مجله علمی – پژوهشی مهندسی عمران مدرس دوره بیستم، شماره ۳. سال۱۳۹۹



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

سعید امانی'، امیر کاووسی<sup>۲\*</sup>، محمد محمد کریمی<sup>۳</sup>

- ۱. دانشجو 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

تاريخ دريافت : ۹۹/۱/۳۰ تاريخ پذيرش: ۹۹/۳/۲۱

#### چکیدہ

روسازیهای آسفالتی به مرور زمان دچار پیرشدگی میشوند که این امر موجب کاهش سطح خدمت دهی و انعطاف پذیری این روسازیها می شود. ترک خوردگی در اثر پیرشدگی یکی از شایع ترین علل خرابی در روسازیهای آسفالتی است. عدم ترمیم به موقع روسازیهای ترک خورده می-تواند باعث گسترش ترک و ایجاد سایر خرابی ها در روسازی شود. برخی از ترکها می توانند با استفاده از اعمال گرمایش به روش تابش امواج الکتر ومغناطیس ترمیم شوند. استفاده از روش گرمایش به روش تابش امواج الکتر ومغناطیس یکی از روشهای نوین در ترمیم ترک ها در روسازیها است. القای گرمایش از طریق امواج الکتر ومغناطیس موجب افزایش دمای قیر درون مخلوطهای آسفالتی شده و موجب حرکت کردن ارزیابی قرار گرفته است. القای گرمایش از طریق امواج الکتر ومغناطیس موجب افزایش دمای قیر درون مخلوطهای آسفالتی شده و موجب حرکت کردن ارزیابی قرار گرفته است. به منظور اعمال شرایط پیرشدگی، مخلوطهای آسفالتی به مدتهای ۲، ۵، ۷ و ۹ روز در گرمخانه در دمای <sup>20</sup> مروسازی مورد ترکه ارزیابی قرار گرفته است. به منظور اعمال شرایط پیرشدگی، مخلوطهای آسفالتی به مدتهای ۲، ۵، ۷ و ۹ روز در گرمخانه در دمای <sup>20</sup> مای نگهداری شدند. در این پژوهش، قیر خالص با استفاده از کربن فعال اصلاح شد. علاوه براین، تأثیر کربن فعال در ویژگیهای مکانیکی و نرخ ارزیابی قرار گرفته است. به منظور اعمال شرایط پیرشدگی، مخلوطهای آسفالتی به مدتهای ۲، ۵، ۷ و ۹ روز در گرمخانه در دمای <sup>20</sup> مر نمایش آن به روش تابش آن به روش تابش امواج الکتر ومغناطیس در معامی می نه تنها گرمایش آن به روش تابش امواج الکتر ومغناطیس در مخلوطهای آسفالتی مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی تأثیر سطوح مختلف پیرشدگی موجب کاهش مقاومت آن نمی شود، بلکه می تواند موجب افزایش مقاومت نمونه ها در بر ابر ترک خوردگی نیز شود. نتایج بدست آمده نشان داد که موجب کاهش مقاومت آن نمی شود، بلکه می تواند موجب افزایش مقاومت نمونه ها در بر بر ترک خوردگی نیز شود. نتایج بدست آمده نشان داد که موجب خودگی موجب کاهش نرخ گرمایش نمونه های آسفالتی به روش تابش امواج الکتر ومغناطیس می شود. نتایج بدست آمده نشان داد که موزیش مقای ساخی می نود ای می القایی در مخلوطهای آسفالتی ترک خورده در دماهای پایین بیشتر از مخلوطهای آسفالتی است که در دامهای میایی ترک خورده در دامهای پایین بی نرد.

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

۱- مقدمه

خرابی مخلوط آسفالتی از ترکهای ریز از همان لحظات ابتدایی شروع میشود. پیرشدگی قیر در مخلوط آسفالتی موجب كاهش خواص چسبندگي، افزايش سختي و افزايش ویسکوزیته قیر میشود. در طول دوران بارگذاری و بهرهبرداری از روسازی، در اثر پیرشدگی در مخلوطهای آسفالتی ترکهای ریزی ایجاد میشود که میتوانند 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 می شود [1] [2. در سالهای اخیر، تلاشهای زیادی برای توسعه فناورىهاى نوين براى بهبود توانايي ترميم مخلوطهاي آسفالتی انجام شده است. گرمایش القایی روش نوینی است که از طریق آن آسفالت می تواند 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 مختلفي همچون القاي مغناطيسي [3, 5]، امواج مايكروويو [3, 6] و امواج اشعه مادون قرمز [7, 8] برای گرم کردن مخلوط آسفالتی استفاده میکنند. برخی از ترکهای روسازی می توانند 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 می شود.

با توجه به اهمیت و ارزش بالای راهها، نیاز به نگهداری آنها افزایش مییابد. درنتیجه 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 براي خودترميمي مخلوطهاي أسفالتي مورد بررسي قرارگرفته است. با توجه به اینکه در اثر پیرشدگی ویسکوزیته قیر افزایش مییابد، انتظار میرود که پیرشدگی تأثیر قابلتوجهی در کارائی 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 می توانند بهراحتی 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 الكترومغناطيس و ترميم القايي 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 زیست محیطی آن، در مقایسه با سایر روش های 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 جاریشدن و پر کردن ترکها می شود، که این امر موجب افزایش نرخ ترمیم القایی می شود

17.

[6, 7]. این فرایند در دمای محیط با نرخ کمتر و با کارایی و بهر،وری پایین تری رخ می دهد. علاوه براین، 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 ۱۰۰–۹۰ درجه سانتی گراد گزارش شده است [12, 13].

مهمترين ويژگى مخلوط أسفالتى تحت تابش امواج الكترومغناطيس، توانايي جذب اين امواج است. خرابيهاي موجود در مخلوطهای آسفالتی شاهد نیز میتوانند تحت تابش امواج الكترومغناطيس ترميم شوند [6, 14]. به منظور افزایش توانایی گرمایش و ترمیم القایی مخلوطهای آسفالتی تحت امواج الكترومغناطيس، محققين انواع مختلفي از مواد رسانای الکتریکی را در مخلوطهای آسفالتی استفاده کردهاند. اضافه كردن مواد رساناي الكتريكي به مخلوط أسفالتي موجب افزايش جذب ميدان الكترومغناطيسي شده و باعث افزايش نرخ گرمایش و ترمیم القایی می شود. مواد رسانای الکتریکی مورد استفاده در مخلوطهای آسفالتی شامل مواد رسانای برپايه پودر، فلز و الياف 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 كاهش دوام مخلوطهاي أسفالتي مي شود [16]. علاوه براين، 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 می شوند [17]

افزودن کربن فعال به قیر موجب بهبود مقاومت در برابر پیرشدگی، شیارشدگی، مقاومت مارشال و مقاومت کششی غیرمستقیم در مخلوطهای آسفالتی می شود [18]. علاوه براین، افزودن کربن فعال موجب افزایش حساسیت دمایی قیر و مخلوط آسفالتی در گرمایش به روش تابش امواج الکترومغناطیس می شود [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

گرمایش نمونههای آسفالتی به روش تابش امواج الکترومغناطیس میشود. علاوه براین، 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 نمونه های 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 الكترومغناطيس، نمونههای مكعبی شكل 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 بهمنظور ترمیم ترک در نمونههای شکسته شده نمونهها درون مایکروویو خانگی مدل سامسونگ ME 341W با فرکانس ۲/٤٥ گیگاهرتز و توان خروجی ۱۰۰۰ وات مورد گرمایش قرار گرفتند تا دمای سطحی نمونههای آسفالتی به C° ۹۰–۱۰۰ برسد. بعد از گرمایش، نمونه ها به مدت ۲٤ 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 براین، به منظور بررسی توانایی ترمیم القایی مخلوطهای آسفالتی در سطوح مختلف پیرشدگی، آزمایش تأثیر پارامترهایی همچون پیرشدگی، طول شیار و دمای آزمایش و تاثیر توأم این پارامترها روی میزان ترمیم القایی مخلوطهای آسفالتی مورد ارزیابی قرار گرفت. جدول (۱) ساختار کلی این پژوهش را نشان میدهد.

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

-20 °C

Aging condition									
Specimens	Mixture ID	Exposure time (days) in an oven at constant temperature (85 °C)	Description						
SCP at 25 °C (Diamatar 150 mm	A0	0	New paved (unaged)						
and thickness 57 mm)	A5	3	Simulating 5 years field aging						
SCB at -20 °C-(Diameter 150 mm	A10	5	Simulating 10 years field aging						
and thickness 25 mm)	A15	7	Simulating 15 years field aging						
	A20	9	Simulating 20 years field aging						

جدول ۱. خلاصه برنامه آزمایشگاهی

		Mecha	nical prop	erties				
Test	Specimen dimension	n (mm)	m) Loading rate tem		Test temperatu	re	Number of replicates	
SCB	Semi-circular - Diam and thickness 57	eter 150 mm	0.5 (mm/min) 25		25 °C	2	3	
SCB	Semi-circular - Diam and thickness 25	eter 150 mm	0.6 (mm/min)		-20 °C	2	3	
		Micr	owave hea	ting				
	Specimen	Heating	source	Heati	ng time	Initial	temperature	
Semi-circular-Diameter 150 mm and thickness 57 mm		Mic	owave	120 s		25 °C		
Semi-circular- Diameter 150 mm and thickness 25 mm		Mic	owave 90 s		s 25 °C		°C	

Induced healing									
Heating temperature	Condition (Time/ Temperature)	Initial temperature							
90-100 °C	24 (h)/25 (°C)	25 °C							

24 (h)/25 (°C)

Table 1. Summary plan of testing

Test

SCB

SCB

90-100 °C

## ٤- شبیهسازی پیرشدگی مخلوطهای آسفالتی در آزمایشگاه

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 °C ۸۵ انجام شد. به منظور شبیهسازی سطوح مختلف پیرشدگی در آزمایشگاه، می توان 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 می تواند 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 با استفاده از مطالعات انجام شده در جدول (۱) تعیین شد. همان گونه که در این شکل نشان داده شده است، افزایش نرخ پیرشدگی مخلوط آسفالتی با افزایش زمان بهرهبرداری (یا زمان در معرض قرارگیری در شرایط آبو 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 آسفالتي افزايش مييابد.

**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 (dave)	Duration			
Duration (days)	(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.

مطابق با مدل رگرسیونی نشان داده شده در شکل (۱)، می توان 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، ۱۰ و ۲۰ سال) می توان زمان لازم برای نگهداری نمونههای آسفالتی در گرمخانه را محاسبه کرد. بنابراین مطابق با مدل رگرسیونی برای صفر (زمان ساخت)، ۵، ۱۰، ۱۰ و ۲۰ سال از عمر روسازی نمونههای مختلف مخلوط آسفالتی باید به ترتیب صفر، ۳، ۵، ۷ و ۹ روز در گرمخانه تحت دمای 2° ۸۵ نگهداری شوند. بنابراین، در این پژوهش ۵۵، ۸5، ۵۱۵ م دا م دال و ۲۰ سال برتیب پیرشدگی در صفر (زمان ساخت)، ۵، ۱۰، ۱۰ و ۲۰ سال

شکل ۱. ارتباط بین پیرشدگی صحرایی و آزمایشگاهی مخلوط آسفالت



Fig. 1. Correlation between laboratory and field aging.

٥- 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 شیمیایی سنگدانه مورد استفاده در این پژوهش در جدول (۳) شیمیایی سنگدانه مورد استفاده در این پژوهش در جدول (۳) نشان داده شده است. از قیر با درجه نفوذ ۸۰/۱۰۰ در این پژوهش استفاده شد. مشخصات قیر مصرفی در جدول (٤) نشان داده شده است. کربن فعال نیز به عنوان ماده افزودنی در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. جدول (۵) مشخصات این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. جدول (۵) مشخصات این پژوهش را نشان میدهد

فیزیکی و اجزای تشکیل دهنده کربن فعال مورد استفاده در

سنگدانه مورد استفاده	فیزیکی و شیمیایی	<b>جدول ۳</b> . مشخصات
----------------------	------------------	------------------------

Physical properties										
Test		Standar	d method	Test results						
Coarse aggr	egate specific g	gravity (g/cm <sup>3</sup> )			ASTM C12	2.69				
Fine aggreg	ate specific gra	vity (g/cm <sup>3</sup> )			ASTM C12	2.63				
Los Angele	s abrasion value	e (LAV)			ASTM C13	22.2 %				
Sodium sult	fate soundness (	(SS)			ASTM C88	2.7 %				
Sand equiva	alent (SE)				ASTM T17	6	70 %			
Chemical composition (%)										
SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	Other substances							
60.5	1.75	14.59	5.86	2.51	1.45	1.68	11.66			
<b>Table 3.</b> The physical and chemical properties of the aggregates.										
جدول ٤. مشخصات قير مورد استفاده جدول ٤. مشخصات قير مورد استفاده										
Asphalt binder properties										
Softenin	g point (°C)	Flash point	(°C)	Fire po	oint (°C)	Ducti	lity at 15 °C (cm)			
	52	232		3	20	+100				
		Ası	ohalt binder o	composition	s (wt %)					
Sat	urates	Naphthene-	aromatics	Polar-aromatics			Asphaltene			
18 41				22			19			
		Table 4.	General prop	erties of the a	asphalt binder					
				_						
	ر این تحقیق	مال مورد استفاده در	يلدهنده كربن ف	) شیمیایی تشک	فیزیکی و اجزای	ل ٥. مشخصات	جدوا			

Physical characteristics												
Туре	App der (g/	oarent nsity cm <sup>3</sup> )	Specific surface area (m <sup>2</sup> /g)	Ash mass (%)	Io abso (n	dine orption ng/g)	Methylene blue absorption (mg/g)		Mesh numbe	r PH	[ N	Moisture (%)
Ariko F1000	0.33	3-0.50	1050	<5	9	900	20		200×32	25 Alkal	ine	<5
Chemical compositions (%)												
С	Na <sub>2</sub> O	MgO	$Al_2O_3$	SiO <sub>2</sub>	$P_2O_5$	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	3 0.065

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

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 براین، به منظور امکان مقایسه تأثیرافزودنی در ویژگیهای مکانیکی، گرمایش به روش تابش امواج

۱-۵- طرح اختلاط

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

الكترومغناطيس، ترميم القايي مخلوطهاي أسفالتي 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 تعيين و مقايسه شدند. نتايج نشان داد كه 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 ٤، ٥/٥، ٥، ٥/٥ و ٦ درصد قیر (درصد وزنی مخلوط أسفالتي) تهيه شدند. مطابق با طرح اختلاط مارشال، با اعمال ۷۵ ضربه در هر طرف نمونه و در نظر گرفتن بار ترافیکی سنگین، درصد قیر بهینه ٤/٧ 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 كربن فعال، از مخلوطكن با سرعت برشي 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 <sup>©</sup> ۱۵۰ به مدت ۳۰ دقیقه و با سرعت چرخشی ٤٠٠٠ دور در دقيقه انجام شد.

## ٦- آزمایشها

آزمایش های موجود در این پژوهش شامل بررسی قابلیت گرمایش نمونههای آسفالتی به روش تابش امواج الكترومغناطيس و ترميم القايي 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.

۱-۲- آزمایش SCB در دمای محیط (℃۲۰

ترکهای خستگی یکی از خرابیهای عمده در روسازیهای آسفالتی در دمای میانی است. آزمایش SCB آزمایشی است که با عملکرد روسازیهای انعطاف پذیر ارتباط خوبی نشان داده است. مطابق با استاندارد ASTM D8044-16، نمونه-های SCB که دارای شیارهای به طول ۲۵، ۳۱/۸ و ۳۸ میلیمتر تهیه شدند و در دمای C° ۲۵ تحت آزمایش قرار گرفتند [25]. سرعت بارگذاری در آزمایشSCB برابر با ۰/۰ میلیمتر در دقیقه تنظیم شد. بارگذاری نمونهها پس از مشاهده افت ۱۰ درصدی از بیشترین مقاومت نمونهها متوقف شد.

## ۲-۲- آزمایش SCB در سرما (℃۲۰-)

آزمایش SCB در دمای پایین، قابلیت بررسی ترک حرارتی روسازی آسفالتی با استفاده از پارامتر انرژی شکست و از طريق مفاهيم مكانيك شكست الاستيك خطى فراهم مىكند. انرژی شکست، بر اساس استاندارد -AASHTO TP 105 13 تعیین شد [26]. دمای مورد نظر در این آزمایش C° ۲۰- و سرعت بارگذاری برابر با ۲/۰ 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 (Alig) که بر اساس رابطه (۱) محاسبه می شود.

$$G_f = \frac{W_f}{A_{lig}} \tag{1}$$

#### ۳-۲- 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 ۲۰×۲۰ میلی متر تهیه شد. همان گونه 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.

مجله علمی – پژوهشی مهندسی عمران مدرس

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 ۲٤ 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*) به مقدار انرژی شکست نمونهی اصلی (*E*) است، مطابق با رابطه (۲) تعیین شد.

$$HI = \frac{E_i}{E_0} \tag{(Y)}$$

به منظور ترمیم القایی نمونههای SCB در دمای پایین، ابتدا نمونهها به مدت ۲ ساعت در دمای  $2^{\circ}$  ۲۰- در فریزر نگهداری شدند. سپس بالافاصله از درون فریزر خارج شده و تحت شرایط آزمایش تا رسیدن به شکست بارگذاری شدند. سپس مقدار انرژی شکست آنها محاسبه شد (e). پس از آن نمونهها به مدت ۲۶ ساعت در دمای اتاق مورد استراحت قرار گرفتند تا سطح نمونهها کاملا خشک شود. سپس مطابق با روش اشارهشده در بالا، نمونهها به مدت ۹۰ ثانیه درون مدت ۲۶ ساعت، دوباره تحت بارگذاری قرار داده شدند. شاخص ترمیم القایی نیز برای نمونههای SCB در دمای  $2^{\circ}$ شماتیک فرایند ترمیم القایی نمونههای SCB در سرما (در شماتیک فرایند ترمیم القایی نمونههای SCB در سرما (در Cubic specimen

شکل ۲. گرمایش نمونهها از طریق تابش امواج مایکروویو

Fig. 2. Heating of specimen under microwave radiation.

## ٤-3- 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 اندازه گیری شد. دمای هشت نقطه از سطح نمونه به صورت تصادفی اندازه گیری و میانگین آنها محاسبه شد. زمان بهینه برای ترمیم القایی نمونههای مخلوط آسفالتی زمانی بود که میانگین دمای سطحی نمونههای مخلوط آسفالتی به °۰۹–۱۰۰ می رسید.

#### ٥-٦- فرايند ترميم القايي

ترمیم القایی نمونههای SCB در دمای  $^{\circ}$  ۲۵ 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 (2° ۲۰-): (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 <sup>2</sup> ۲۰- نشان می دهد. 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 می کند. بنابراین انتظار می رود 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 ٤. تاثیر کربن فعال در نیرو در لحظه شکست (مقاومت)

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

شکل ٦. زمان مورد نیاز برای ترمیم نمونههای SCB درون مایکروویو الف) C° ۲۵، ب) C° ۲۰–



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

# ۲-۳- 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 مطابق با شکل (۷ الف)، نرخ گرمایش نمونههای اصلاح شده مطابق با شکل (۷ الف)، نرخ گرمایش نمونههای اصلاح شده نمایش با کربن فعال به روش تابش امواج الکترومغناطیس در سطوح مختلف پیرشدگی، ۵۵، ۸۵، ما۵۸ و ۸۷۵ به ترتیب ثانیه حاصل شد. این درحالی است که نرخ گرمایش نمونه-نمای شاهد به روش تابش امواج الکترومغناطیس به ترتیب برابر با ۲۷، ۲٫۷۰، ۲٫۷۰، ۲٫۰۰ و ۲٫۰۰ درجه سانتی گراد بر



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





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

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

شکل (٦) 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 اصلاح شده 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 (٦) نشان داده شده، نمونههای SCB اصلاحشده با زمان ۲۰۱ و ۹۰ ثانیه دمای سطح آنها به ۲° ۹۰–۱۰۰ میرسند (دمای بهینه ترمیم القایی). بنابراین، به منظور ارزیابی ترمیم القایی نمونههای SCB در دمای میانی و پایین می بیس به القایی نمونههای SCB در دمای میانی و پایین می بیست به

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 نتيجه گرفت که افزودن کربن فعال به قير باعث افزايش رسانایی گرمایی و رسانایی الکتریکی شده و در نتیجه موجب افزایش نرخ گرمایش نمونهها **به** روش تابش امواج الكترومغناطيس مي شود. علاوه براين، مي توان نتيجه گرفت كه افزایش سطح پیرشدگی منجر به کاهش نرخ گرمایش نمونهها به روش تابش امواج الكترومغناطيس مىشود. بنابراين، می توان 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 الكترومغناطيس الف) نمونههاي شاهد، ب) نمونههاي اصلاحشده با كربن فعال



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

٤-٧- تأثير پيرشدگي در ترميم القايي شکل (۸) مقادیر شاخص ترمیم القایی مخلوطهای آسفالتی تحت سطوح مختلف پیرشدگی را که با انجام آزمایش SCB

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 A15،A10 ، A5، A20 و A20 به ترتیب برابر با ۵۸، ۵۲، ٤۹، ٤۵ و ٤٣ درصد حاصل شد. به عبارت دیگر می توان اذعان داشت که توانایی قیر برای جاری شدن و پر كردن تركها با افزايش سطح پيرشدگي مخلوط كاهش مي-یابد. علاوه براین، همانگونه که در بند قبل شرح داده شد، افزایش سطح پیرشدگی منجر به کاهش نرخ گرمایش نمونهها به روش تابش امواج الكترومغناطيس شده، كه اين امر موجب کاهش توانایی قیر در ترمیم ترکها میشود و در نتیجه

سعید امانی و همکاران

شکل ۸ شاخص ترمیم القایی در سطوح مختلف پیرشدگی از طریق آزمایش SCB در دمای الف) ℃ ۲۰، ب) ℃ ۲۰-

شاخص ترميم القايي كاهش مي يابد.



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

12.

۷-٥- تأثير طول شيار در ترميم القايي

# شکل (۹) تأثیر طول شیار روی شاخص ترمیم القایی نمونه- میکل ۱۰. شماتیک تشریحی تأثیر طول ترک در فرایند ترمیم القایی در



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

# ۷-٦- تأثیر توأم پیرشدگی و طول شیار در ترمیم القایی

شکل (۱۱) تأثیر توأم پیرشدگی و طول شیار را روی شاخص ترميم القايي مخلوطهاي آسفالتي نشان ميدهد. مطابق با اين شکل، شاخص ترمیم القایی با افزایش طول شیار و افزایش سطح پیرشدگی کاهش مییابد. علاوه براین، نتایج نشان می-دهند که تأثیر مخرب طول شیار با افزایش سطح پیرشدگی افزایش بیشتری پیدا خواهد کرد. به عنوان نمونه، کاهش شاخص ترميم القايي براي نمونههاي اصلاحشده با كربن 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. های آسفالتی در شرایط پیر نشده (A0) را نشان میدهد. همانگونه که در شکل (A) نشان داده شده است، طول شیار ایجاد شده در آزمایش SCB عریض بوده بطوریکه نمی تواند از طریق گرمایش به روش تابش امواج الکترومغناطیس ترمیم شود (Lo-L در شکل ۱۰). بر اساس تئوری مکانیک شکست، طول شیار ایجاد شده در آزمایش SCB می تواند در مقاومت (حداکثر نیروی ایجاد شده در آزمایش) و انرژی شکست نمونهها تأثیر بگذارد. از نتایج به دست آمده در شکل (A) می توان 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

قابل توجهی در شاخص ترمیم القایی دارد. کاهش طول شیار ایجاد شده در نمونه موجب افزایش طول مؤثر ترک شده (L در شکل ۱۰)، که می تواند امواج الکترومغناطیس را جذب کرده و ترکها را ترمیم کند. علاوه براین، نتایج نشان داد که شاخص ترمیم القایی با افزایش طول شیار کاهش می یابد. به عنوان نمونه، شاخص ترمیم القایی در نمونههای اصلاح شده با کربن فعال، با افزایش طول شیار از ۲۵ به ۱۳۸۸ و ۲۸ میلی متر به ترتیب ۱۵ و ۲۹ درصد کاهش یافت. می توان 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 می کند.



### **شکل ۹**. تأثیر طول شیار در نمونههای SCB روی شاخص ترمیمالقایی

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

#### ارزيابي ترميم القايي مخلوط...

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. می توان 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، می توان انتظار داشت که شاخص ترمیم القایی در نمونههای شکسته شده در دمای پایین بیش از نمونه های شکسته شده در دمای میانی باشد. علاوه براین، از نتایج میتوان استنباط کرد که تأثیر یپرشدگی روی نمونههای شکسته شده در دمای پایین بیشتر از نمونههای شکسته شده در دمای میانی است. به عنوان نمونه، كاهش شاخص ترميم القايي نمونههاي شاهد و اصلاح شده (A0) که در دمای پایین شکسته شده است، ۳۳ درصد کمتر (مقایسه ۵۹ و ۳۹؛ مقایسه ۷۱ و ٤٧) 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 ٤٥ و ۳٦) و ۲۵ (مقایسه ٥٨ و ٤٣) 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 نمونه-های: (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.

## ۲-۷- تأثیر توأم دمای آزمایش و پیرشدگی روی شاخص ترمیم القایی

به منظور بررسی دمای آزمایش در شاخص ترمیم القایی، نتایج آزمایش SCB در دماهای 2° ۲۵ و 2° ۲۰ 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 A0، A5، 10، 71، مای میانی به و 20 در دمای پایین به ترتیب برابر است با ۲۱، ۲۰، ۳۵، ترتیب برابر با ۵۸، ۲۵، ۵۹، ۵۵ و ۲۳ درصد بود. شاخص ترمیم القایی پایینتر مخلوطهای آسفالتی که در دمای میانی خواهد كرد.

 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 ترک-های کمتر) و عرض کمتر ترکها در دمای پایین نسبت داد.



- 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. Selfhealing 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, Á., 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 نتیجه گیریهای 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 می شود. در نتیجه افزایش سطح پیرشدگی موجب کاهش شاخص ترمیم القایی مخلوطهای آسفالتی می شود.
- 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.
- ٤) 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 مایکروویو) قرار می گیرد، نسبت داد. علاوه براین، تأثیر مخرب طول شیار با افزایش سطح پیرشدگی افزایش بیشتری پیدا

modification. Građevinar, 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 heatinghealing 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, termal, 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. Ironbased 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., Yalçin, E., Yilmaz, 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] Bostancioğlu, 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>

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