. "Coefficient of variation". Encyclopedia Res. Design, 1: 169-171.
- Al-Ohaly, A. A. and Terrel, R. L. 1988. "Effect of microwave heating on adhesion and moisture damage of asphalt mixtures". National Research Council, Transportation Research Board.
- Ayar, P., Moreno-Navarro, F. and Rubio-Gámez, M. C. 2016. "The healing capability of asphalt pavements: a state of the art review". J. Clean. Prod., 113: 28-40.
- Bazin, P. and Saunier, J. 1967. "Deformability, fatigue and healing properties of asphalt mixes". International Conference on Structural Design and Asphalt Pavements.
- Collin, R. E. 2007. "Foundations for microwave engineering". John Wiley & Sons.
- Dai, Q., Wang, Z. and Hasan, M. R. M. 2013. "Investigation of induction heating effects on electrically conductive asphalt mastic and asphalt concrete beams through fracture-healing tests". Constr. Build. Mater., 49: 729-737.
- Daniel, J. S. and Kim, Y. R. 2001. "Laboratory evaluation of fatigue damage and healing of asphalt mixtures". J. Mater. Civ. Eng., 13(6): 434-440.
- Dinis-Almeida, M. and Lopes Afonso, M. 2015. "Warm mix recycled asphalt—a sustainable solution". J. Clean. Prod., 107: 310-316.

- Fakhri, M., Bahmai, B. B., Javadi, S. and Sharafi, M. 2020. "An evaluation of the mechanical and self-healing properties of warm mix asphalt containing scrap metal additives". *J. Clean. Prod.*, 119963.
- Fu, C., Liu, K., Liu, Q., Zhang, Z. and Oeser, M. 2022. "A sustainable inductive healing asphalt mixture for solving gradient healing behavior". *J. Clean. Prod.*, 370: 133327.
- Gallego, J., del Val, M. A., Contreras, V. and Páez, A. 2013. "Heating asphalt mixtures with microwaves to promote self-healing". *Constr. Build. Mater.*, 42: 1-4.
- García, Á. 2012. "Self-healing of open cracks in asphalt mastic". *Fuel*, 93: 264-272.
- García, Á., Schlangen, E., van de Ven, M. and van Vliet, D. 2011. "Induction heating of mastic containing conductive fibers and fillers". *Mater. Struct.*, 44(2): 499-508.
- García, A., Bueno, M., Norambuena-Contreras, J. and Partl, M. N. 2013. "Induction healing of dense asphalt concrete". *Constr. Build. Mater.*, 49: 1-7.
- González, A., Valderrama, J. and Norambuena-Contreras, J. 2019. "Microwave crack healing on conventional and modified asphalt mixtures with different additives: An experimental approach". *Road Mater. Pavement Design*, 20: S149-S162.
- Jahanbakhsh, H., Karimi, M. M., Jahangiri, B. and Moghadas Nejad, F. 2018. "Induction heating and healing of carbon black modified asphalt concrete under microwave radiation". *Constr. Build. Mater.*, 174: 656-666.
- Jahanbakhsh, H., Moghadas Nejad, F., Khodaii, A., Karimi, M. M. and Naseri, H. 2024a. "Sustainable induction-heatable cold patching using microwave and reclaimed asphalt pavement". *J. Mater. Civ. Eng.*, 36(3): 04023607.
- Jahanbakhsh, H., Moghadas Nejad, F., Khodaii, A. and Karimi, M. M. 2024b. "Induction heating and induced healing evaluation of the asphalt concretes incorporating conductive aggregates exposed to microwave radiation". *Constr. Build. Mater.*, 416: 135126.
- Jian, R., Hu, X., Han, T., Wan, J., Gan, W., Chen, Z., Zhang, Y. and Cao, C. 2023. "Optimization of induction heating parameters for improving self-healing performance of asphalt mixture through partial least square model". *Constr. Build. Mater.*, 365: 130019.
- Karimi, M. M., Jahanbakhsh, H., Jahangiri, B. and Moghadas Nejad, F. 2018. "Induced heating-healing characterization of activated carbon modified asphalt concrete under microwave radiation". *Constr. Build. Mater.*, 178: 254-271.
- Karimi, M. M., Amani, S., Jahanbakhsh, H., Jahangiri, B. and Alavi, A. H. 2021. "Induced heating-healing of conductive asphalt concrete as a sustainable repairing technique: A review". *Clean. Eng. Tech.*, 4: 100188.
- Liu, Q., Schlangen, E., García, A. and van de Ven, M. 2010. "Induction heating of electrically conductive porous asphalt concrete". *Constr. Build. Mater.*, 24(7): 1207-1213.
- Liu, Q., García, Á., Schlangen, E. and van de Ven, M. 2011. "Induction healing of asphalt mastic and porous asphalt concrete". *Constr. Build. Mater.*, 25(9): 3746-3752.
- Liu, Q., Schlangen, E., van de Ven, M., van Bochove, G. and van Montfort, J. 2012a. "Evaluation of the induction healing effect of porous asphalt concrete through four point bending fatigue test". *Constr. Build. Mater.*, 29: 403-409.
- Liu, Q., Schlangen, E., van de Ven, M., van Bochove, G. and van Montfort, J. 2012b. "Predicting the performance of the induction healing porous asphalt test section". 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements, Springer.
- Liu, K., Fu, C., Dai, D., Jin, C., Li, S. Li, W. and Xu, X. 2019. "Induction heating performance of asphalt pavements incorporating electrically conductive and magnetically absorbing layers". *Constr. Build. Mater.*, 229: 116805.
- Menzio, A., Garcia, A., Partl, M. N., Tebaldi, G. and Schuetz, P. 2015. "Induction healing of fatigue damage in asphalt test samples". *Constr. Build. Mater.*, 74: 162-168.
- Norambuena-Contreras, J. and Garcia, A. 2016. "Self-healing of asphalt mixture by microwave and induction heating". *Mater. Design*, 106: 404-414.
- Norambuena-Contreras, J. and Gonzalez-Torre, I. 2017. "Influence of the microwave heating time on the self-healing properties of asphalt mixtures". *Appl. Sci.*, 7(10): 1076.
- Rudnev, V., Loveless, D. and Cook, R. L. 2017. "Handbook of induction heating". CRC Press.
- Sun, Y., Wu, S., Liu, Q., Zeng, W., Chen, Z., Ye, Q. and Pan, P. 2017. "Self-healing performance of asphalt mixtures through heating fibers or aggregate". *Constr. Build. Mater.*, 150: 673-680.
- Sybilski, D. 1993. "Non-Newtonian viscosity of polymer-modified bitumens". *Mater. Struct.*, 26(1): 15-23.
- Ukwuoma, O. and Ademodi, B. 1999. "The effects of temperature and shear rate on the apparent viscosity of Nigerian oil sand bitumen". *Fuel Process. Tech.*, 60(2): 95-101.
- White, S. R., Sottos, N. R., Geubelle, P. H., Moore, J. S., Kessler, M. R., Sriram, S., Brown, S. and Viswanathan, S. 2001. "Autonomic healing of polymer composites". *Nat.*, 409(6822): 794-797.

- Xu, H., Wu, S., Chen, A. and Zou, Y. 2022. "Influence of erosion factors (time, depths and environment) on induction heating asphalt concrete and its mechanism". *J. Clean. Prod.*, 363: 132521.
- Zhu, X., Cai, Y., Zhong, S., Zhu, J. and Zhao, H. 2017. "Self-healing efficiency of ferrite-filled asphalt mixture after microwave irradiation". *Constr. Build. Mater.*, 141: 12-22.