

# ارزیابی ترمیم القایی مخلوط‌های آسفالتی پیرشده در آزمایشگاه با استفاده از آزمون خمش نیم‌دایره‌ای

سعید امانی<sup>۱</sup>، امیر کاوسی<sup>۲\*</sup>، محمد محمد کریمی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲. استاد، دانشکده عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۳. استادیار، دانشکده عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس

Kavussia@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۹/۱/۳۰ تاریخ پذیرش: ۹۹/۳/۲۱

## چکیده

روسازی‌های آسفالتی به مرور زمان دچار پیرشدگی می‌شوند که این امر موجب کاهش سطح خدمت‌دهی و انعطاف‌پذیری این روسازی‌ها می‌شود. ترک خوردگی در اثر پیرشدگی یکی از شایع‌ترین علل خرابی در روسازی‌های آسفالتی است. عدم ترمیم به موقع روسازی‌های ترک خورده می‌تواند باعث گسترش ترک و ایجاد سایر خرابی‌ها در روسازی شود. برخی از ترک‌ها می‌توانند با استفاده از اعمال گرمایش به روش تابش امواج الکترومغناطیس ترمیم شوند. استفاده از روش گرمایش به روش تابش امواج الکترومغناطیس یکی از روش‌های نوین در ترمیم ترک‌ها در روسازی‌ها است. القای گرمایش از طریق امواج الکترومغناطیس موجب افزایش دمای قیر درون مخلوط‌های آسفالتی شده و موجب حرکت کردن قیر و پر کردن ترک‌ها می‌شود. در این پژوهش، تأثیر سطوح مختلف پیرشدگی مخلوط‌های آسفالتی روی گرمایش و ترمیم القایی روسازی مورد ارزیابی قرار گرفته است. به منظور اعمال شرایط پیرشدگی، مخلوط‌های آسفالتی به مدت‌های ۳، ۵، ۷ و ۹ روز در گرمخانه در دمای  $85^{\circ}\text{C}$  نگهداری شدند. در این پژوهش، قیر خالص با استفاده از کربن فعال اصلاح شد. علاوه بر این، تأثیر کربن فعال در ویژگی‌های مکانیکی و نرخ گرمایش آن به روش تابش امواج الکترومغناطیس در مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی تأثیر سطوح مختلف پیرشدگی در نرخ ترمیم القایی، آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای در دماهای میانی و پایین انجام شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزودن کربن فعال به قیر نه تنها موجب کاهش مقاومت آن نمی‌شود، بلکه می‌تواند موجب افزایش مقاومت نمونه‌ها در برابر ترک‌خوردگی نیز شود. نتایج بدست آمده نشان داد که افزایش سطح پیرشدگی موجب کاهش نرخ گرمایش نمونه‌های آسفالتی به روش تابش امواج الکترومغناطیس می‌شود. علاوه بر این، نتیجه گردید که افزایش سطح پیرشدگی در مخلوط آسفالتی و افزایش طول شیار در نمونه‌های خمش نیم‌دایره‌ای موجب کاهش نرخ ترمیم القایی می‌شود. همچنین، نتایج نشان داد که میزان ترمیم القایی در مخلوط‌های آسفالتی ترک خورده در دماهای پایین بیشتر از مخلوط‌های آسفالتی است که در دماهای میانی ترک خورده‌اند.

**واژگان کلیدی:** گرمایش و ترمیم القایی، پیرشدگی، کربن فعال، آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای، امواج الکترومغناطیس.

## ۱- مقدمه

خرابی مخلوط آسفالتی از ترک‌های ریز از همان لحظات ابتدایی شروع می‌شود. پیرشدگی قیر در مخلوط آسفالتی موجب کاهش خواص چسبندگی، افزایش سختی و افزایش ویسکوزیته قیر می‌شود. در طول دوران بارگذاری و بهره‌برداری از روسازی، در اثر پیرشدگی در مخلوط‌های آسفالتی ترک‌های ریزی ایجاد می‌شود که می‌تواند رشد کرده و به خرابی‌های بزرگ‌تری تبدیل شوند. به منظور حفظ روسازی در یک سطح خدمت‌دهی قابل قبول، ریزترک‌های ایجادشده در روسازی باید در سال‌های اولیه خود ترمیم شوند. در غیر این صورت، ریزترک‌ها رشد کرده و موجب افزایش ترک‌خوردگی و کاهش مقاومت روسازی می‌شوند. پژوهشگران برای کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری، کاهش اختلال در ترافیک، کاهش آلودگی و افزایش ایمنی هنگام تعمیرات به روش‌های ترمیم توجه زیادی دارند. در تابستان- های گرم و دوره‌های استراحت طولانی، آسفالت می‌تواند بخشی از خواص مکانیکی خود را بهبود ببخشد. این ویژگی ذاتی مخلوط آسفالتی است که خودترمیمی نامیده می‌شود [1].

[2]. در سال‌های اخیر، تلاش‌های زیادی برای توسعه فناوری‌های نوین برای بهبود توانایی ترمیم مخلوط‌های آسفالتی انجام شده است. گرمایش القایی روش نوینی است که از طریق آن آسفالت می‌تواند به صورت موضعی گرم شده و فرایند خودترمیمی را تسریع بخشد [3, 4]. این روش که از گرمایش مخلوط آسفالتی برای تسریع فرایند ترمیم بهره می‌برد، گرمایش القایی نامیده می‌شود. پژوهشگران به منظور ترمیم ترک‌ها در روش گرمایش القایی از منابع گرمایشی مختلفی همچون القای مغناطیسی [3, 5]، امواج مایکروویو [3, 6] و امواج اشعه مادون قرمز [7, 8] برای گرم کردن مخلوط آسفالتی استفاده می‌کنند. برخی از ترک‌های روسازی می‌توانند با استفاده از روش گرمایش القایی ترمیم شوند. اگر قیر موجود در مخلوط آسفالتی دچار پیرشدگی زودرس نشود، مخلوط آسفالتی می‌تواند ریزترک‌ها و ترک‌های خود را ترمیم کند. با افزایش دمای قیر در مخلوط آسفالتی، ویسکوزیته آن

به تدریج کاهش یافته و زمانی که دمای قیر به دمای سیال نیوتونی و یا بالاتر از آن می‌رسد، قیر ذوب‌شده به درون ریز- ترک‌ها و ترک‌ها حرکت کرده و آنها را پر کرده، و در نتیجه ترمیم حاصل می‌شود.

با توجه به اهمیت و ارزش بالای راه‌ها، نیاز به نگهداری آنها افزایش می‌یابد. در نتیجه به‌منظور حل مشکلات ناشی از فرایند تعمیر و نگهداری، کاهش هزینه‌ها و همچنین طولانی نمودن عمر روسازی، توسعه آسفالت خودترمیم ضرورت پیدا می‌کند. از این‌رو، در این پژوهش یکی از روش‌های نوین برای خودترمیمی مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به اینکه در اثر پیرشدگی ویسکوزیته قیر افزایش می‌یابد، انتظار می‌رود که پیرشدگی تأثیر قابل توجهی در کارایی ترمیم ایجاد کند. تاکنون، بیشتر پژوهش‌های انجام شده در خصوص توانایی ترمیم القایی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از نمونه‌های ساخته شده با مصالح خام (مصالح پیر نشده) بوده است، این بدان معنی است که قابلیت ترمیم مخلوط‌های مورد آزمایش بالا بوده و این مخلوط‌ها می‌توانند به راحتی از طریق گرمایش به روش تابش امواج الکترومغناطیس ترمیم شوند. در این پژوهش به منظور بررسی تأثیر سطوح مختلف پیرشدگی، ابتدا مخلوط‌های آسفالتی در شرایط آزمایشگاهی در معرض پیرشدگی در زمان‌های مختلف در آزمایشگاه قرار گرفته و سپس قابلیت گرمایش به روش تابش امواج الکترومغناطیس و ترمیم القایی آنها در سطوح مختلف پیرشدگی مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲- پیشینه تحقیق

پژوهشگران معتقدند که روش گرمایش القایی مخلوط‌های آسفالتی به دلیل مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی آن، در مقایسه با سایر روش‌های ترمیم، مانند استفاده از نانوذرات [9] و مواد جوان ساز [10] دارای اهمیت بیشتری است. فرایند گرمایش القایی وابسته به دما است [11]. دمای بالاتر موجب توانایی بیشتر قیر در جاری شدن و پر کردن ترک‌ها می‌شود، که این امر موجب افزایش نرخ ترمیم القایی می‌شود

گرمایش نمونه‌های آسفالتی به روش تابش امواج الکترومغناطیس می‌شود. علاوه بر این، افزایش بیش از ۱۰٪ کربن فعال، موجب افزایش ویسکوزیته و سختی قیر شده، که این امر موجب کارایی کمتر قیر در جاری شدن و پر کردن ترک‌ها می‌شود [19]. در یک پژوهش، نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم نشان داد که افزودن بیش از ۱۰٪ کربن فعال منجر به کاهش نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم (TSR) شده، که این امر تأثیر منفی روی حساسیت رطوبتی نمونه‌های آسفالتی دارد [18].

### ۳- روش تحقیق

پس از ساخت نمونه‌های مخلوط آسفالتی، به منظور اعمال سطوح مختلف پیرشدگی، نمونه‌های ساخته شده در زمان‌های مختلف در گرمخانه نگهداری شدند. در این پژوهش تأثیر سطوح مختلف پیرشدگی به عنوان یک عامل تأثیرگذار در گرمایش به روش تابش امواج الکترومغناطیس و ترمیم القایی مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی قرار گرفت. سپس به منظور بررسی تأثیر سطوح مختلف پیرشدگی روی نرخ گرمایش به روش تابش امواج الکترومغناطیس، نمونه‌های مکعبی شکل ساخته و مورد گرمایش تحت امواج مایکروویو قرار گرفتند. به منظور بررسی میزان ترمیم القایی، ابتدا نمونه‌های آسفالتی تحت آزمایش خمش نیم‌دایره قرار گرفتند و انرژی شکست حاصل از نمونه‌ها محاسبه شد. سپس به منظور ترمیم ترک در سامسونگ ME 341W با فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز و توان خروجی ۱۰۰۰ وات مورد گرمایش قرار گرفتند تا دمای سطحی نمونه‌های آسفالتی به ۹۰-۱۰۰ °C برسد. بعد از گرمایش، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق قرار داده شدند تا دمای آن‌ها به دمای محیط برسد، سپس دوباره تحت آزمایش خمش نیم‌دایره قرار گرفته و انرژی شکست آن‌ها محاسبه شد. به این ترتیب، یک چرخه شکست-ترمیم تکمیل شد. علاوه بر این، به منظور بررسی توانایی ترمیم القایی مخلوط‌های آسفالتی در سطوح مختلف پیرشدگی، آزمایش

[6, 7]. این فرایند در دمای محیط با نرخ کمتر و با کارایی و بهره‌وری پایین‌تری رخ می‌دهد. علاوه بر این، اعمال گرما به صورت مستقیم به مخلوط برای گرم کردن قیر به منظور پر کردن ترک‌ها نیازمند زمان و انرژی قابل توجهی است. دمای بهینه به منظور ترمیم القایی مخلوط‌های آسفالتی بین ۹۰-۱۰۰ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است [12, 13].

مهمترین ویژگی مخلوط آسفالتی تحت تابش امواج الکترومغناطیس، توانایی جذب این امواج است. خرابی‌های موجود در مخلوط‌های آسفالتی شاهد نیز می‌توانند تحت تابش امواج الکترومغناطیس ترمیم شوند [6, 14]. به منظور افزایش توانایی گرمایش و ترمیم القایی مخلوط‌های آسفالتی تحت امواج الکترومغناطیس، محققین انواع مختلفی از مواد رسانای الکتریکی را در مخلوط‌های آسفالتی استفاده کرده‌اند. اضافه کردن مواد رسانای الکتریکی به مخلوط آسفالتی موجب افزایش جذب میدان الکترومغناطیسی شده و باعث افزایش نرخ گرمایش و ترمیم القایی می‌شود. مواد رسانای الکتریکی مورد استفاده در مخلوط‌های آسفالتی شامل مواد رسانای برپایه پودر، فلز و الیاف هستند [6, 14, 15]. استفاده از مواد رسانای بر پایه فلز و الیاف با وجود گرمایش مطلوب، موجب افزایش درصد فضای خالی مخلوط شده که این امر منجر به کاهش دوام مخلوط‌های آسفالتی می‌شود [16]. علاوه بر این، مواد رسانای بر پایه فلز در صورت عدم توزیع یکنواخت در مخلوط موجب ناهمسانی در توزیع دما در نمونه شده و منجر به افزایش خطر پیرشدگی قیر در اطراف ذرات رسانا می‌شوند [17].

افزودن کربن فعال به قیر موجب بهبود مقاومت در برابر پیرشدگی، شیارشدگی، مقاومت مارشال و مقاومت کششی غیرمستقیم در مخلوط‌های آسفالتی می‌شود [18]. علاوه بر این، افزودن کربن فعال موجب افزایش حساسیت دمایی قیر و مخلوط آسفالتی در گرمایش به روش تابش امواج الکترومغناطیس می‌شود [11]. در پژوهشی مقدار بهینه کربن فعال برابر با ۵٪ (درصد وزنی قیر) تعیین شده است [11]. این درحالی است که افزودن ۱۰٪ موجب کاهش میزان

خمش نیم‌دایره‌ای در دماهای میانی و پایین انجام شد. علاوه بر این، تأثیر کربن فعال در خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی و گرمایش نمونه‌های حاوی کربن فعال به روش تابش امواج الکترومغناطیس مورد بررسی قرار گرفت. بعلاوه،

تأثیر پارامترهایی همچون پیرشدگی، طول شیار و دمای آزمایش و تأثیر توأم این پارامترها روی میزان ترمیم القایی مخلوط‌های آسفالتی مورد ارزیابی قرار گرفت. جدول (۱) ساختار کلی این پژوهش را نشان می‌دهد.

جدول ۱. خلاصه برنامه آزمایشگاهی

Aging condition				
Specimens	Mixture ID	Exposure time (days) in an oven at constant temperature (85 °C)	Description	
SCB at 25 °C-(Diameter 150 mm and thickness 57 mm)	A0	0	New paved (unaged)	
	A5	3	Simulating 5 years field aging	
SCB at -20 °C-(Diameter 150 mm and thickness 25 mm)	A10	5	Simulating 10 years field aging	
	A15	7	Simulating 15 years field aging	
	A20	9	Simulating 20 years field aging	
Mechanical properties				
Test	Specimen dimension (mm)	Loading rate	Test temperature	Number of replicates
SCB	Semi-circular - Diameter 150 and thickness 57 mm	0.5 (mm/min)	25 °C	3
SCB	Semi-circular - Diameter 150 and thickness 25 mm	0.6 (mm/min)	-20 °C	3
Microwave heating				
Specimen	Heating source	Heating time	Initial temperature	
Semi-circular-Diameter 150 mm and thickness 57 mm	Microwave	120 s	25 °C	
Semi-circular- Diameter 150 mm and thickness 25 mm	Microwave	90 s	25 °C	
Induced healing				
Test	Heating temperature	Condition (Time/ Temperature)	Initial temperature	
SCB	90-100 °C	24 (h)/25 (°C)	25 °C	
SCB	90-100 °C	24 (h)/25 (°C)	-20 °C	

Table 1. Summary plan of testing



#### ۴- شبیه‌سازی پیرشدگی مخلوط‌های آسفالتی در آزمایشگاه

مطابق با مدل رگرسیونی نشان داده شده در شکل (۱)، می‌توان سطوح مختلف پیرشدگی در پروژه را در سال‌های مختلف عمر بهره‌برداری از روسازی شبیه سازی نمود. با در نظر گرفتن سال‌های مختلف از عمر روسازی (برای مثال صفر، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سال) می‌توان زمان لازم برای نگهداری نمونه‌های آسفالتی در گرمخانه را محاسبه کرد. بنابراین مطابق با مدل رگرسیونی برای صفر (زمان ساخت)، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سال از عمر روسازی نمونه‌های مختلف مخلوط آسفالتی باید به ترتیب صفر، ۳، ۵، ۷ و ۹ روز در گرمخانه تحت دمای ۸۵ °C نگهداری شوند. بنابراین، در این پژوهش A0، A5، A10، A15 و A20 به ترتیب پیرشدگی در صفر (زمان ساخت)، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سال پس از ساخت روسازی را نشان می‌دهند.

شکل ۱. ارتباط بین پیرشدگی صحرائی و آزمایشگاهی مخلوط آسفالت

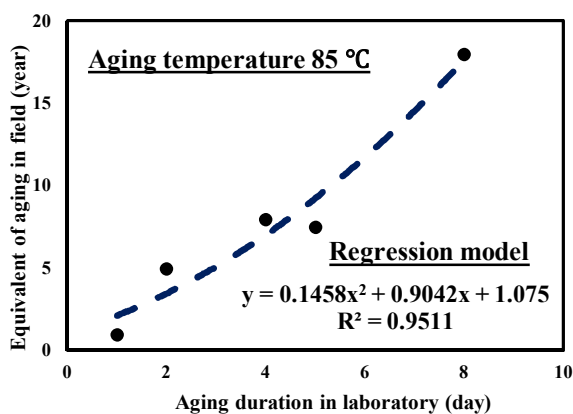


Fig. 1. Correlation between laboratory and field aging.

#### ۵- مواد و مصالح

برای ساخت مخلوط آسفالتی از یک نوع سنگدانه آهکی استفاده شد. دانه‌بندی مورد استفاده، دانه‌بندی پیوسته و با حداکثر اندازه اسمی ۱۲/۵ میلی‌متر (مطابق با استاندارد ASTM D3515-01) بود [24]. مشخصات فیزیکی و شیمیایی سنگدانه مورد استفاده در این پژوهش در جدول (۳) نشان داده شده است. از قیر با درجه نفوذ ۸۵/۱۰۰ در این پژوهش استفاده شد. مشخصات قیر مصرفی در جدول (۴) نشان داده شده است. کربن فعال نیز به عنوان ماده افزودنی در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. جدول (۵) مشخصات

سطوح مختلف پیرشدگی در پروژه تابعی از دما، فشار، زمان و ساختار سنگدانه (تخلخل سنگدانه) است که مخلوط‌های آسفالتی با در معرض قرار گرفتن در شرایط محیطی، سطوح مختلفی از پیرشدگی را تجربه می‌کنند. روند پیرشدگی در این پژوهش، مطابق با مطالعات انجام شده در جدول (۲) در دمای ۸۵ °C انجام شد. به منظور شبیه‌سازی سطوح مختلف پیرشدگی در آزمایشگاه، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش زمان نگهداری نمونه‌های آسفالتی در گرمخانه در دمای ثابت، سطح پیرشدگی آن افزایش می‌یابد. در نتیجه، در دمای ثابت، میزان پیرشدگی نمونه‌ها در گرمخانه در آزمایشگاه می‌تواند به عنوان تابعی از زمان محاسبه شود. در این پژوهش مطابق با شکل (۱)، ارتباط بین پیرشدگی مخلوط آسفالتی در پروژه‌های صحرائی و آزمایشگاه در دمای ۸۵ °C با استفاده از مطالعات انجام شده در جدول (۱) تعیین شد. همان‌گونه که در این شکل نشان داده شده است، افزایش نرخ پیرشدگی مخلوط آسفالتی با افزایش زمان بهره‌برداری (یا زمان در معرض قرارگیری در شرایط آب و هوایی) افزایش می‌یابد. به بیان دیگر شیب منحنی با افزایش زمان نگهداری نمونه‌ها در گرمخانه افزایش می‌یابد. این شرایط مطابق با افزایش سطح پیرشدگی مخلوط آسفالتی در پروژه است که با افزایش زمان خدمت‌دهی و افزایش مدت زمان در معرض قرار گرفتن روسازی در شرایط محیطی، میزان پیرشدگی مخلوط‌های آسفالتی افزایش می‌یابد.

جدول ۲. مطالعات پیشین در زمینه پیرشدگی بلند مدت مخلوط آسفالتی با اعتبار از نتایج واقعی پیرشدگی صحرائی

Laboratory long-term oven aging at constant temperature 85 °C	Representative of filed aging	reference
Duration (days)	Duration (years)	
1	1	[20]
2	5	[21]
4	8	[22]
5	7.5	[23]
8	18	[22]

Table 2. Previous studies on long-term oven aging of asphalt mixtures.

فیزیکی و اجزای تشکیل دهنده کربن فعال مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد  
جدول ۳. مشخصات فیزیکی و شیمیایی سنگدانه مورد استفاده

Physical properties							
Test	Standard method						Test results
Coarse aggregate specific gravity (g/cm <sup>3</sup> )	ASTM C127						2.69
Fine aggregate specific gravity (g/cm <sup>3</sup> )	ASTM C128						2.63
Los Angeles abrasion value (LAV)	ASTM C131						22.2 %
Sodium sulfate soundness (SS)	ASTM C88						2.7 %
Sand equivalent (SE)	ASTM T176						70 %
Chemical composition (%)							
SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	MgO	Na <sub>2</sub> O	Other substances
60.5	1.75	14.59	5.86	2.51	1.45	1.68	11.66

**Table 3.** The physical and chemical properties of the aggregates.

جدول ۴. مشخصات قیر مورد استفاده

Asphalt binder properties			
Softening point (°C)	Flash point (°C)	Fire point (°C)	Ductility at 15 °C (cm)
52	232	320	+100
Asphalt binder compositions (wt %)			
Saturates	Naphthene-aromatics	Polar-aromatics	Asphaltene
18	41	22	19

**Table 4.** General properties of the asphalt binder.

جدول ۵. مشخصات فیزیکی و اجزای شیمیایی تشکیل دهنده کربن فعال مورد استفاده در این تحقیق

Physical characteristics												
Type	Apparent density (g/cm <sup>3</sup> )	Specific surface area (m <sup>2</sup> /g)	Ash mass (%)	Iodine absorption (mg/g)	Methylene blue absorption (mg/g)	Mesh number	PH	Moisture (%)				
Ariko-F1000	0.33-0.50	1050	<5	900	20	200×325	Alkaline	<5				
Chemical compositions (%)												
C	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	Cl	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
95	0.017	0.59	0.18	0.75	0.18	0.075	0.018	1.27	1.84	0.0049	0.0043	0.065

**Table 5.** The physical characteristics and chemical compositions of activated carbon.

### ۱-۵- طرح اختلاط

نمونه‌های حاوی کربن فعال از درصد قیر و سنگدانه مشابه با نمونه شاهد استفاده شد تا تفاوت در درصد قیر باعث تغییر در تفسیر نتایج نشود (تفاوت در عملکرد ترمیم القایی و گرمایش نمونه‌ها به روش تابش امواج الکترومغناطیس). علاوه بر این، به منظور امکان مقایسه تأثیرافزودنی در ویژگی‌های مکانیکی، گرمایش به روش تابش امواج

طرح اختلاط مخلوط آسفالتی بر اساس روش مارشال انجام شد. به منظور مقایسه میزان گرمایش به روش تابش امواج الکترومغناطیس و ترمیم القایی نمونه‌های آسفالتی، ذکر این نکته ضروری است که طرح اختلاط فقط برای نمونه مخلوط‌های شاهد (بدون اصلاح‌کننده) انجام شد و در

### ۱-۶- آزمایش SCB در دمای محیط (۲۵°C)

ترک‌های خستگی یکی از خرابی‌های عمده در روسازی‌های آسفالتی در دمای میانی است. آزمایش SCB آزمایشی است که با عملکرد روسازی‌های انعطاف‌پذیر ارتباط خوبی نشان داده است. مطابق با استاندارد ASTM D8044-16، نمونه‌ها ۳۸ میلی‌متر تهیه شدند و در دمای ۲۵ °C تحت آزمایش قرار گرفتند [25]. سرعت بارگذاری در آزمایش SCB برابر با ۰/۵ میلی‌متر در دقیقه تنظیم شد. بارگذاری نمونه‌ها پس از مشاهده افت ۱۰ درصدی از بیشترین مقاومت نمونه‌ها متوقف شد.

### ۲-۶- آزمایش SCB در سرما (۲۰°C-)

آزمایش SCB در دمای پایین، قابلیت بررسی ترک حرارتی روسازی آسفالتی با استفاده از پارامتر انرژی شکست و از طریق مفاهیم مکانیک شکست الاستیک خطی فراهم می‌کند. انرژی شکست، بر اساس استاندارد AASHTO TP 105-13 تعیین شد [26]. دمای مورد نظر در این آزمایش ۲۰°C- و سرعت بارگذاری برابر با ۰/۶ میلی‌متر در دقیقه بود. طبق تعریف، انرژی شکست ( $G_f$ ) نمونه SCB عبارت است از کار ناشی از شکست ( $W_f$ ) تقسیم بر مساحت فاصله رابط بین محل بارگذاری و نوک ترک قبل از اعمال بارگذاری ( $A_{lig}$ ) که بر اساس رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$G_f = \frac{W_f}{A_{lig}} \quad (1)$$

### ۳-۶- تهیه نمونه‌ها و اعمال گرمایش

برای بررسی قابلیت جذب گرما، نمونه‌های آسفالتی مطابق با روش مارشال ساخته شدند. سپس از نمونه‌های استوانه‌ای ساخته شده در سطوح مختلف پیرشدگی، با استفاده از اره مخصوص سنگ‌بری نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۶۰×۶۰ میلی‌متر تهیه شد. همان‌گونه که در شکل (۲) نشان داده شده است، تابش امواج مایکروویو روی نمونه‌های مکعبی در سطوح مختلف پیرشدگی به مدت ۱۲۰ ثانیه در شش چرخه‌ی ۲۰ ثانیه‌ای اعمال شد.

الکترومغناطیس، ترمیم القایی مخلوط‌های آسفالتی و همچنین کاهش تعداد نمونه‌های آزمایشگاهی از درصد قیر بهینه یکسان در نمونه‌های شاهد و نمونه‌های اصلاح شده با کربن فعال استفاده شد. با این حال، ویژگی‌های حجمی (مانند درصد فضای خالی) مخلوط‌های آسفالتی شاهد و اصلاح‌شده تعیین و مقایسه شدند. نتایج نشان داد که ویژگی‌های حجمی هر دو نمونه شاهد و اصلاح‌شده تقریباً یکسان بودند، که این امر به علت مقدار کم کربن فعال در نمونه‌های اصلاح‌شده است. به منظور تعیین درصد قیر بهینه، نمونه‌هایی با ۴، ۵، ۵/۵ و ۶ درصد قیر (درصد وزنی مخلوط آسفالتی) تهیه شدند. مطابق با طرح اختلاط مارشال، با اعمال ۷۵ ضربه در هر طرف نمونه و در نظر گرفتن بار ترافیکی سنگین، درصد قیر بهینه ۴/۷ درصد بدست آمد. لازم به ذکر است که سایر پارامترهای مخلوط آسفالتی به- ازای این درصد قیر مورد کنترل قرار گرفتند که در محدوده مجاز آیین‌نامه بودند. علاوه براین، به منظور تهیه نمونه‌های اصلاح‌شده با کربن فعال، از مخلوط‌کن با سرعت برشی بالا استفاده شد. مطابق با پژوهش محمد کریمی و همکاران [11]، مقدار کربن فعال شده مناسب برای اصلاح قیر برابر با ۵٪ (درصد وزنی قیر) است، که در این پژوهش نیز همین مقدار انتخاب شد. علاوه براین، اختلاط قیر با کربن فعال در دمای ۱۵۰ °C به مدت ۳۰ دقیقه و با سرعت چرخشی ۴۰۰۰ دور در دقیقه انجام شد.

### ۶- آزمایش‌ها

آزمایش‌های موجود در این پژوهش شامل بررسی قابلیت گرمایش نمونه‌های آسفالتی به روش تابش امواج الکترومغناطیس و ترمیم القایی آن‌ها در سطوح مختلف پیرشدگی است. مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده در این پژوهش، با توجه به نوع قیر (نمونه‌های حاوی قیر خالص و قیر اصلاح‌شده با کربن فعال) و سطح پیرشدگی (پیرشده و پیرنشده) متفاوت هستند که مشروح آن‌ها در ادامه آمده است.



ساعت در دمای اتاق مورد استراحت قرار گرفت. سپس به منظور ترمیم ترک‌های ایجاد شده در اثر شکست، نمونه‌های آسفالتی به مدت دو دقیقه درون مایکروویو گرم شدند. در نهایت پس از ترمیم، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق نگه داشته شدند. سپس نمونه‌های ترمیم یافته دوباره تحت آزمایش SCB قرار گرفته و انرژی شکست آنها محاسبه شد. در این پژوهش شاخص ترمیم القایی ( $HI$ ) که نسبت مقدار انرژی شکست نمونه‌ی ترمیم شده ( $E_i$ ) به مقدار انرژی شکست نمونه‌ی اصلی ( $E_0$ ) است، مطابق با رابطه (۲) تعیین شد.

$$HI = \frac{E_i}{E_0} \quad (2)$$

به منظور ترمیم القایی نمونه‌های SCB در دمای پایین، ابتدا نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در دمای  $20^{\circ}\text{C}$  در فریزر نگهداری شدند. سپس بلافاصله از درون فریزر خارج شده و تحت شرایط آزمایش تا رسیدن به شکست بارگذاری شدند. سپس مقدار انرژی شکست آنها محاسبه شد ( $E_0$ ). پس از آن نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق مورد استراحت قرار گرفتند تا سطح نمونه‌ها کاملاً خشک شود. سپس مطابق با روش اشاره‌شده در بالا، نمونه‌ها به مدت ۹۰ ثانیه درون مایکروویو مورد گرمایش قرار گرفته و پس از استراحت به مدت ۲۴ ساعت، دوباره تحت بارگذاری قرار داده شدند. شاخص ترمیم القایی نیز برای نمونه‌های SCB در دمای  $20^{\circ}\text{C}$  مطابق با رابطه (۲) محاسبه شد. شکل (۳) به صورت شماتیک فرایند ترمیم القایی نمونه‌های SCB در سرما (در دمای  $20^{\circ}\text{C}$ ) را نشان می‌دهد.

شکل ۲. گرمایش نمونه‌ها از طریق تابش امواج مایکروویو

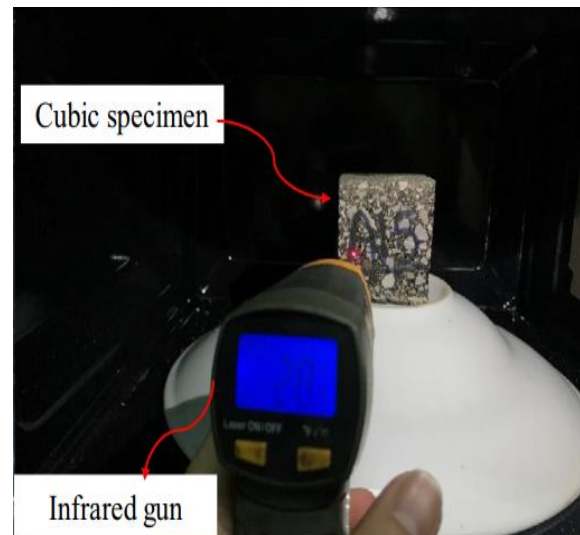


Fig. 2. Heating of specimen under microwave radiation.

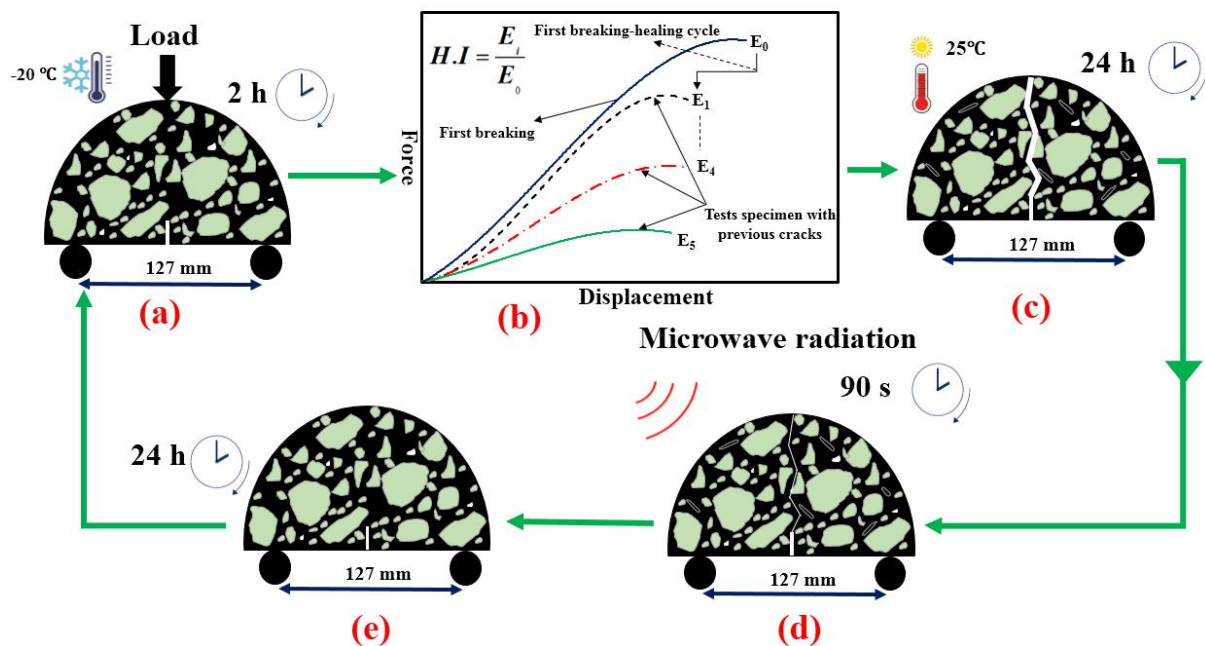
#### ۶-۴- زمان مورد نیاز برای گرمایش نمونه‌های SCB به روش تابش امواج الکترومغناطیس

به منظور دستیابی به بیشترین نرخ ترمیم القایی، نمونه‌های مختلف در مدت زمان مشخصی تحت گرمایش قرار داده شدند. به این ترتیب که، هر یک از نمونه‌های آسفالتی درون مایکروویو قرار داده شده و به مدت ۲۰ ثانیه تحت تابش مایکروویو قرار گرفتند. سپس از مایکروویو خارج شده و دمای سطح آنها توسط دماسنج لیزری اندازه‌گیری شد. دمای هشت نقطه از سطح نمونه به صورت تصادفی اندازه‌گیری و میانگین آنها محاسبه شد. زمان بهینه برای ترمیم القایی نمونه‌های مخلوط آسفالتی زمانی بود که میانگین دمای سطحی نمونه‌های مخلوط آسفالتی به  $90^{\circ}\text{C}$  -  $100^{\circ}\text{C}$  می‌رسید.

#### ۶-۵- فرایند ترمیم القایی

ترمیم القایی نمونه‌های SCB در دمای  $25^{\circ}\text{C}$  مطابق روش زیر انجام شد. پس از آماده شدن نمونه‌ها در دمای آزمایش به مدت دو ساعت، نمونه تحت شرایط آزمایش تا رسیدن به شکست بارگذاری شد و سپس مقدار انرژی شکست آن محاسبه شد ( $E_0$ ). پس از آن، نمونه مورد نظر به مدت ۲

شکل ۳. فرایند ترمیم القایی نمونه های SCB در سرما (۲۰- °C): (الف) بارگذاری نمونه تا رسیدن به شکست، (ب) نمودار نیرو-جابجایی جهت تعیین انرژی شکست، (پ) استراحت نمونه به منظور خشک کردن سطح نمونه، (ت) گرمایی القایی درون مایکروویو، (ث) استراحت نمونه به منظور خنک شدن آن برای اعمال چرخه بعدی شکست-ترمیم



**Fig. 3.** Induced healing process of SCB test samples at -20 °C: (a) loading specimen until failure; (b) force-displacement obtain from broken specimen; (c) relaxation of specimen to dry the moisture of specimen; (d) induced-healing under microwave radiation; (e) relaxation to cool down and get ready for the next breaking-healing cycle.

دمای ۲۰- °C نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که افزودن کربن فعال به قیر منجر به افزایش انرژی شکست نمونه‌های آسفالتی در دمای پایین شده است. انرژی شکست بیشتر به دلیل انقباض مخلوط‌های آسفالتی در دمای پایین سطح تنش بیشتری را ایجاد می‌کند. بنابراین انتظار می‌رود نمونه‌های مخلوط آسفالتی اصلاح شده با کربن فعال به علت افزایش انرژی شکست، عملکرد بهتری در برابر ترک خوردگی در دمای پایین از خود نشان دهند.

شکل ۴. تاثیر کربن فعال در نیرو در لحظه شکست (مقاومت)

## ۷- نتایج و بحث

### ۷-۱- تاثیر کربن فعال در خصوصیات مکانیکی

شکل (۴) مقدار نیرو در لحظه شکست (مقاومت نمونه) را برای نمونه‌های SCB در دمای ۲۵ °C نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده نشان داد که در آزمایش SCB با طول شیارهای مختلف، نمونه‌های اصلاح شده با کربن فعال نیروی بیشتری را در مقایسه با نمونه‌های شاهد در لحظه شکست تحمل می‌کنند. در نمونه اصلاح شده با کربن فعال با طول شیار ۲۵ میلی‌متر، نیرو در لحظه شکست ۲۳ درصد بیشتر از نمونه شاهد بود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که افزودن کربن فعال به قیر نه تنها موجب کاهش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در لحظه شکست نمی‌شود، بلکه می‌تواند موجب افزایش مقاومت مخلوط نیز در برابر شکست شود. علاوه بر این، شکل (۵) تاثیر کربن فعال را در انرژی شکست نمونه‌های SCB

ترتیب به مدت زمان ۱۲۰ و ۹۰ ثانیه درون مایکروویو مورد گرمایش به روش تابش امواج الکترومغناطیس قرار گیرند.

شکل ۶. زمان مورد نیاز برای ترمیم نمونه‌های SCB درون مایکروویو (الف) ۲۵ °C، (ب) ۲۰ °C-

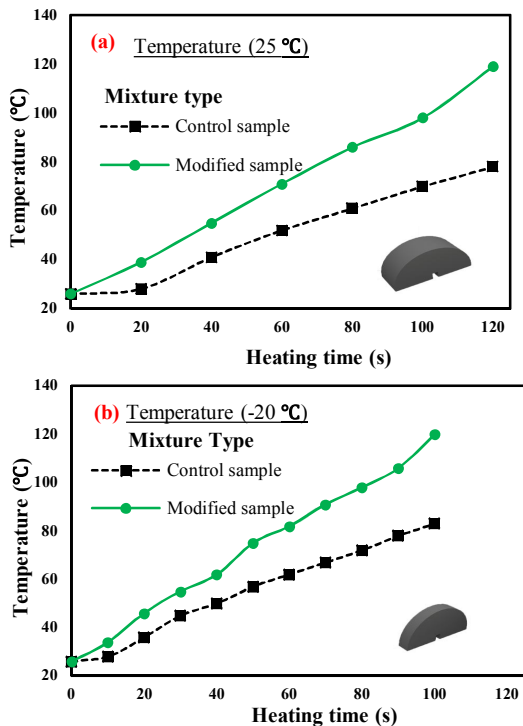


Fig. 6. Required time for heating in microwave in testing SCB samples at: (a) 25 °C; (b) -20 °C.

### ۳-۷- تأثیر پیرشدگی در نرخ گرمایش نمونه‌ها به روش تابش امواج الکترومغناطیس

شکل (۷) تأثیر سطوح مختلف پیرشدگی را روی نرخ گرمایش نمونه‌های آسفالتی به روش تابش امواج الکترومغناطیس نشان می‌دهد. با برون‌یابی نتایج دما بر حسب زمان، نرخ گرمایش نمونه‌های آسفالتی به روش تابش امواج الکترومغناطیس در سطوح مختلف پیرشدگی تعیین شد. مطابق با شکل (۷ الف)، نرخ گرمایش نمونه‌های اصلاح‌شده با کربن فعال به روش تابش امواج الکترومغناطیس در سطوح مختلف پیرشدگی، A0، A5، A10، A15 و A20 به ترتیب برابر با ۱/۰۲، ۰/۹۲، ۰/۸۳، ۰/۷۹ و ۰/۷۰ درجه سانتی‌گراد بر ثانیه حاصل شد. این درحالی است که نرخ گرمایش نمونه‌های شاهد به روش تابش امواج الکترومغناطیس به ترتیب برابر با ۰/۴۷، ۰/۴۲، ۰/۴۰، ۰/۳۶ و ۰/۳۳ درجه سانتی‌گراد بر

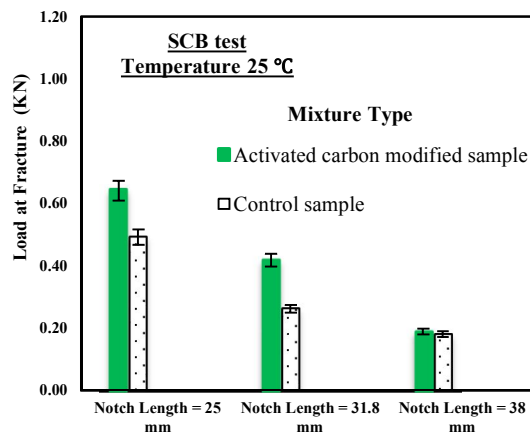


Fig. 4. Effects of activated carbon on load at fracture (strength).

شکل ۵. تأثیر کربن فعال در انرژی شکست

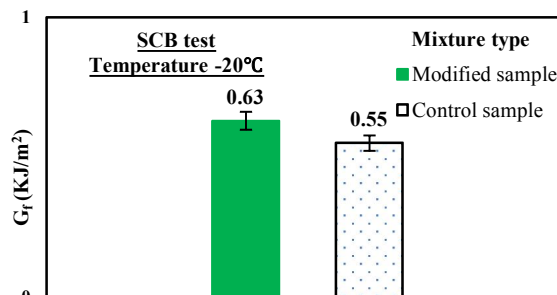


Fig. 5. Effect of activated carbon on fracture energy.

### ۲-۷- تعیین زمان مورد نیاز جهت ترمیم القایی

شکل (۶) زمان مورد نیاز برای گرمایش نمونه‌های SCB را درون مایکروویو نشان می‌دهد. به منظور درک اختلاف دما میان نمونه‌های اصلاح‌شده و نمونه‌های شاهد، نمونه‌های پیرنشده شاهد و اصلاح‌شده درون مایکروویو مورد گرمایش قرار گرفتند. با تعیین زمان مورد نیاز برای گرمایش نمونه‌های آسفالتی در شرایط پیر نشده، تمامی نمونه‌های مخلوط آسفالتی در تمام سطوح مختلف پیرشدگی در همان زمان تعیین شده مورد ترمیم القایی قرار گرفتند. همان‌گونه که در شکل (۶) نشان داده شده، نمونه‌های SCB اصلاح‌شده با کربن فعال در دمای میانی و پایین به ترتیب پس از مدت زمان ۱۲۰ و ۹۰ ثانیه دمای سطح آنها به ۹۰-۱۰۰ °C می‌رسند (دمای بهینه ترمیم القایی). بنابراین، به منظور ارزیابی ترمیم القایی نمونه‌های SCB در دمای میانی و پایین می‌بایست به

در دماهای میانی و پایین تعیین شده‌اند را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که توانایی ترمیم ترک‌ها به تدریج با افزایش سطح پیرشدگی کاهش می‌یابد. به عنوان نمونه، مطابق با شکل (۸ الف) شاخص ترمیم القایی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با کربن فعال از طریق آزمایش SCB با طول شیار ۲۵ میلی‌متر در دمای میانی تحت سطوح مختلف پیرشدگی A0، A5، A10، A15 و A20 به ترتیب برابر با ۵۸، ۵۲، ۴۹، ۴۵ و ۴۳ درصد حاصل شد. به عبارت دیگر می‌توان اذعان داشت که توانایی قیر برای جاری شدن و پر کردن ترک‌ها با افزایش سطح پیرشدگی مخلوط کاهش می‌یابد. علاوه بر این، همان‌گونه که در بند قبل شرح داده شد، افزایش سطح پیرشدگی منجر به کاهش نرخ گرمایش نمونه‌ها به روش تابش امواج الکترومغناطیس شده، که این امر موجب کاهش توانایی قیر در ترمیم ترک‌ها می‌شود و در نتیجه شاخص ترمیم القایی کاهش می‌یابد.

شکل ۸ شاخص ترمیم القایی در سطوح مختلف پیرشدگی از طریق آزمایش SCB در دمای الف) ۲۵ °C، ب) ۲۰ °C

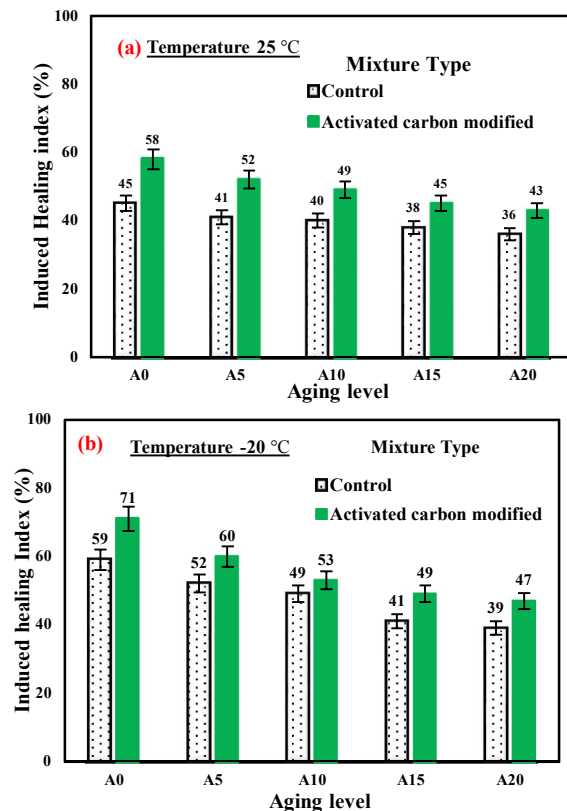


Fig. 8. Effects of aging on induced healing index in SCB samples at: (a) 25 °C, (b) -20 °C.

ثانیه بود شکل (۷ ب). نتایج آزمایشگاهی نشان داد که نرخ گرمایش نمونه‌های اصلاح‌شده با کربن فعال به روش تابش امواج الکترومغناطیس بیشتر از نمونه‌های شاهد بود. می‌توان نتیجه گرفت که افزودن کربن فعال به قیر باعث افزایش رسانایی گرمایی و رسانایی الکتریکی شده و در نتیجه موجب افزایش نرخ گرمایش نمونه‌ها به روش تابش امواج الکترومغناطیس می‌شود. علاوه بر این، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش سطح پیرشدگی منجر به کاهش نرخ گرمایش نمونه‌ها به روش تابش امواج الکترومغناطیس می‌شود. بنابراین، می‌توان انتظار داشت که نمونه‌های پیر شده به دلیل کاهش نرخ گرمایشی شاخص ترمیم القایی کمتری در مقایسه با نمونه‌های پیر نشده داشته باشند.

شکل ۷. تاثیر سطوح مختلف پیرشدگی روی نرخ گرمایش به روش تابش امواج الکترومغناطیس الف) نمونه‌های شاهد، ب) نمونه‌های اصلاح‌شده با کربن فعال

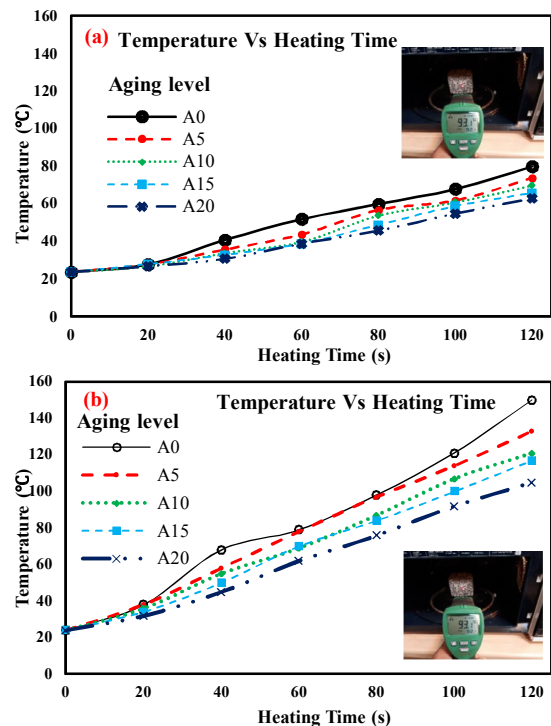


Fig. 7. Effects aging on heating rate: (a) control samples; (b) activated carbon modified samples.

#### ۷-۴- تأثیر پیرشدگی در ترمیم القایی

شکل (۸) مقادیر شاخص ترمیم القایی مخلوط‌های آسفالتی تحت سطوح مختلف پیرشدگی را که با انجام آزمایش SCB

## ۵-۷- تأثیر طول شیار در ترمیم القایی

شکل ۱۰. شماتیک تشریحی تأثیر طول ترک در فرایند ترمیم القایی در نمونه ترک خورده

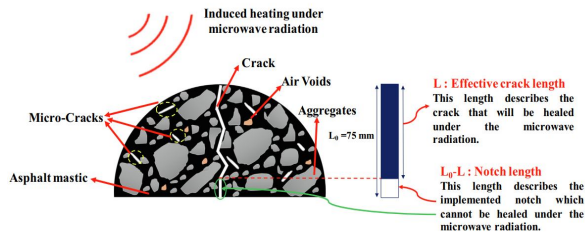


Fig. 10. Schematic description for the effects of crack length on induced healing properties of samples.

## ۶-۷- تأثیر توأم پیرشدگی و طول شیار در ترمیم

## القایی

شکل (۱۱) تأثیر توأم پیرشدگی و طول شیار را روی شاخص ترمیم القایی مخلوط‌های آسفالتی نشان می‌دهد. مطابق با این شکل، شاخص ترمیم القایی با افزایش طول شیار و افزایش سطح پیرشدگی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهند که تأثیر مخرب طول شیار با افزایش سطح پیرشدگی افزایش بیشتری پیدا خواهد کرد. به عنوان نمونه، کاهش شاخص ترمیم القایی برای نمونه‌های اصلاح‌شده با کربن فعال در شرایط پیر نشده (A0)، زمانی که طول شیار در نمونه SCB از ۲۵ به ۳۱/۸ و ۳۸ میلی‌متر افزایش پیدا می‌کند به ترتیب ۱۵ و ۲۹ درصد بود، در حالیکه این مقدار برای نمونه A20، به مقدار ۲۸ و ۳۵ درصد افزایش پیدا کرد (شکل ۱۱ ب). این نتایج نشان می‌دهد که نه تنها گسترش ترک در روسازی منجر به کاهش بهره‌وری ترمیم القایی می‌شود، بلکه پدیده‌ی پیرشدگی خود می‌تواند موجب گسترش و تشدید ترک شود. توجه به این مسئله می‌تواند در بهینه‌سازی و ترمیم به موقع خرابی‌های ایجاد شده در روسازی و همچنین در برنامه‌های مدیریت تعمیر و نگهداری روسازی مؤثر واقع شود.

شکل (۹) تأثیر طول شیار روی شاخص ترمیم القایی نمونه‌های آسفالتی در شرایط پیر نشده (A0) را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل (۹) نشان داده شده است، طول شیار ایجاد شده در آزمایش SCB عریض بوده بطوریکه نمی‌تواند از طریق گرمایش به روش تابش امواج الکترومغناطیس ترمیم شود (در شکل ۱۰ در  $L_0-L$ ). بر اساس تئوری مکانیک شکست، طول شیار ایجاد شده در آزمایش SCB می‌تواند در مقاومت (حداکثر نیروی ایجاد شده در آزمایش) و انرژی شکست نمونه‌ها تأثیر بگذارد. از نتایج به دست آمده در شکل (۹) می‌توان استنباط کرد که طول شیار ایجاد شده در نمونه، نه تنها روی انرژی شکست نمونه تأثیرگذار بوده، بلکه تأثیر قابل توجهی در شاخص ترمیم القایی دارد. کاهش طول شیار ایجاد شده در نمونه موجب افزایش طول مؤثر ترک شده (در شکل ۱۰)، که می‌تواند امواج الکترومغناطیس را جذب کرده و ترک‌ها را ترمیم کند. علاوه بر این، نتایج نشان داد که شاخص ترمیم القایی با افزایش طول شیار کاهش می‌یابد. به عنوان نمونه، شاخص ترمیم القایی در نمونه‌های اصلاح‌شده با کربن فعال، با افزایش طول شیار از ۲۵ به ۳۱/۸ و ۳۸ میلی‌متر به ترتیب ۱۵ و ۲۹ درصد کاهش یافت. می‌توان نتیجه گرفت که در اثر افزایش طول شیار، طول ترمیم مؤثر کاهش یافته و مساحتی که برای ترمیم تحت امواج مایکروویو قرار گرفته، امواج کمتری را جذب می‌کنند.

شکل ۹. تأثیر طول شیار در نمونه‌های SCB روی شاخص ترمیم القایی

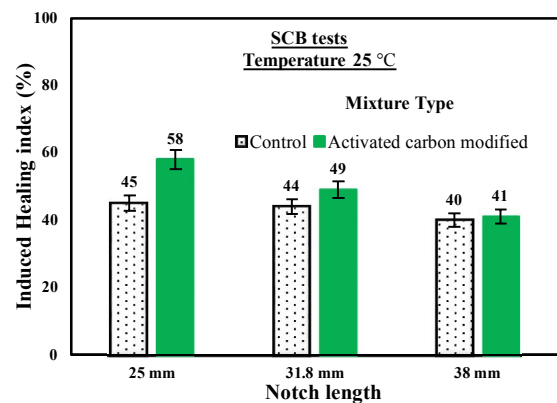
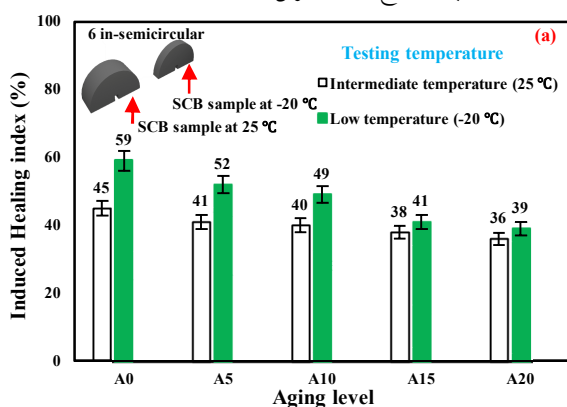


Fig. 9. Effects of notch length on induced healing Index.

بارگذاری شده‌اند را می‌توان به خرابی‌ها و تغییر شکل‌های ماندگار روسازی در دمای میانی نسبت داد. می‌توان نتیجه گرفت که ترمیم القایی فقط می‌تواند ترک‌های روسازی را ترمیم کند و قادر به ترمیم تغییر شکل‌های دائمی نیست. می‌توان اذعان داشت که در دمای میانی، ریزترک‌ها به علت تغییر شکل‌های دائمی و چرخش سنگدانه‌ها در مخلوط‌های آسفالتی ایجاد می‌شوند. در نتیجه، شدت ترک خوردگی در دمای میانی بیشتر از دمای پایین است. بنابراین، می‌توان انتظار داشت که شاخص ترمیم القایی در نمونه‌های شکسته شده در دمای پایین بیش از نمونه‌های شکسته شده در دمای میانی باشد. علاوه بر این، از نتایج می‌توان استنباط کرد که تأثیر پیرشدگی روی نمونه‌های شکسته شده در دمای پایین بیشتر از نمونه‌های شکسته شده در دمای میانی است. به عنوان نمونه، کاهش شاخص ترمیم القایی نمونه‌های شاهد و اصلاح‌شده (A0) که در دمای پایین شکسته شده است، ۳۳ درصد کمتر (مقایسه ۵۹ و ۳۹؛ مقایسه ۷۱ و ۴۷) از نمونه A20 است. این درحالی است که این شاخص به ترتیب برای نمونه‌های شاهد و اصلاح‌شده با کربن فعال که در دمای میانی شکسته شده‌اند به ترتیب ۲۰ (مقایسه ۴۵ و ۳۶) و ۲۵ (مقایسه ۵۸ و ۴۳) درصد کمتر است.

شکل ۱۲. تأثیر توأم دمای آزمایش و پیرشدگی روی شاخص ترمیم القایی (الف) شاهد؛ (ب) اصلاح شده با کربن فعال



شکل ۱۱. تأثیر توأم پیرشدگی و طول شیار روی شاخص ترمیم القایی در نمونه‌های: (الف) شاهد؛ (ب) اصلاح شده با کربن فعال

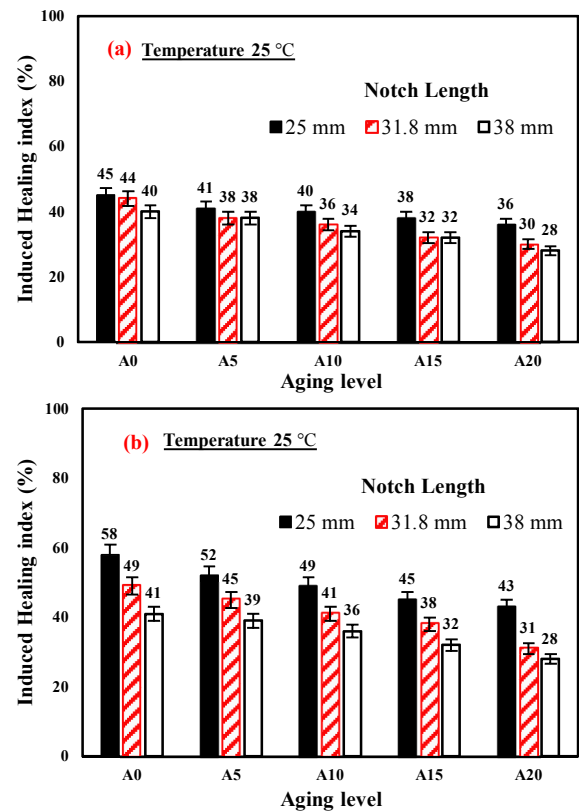


Fig. 11. Combination effects of aging and notch length on induced healing index of SCB samples at 25 °C: (a) control samples; (b) activated carbon modified samples.

## ۷-۷- تأثیر توأم دمای آزمایش و پیرشدگی روی شاخص ترمیم القایی

به منظور بررسی دمای آزمایش در شاخص ترمیم القایی، نتایج آزمایش SCB در دماهای ۲۵ °C و ۲۰ °C- مورد ارزیابی قرار گرفتند. شکل (۱۲) تأثیر دمای آزمایش را روی شاخص ترمیم القایی مخلوط‌های آسفالتی در سطوح مختلف پیرشدگی نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که شاخص ترمیم القایی نمونه‌های مخلوط آسفالتی در تمام سطوح پیرشدگی در دمای پایین بیشتر از دمای میانی است. به عنوان مثال، مطابق با شکل (۱۲) (ب) شاخص ترمیم القایی نمونه‌های آسفالتی در سطوح مختلف پیرشدگی A15، A10، A5، A0 و A20 در دمای پایین به ترتیب برابر است با ۷۱، ۶۰، ۵۳، ۴۹ و ۴۷ درصد؛ درحالی‌که این شاخص در دمای میانی به ترتیب برابر با ۵۸، ۵۲، ۴۹، ۴۵، ۴۳ درصد بود. شاخص ترمیم القایی پایین‌تر مخلوط‌های آسفالتی که در دمای میانی



خواهد کرد.

۵) شاخص ترمیم القایی نمونه‌های مخلوط آسفالتی در تمام سطوح پیرشدگی در دمای پایین بیشتر از دمای میانی بود. این امر را می‌توان به سطح خرابی کمتر (مقدار ریز ترک‌های کمتر) و عرض کمتر ترک‌ها در دمای پایین نسبت داد.

## ۹- مراجع

- [1] Xu, S., García, A., Su, J., Liu, Q., Tabaković, A., and Schlangen, E. 2018. Self-Healing Asphalt Review: From Idea to Practice. *Advanced Materials Interfaces*, 5(17), 1800536.
- [2] Tabaković, A. and E. Schlangen, 2015. Self-healing technology for asphalt pavements, in *Self-healing Materials*. Springer. 285-306.
- [3] Norambuena-Contreras, J. and A. Garcia, 2016. Self-healing of asphalt mixture by microwave and induction heating. *Materials & Design*, 106, 404-414.
- [4] García, A., Schlangen, E., van de Ven, M., and Liu, Q. 2012. A simple model to define induction heating in asphalt mastic. *Construction and Building Materials*, 31, 38-46.
- [5] Liu, K., Dai, D., Fu, C., Li, W., and Li, S. 2020. Induction heating of asphalt mixtures with waste steel shavings. *Construction and Building Materials*, 234, 117368.
- [6] Amani, S., Kavussi, A., & Karimi, M. M. 2020. Effects of aging level on induced heating-healing properties of asphalt mixes. *Construction and Building Materials*, 263, 120105.
- [7] Gómez-Meijide, B., Ajam, H., Lastra-González, P., and Garcia, A. 2016. Effect of air voids content on asphalt self-healing via induction and infrared heating. *Construction and Building Materials*, 126, 957-966.
- [8] Ajam, H., Lastra-González, P., Gómez-Meijide, B., Airey, G., and Garcia, A. 2017. Self-healing of dense asphalt concrete by two different approaches: electromagnetic induction and infrared radiation. *Journal of Testing and Evaluation*, 45(6), 1933-1940.
- [9] Tabatabaee, N. and M.H. Shafiee. Effect of organoclay modified binders on fatigue performance. in 7th RILEM International

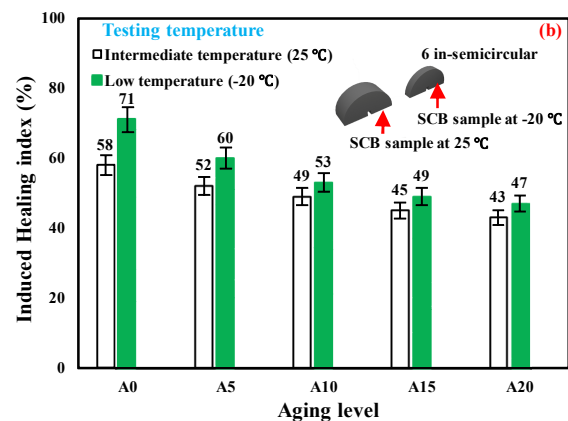


Fig. 12. Combination effects of testing temperature and aging level on induced healing index: (a) control samples; (b) activated carbon modified samples.

## ۸- نتیجه گیری

با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش نتیجه‌گیری‌های زیر حاصل شد:

- (۱) نتایج آزمایش‌های مکانیکی نشان داد که افزودن کربن فعال به قیر نه تنها موجب کاهش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی نمی‌شود بلکه می‌تواند موجب افزایش مقاومت آن‌ها در برابر ترک خوردگی نیز شود.
- (۲) افزایش سطح پیرشدگی مخلوط‌های آسفالتی منجر به کاهش نرخ گرمایش مخلوط‌های آسفالتی به روش تابش امواج الکترومغناطیس می‌شود. در نتیجه افزایش سطح پیرشدگی موجب کاهش شاخص ترمیم القایی مخلوط‌های آسفالتی می‌شود.
- (۳) نمونه‌های مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با کربن فعال نسبت به نمونه‌های شاهد به علت نرخ گرمایش بیشتر موجب افزایش توانایی قیر در جاری شدن و پر کردن ترک‌های مخلوط آسفالتی شده و در نتیجه شاخص ترمیم القایی بیشتری را نشان می‌دهند.
- (۴) با افزایش طول شیار شاخص ترمیم القایی کاهش می‌یابد. کاهش شاخص ترمیم القایی در اثر افزایش طول شیار را می‌توان به کاهش طول ترمیم مؤثر و مساحتی که برای ترمیم تحت امواج الکترومغناطیس (امواج میکروویو) قرار می‌گیرد، نسبت داد. علاوه براین، تأثیر مخرب طول شیار با افزایش سطح پیرشدگی افزایش بیشتری پیدا

- modification. *Grđevinar*, 2017. 69(03.): pp. 215-220
- [20] Islam, M.R., M.I. Hossain, and R.A. Tarefder, A study of asphalt aging using Indirect Tensile Strength test. *Construction and Building Materials*, 2015. 95: p. 218-223.
- [21] Romero, P. and R. Roque, Evaluation of Long-Term Oven Aging of Asphalt Mixtures (AASHTO PP2-95) on Superpave Thermal Cracking Performance Predictions, in *Progress of Superpave (Superior Performing Asphalt Pavement): Evaluation and Implementation*. 1997, ASTM International.
- [22] Bell, C.A., A.J. Wieder, and M.J. Fellin, Laboratory aging of asphalt-aggregate mixtures: Field validation. 1994.
- [23] AASHTO, P., Standard practice for accelerated aging of asphalt binder using a pressurized aging vessel (PAV). American Association of State Highway Transportation Officials, 2009.
- [24] ASTM D3515-01, Standard Specification for Hot-Mixed, Hot-Laid Bituminous Paving Mixtures (Withdrawn 2009), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2001, www.astm.org
- [25] ASTM D8044-16, Standard Test Method for Evaluation of Asphalt Mixture Cracking Resistance using the Semi-Circular Bend Test (SCB) at Intermediate Temperatures, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- [26] AASHTO, T. (2013). 105-13. Standard Method of Test for Determining the Fracture Energy of Asphalt Mixtures Using the Semicircular Bend Geometry (SCB), American Association of State and Highway Transportation Officials.
- Conference on Cracking in Pavements. 2012. Springer.
- [10] Al-Mansoori, T., Micaelo, R., Artamendi, I., Norambuena-Contreras, J., and Garcia, A. 2017. Microcapsules for self-healing of asphalt mixture without compromising mechanical performance. *Construction and Building Materials*, 155, 1091-1100.
- [11] Karimi, M. M., Jahanbakhsh, H., Jahangiri, B., and Nejad, F. M. 2018. Induced heating-healing characterization of activated carbon modified asphalt concrete under microwave radiation. *Construction and Building Materials*, 178, 254-271.
- [12] García, A., Norambuena-Contreras, J., Bueno, M., and Partl, M. N. 2014. Influence of steel wool fibers on the mechanical, thermal, and healing properties of dense asphalt concrete. *Journal of Testing and Evaluation*, 42(5), 1107-1118.
- [14] Wang, Z., Q. Dai, and X. Yang, 2016. Integrated computational-experimental approach for evaluating recovered fracture strength after induction healing of asphalt concrete beam samples. *Construction and Building Materials*, 106: p. 700-710.
- [15] Jeoffroy, E., Bouville, F., Bueno, M., Studart, A. R., and Partl, M. N. 2018. Iron-based particles for the magnetically-triggered crack healing of bituminous materials. *Construction and Building Materials*, 164, 775-782.
- [16] Liu, Z., Luo, S., Wang, Y., and Chen, H. 2019. Induction Heating and Fatigue-Damage Induction Healing of Steel Fiber-Reinforced Asphalt Mixture. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(9), 04019180.
- [17] Karimi, M. M., Darabi, M. K., Jahanbakhsh, H., Jahangiri, B., and Rushing, J. F. 2019. Effect of steel wool fibers on mechanical and induction heating response of conductive asphalt concrete. *International Journal of Pavement Engineering*, 1-14.
- [18] Seyrek, E. Ş., Yalçın, E., Yılmaz, M., Kök, B. V., and Arslanoğlu, H. (2020). Effect of activated carbon obtained from vinasse and marc on the rheological and mechanical characteristics of the bitumen binders and hot mix asphalts. *Construction and Building Materials*, 240, 117921.
- [19] Bostancıoğlu, M. and Ş. Oruç, Optimizing activated carbon size and ratio in bitumen



# Evaluation of Induced Healing of Laboratory Aged Mixes Based on Semi-Circular Bending Test Results

Saeed Amani<sup>1</sup>, Amir Kavussi<sup>2\*</sup>, Mohammad M.karimi<sup>3</sup>

1 M.Sc. Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2 Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3 Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Kavussia@modares.ac.ir

## Abstract

Aging in asphalt pavements results in reduced serviceability and flexibility of pavements. Aging is not commonly considered as distress, but it substantially affects the rate of evolution of various distresses. One of the common distresses observed in aged asphalt pavements is cracking. If cracks/micro-cracks are healed during their initial formation, the service life of the pavement will be increased. Otherwise, there will be the risk of crack propagation that results in more cracking and loss of pavement strength. It is well known that asphalt mixes have capability of self-healing their cracks/micro-cracks when they are exposed to high temperatures. Cracks/micro-cracks in asphalt mixes can be healed through an induced healing process. Induced healing of asphalt mixes by applying external electromagnetic radiation is an innovative technique to repair cracks/micro-cracks. Applying external energy through electromagnetic radiation increases the temperature of the asphalt binder in mixes, allowing it to move and fill the cracks/micro-cracks. Flowing and crack filling of asphalt binder play a significant role in induced healing characteristics of mixes. As temperature of the asphalt binder is increased, its viscosity will be decreased drastically. When asphalt binder gets to Newtonian fluid temperature or higher, the melted binder moves inside the cracks and micro-cracks and subsequently, the cracks will be healed. The aim of this research was to evaluate the effects of different aging levels on induced heating-healing of asphalt mixes. In order to impose different aging levels, asphalt mixes were aged in oven for 3, 5, 7 and 9 days at 85 °C. Activated carbon was used as an asphalt binder modifier. In addition, effects of activated carbon on mechanical properties and microwave heating rate of mixes were determined. Results indicated that activated carbon, as a powder-based additive, improves electrical conductivity, induced heating-healing rate of asphalt mixes. In addition, it was shown that aging phenomenon in asphalt mixes decreases their heating rate, which was more pronounced in higher aging level. Lower heating rate of asphalt mixes resulted in lower efficiency of induced healing of mixes. For evaluating healing capability of mixes that were subjected to different aging levels, semicircular bending tests was conducted at intermediate and low temperatures. It presented that induced healing efficiency of mixes decreased as the aging level and the notch length in semicircular bending specimens were increased. The adverse effects of aging on induced healing process can be attributed to increased viscosity of the asphalt binder in mixes, which limits moving capability of melted asphalt binders to move through damages and properly heal the cracks. Moreover, it resulted that, lower heating rate of aged mixes can be considered as another reason of reduction in induced healing efficiency. The results indicated that increased notch lengths not only affects load at fracture and fracture energy of mixes, but also it plays a significant role in induced healing efficiency of mixes. For further evaluation of the healing ability of asphalt mixes, combination effects of aging, notch lengths and testing temperature parameters were also investigated. Notch length and testing temperature was found to have significant effects on induced healing efficiency of mixes. In addition, the results indicated that induced healing efficiency of low temperature cracked asphalt mixes were more than that of asphalt mixes that were cracked at intermediate temperatures. The results suggest that the necessity of considering aging level in analyzing induced heating-healing process of asphalt mixes.

**Keywords:** Induced heating-healing, Aging, Activated carbon, Semicircular Bending test, Electromagnetic radiation.