



Semnan University

## Journal of Transportation Infrastructure Engineering

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

ISSN: 2821-0549



## Research Article

# Comparison of the Effect of Accelerated Curing with Post-Construction Induction Heating and Natural Curing on the Self-Healing Index of Cold Asphalt Mixture

Taha Navidi<sup>a</sup>, Gholamali Shafabakhsh<sup>b\*</sup>, Seyyed Mohammad Mirabdolazimi<sup>c</sup>

<sup>a</sup> MSc. Student in Civil Engineering, Road and Transportation Engineering, Semnan University, Semnan, I. R. Iran.

<sup>b</sup> Professor, Department of Road and Transportation, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, I. R. Iran.

<sup>c</sup> Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, I. R. Iran.

## PAPER INFO

**Paper history:**

Received: 2024-09-23

Revised: 2025-02-06

Accepted: 2025-02-08

**Keywords:**

Cold asphalt;

Induction heating;

Curing;

Self-healing;

Indirect tensile strength.

## ABSTRACT

Cold asphalt has drawbacks such as lower shear strength due to poor adhesion between bitumen and aggregates (caused by insufficient heating during production), limiting its use on high-traffic roads. Additionally, the weak bond between bitumen and aggregates leads to faster crack initiation and propagation in these pavements. The primary objective of this research is to compare the self-healing capacity of cold asphalt cured with post-construction electromagnetic induction heating and cold asphalt cured using the conventional method. For the laboratory specimens, siliceous aggregates, 63-micron iron powder (as an induction agent), cationic emulsion bitumen, and rock powder were used. Specimens were prepared using the Marshall method at two curing ages of 7 and 21 days, and by two methods: accelerated curing (with initial induction heating for 240 seconds) and natural curing (without initial induction heating). Subsequently, the specimens were subjected to Indirect Tensile Strength (ITS) tests at temperatures of 0, 15, and 40 degrees Celsius. After failure, both sets of specimens were subjected to restorative induction heating to evaluate their self-healing capacity. The specimens were then retested using the ITS test at the same temperatures to calculate the self-healing index by comparing the strength of the specimens before and after failure and induction heating. Results showed that with increasing age, the self-healing index rate of cold asphalt samples decreases with induction heating during curing. This becomes more pronounced with increasing test temperature. This trend indicates a significant effect of heating during curing and a rapid increase in the tensile strength of the samples at early pavement ages.

\* Corresponding author.

E-mail address: [thnavid@gmail.com](mailto:thnavid@gmail.com)

**How to cite this article:** Navidi, T. , shafabakhsh, G. and Mirabdolazimi, S. M. (2025). Comparison of the effect of accelerated curing with post-construction induction heating and natural curing on the self-healing index of cold asphalt mixture. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 11(1), 21-38.

<https://doi.org/10.22075/jtie.2025.35317.1687>

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



مقاله پژوهشی

## مقایسه اثر عمل‌آوری تسریع شده با گرمایش القایی پس از اجرا و عمل‌آوری طبیعی بر شاخص خودترمیمی مخلوط آسفالت سرد

طاها نویدی<sup>۱</sup>، غلامعلی شفا بخش<sup>۲</sup>، سید محمد میرعبدالعظیمی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، گرایش راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

<sup>۲</sup> استاد، دکتری راه و ترابری، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

<sup>۳</sup> استادیار، دکتری راه و ترابری، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

### چکیده

مخلوط آسفالت سرد دارای معایبی همچون ضعف مقاومت برشی به دلیل چسبندگی کمتر قیر و سنگ‌دانه به علت عدم گرمایش کافی حین تولید می‌باشد که موجب ایجاد محدودیت برای استفاده از آن در جاده‌های پُرتراфик شده است. از طرف دیگر، فقدان چسبندگی کافی بین قیر و سنگ‌دانه موجب تسریع ایجاد و گسترش ترک در روسازی‌ها خواهد شد. هدف اصلی از این پژوهش، مقایسه قابلیت خودترمیمی در آسفالت سرد عمل‌آوری شده با القای گرمایش القایی پس از اجرای روسازی و آسفالت سرد عمل‌آوری شده در حالت طبیعی است. جهت ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی در این پژوهش، از مصالح سنگی سیلیسی، پودر آهن ۶۳ میکرون به عنوان عامل القا، قیر امولسیون کاتیونی و پودر سنگ استفاده شده است. نمونه‌های آزمایشگاهی با روش مارشال و در سنین عمل‌آوری ۷ و ۲۱ روز و با دو روش عمل‌آوری تسریع شده (با گرمایش القایی اولیه به مدت ۲۴۰ ثانیه) و عمل‌آوری طبیعی (بدون گرمایش القایی) ساخته شدند. سپس نمونه‌ها تحت آزمون استحکام کششی غیرمستقیم (ITS) در دماهای صفر، ۱۵ و ۴۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند. پس از آستانه گسیختگی، هر دو سری نمونه‌ها، تحت گرمایش القایی ترمیمی قرار گرفتند تا بتوان قابلیت خودترمیمی آنها را مورد ارزیابی قرار داد. سپس نمونه‌ها مجدداً تحت آزمون استحکام کششی غیرمستقیم (ITS) در همان دماها قرار گرفتند تا بتوان از میزان مقاومت نمونه‌ها قبل از گسیختگی و بعد از گسیختگی و اعمال گرمایش القایی، جهت محاسبه شاخص خودترمیمی بهره گرفت. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سن، نرخ شاخص خودترمیمی نمونه‌های آسفالت سرد دارای گرمایش القایی حین عمل‌آوری کاهش می‌یابد. این امر با افزایش دمای آزمایش برجسته‌تر می‌گردد. این روند، نشان‌دهنده تأثیر شگرف گرمایش حین عمل‌آوری بر افزایش سریع مقاومت کششی نمونه‌ها در سنین اولیه روسازی است.

### اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۲۳

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۱۸

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۲۰

واژگان کلیدی:

آسفالت سرد،

گرمایش القایی،

عمل‌آوری،

خودترمیمی،

استحکام کششی غیرمستقیم.

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: [thnavid@gmail.com](mailto:thnavid@gmail.com)

استناد به این مقاله: نویدی، طاها، شفا بخش، غلامعلی و میرعبدالعظیمی، سید محمد. (۱۴۰۴). (مقایسه اثر عمل‌آوری تسریع شده با گرمایش القایی

پس از اجرا و عمل‌آوری طبیعی بر شاخص خودترمیمی مخلوط آسفالت سرد. مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، ۱۱(۱)، ۳۸-۲۱

<https://doi.org/10.22075/jtie.2025.35317.1687>

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

## ۱. مقدمه

آسفالت گرم به دلیل کیفیت بالایی که دارد، به عنوان رایج‌ترین نوع مخلوط در روسازی جاده‌ها به کار می‌رود. با این حال، استفاده از آسفالت گرم با ضخامت زیاد امروزه به دلیل مشکلات اقتصادی و زیست‌محیطی، اقتصادی و کارآمد نیست (عطاران و همکاران، ۲۰۱۸). آسفالت به دو دسته گرم (۱۰۰-۱۴۰ درجه سلسیوس) و نیمه‌گرم (۶۰-۱۰۰ درجه سلسیوس) تقسیم می‌شود، در حالی که آسفالت سرد در دمای کم (۰-۴۰ درجه سلسیوس) تولید می‌گردد. در این نوع آسفالت، امولسیون قیر پس از شکسته شدن، سنگ‌دانه‌ها را پوشش داده و به مرور زمان مقاومت آن‌ها را افزایش می‌دهد (تیوس و گیزی، ۲۰۱۷؛ چین و سینگ، ۲۰۲۱). آسفالت سرد دارای مزایایی همچون کاهش مصرف انرژی، هزینه کمتر و عدم نیاز به خشک کردن سنگ‌دانه‌ها است. اما از نظر خواص مکانیکی، مانند سفتی و مقاومت در برابر تغییر شکل، نسبت به آسفالت گرم ضعیف‌تر بوده و نیازمند بهبود است. همچنین، حساسیت بالای آن به رطوبت باعث کاهش چسبندگی قیر به سنگ‌دانه‌ها و کاهش عملکرد می‌شود (البوسلطان و همکاران، ۲۰۱۲).

مخلوط‌های آسفالتی سرد به دلیل عدم نیاز به حرارت‌دهی، باعث کاهش مصرف انرژی و انتشار کمتر می‌شوند و همچنین امکان حمل و نقل در فواصل طولانی و تولید خارج از سایت را فراهم می‌کنند. با این حال، زمان طولانی مورد نیاز برای پخت کامل و دستیابی به استحکام نهایی، به همراه عملکرد مکانیکی کمتر در مقایسه با آسفالت‌های مخلوط گرم، از جمله چالش‌ها محسوب می‌شوند. با این وجود، نتایج مکانیکی نشان می‌دهند که گرمایش القایی می‌تواند به عنوان یک روش مؤثر برای افزایش مقاومت اولیه و کاهش زمان بازگشایی لایه‌های آسفالت سرد مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، برای بهینه‌سازی ترکیب و بهبود پیکربندی دستگاه‌های القایی، تحقیقات بیشتری لازم است. فناوری گرمایش

القایی در سال‌های اخیر برای بهبود فرایند ترمیم مخلوط‌های قیری مورد توجه قرار گرفته است (جعفری آنی و همکاران، ۲۰۲۳؛ جعفری آنی و همکاران، ۲۰۲۴). این فرایند شامل استفاده از مخلوط‌های آسفالتی حاوی ذرات فلزی است که با اعمال گرما فعال می‌شوند. در این روش، قیر اطراف ذرات فلزی گرم شده، به دلیل انبساط حرارتی و کاهش ویسکوزیته، به جریان می‌افتد و شکاف‌های موجود در ساختار را پر می‌کند. این فناوری از نظر کارایی انرژی بسیار مؤثر است. عمده‌ترین دلیل آن نیز گرم شدن ذرات قیر و فلز در مخلوط آسفالت است (رضایی و همکاران، ۲۰۱۷).

آسفالت، که از قیر و سنگ‌دانه‌های معدنی تشکیل شده است، یکی از مصالح اصلی در ساخت جاده‌ها و باندهای فرودگاه به شمار می‌رود و برای عملکرد بهینه و طول عمر بیشتر نیازمند عمل‌آوری مناسب است. عمل‌آوری آسفالت به دو روش طبیعی و تسریع شده انجام می‌شود. برای تسریع این فرآیند، تکنیک‌های گرمایشی به کار می‌روند که در پروژه‌های با نیاز به سرعت بالا مانند جاده‌های پرتردد یا باندهای فرودگاه مفید هستند. روش‌های تسریع شده شامل: ۱) استفاده از دستگاه‌های گرمایشی مانند گرم‌کن‌های صنعتی برای افزایش سریع دمای آسفالت و رسیدن قیر به چسبندگی مطلوب، ۲) افزودن مواد شیمیایی مثل پلیمرها به قیر برای تسریع پلیمریزاسیون و چسبندگی، که زمان عمل‌آوری را کاهش و دوام را افزایش می‌دهد، ۳) استفاده از بخار آب یا هوای گرم برای افزایش دمای سطح آسفالت و تسریع سفت شدن، و ۴) بهره‌گیری از فناوری‌های نوین مانند مایکروویو و مادون قرمز که گرمایش سریع‌تر و یکنواخت‌تری را فراهم کرده و کیفیت نهایی آسفالت را بهبود می‌بخشند (شانبارا و همکاران، ۲۰۲۱).

قیر، به عنوان یک ماده ویسکوالاستیک که حساس به دما است، می‌تواند در شرایط دمایی زیاد یا با استراحت کافی، به‌طور خودکار ترک‌های داخلی مخلوط آسفالتی را

ترمیم کند. به همین دلیل، آسفالت به عنوان یک ماده خودترمیم شناخته می شود (موسوی راد و همکاران، ۲۰۲۲). برای بهبود عملکرد خودترمیمی آسفالت، از روش هایی همچون اصلاح قیر با نانو مواد (موسوی راد و همکاران، ۲۰۲۳) و گرمایش با امواج الکترومغناطیس، از جمله گرمایش القایی و گرمایش ماکروویو، استفاده می شود. در گرمایش القایی، جریان متناوب از طریق سیم پیچ ایجاد شده و میدان الکترومغناطیسی باعث گرم شدن ذرات رسانا، مانند الیاف فولادی، در داخل قیر می شود. این گرم شدن موجب نرم شدن قیر و پر شدن ترک ها می گردد. در گرمایش با ماکروویو، میدان الکترومغناطیسی متناوب نیز با ذرات رسانا در قیر واکنش نشان می دهد و عملکرد مشابهی در ترمیم مخلوط آسفالتی دارد (سان و همکاران، ۲۰۱۸). در تحقیقی در سال ۲۰۱۹، دو نوع مخلوط، یکی با ذرات فولادی و دیگری بدون افزودنی، بررسی شد. نتایج نشان داد که مخلوط آسفالت سرد با ۱٪ ذرات فولادی و گرمایش القایی، پیرشدگی کمتری نسبت به مخلوط بدون افزودنی داشت. همچنین، مخلوط تحت گرمایش القایی افت وزنی و سختی کمتری نشان داد. این پژوهش نتیجه گرفت که گرمایش القایی می تواند روشی مناسب برای افزایش مقاومت و کاهش زمان عمل آوری آسفالت سرد باشد (گونزالس و همکاران، ۲۰۱۹). در سال ۲۰۲۳ و در تحقیقی دیگر، چهار نوع مخلوط آسفالت سرد تولید شد: یکی با ذرات مغناطیسی، یکی با الیاف فولادی تحت گرمایش القایی، و دو مخلوط دیگر مطابق با استانداردهای اسپانیا و آمریکا. نتایج نشان داد که مخلوط های تحت گرمایش القایی پیرشدگی، افت وزنی و سختی کمتری نسبت به سایر مخلوط ها داشتند. همچنین مشخص شد که افزودنی های مغناطیسی می توانند جایگزین مناسبی برای الیاف فولادی در گرمایش القایی باشند و بهبود عملکرد مکانیکی را نیز فراهم کنند (دلا فوئنته ناوارو و همکاران، ۲۰۲۳).

در تحقیقی در سال ۲۰۲۳، از روش مکانیک شکست به جهت بررسی مقاومت شکست نمونه ها استفاده شد. نتایج نشان داد که اصلاح مخلوط آسفالت سرد با الیاف بازالت و استایرن بوتادین باعث بهبود قابل توجه انرژی شکست و ضریب شدت تنش می گردد (لیو و همکاران، ۲۰۲۳). دانشور و همکاران (۲۰۲۲) نیز آزمایش هایی در مورد تأثیر افزودن خرده لاستیک بر شکست و حساسیت رطوبتی مخلوط های آسفالت سرد با استفاده از آزمایش خمش نیم دایره انرژی، شکست استاندارد آشتو تی ۲۸۳ و شاخص انعطاف پذیری، انجام دادند. علاوه بر این، اثرات افزودن سیمان همراه با خرده لاستیک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده همزمان از ۱۴ درصد خرده لاستیک به همراه ۲ درصد سیمان می تواند به طور قابل توجهی شکست و خرابی رطوبتی را بهبود بخشد تا عملکرد قابل مقایسه ای در برابر مخلوط آسفالت گرم داشته باشد.

در تحقیقی در سال ۲۰۲۰، مقاومت کششی غیرمستقیم، مقدار افت رطوبت و مقاومت مارشال مخلوط های آسفالت سرد حاوی درصد های مختلف سیمان پرتلند در زمان های مختلف عمل آوری تا ۲۸ روز به منظور توسعه خواص مکانیکی آنها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزودن سیمان پرتلند به مخلوط آسفالت سرد می تواند به طور مؤثری عملکرد مکانیکی آن را افزایش دهد. همچنین، مشخص شد که با مقادیر زیاد سیمان ۴٪ و ۶٪، مخلوط آسفالت سرد سفت تر می شود که همین امر می تواند باعث افزایش شکنندگی آن گردد (لی و همکاران، ۲۰۲۰). محققان، با هدف بررسی خواص خود ترمیمی آسفالت نیمه گرم، نمونه هایی از این نوع آسفالت را با استفاده از مواد افزودنی ژئولیت، زایکوترم و گیلسونایت تولید کردند. آنها با انجام آزمایش های مختلف از جمله خمش سه- نقطه ای، به بررسی عملکرد این نمونه ها پرداختند. نتایج نشان داد که نرخ ترمیم در آسفالت گرم در مقایسه با

آسفالت داغ کمتر است. این امر احتمالاً به دلیل اضافه شدن مواد افزودنی در فرآیند تبدیل آسفالت داغ به گرم می‌باشد (حسنی نسب؛ کرمانشاهی، ۲۰۱۹).

در تحقیقی، با استفاده از گرمایش القایی، به بررسی اثرات فضای خالی و مقدار قیر بر مکانیسم مقاومت ترک‌خوردگی مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم در سال ۲۰۲۲ پرداخته شد. آزمون خمش نیم‌دایره‌ای برای ارزیابی مقاومت ترک‌خوردگی مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که حتی اگر سطح ترمیم مخلوط آسفالتی تا ۸۰٪ بهبود یابد، مقاومت ترک‌خوردگی پس از یک سیکل آسیب - ترمیم به شدت کاهش خواهد یافت. فضای خالی نقش مهمی در ظرفیت ترمیم و مقاومت ترک‌خوردگی دارد. در حالی که تأثیر مقدار قیر ملایم‌تر است (فان و همکاران، ۲۰۲۲). در پژوهشی، از الیاف فولادی در مخلوط آسفالتی برای ایجاد رسانایی و بهبود عملکرد روش گرمایش القایی استفاده شد. در این تحقیق، الیاف فولادی با مقادیر مختلف صفر، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد به مخلوط بتن آسفالتی اضافه شد. فرآیند خودترمیمی با آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای و گرمایش مایکروویو انجام شد. گرمایش مایکروویو در سه زمان ۲۰، ۴۰ و ۶۰ ثانیه انجام شد. نتایج نشان داد که مخلوط آسفالتی حاوی الیاف فولادی در روش گرمایش القایی موفق بوده است. ولی در مورد مخلوط بدون ذرات فولاد ثابت شد که توانایی خودترمیمی مناسبی نسبت به مخلوط‌های دیگر ندارد (تاج‌الدین و همکاران، ۲۰۲۲). عملکرد گرمایش القایی در یک تحقیق مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که ضایعات فولادی، راندمان گرمایش القایی مخلوط‌های آسفالتی را بهبود می‌بخشند. با این حال، عملکرد گرمایش مخلوط آسفالت با ضایعات فولادی از گرمای بیش از حد و توزیع غیریکنواخت دما رنج می‌برد. در نهایت، برای به‌دست آوردن عملکرد گرمایش بیشتر و همچنین مصرف انرژی کمتر و استفاده کارآمدتر از براده‌های فولادی، توصیه شد که از فرکانس

۳ کیلووات توان ۵۵ کیلوهرتز و ۱۰٪ وزنی محتوای براده ضایعات فولادی به عنوان طرح بهینه استفاده شود. آنها با استفاده از آزمون خمش چهارنقطه‌ای، تأثیر گرمایش القایی بر عملکرد خستگی بتن آسفالتی متخلخل را بررسی کردند و از نسبت طول عمر خستگی به بازیابی سختی خمشی به عنوان شاخصی برای ارزیابی اثر ترمیم استفاده نمودند. نتایج نشان داد که گرمایش القایی می‌تواند خواص مکانیکی آسفالت را به طور قابل‌توجهی بهبود بخشد (لیو و همکاران، ۲۰۱۲ a).

چسبندگی کمتر بین قیر و سنگ‌دانه به علت عدم گرمایش کافی حین تولید در مخلوط آسفالت سرد، منجر به ضعف مقاومت و همچنین تسریع در ایجاد و گسترش ترک در روسازی ساخته شده با این نوع مخلوط خواهد شد. لذا، استفاده از آسفالت سرد عمل‌آوری شده به روش تسریع شده (با اعمال گرمایش القایی) به‌منظور رفع این نقاط ضعف پیشنهاد شده است. هدف اصلی این پژوهش، مقایسه قابلیت خودترمیمی در آسفالت سرد عمل‌آوری شده پس از اجرای روسازی به روش تسریع شده (با القای گرمایش الکترومغناطیس) و آسفالت سرد عمل‌آوری شده در حالت طبیعی (بدون اعمال گرمایش القایی) است.

## ۲. مطالعات آزمایشگاهی

### ۲-۱. مصالح و مواد

مصالح مورد استفاده در این پژوهش شامل سنگ‌دانه، قیر و پودر آهن می‌باشد.

### ۲-۱-۱. مصالح سنگی

دانه‌بندی مصالح سنگی مورد استفاده در تحقیق مطابق حد وسط دانه‌بندی شماره ۳ اشته برای آستر و رویه است. مشخصات فیزیکی مصالح در جدول ۱ و حدود دانه‌بندی مصالح سنگی در جدول ۲ ارائه شده است.

## ۲-۱-۲. پودر آهن

پودر آهن مصرفی در این پژوهش با اندازه ۶۳ میکرون به عنوان عامل القاء استفاده شده که مشخصات آن در جدول ۳ ارائه شده است. به جهت جایگزینی بخشی از فیلر با پودر آهن، در این پژوهش از اندازه ۶۳ میکرون که در محدوده فیلر (زیر الک ۲۰۰) است استفاده شد.

## ۲-۱-۳. قیر

قیر مصرفی در این پژوهش، از نوع قیر امولسیون کاتیونی CSS-1 بوده که از شرکت مهندسی قیر و آسفالت غرب تهیه شده است. مشخصات قیر مصرفی در جدول ۴ ارائه شده است.

## ۳. برنامه آزمایشگاهی و روش ساخت نمونه

نوع آزمایش‌ها و شرایط آنها در جدول ۵ ارائه گردیده است. همچنین، روند آزمایشگاهی مربوط به ساخت و

آزمایش نمونه‌های آسفالتی در شکل ۱ نشان داده شده است. در این پژوهش، ابتدا درصد قیر بهینه به کمک آزمایش‌های مارشال تعیین گردیده است. نمونه‌های آزمایشگاهی با قیر بهینه به روش مارشال و در دو سن عمل‌آوری ۷ و ۲۱ روز و با دو روش، شامل عمل‌آوری تسریع شده (با گرمایش القایی اولیه به مدت ۲۴۰ ثانیه) و عمل‌آوری طبیعی (بدون گرمایش القایی اولیه) ساخته شدند. سپس، نمونه‌ها تحت آزمون استحکام کششی غیرمستقیم (ITS) در دماهای صفر، ۱۵ و ۴۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند. پس از آستانه گسیختگی، هر دو سری نمونه تحت گرمایش القایی ترمیمی قرار داده شدند تا بتوان قابلیت خودترمیمی آنها را ارزیابی کرد. سپس، نمونه‌ها مجدداً تحت آزمون استحکام کششی غیرمستقیم (ITS) در همان دماهای اولیه قرار گرفتند تا از میزان مقاومت نمونه‌ها قبل و بعد از گسیختگی جهت محاسبه شاخص خودترمیمی بهره گرفته شود.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی مصالح سنگی استفاده شده در این پژوهش

| نتایج<br>آزمون       | محدوده استاندارد طبق نشریه ۲۳۴ |      | کد استاندارد | آزمون‌ها                              |
|----------------------|--------------------------------|------|--------------|---------------------------------------|
|                      | رویه                           | آستر |              |                                       |
| مصالح سنگی درشت‌دانه |                                |      |              |                                       |
| ۲/۶۱۲                | ---                            | ---  | ASTM C 127   | وزن مخصوص انبوهی (g/cm <sup>3</sup> ) |
| ۲/۷۰۴                | ---                            | ---  |              | وزن مخصوص ظاهری (g/cm <sup>3</sup> )  |
| ۱/۳                  | ۲/۵                            | ۲/۸  |              | جذب آب (%)                            |
| مصالح سنگی ریزدانه   |                                |      |              |                                       |
| ۲/۶۳۳                | ---                            | ---  | ASTM C 128   | وزن مخصوص انبوهی (g/cm <sup>3</sup> ) |
| ۲/۷۶۱                | ---                            | ---  |              | وزن مخصوص ظاهری (g/cm <sup>3</sup> )  |
| ۱/۸                  | ۲.۵                            | ۲.۸  |              | جذب آب (%)                            |
| ۱۹                   | ۲۵                             | ۳۰   | ASTM C 131   | حداکثر سایش لس آنجلس (%)              |
| ۹۸                   | بر اساس ترافیک                 |      | ASTM D 5821  | شکستگی در دو جبهه (%)                 |
| ۴                    | ۸                              | ۸    | ASTM C 88    | افت وزنی در برابر سولفات سدیم (%)     |

مقایسه اثر عمل‌آوری تسریع شده با گرمایش القایی پس از اجرا و عمل‌آوری طبیعی بر شاخص خودترمیمی مخلوط آسفالت سرد

جدول ۲. دانه‌بندی مصالح سنگی مورد استفاده

| اندازه الک (میلی‌متر)     | ۲۵ (۱ اینچ) | ۱۹ (۳/۴ اینچ) | ۱۲/۵ (۱/۲ اینچ) | ۹/۵ (۳/۸ اینچ) | ۴/۷۵ (۴ اینچ) | ۲/۳۶ (۸ اینچ) | ۰/۳ (۵۰ شماره) | ۰/۰۷۵ (۲۰۰ شماره) |
|---------------------------|-------------|---------------|-----------------|----------------|---------------|---------------|----------------|-------------------|
| حد بالا و پایین استاندارد | —           | ۱۰۰           | ۹۰-۱۰۰          | —              | ۴۴-۷۴         | ۲۸-۵۸         | ۵-۲۱           | ۲-۱۰              |
| درصد عبوری                | —           | ۱۰۰           | ۹۵              | —              | ۵۹            | ۴۳            | ۱۳             | ۶                 |

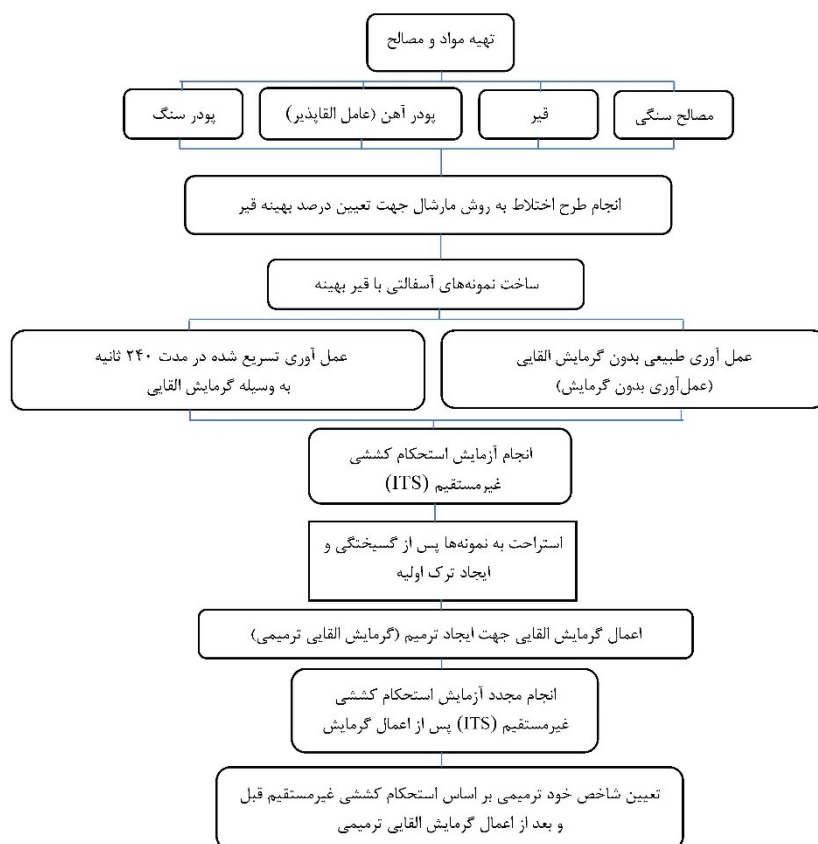
جدول ۳. مشخصات پودر آهن مصرفی در این پژوهش

| عدد اتمی | چگالی (g/cm <sup>3</sup> ) | الکترونگاتیوی (مقیاس پلینز) | نقطه ذوب (°C) | نقطه جوش (°C) | پارامتر مغناطیسی | نسبت پواسون | مدول یانگ (GPa) |
|----------|----------------------------|-----------------------------|---------------|---------------|------------------|-------------|-----------------|
| ۲۶       | ۷/۸۷۴                      | ۱/۸۳                        | ۱۵۸۳          | ۲۸۶۲          | فرومغناطیس       | ۰/۲۹        | ۲۱۱             |

جدول ۴. مشخصات قیر مصرفی در این پژوهش

| آزمایش                                                    | استاندارد بین المللی ASTM | استاندارد ملی ISIRI | نتیجه | اساس ASTM D2397 | حدود پذیرش بر اساس حداکثر |
|-----------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------|-------|-----------------|---------------------------|
| قیر امولسیون CSS-1                                        |                           |                     |       |                 |                           |
| تعیین کندروانی سیبوت-فیورل در دمای ۲۵ درجه سلسیوس (ثانیه) | ASTM D7496                | INSO 20644          | ۲۳    | ۲۰              |                           |
| تعیین کندروانی سیبوت-فیورل در دمای ۵۰ درجه سلسیوس (ثانیه) | ASTM D7496                | INSO 20644          | —     | ۲۰              |                           |
| تعیین بار ذره‌ای                                          | ASTM D7402                | INSO 20642          | مثبت  | مثبت            |                           |
| دانه‌بندی الک (٪)                                         | ASTM D6933                | INSO 20638          | ۰     | -               | ۰/۱                       |
| اختلاط با سیمان (٪)                                       | ASTM D6935                | INSO 13581          | -     | -               | ۲                         |
| پایداری در برابر ته نشینی در                              | ASTM D6930                | INSO 20637          | ۰/۳   | -               | ۱                         |

|                                |      |       |            |            |                                                        |
|--------------------------------|------|-------|------------|------------|--------------------------------------------------------|
| ۲۴ ساعت (%)                    |      |       |            |            |                                                        |
| مقدار روغن تقطیر شده           |      |       |            |            |                                                        |
| -                              | -    | -     | INSO 13580 | ASTM D6997 | امولسیون (%)                                           |
| تعیین مقدار قیر باقیمانده از   |      |       |            |            |                                                        |
| -                              | ۵۷   | ۶۰/۷۵ | INSO 13580 | ASTM D6997 | تقطیر (%)                                              |
| <b>قیر پسماند فرآیند تقطیر</b> |      |       |            |            |                                                        |
| نفوذ در دمای ۲۵ درجه           |      |       |            |            |                                                        |
| ۲۵۰                            | ۱۰۰  | ۲۲۰   | INSO 2950  | ASTM D5    | سلسیوس با وزن ۱۰۰ گرم و مدت زمان ۵ ثانیه (یک میلی متر) |
| کشش در دمای ۲۵ درجه            |      |       |            |            |                                                        |
| -                              | ۴۰   | ۷۱    | INSO 3866  | ASTM D113  | سلسیوس با سرعت سانتی متر بر دقیقه (سانتی متر)          |
| حلالیت در تری کلرو اتیلن       |      |       |            |            |                                                        |
| -                              | ۹۷/۵ | ۹۹/۸  | INSO 2953  | ASTM D2042 |                                                        |



شکل ۱. فلوچارت انجام فعالیت های آزمایشگاهی پژوهش حاضر

مقایسه اثر عمل‌آوری تسریع شده با گرمایش القایی پس از اجرا و عمل‌آوری طبیعی بر شاخص خودترمیمی مخلوط آسفالت سرد

جدول ۵. شرایط آزمون‌های آزمایشگاهی انجام شده در پژوهش حاضر

| نوع آزمایش      | استاندارد  | هدف     | ابعاد (cm)  | دما (°C) | روش عمل‌آوری        | سن     | تکرار |
|-----------------|------------|---------|-------------|----------|---------------------|--------|-------|
| استحکام         |            | ارزیابی | استوانه با  | ۰        | با القا (تسریع شده) | ۷ روز  |       |
| کششی            | ASTM D4123 | مقاومت  | ارتفاع ۶/۲۵ | ۱۵       | بدون القا (طبیعی)   | ۲۱ روز | ۳     |
| غیرمستقیم (ITS) |            | کششی    | قطر ۱۰/۱    | ۴۰       |                     |        |       |

#### ۴. آزمایش‌های مخلوط آسفالتی

در این پژوهش، مخلوط آسفالتی سرد به منظور تعیین قیر بهینه و قابلیت خودترمیمی به روش گرمایش القایی مورد آزمون قرار گرفت.

##### ۴-۱. آزمون مارشال

طرح اختلاط مخلوط آسفالت سرد در این پژوهش بر اساس نشریه MS-2 انستیتو آسفالت انجام شده است.

##### ۴-۲. آزمون مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS)

آزمون مقاومت کششی غیرمستقیم بر اساس استاندارد ASTM D-4123 برای مخلوط آسفالت متراکم مورد استفاده قرار می‌گیرد. نمونه‌ها با استفاده از روش مارشال تهیه می‌شوند و سپس به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق قرار می‌گیرند تا به دمای محیط برسند. پس از آن، نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در یک حمام آب با دمای ۲۰ درجه سلسیوس قرار داده می‌شوند (میرعبدالعظیمی و همکاران، ۲۰۲۱). پس از انجام مراحل ذکر شده، به جهت تعیین مقاومت کششی غیرمستقیم، نمونه‌های ۷ و ۲۱ روز و عمل‌آوری شده به دو صورت طبیعی و با گرمایش القایی در سه دمای صفر، ۱۵ و ۴۰ درجه سلسیوس تحت بارگذاری با سرعت ثابت ۵۰ میلی‌متر در دقیقه قرار می‌گیرند تا

#### گسیختگی رخ دهد و مقدار بار در آن لحظه ثبت

شود. مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) با استفاده از معادله (۱) محاسبه می‌گردد:

$$ITS = \frac{2 \cdot P_{max}}{\pi \cdot t \cdot D} \quad (1)$$

##### ۴-۳. خودترمیمی نمونه‌های آسفالتی

پس از آستانه گسیختگی در آزمون استحکام کششی غیرمستقیم (ITS)، هر دو سری نمونه‌ها تحت گرمایش القایی ترمیمی قرار گرفتند تا بتوان قابلیت خودترمیمی آنها را مورد ارزیابی قرار داد.

دستگاه گرمایش القایی مورد استفاده در این پژوهش مطابق شکل ۲ (عمر محمد صالح و همکاران، ۲۰۲۴)، جریان ۱ تا ۳۰ آمپر و توان صفر تا ۳۰ کیلووات را دارا می‌باشد و کویل دستگاه، سیم‌پیچ صفحه‌ای به قطر ۱۱۰ میلی‌متر و قطر میله مسی ۱۰ میلی‌متر است. از آمپر ۲۵ در این تحقیق استفاده شد که معادل توان ۹/۱۳ کیلووات می‌باشد. برای تعیین پتانسیل خودترمیمی مخلوط‌های آسفالتی در شرایط مختلف آزمایش، از مقایسه میزان مقاومت کششی غیرمستقیم در هر مرحله از شکست پس از ترمیم، نسبت به مقاومت کششی غیرمستقیم اولیه استفاده شد. شاخص ترمیم (HI) که نسبت مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم پس از شکست نمونه ترمیم‌شده (ITS<sub>1</sub>) به مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم اولیه نمونه (ITS<sub>0</sub>) است، مطابق با رابطه (۲) تعیین می‌شود:

$$HI_i = \frac{ITS\ 1}{ITS\ 0} \quad (2)$$

به طور کلی، هدف از انجام آزمایش مارشال، تعیین معیارهای مناسب برای طرح یک مخلوط آسفالتی مناسب است. مقدار قیر بهینه در این پژوهش ۱۰/۶۹ درصد تعیین شده است. سایر نمونه‌ها بر اساس این قیر بهینه (جدول ۶) ساخته می‌شوند.

## ۵. نتایج و بحث

### ۵-۱. نتایج آزمون مارشال

جدول ۶. نتایج طرح اختلاط جهت تعیین قیر بهینه در مخلوط‌های آسفالت سرد در این پژوهش

| درصد      | استقامت   | فضای خالی  | فضای خالی | فضای خالی پر | ورن مخصوص         |        |          |
|-----------|-----------|------------|-----------|--------------|-------------------|--------|----------|
| مقدار قیر | مارشال    | روانی      | مخلوط     | مصلح سنگی    | حقیقی (کیلوگرم بر |        |          |
| (%)       | (کیلوگرم) | (میلی متر) | (درصد)    | (درصد)       | سانتی متر مکعب)   |        |          |
| 9.19      | 5.58      | 6587.562   | 8.356     | 9.881        | 26.780            | 63.102 | 2158.930 |
| 9.69      | 5.88      | 7099.719   | 8.119     | 5.551        | 26.891            | 79.357 | 2166.383 |
| 10.19     | 6.19      | 6664.327   | 8.265     | 5.135        | 27.245            | 81.152 | 2169.116 |
| 10.69     | 6.49      | 6112.41    | 8.64      | 2.317        | 26.483            | 91.25  | 2204.104 |
| 11.19     | 6.79      | 5617.97    | 8.969     | 2.077        | 27.744            | 92.514 | 2178.492 |



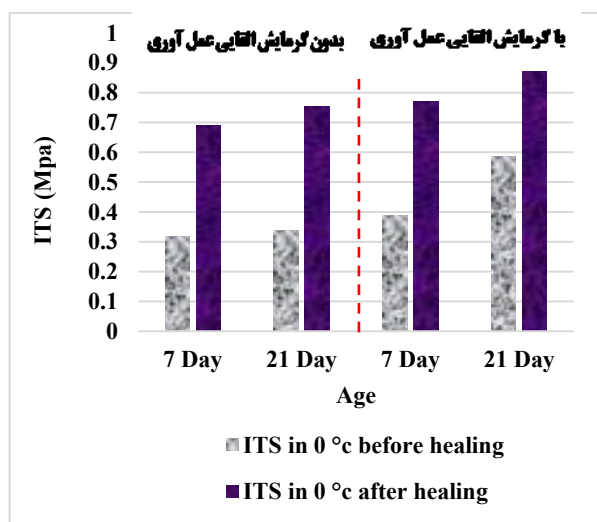
شکل ۲. دستگاه گرمایش القایی مورد استفاده در تحقیق

### ۵-۲. نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

گرمایش القایی عمل‌آوری، رشد کمتری را در حین افزایش سن و پیش از ترمیم از خود نشان داده است. اما نمونه‌های دارای گرمایش القایی عمل‌آوری، علاوه بر افزایش نرخ رشد، میزان مقاومت بالاتری را نیز از خود بروز می‌دهند که این می‌تواند به دلیل چسبندگی بیشتر بین قیر نرم شده و مصالح سنگی در حین ترمیم با گرمایش القایی باشد.

شکل ۳، نشان‌دهنده نتایج آزمایش ITS در دمای صفر درجه سلسیوس، قبل و بعد از گرمایش ترمیمی بر نمونه‌ها در سنین ۷ و ۲۱ روز، با و بدون گرمایش اولیه جهت عمل‌آوری است. همانگونه که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود، مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های بدون

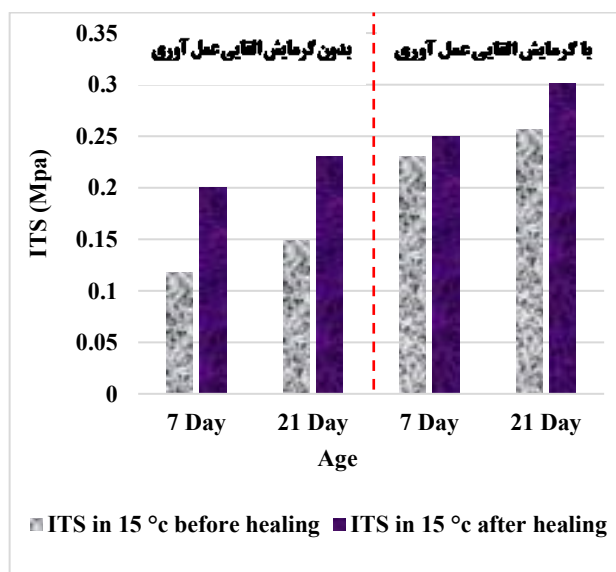
مقایسه اثر عمل‌آوری تسریع شده با گرمایش القایی پس از اجرا و عمل‌آوری طبیعی بر شاخص خودترمیمی مخلوط آسفالت سرد



شکل ۳. نتایج آزمایش ITS در سنین ۷ و ۲۱ روز، قبل و بعد از ترمیم القایی در دمای صفر درجه سلسیوس، در نمونه‌های با و بدون گرمایش عمل‌آوری

حالت ترمیم بیشتر از نمونه‌های با گرمایش عمل‌آوری است. زیرا نمونه‌های با گرمایش عمل‌آوری، در همان مراحل ابتدایی و قبل از ترمیم، اکثر رشد مقاومتی خود را تجربه نموده‌اند. علاوه بر این، ملاحظه می‌شود که فاصله نتایج قبل و بعد از ترمیم القایی، در هر دو حالت عمل‌آوری (با گرمایش القایی و طبیعی) کاهش یافته است.

شکل ۴، نشان‌دهنده نتایج آزمایش ITS در دمای ۱۵ درجه سلسیوس، قبل و بعد از گرمایش ترمیمی بر نمونه‌ها در سنین ۷ و ۲۱ روز، با و بدون گرمایش اولیه جهت عمل‌آوری است. بر اساس شکل ۴ نیز ملاحظه می‌شود که اعمال گرمایش عمل‌آوری منجر به مقاومت کششی بالاتر در نمونه‌های آسفالتی شده است. اما رشد مقاومت در نمونه‌های بدون گرمایش عمل‌آوری در



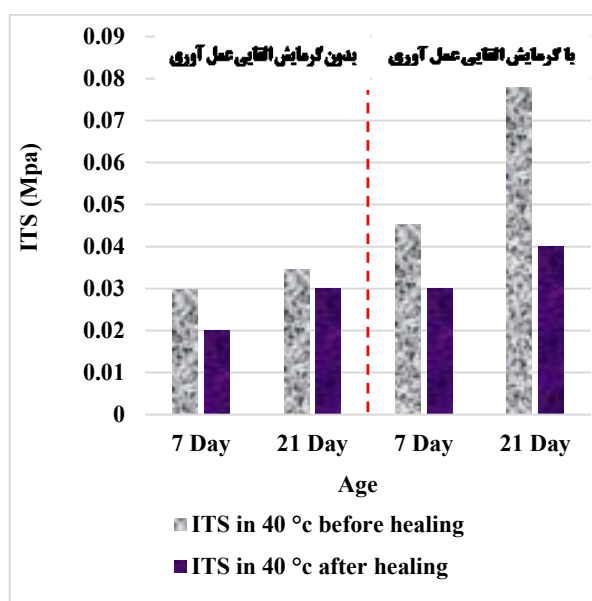
شکل ۴. نتایج آزمایش ITS در سنین ۷ و ۲۱ روز، قبل و بعد از ترمیم القایی در دمای ۱۵ درجه سلسیوس، در نمونه‌های با و بدون گرمایش عمل‌آوری

ترمیمی کمتر از قبل از ترمیم است. علت این امر را می-توان به این صورت توجیه نمود که نمونه‌ها در دمای ۴۰ درجه سلسیوس و پیش از اعمال گرمایش ترمیمی، به حداکثر مقاومت قابل تحصیل خود رسیده‌اند و دیگر امکان افزایش بیشتری نخواهند داشت.

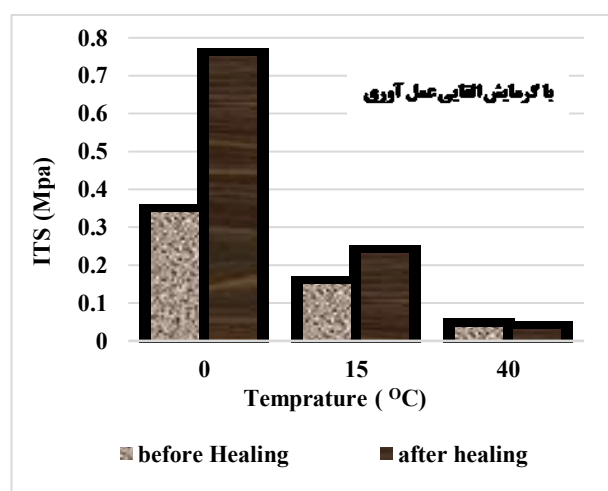
شکل‌های ۶ و ۷ نشان‌دهنده نتایج مقاومت کششی نمونه‌ها با و بدون گرمایش عمل‌آوری، در سن ۷ روز و سه دمای مختلف، قبل و بعد از اعمال گرمایش القایی ترمیمی است.

در شکل ۵، نتایج آزمایش ITS در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد، قبل و بعد از گرمایش ترمیمی بر نمونه‌ها در سنین ۷ و ۲۱ روز، با و بدون گرمایش اولیه، جهت عمل‌آوری نشان داده شده است.

همانگونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، نتایج در دمای ۴۰ درجه سلسیوس در مقایسه با دو دمای دیگر، یعنی صفر و ۱۵ درجه سلسیوس، متفاوت است. مقاومت در تمامی نمونه‌ها در این دما، پس از اعمال گرمایش



شکل ۵. نتایج آزمایش ITS در سنین ۷ و ۲۱ روز، قبل و بعد از ترمیم القایی در دمای ۴۰ درجه سلسیوس، در نمونه‌های با و بدون گرمایش عمل‌آوری

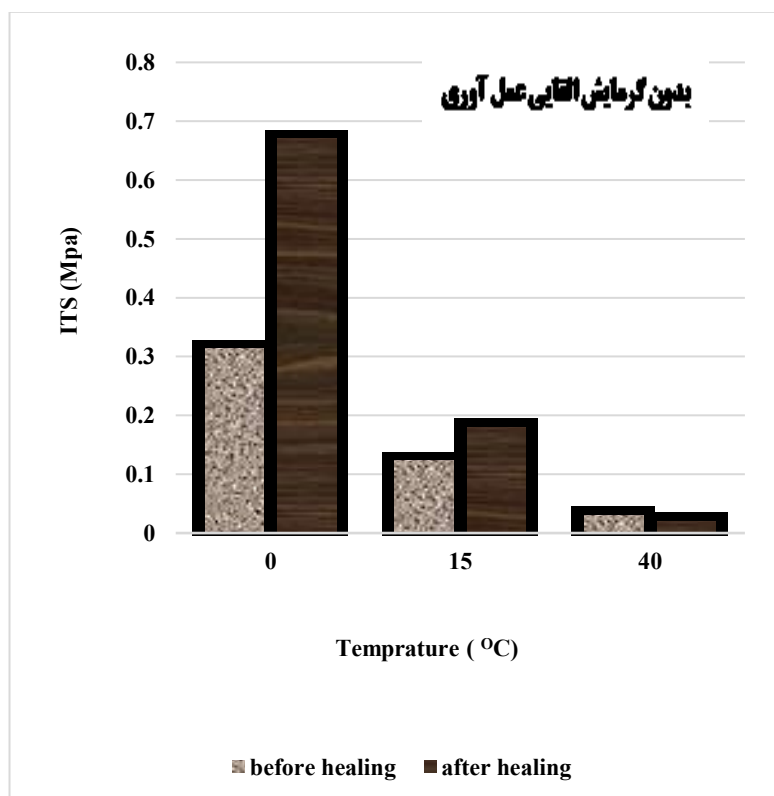


شکل ۶. نتایج آزمایش ITS در سن ۷ روز، قبل و بعد از ترمیم القایی در دماهای مختلف در نمونه‌های با گرمایش عمل‌آوری

مقایسه اثر عمل‌آوری تسریع شده با گرمایش القایی پس از اجرا و عمل‌آوری طبیعی بر شاخص خودترمیمی مخلوط آسفالت سرد

است. نکته دیگری که از این شکل‌ها برداشت می‌شود این است که با افزایش دما، از میزان مقاومت کششی بعد از ترمیم نمونه‌ها کاسته می‌شود. این امر می‌تواند به دلیل تأثیر اولیه گرمایش در آزمون ITS مرحله اول (قبل از ترمیم) باشد.

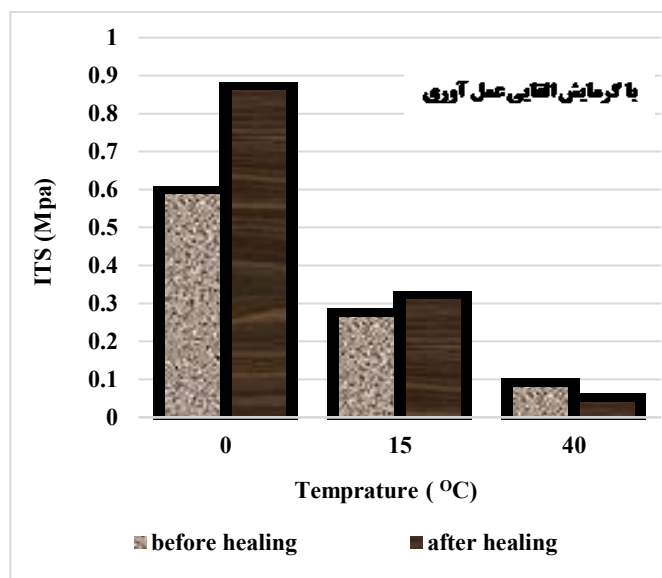
همانگونه که از شکل‌های ۶ و ۷ برداشت می‌شود، با اعمال گرمایش عمل‌آوری، بر میزان مقاومت کششی نمونه‌ها به میزان قابل ملاحظه‌ای افزوده می‌شود که این امر به دلیل تبخیر آب محتوی امولسیون در همان لحظات اولیه (کامبوزیا و همکاران، ۲۰۲۲؛ جلالیان و همکاران، ۲۰۲۳) و ایجاد چسبندگی بیشتر قیر و مصالح سنگی



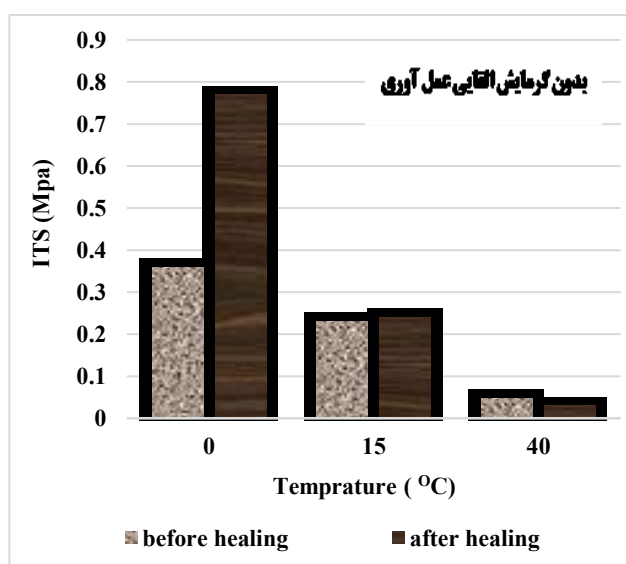
شکل ۷. نتایج آزمایش ITS در سن ۷ روز، قبل و بعد از ترمیم القایی در دماهای مختلف در نمونه‌های بدون گرمایش عمل‌آوری

قیر و مصالح سنگی افزوده می‌شود. نکته جالب و حائز اهمیت، فاصله کمتر مقاومت در نمونه‌های قبل و بعد از ترمیم در مقایسه با سن ۷ روز است که این امر را می‌توان با تأثیر سن بر چسبندگی بیشتر بین قیر و مصالح و تبخیر کامل آب محتوی امولسیون توجیه نمود که دیگر پتانسیلی برای عمل‌آوری بیشتر در اثر گرمایش ترمیمی، به-خصوص در دمای آزمون ۴۰ درجه سلسیوس در نمونه‌ها باقی نمی‌گذارد.

شکل‌های ۸ و ۹ نشان‌دهنده نتایج مقاومت کششی نمونه‌ها با و بدون گرمایش عمل‌آوری، در سن ۲۱ روز و سه دمای مختلف، قبل و بعد از اعمال گرمایش القایی ترمیمی است. بر اساس شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌شود که مشابه نمونه‌های دارای سن ۷ روز، در نمونه‌های دارای سن ۲۱ روز نیز با اعمال گرمایش عمل‌آوری، بر میزان مقاومت کششی نمونه‌ها به دلیل تبخیر آب محتوی امولسیون در همان لحظات اولیه و ایجاد چسبندگی بیشتر



شکل ۸. نتایج آزمایش ITS در سن ۲۱ روز، قبل و بعد از ترمیم القایی در دماهای مختلف در نمونه‌های با گرمایش عمل‌آوری



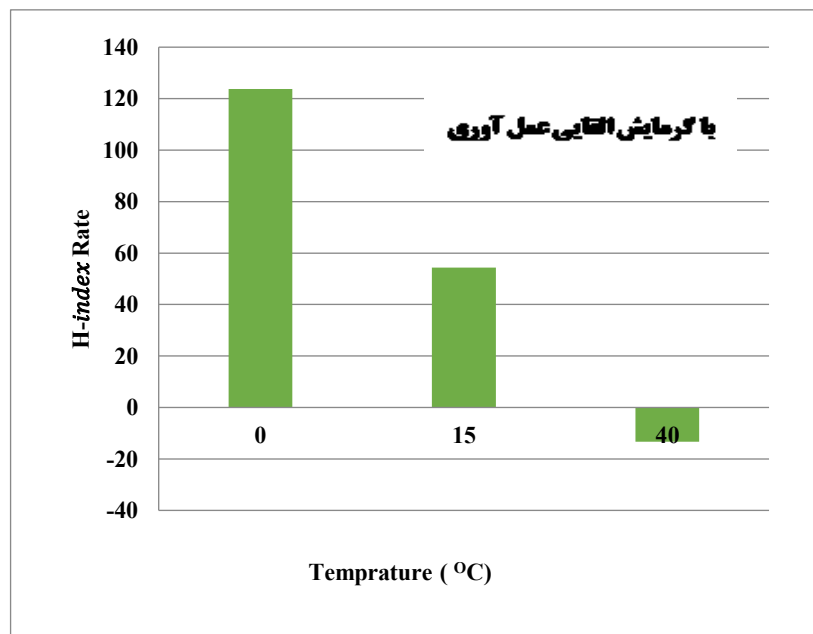
شکل ۹. نتایج آزمایش ITS در سن ۲۱ روز، قبل و بعد از ترمیم القایی در نمونه‌های بدون گرمایش عمل‌آوری

### ۳-۵. شاخص خودترمیمی

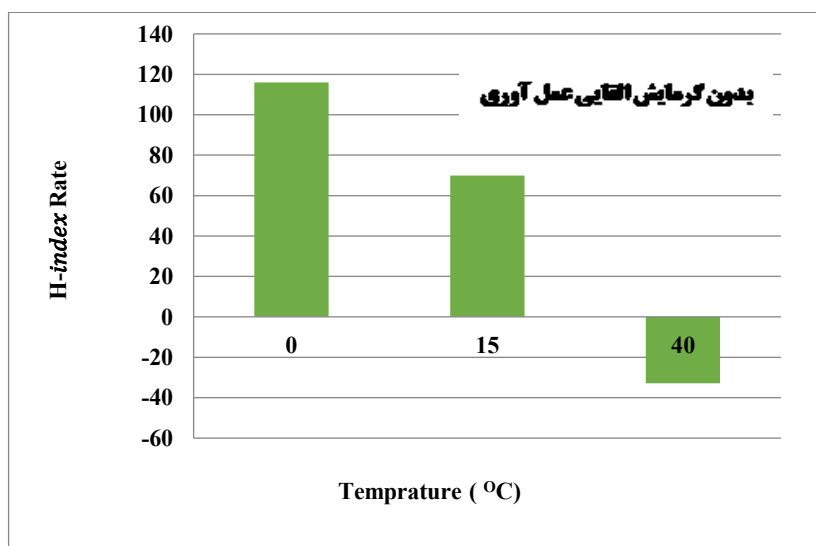
در شکل‌های ۱۰ و ۱۱، نرخ شاخص خودترمیمی نمونه‌ها، با و بدون گرمایش عمل‌آوری، در سن ۷ روز و سه دمای مختلف نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در این نمونه‌ها، نرخ خودترمیمی در

دمای صفر درجه سلسیوس به مراتب بیشتر از ۱۵ درجه سلسیوس است. اما در دمای ۴۰ درجه سلسیوس، به دلیل پُرشدن ظرفیت خودترمیمی و تأثیر اولیه گرمایش در آزمون ITS مرحله اول (قبل از ترمیم)، دیگر پتانسیلی برای تحمل بار بیشتر در نمونه در آزمون ITS مرحله دوم وجود نداشته است.

مقایسه اثر عمل آوری تسریع شده با گرمایش القایی پس از اجرا و عمل آوری طبیعی بر شاخص خودترمیمی مخلوط آسفالت سرد



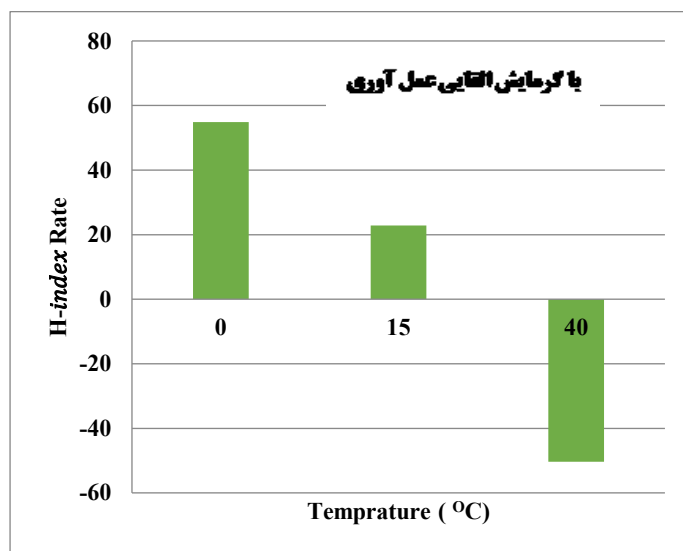
شکل ۱۰. نرخ شاخص خودترمیمی در نمونه‌های ۷ روزه با گرمایش حین عمل آوری



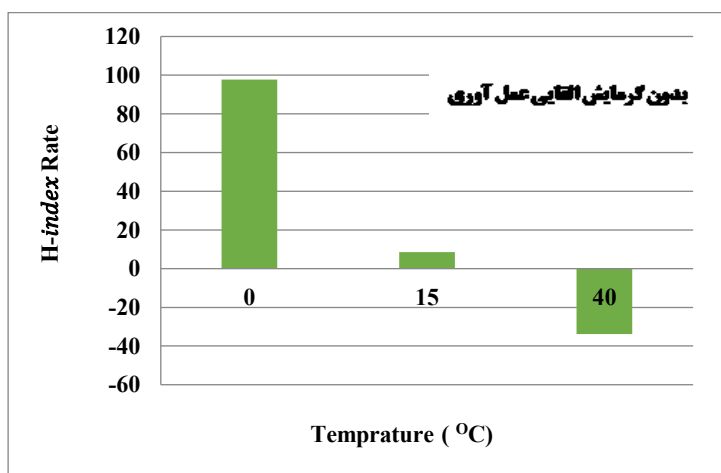
شکل ۱۱. نرخ شاخص خودترمیمی در نمونه‌های ۷ روزه بدون گرمایش حین عمل آوری

داده‌اند. در شکل‌های ۱۲ و ۱۳، نرخ شاخص خودترمیمی نمونه‌ها، با و بدون گرمایش عمل آوری، در سن ۲۱ روز و سه دمای مختلف مورد مقایسه قرار گرفته است.

نتیجه دیگری که از شکل‌های ۱۰ و ۱۱ برداشت می‌شود این است که نمونه‌های با گرمایش عمل آوری، در یک روند کلی، عملکرد ترمیمی بسیار بهتری را در مقایسه با نمونه‌های دارای عمل آوری طبیعی از خود بروز



شکل ۱۲. نرخ شاخص خودترمیمی در نمونه‌های ۲۱ روزه با گرمایش حین عمل‌آوری



شکل ۱۳. نرخ شاخص خودترمیمی در نمونه‌های ۲۱ روزه بدون گرمایش حین عمل‌آوری

## ۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به بررسی میزان خودترمیمی نمونه‌های آسفالت سرد به وسیله گرمایش القایی در شرایط مختلف عمل‌آوری (تسریع شده و طبیعی) پرداخته شد. در ابتدا، نمونه‌هایی با دو روش عمل‌آوری متفاوت ساخته شدند. سپس آزمایش ITS به منظور بررسی میزان مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها در دو سن ۷ و ۲۱ روز و در سه دمای مختلف انجام گرفت. سپس نمونه‌های گسیخته شده با اعمال

نکته قابل تأمل در شکل‌های ۱۲ و ۱۳، تأثیر افزایش سن بر شاخص خودترمیمی نمونه‌های آسفالت سرد است. مشاهده می‌شود که در یک روند کلی، با افزایش سن، از میزان نرخ شاخص خودترمیمی نمونه‌های دارای گرمایش عمل‌آوری کاسته می‌شود و این امر با افزایش دمای آزمون تشدید می‌گردد. اما این امر نشان‌دهنده تأثیر قابل ملاحظه گرمایش حین عمل‌آوری و افزایش سریع مقاومت کششی نمونه‌ها از همان ابتدای تولید و اجرای روسازی آسفالتی است.

مقایسه اثر عمل‌آوری تسریع شده با گرمایش القایی پس از اجرا و عمل‌آوری طبیعی بر شاخص خودترمیمی مخلوط آسفالت سرد

است که با افزایش دما، از میزان مقاومت کششی بعد از ترمیم نمونه‌ها کاسته می‌شود. این امر می‌تواند به دلیل تأثیر اولیه گرمایش در آزمون ITS مرحله اول (قبل از ترمیم) باشد.

- مقاومت کششی در نمونه‌های ۲۱ روزه قبل و بعد از ترمیم در مقایسه با نمونه‌های ۷ روزه دارای فاصله کمتری است که این امر را می‌توان به تأثیر سن بر چسبندگی بیشتر بین قیر و مصالح و تبخیر کامل آب محتوی امولسیون مربوط دانست و اینکه دیگر پتانسیلی برای عمل‌آوری بیشتر در اثر گرمایش ترمیمی، به‌خصوص در دمای آزمون ۴۰ درجه سلسیوس باقی نمی‌گذارد.
- نرخ خودترمیمی در دمای صفر درجه سلسیوس به مراتب بیشتر از ۱۵ درجه سلسیوس است. اما در دمای ۴۰ درجه سلسیوس، به دلیل پُر شدن ظرفیت خودترمیمی و تأثیر اولیه گرمایش در آزمون ITS مرحله اول (قبل از ترمیم)، دیگر پتانسیلی برای تحمل بار بیشتر در نمونه‌ها در آزمون ITS مرحله دوم وجود نداشته است.
- در یک روند کلی، با افزایش سن، از میزان نرخ شاخص خودترمیمی نمونه‌های دارای گرمایش عمل‌آوری کاسته می‌شود و این امر با افزایش دمای آزمون تشدید می‌گردد. این امر نشان‌دهنده تأثیر قابل ملاحظه گرمایش حین عمل‌آوری و افزایش سریع مقاومت کششی نمونه‌ها از همان ابتدای تولید و اجرای روسازی آسفالتی است.

گرمایش القایی تحت شرایط خودترمیمی قرار گرفتند. پس از انجام عملیات خودترمیمی، مجدداً آزمایش ITS روی نمونه‌ها انجام شد و میزان مقاومت و استحکام آنها پس از اعمال شرایط خودترمیمی محاسبه گردید. مهمترین نتایج این تحقیق عبارتند از:

- مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های بدون گرمایش عمل‌آوری، رشد کمتری را در حین افزایش سن و پیش از ترمیم از خود نشان داده‌اند. اما نمونه‌های دارای گرمایش عمل‌آوری، علاوه بر افزایش نرخ رشد، میزان مقاومت بیشتری را نیز از خود بروز می‌دهند که این امر به دلیل چسبندگی بیشتر بین قیر و مصالح سنگی، در حین ترمیم و نرم شدن قیر با گرمایش القایی است.
- در حالت ترمیم، رشد مقاومت در نمونه‌های بدون گرمایش عمل‌آوری بیشتر از نمونه‌های با گرمایش عمل‌آوری است زیرا نمونه‌های با گرمایش عمل‌آوری، در همان مراحل ابتدایی و قبل از ترمیم، اکثر رشد مقاومتی خود را تجربه نموده‌اند. علاوه بر این، ملاحظه می‌شود که فاصله نتایج قبل و بعد از ترمیم القایی، در هر دو حالت عمل‌آوری (با گرمایش القایی و طبیعی) کاهش یافته است.
- با اعمال گرمایش عمل‌آوری، بر میزان مقاومت کششی نمونه‌ها به میزان قابل ملاحظه‌ای افزوده می‌شود که این امر به دلیل تبخیر آب محتوی امولسیون در همان لحظات اولیه و ایجاد چسبندگی بیشتر بین قیر و مصالح سنگی است. نکته دیگر این

## ۷. مراجع

- Al-Busaltan, S., Al Nageim, H., Atherton, W. and Sharples, G. 2012. "Mechanical properties of an upgrading cold-mix asphalt using waste materials". J. Mater. Civ. Eng., 24(12): 1484-1491.
- Attaran, H., Mohammadzadeh Moghadam, K., Shahnava, B., and Attaran, S. 2018. "Effect of Calcium Carbonate Precipitation Caused by Bacterial Agent on Mechanical Properties of Cold Asphalt". 11th International Civil Engineering Congress.
- Daneshvar, D., Motamed, A. and Imaninasab, R. 2022. "Improving fracture and moisture resistance of cold mix asphalt (CMA) using crumb rubber and cement. Road Mater. Pavement Design, 23(3), 527-545.
- DeLaFuente-Navarro, C., Lastra-González, P., Calzada-Pérez, M. Á. and Castro Fresno, D. 2023. "Rheological

- and mechanical consequences of reducing the curing time of cold asphalt mixtures by means of magnetic induction". *Case Stud. Constr. Mater.*, 19: e02573.
- 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(sup1): S149-S162.
- Hasani Nasab, S.Sh., Kermanshahi, N. 2019. "Investigation of the Effect of Gilsonite on the Self-Healing Properties of Hot Mix Asphalt". 11th Iran Bitumen and Asphalt Symposium. Tehran.
- Jafari Ani, O., Shafabakhsh, G. A. and Mirabdolazimi, S. M. 2023. "Presenting the self-healing potential model by induction heating method in warm asphalt mixtures by artificial neural network". *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.*, 105(2): 1-20.
- Jafari Ani, O., Shafabakhsh, G. and Mirabdolazimi, S. M. 2024. "Investigation of rheological characteristics of powdered activated carbon modified bitumen for use in self-healing mechanism of asphalt concrete". *J. Rehabil. Civ. Eng.*, 12(2): 58-68.
- Jain, S. and Singh, B. 2021. "Cold mix asphalt: An overview". *J. Clean. Prod.*, 280: 124378.
- Jalalian Khoshnood, A., Kamboozia, N., Ziari, H. and Zalnezhad, M., 2023. "Evaluation of performance characteristics of polymer-modified slurry seal (PMSS) by replacing filler with ceramic waste powder". *Road Materials and Pavement Design*, 24(9), pp.2174-2191.
- Kamboozia, N., Ziari, H., Zalnezhad, M. and Jalalian Khoshnood, A. 2022. "Investigation of the effect of waste ceramic filler on the performance of microsurfacing". *J. Transport. Infrastruct. Eng.*, 8(1): 1-22.
- Li, R., Leng, Z., Wang, Y. and Zou, F. 2020. "Characterization and correlation analysis of mechanical properties and electrical resistance of asphalt emulsion cold-mix asphalt". *Constr. Build. Mater.*, 263: 119974.
- Liu, Q., et al. 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. and van de Ven, M. 2012b. "Induction healing of porous asphalt concrete beams on an elastic foundation". *J. Mater. Civ. Eng.*, 25(7): 880-885.
- Liu, H., Kuang, A., Wang, Z., Chu, C., Yu, H. and Lv, S. 2023. "Investigation on fracture and fatigue performance of cold recycling emulsified asphalt mixture based on acoustic emission parameters". *J. Clean. Prod.*, 428: 139285.
- Mirabdolazimi, S. M., Pakenari, M. M. and Kargari, A. 2021. "Effect of nanosilica on moisture susceptibility of asphalt emulsion mixture". *Arab. J. Sci. Eng.* 46: 11139-11151. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-05696-3>
- Mousavi Rad, S., Kamboozia, N., Anupam, K. and Saed, S. A., 2022. "Experimental evaluation of the fatigue performance and self-healing behavior of nanomodified porous asphalt mixtures containing RAP materials under the aging condition and freeze-thaw cycle". *J. Mater. Civ. Eng.*, 34(12): 04022323.
- Mousavi Rad, S., Kamboozia, N., Ameri, M. and Mirabdolazimi, S.M., 2023. Feasibility of concurrent improvement of pollutants-absorption ability from surface runoff and mechanical performance of asphalt mixtures by using photocatalytic nanomodified porous asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(8), p.04023248.
- Phan, T. M., Le, T. H. M. and Park, D. W. 2022. "Evaluation of cracking resistance of healed warm mix asphalt based on air-void and binder content". *Road Mater. Pavement Design*, 23(1): 47-61.
- Rezaei, H., Sadeghian, M., Motamedi, H., and Torabi, A. 2017. "The Application of Microsurfacing Asphalt Overlay and its Economic Comparison with Other Protective Asphalts". 9th Bitumen and Asphalt Symposium.
- Shanbara, H. K., Dulaimi, A., Al-Mansoori, T., Al-Busaltan, S., Herez, M., Sadique, M. and Abdel-Wahed, T. 2021. "The future of eco-friendly cold mix asphalt". *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 149: 111318.
- Sun, D., et al. 2018. "A comprehensive review on self-healing of asphalt materials: Mechanism, model, characterization and enhancement". *Adv. Colloid Interfac. Sci.*, 256: 65-93.
- Tajudin, A. N., Sandjaya, A., Christianto, D. and Kurniawan, M. B. H. 2022. "Experimental study on the self-healing ability of wearing course-asphalt concrete mixes reinforced with steel particles". In *Proceedings of the Second International Conference of Construction, Infrastructure, and Materials: ICCIM 2021, Jakarta, Indonesia* (pp. 421-430). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Thives, L. P. and Ghisi, E. 2017. "Asphalt mixtures emission and energy consumption: A review". *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 72: 473-484.
- Umar Mohammad Saleh, I., Effati, M., Jalali, M. and Mirabdolazimi, S. M. 2024. "Evaluation of the self-healing behavior of warm mix asphalt with the help of failure mechanism and in terms of induction characteristics using Artificial Neural Networks". *Modares Civ. Eng. J.*, 24(1): 7-23.