

ترمیم پرکننده‌های درزهای عرضی در روسازی بتنی با استفاده از روش حرارت القایی توسط اشعه الکترومغناطیس

ابوالفضل حسنی^{۱*}، محمد اسدی^۲، محمد محمدکریمی^۳

۱. استاد، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
۲. دانشجوی ارشد عمران گروه راه و ترابری، دانشگاه تربیت مدرس
۳. استادیار، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

hassani@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۰

چکیده

شکست چسبندگی و درون ماده از جمله مهم ترین خرابی‌های ماده درزگیر قیری گرم اجرا در درزهای روسازی بتنی می‌باشد. این خرابی‌ها ناشی از جمع شدگی بتن در اثر کاهش دما است که باعث نفوذ آب به زیر دال بتنی و به وجود آمدن پدیده پامپینگ می‌شود. تاکنون تنها راه برای جلوگیری از نفوذ آب به داخل درزهایی که مواد درزگیرشان دچار خرابی چسبندگی و درون ماده شده‌اند، درزگیری مجدد بوده است که هزینه و زمان زیادی را به هدر می‌دهد و باعث آثار زیست محیطی می‌شود. بنابراین، ابداع روشی نوین که بتوان با صرف کمترین هزینه و زمان این خرابی‌ها را به طور کامل ترمیم کرد بسیار حائز اهمیت است. در چند سال اخیر از گرمایش القایی برای ترمیم ریزترک‌ها و ترک‌های مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده است. با توجه به این موضوع برای اولین بار از گرمایش القایی برای ترمیم خرابی‌های چسبندگی و درون ماده استفاده شد. در این مطالعه یک آزمایش کشش جدید برای ارزیابی ماده درزگیر قیری توسعه داده شد. در ابتدا ماده درزگیری که بین دو بلوک بتن اجرا شده در دمای پایین (۱۰-، ۲۰- و ۳۰- درجه سانتی‌گراد) گذاشته شد و سپس آزمایش کشش تا نقطه جداشدگی درزگیر انجام شد. پس از آن درزگیرهای آسیب دیده شده بعد از رسیدن به دمای محیط برای ترمیم القایی از طریق گرمایش القایی، درون دستگاه مایکروویو گذاشته شدند. پس از گرمایش القایی، نمونه‌ها در دمای محیط گذاشته شدند تا ماده درزگیر عمل‌آوری شود. این روند (شکست-ترمیم) برای ۳ بار دیگر انجام گرفت. نتایج نشان داد که ترمیم القایی با استفاده از امواج مایکروویو خرابی‌های چسبندگی و درون ماده را به طور کامل ترمیم می‌کند به طوری که شاخص تنش و کرنش در دماهای ۱۰- و ۲۰- درجه سانتی‌گراد در سیکل‌های دوم به بعد افزایش بیش از ۱ را داشت و در دمای ۳۰- درجه سانتی‌گراد هم شاخص تنش و کرنش کمتر از سیکل اول نشد.

واژگان کلیدی: درزگیر قیری گرم اجرا، گرمایش القایی، ترمیم القایی، امواج مایکروویو

۱- مقدمه

تغییرات شرایط جوی (دما و رطوبت)، اصطکاک و تسهیل
فرآیند ساخت، در این نوع روسازی‌ها درز تعبیه می‌شود.
به‌طور کلی در روسازی‌های بتنی سه نوع درز وجود دارد که

به منظور فراهم نمودن شرایط انبساط و انقباض در
روسازی‌های بتنی و در نتیجه استهلاک تنش‌های ناشی از

عبارت‌اند از: درز انقباض^۱، درز انبساط^۲، درز انقطاع^۳ و درز اجرایی^[1]. درزهای عرضی برای استهلاک تنش‌های کششی ناشی از تغییرات دما، تغییرات رطوبت و اصطکاک و در نتیجه کنترل ترک‌خوردگی دال بتنی استفاده می‌شود. در صورت استفاده نکردن از درزهای انقباضی، ترک‌های تصادفی در دال بتنی ایجاد می‌شود. درزهای انقباض به دو نوع عرضی و طولی تقسیم‌بندی می‌شوند. درزهای انقباض عرضی در روسازی‌های بتنی درزدار استفاده می‌شوند و معمولاً به صورت عمود بر محور راه و در فواصلی قرار می‌گیرند که تنش کششی ناشی از تغییرات دما و رطوبت منجر به وقوع ترک در دال نشود. درزهای انقباضی طولی نیز در جاهایی که بتن‌ریزی دو یا چند خط عبور و شانه روسازی در یک‌زمان انجام می‌شود، تعبیه می‌شود. با توجه به این که درزهای انقباضی، مکان‌هایی ضعیف شده و از پیش تعیین شده برای ترک خوردگی در روسازی‌های بتنی است، مکانی برای نفوذ آب و مواد حلال دیگر به زیر دال بتنی می‌باشد که در صورت نفوذ آب به زیر دال باعث پمپاژ شدن مواد زیر دال از طریق درز به روی دال می‌شود و تکیه‌گاه دال از دست می‌رود که این پدیده باعث به وجود آمدن خرابی‌ها با شدت زیاد در روسازی‌های بتنی می‌شود.

به منظور جلوگیری از نفوذ آب و سایر مواد به محل درز، در محل درز از مواد درزگیر استفاده می‌شود. مواد درزگیر به دو دسته اجراشده در محل^۴ (به صورت مایع یا نیمه مایع) و پیش‌ساخته^۵ طبقه‌بندی می‌شوند. معمولاً درزگیرهای گرم اجرا باید در حدود ۳ تا ۵ سال تعویض شوند^[2]. تجربه نشان می‌دهد با نابودی مقدار معینی از مواد درزگیر (۲۵ تا ۵۰ درصد) نفوذ آب و یا مصالح تراکم‌ناپذیر به محل درز تشدید می‌شود و در چنین شرایطی خرابی درز اتفاق می‌افتد. از علل عمده خرابی ماده درزگیر قیری می‌توان به دو دسته اشاره کرد:

۱. خرابی چسبندگی^۱: که در آن رابط بین درزگیر و بتن (PCC) دیگر قادر به تحمل نیروهای برشی و تنش اعمال‌شده توسط ترافیک و انقباض آسفالت یا بتن که در آب‌وهوای سرد رخ می‌دهد را ندارد.

۲. خرابی انسجام ماده درزگیر^۷: که در آن درزگیر نصف شده است ولی بخش عمده‌ای از مواد هنوز هم به دیواره ترک متصل است. هر دو خرابی می‌تواند منجر به کاهش قابل توجهی از عمر از ساختار روسازی شود. با این حال، در بیشتر موارد خرابی چسبندگی، یک نوع خرابی غالب است [3].

در حال حاضر تنها راه برای جلوگیری از نفوذ آب به زیر سازه در درزهایی که دچار خرابی چسبندگی و انسجام شدند، درزگیری مجدد بوده است که هزینه و زمان قابل توجهی می‌برد. بدین منظور در این پژوهش، برای چسبندگی مجدد درزگیرهای از هم گسیخته، از امواج الکترومغناطیس برای گرمایش و ترمیم القایی این خرابی‌ها استفاده شد.

خود ترمیمی یعنی توانایی یک ماده در ترمیم خود به خودی آسیب‌های به وجود آمده در طول عمر بهره‌برداری [4]. در طول زمان، خواص مواد به دلیل خرابی‌ها در مقیاس میکروسکوپی (مانند ریزترک‌ها)، کاهش می‌یابد. این ترک‌ها می‌توانند رشد کنند و در نهایت به شکست در ماده منجر شوند. در حال حاضر، پژوهشگران عرصه‌ی علم مواد تلاش می‌کنند تا با افزودن اجزاء خودترمیم به مواد طبیعی، عمر بهره‌برداری آن‌ها را بهبود بخشند. مصالح دارای قابلیت خود ترمیمی می‌توانند به صورت ذاتی خرابی‌های ناشی از استفاده‌ی معمولی را تصحیح کنند و سبب کاهش ناکارآمدی به وجود آمده در ماده شوند. همچنین با افزایش طول عمر ماده، هزینه‌های تولید را کاهش داده و از هزینه‌های تعمیر و نگهداری نیز جلوگیری می‌کنند [5].

ترمیم القایی عبارت است از اعمال انرژی خارجی مانند گرما برای ترمیم آسیب‌ها و شکست‌های به وجود آمده در طول عمر

1. Contraction joint
2. Expansion joint
3. Isolation joint
4. Field molded
5. Preformed
6. Adhesion Failure
7. Cohesion Failure

بهره‌برداری ماده که با خودترمیمی تفاوت دارد [6]. به تازگی در تحقیقات روسازی آسفالتی، گرمایش القایی توسط القای الکترومغناطیسی برای بهبود خود ترمیمی روسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. سازوکار اصلی ترمیم در این روش، جریان و انتشار قیر در درجه حرارت بالا می‌باشد. روش گرمایش القایی، پیشرفته‌ترین فناوری خود ترمیمی برای روسازی آسفالتی می‌باشد که تا به امروز گزارش شده است. برای ترمیم مخلوط آسفالتی به روش گرمایش القایی به‌طور کلی دو منبع تولید گرما وجود دارد که عبارت‌اند از:

- سیم‌پیچ‌های القایی الکترومغناطیسی^۸
- مایکروویو^۹

با توجه به اینکه گرمایش مخلوط آسفالتی باعث روان شدن قیر و اصلاح ترک‌ها می‌شود باید به این موضوع دقت کرد که این گرمایش به چه شکلی باشد که باعث تغییر خواص رئولوژی قیر و ایجاد آثار منفی بر آن نشود. این نکته به حدی مهم است که در انتخاب منبع انرژی گرمایشی باید آن را معیار انتخاب قرارداد. اولین مرحله در جهت استفاده از گرمایش القایی توسط سیم‌پیچ‌های القای الکترومغناطیسی در مخلوط آسفالتی، ایجاد رسانایی الکتریکی در آن می‌باشد؛ زیرا تنها مواد رسانای الکتریکی توانایی گرم شدن بر اثر انرژی القایی را دارند، برای این منظور مواد رسانا مانند الیاف فولادی و مواد حاوی کربن به مخلوط آسفالتی اضافه می‌شوند. با توجه به این که برای تاثیر گرمایش القایی توسط سیم پیچ های القای الکترومغناطیس از مواد افزودنی باید استفاده بشود این روش برای ترمیم خرابی ماده درزگیر موجود کارایی ندارد و باید روش مایکروویو را مورد بررسی قرار داد.

مایکروویو یا ریزموج، امواج الکترومغناطیسی مشابه ماهیت رادیویی، نور مرئی و امواج اشعه‌ی ایکس می‌باشد. وجه تمایز امواج مایکروویو طول‌موج (فرکانس) آن‌ها است، برای نمونه، محدوده طول‌موج نورهای مرئی بین 4×10^{-7} متر (بنفش) و

7×10^{-1} متر (قرمز) است، درحالی‌که امواج مایکروویو دارای طول‌موج ۳ میلی‌متر تا ۳ متر هستند که متناظر با فرکانس ۱۰۰ مگاهرتز تا ۱۰۰ گیگاهرتز می‌باشند [7]. سازوکار گرمایش مواد تحت امواج مایکروویو بدین‌صورت است که وقتی مولکول‌های قطبی مواد در معرض امواج مایکروویو قرار گیرند، شروع به چرخش خواهند کرد. چرخش مولکول‌ها، سبب ایجاد اصطکاک بین مولکول‌ها می‌شود که این اصطکاک به گرما تبدیل می‌شود. همچنین در مواد جامد غنی از الکترون، مانند مواد رسانا که هیچ دوقطبی با حرکت چرخشی آزادانه‌ای ندارد، حرکت الکترون‌ها از طریق گرمایش ژول یا تولید جرقه سبب ایجاد گرما می‌شود [8]. امواج مایکروویو می‌توانند به‌طور مستقیم از ماده عبور کنند [9]. همچنین مایکروویو در سطح مولکولی ماده را گرم می‌کند و به همین دلیل گرمایش توسط آن در زمان کم‌تر و یکنواخت‌تر صورت می‌گیرد [10 11]. علاوه بر آن مشاهده شده است که استفاده از مایکروویو، بازدهی بیشتری در ترمیم گرمایشی نسبت به سیم‌پیچ‌های القای الکترومغناطیسی دارد [7].

با توجه به مطالعاتی که در زمینه گرمایش القایی مخلوط‌های آسفالتی توسط امواج مایکروویو انجام‌شده اثربخشی بیشتر این نوآوری با اضافه کردن مواد رسانا و دوقطبی امکان‌پذیر است. همچنین این نوآوری تا به حال برای درزگیرهای قیری گرم اجرای روسازی‌های بتنی استفاده نشده است. با توجه به این موضوع برای اولین بار استفاده از امواج مایکروویو برای ترمیم شکست‌های چسبندگی و پیوستگی بدون استفاده از افزودنی‌های رسانا یا دوقطبی در این مطالعه صورت گرفت [7, 12-17].

۲- مواد و مصالح

۲-۱- ماستیک قیری درزگیر

ماستیک قیری درزگیر این مطالعه از نوع گرم اجرا است که از یک شرکت محلی تهیه شده است. مشخصات ماستیک مورد استفاده در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات ماستیک قیری درزگیر

Test	Specification	Result
Softening point (°C)	ASTM D36	114
Asphalt Compatibility	ASTM D5329	Pass
Ductility (25°; cm)	ASTM D113	+100
Penetration (25°;0.1mm)	ASTM D5	36
Cone penetration (25°;0.1mm)	ASTM D5329	26
Resilience (25°;%)	ASTM D5329	40

Table 1. Properties of bitumen joint sealant

۲-۲- بتن

بتن مورد استفاده در این تحقیق دارای مقاومت فشاری ۳۸/۸۱ مگا پاسکال است. اجزا بتن در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲. اجزا بتن

UNIT WEIGHT (KG/M ³)	
Cement Type II	411
Water	217
Coarse aggregates	951
Fine aggregate	754
Concrete Slump	70
Water-cement ratio	0.53

Table 2. Concrete components

۳-۲- فیکسچر آزمایش کشش

در این پژوهش از فولاد ابزار به دلیل سختی ویژه، مقاومت در برابر سایش، تغییر شکل و همچنین فرایند تولید آسان برای تهیه فیکسچر آزمایش کششی استفاده شده است. ابتدا اجزای فیکسچر در نرم‌افزار Solid work مدل‌سازی شده و سپس قطعات ماشین‌کاری و مونتاژ شدند (شکل ۱).

۲-۴- منبع تولید امواج الکترومغناطیس

با توجه به مطالعات گذشته که نشان از تأثیر و مزایای بیشتر امواج مایکروویو نسبت به سیم‌پیچ‌های القای الکترومغناطیس دارد، در این مطالعه از یک دستگاه مایکروویو خانگی با فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز و توان ۱۰۰۰ وات استفاده شده است [15].

شکل ۱. جزئیات و تصویر فیکسچر

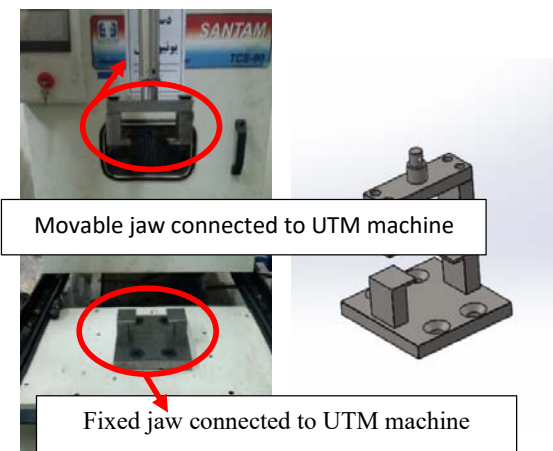


Fig. 1. Details and image fixtures

۳-۳- روش تحقیق آزمایشگاهی

این بخش شامل دو قسمت کلی می‌شود. در قسمت اول به بررسی تأثیر گرمایش القایی امواج مایکروویو روی ماده درزگیر، بتن و نمونه آزمایش کشش که شامل ماده درزگیر و بتن است، پرداخته می‌شود. در قسمت دوم به شرح کامل آزمایش کشش پرداخته می‌شود.

۳-۱- گرمایش القایی

در مرحله اول برای بررسی قابلیت گرمایش ماده درزگیر قیری توسط مایکروویو مقدار ۱۰۰ گرم از آن درون بشر ریخته شد تا به دمای محیط برسد، سپس بشر را به مدت ۳۶۰ ثانیه درون مایکروویو با فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز و قدرت خروجی ۱۰۰۰ وات گذاشته شد و هر ۳۰ ثانیه یک‌بار دمای آن با دماسنج لیزری اندازه‌گیری شد. در مرحله دوم برای بررسی دقیق‌تر قابلیت گرمایش نمونه‌های آزمایش کشش، درون مایکروویو به مدت ۳ دقیقه گذاشته شد و هر ۱ دقیقه درب مایکروویو باز شد و با استفاده از دوربین ترموگرافی، عکس‌های حرارتی گرفته شد. برای بررسی قابلیت گرمایش سطح مرزی بین درزگیر و بتن، دو مکعب به ابعاد ۴×۴×۱ سانتی‌متر مکعب و درزگیر به ضخامت ۲ میلی‌متر بین این دو مکعب، درون مایکروویو به مدت ۲ دقیقه گذاشته شد و سپس عکس حرارتی گرفته شد. مجموعه کامل این آزمایش در شکل (۲) نشان داده شده است.

شکل ۳. فرایند شکست-ترمیم در آزمایش کشش (۱) سرد کردن نمونه آزمایش کشش با قالب (۴ ساعت دردهماهای منفی) (۲) انجام آزمایش کشش (۳) خرابی درزگیر (شکست چسبندگی یا پیوستگی). (۴) گرمایش القایی نمونه (گرم کردن با امواج مایکروویو ۲ دقیقه). (۵) ترمیم شکست درزگیر.

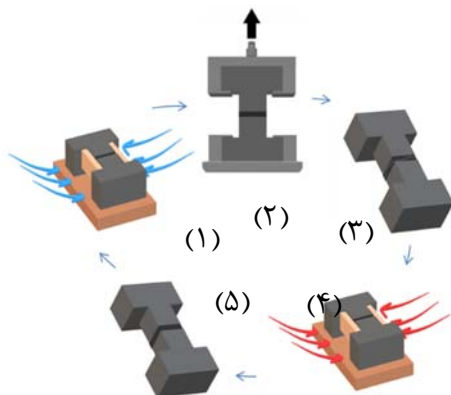


Fig. 3. Failure-Healing process in the tensile test

برای تکرارپذیر بودن گرمایش القایی ماده درزگیر، فرایند ترمیم و شکست مجدد برای نمونه‌ها ۳ بار تکرار شد و نتایج آن مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت، همچنین با توجه به ویژگی‌های ماده درزگیر که در بالا اشاره شد، در آزمایش کشش، سه مورد خاصیت کشسانی ماده درزگیر قیری در دمای پایین و میزان مقاومت کششی انسجام ماده و چسبندگی ماده درزگیر به بتن به‌وسیله تعریف روابط ۱، ۲ و ۳ که شاخص ترمیم (HI) برای تنش‌ها و کرنش‌ها و چقرمگی‌ها نامیده می‌شود، انجام شد، تا میزان ترمیم نمونه‌ها نسبت به آزمایش کشش اول، نشان داده شود.

$$HI = \frac{\sigma_{Bi}}{\sigma_{B1}} \quad (1)$$

$$HI = \frac{\epsilon_{Bi}}{\epsilon_{B1}} \quad (2)$$

$$HI = \frac{T_{Bi}}{T_{B1}} \quad (3)$$

که در آن σ_{Bi} و ϵ_{Bi} و T_{Bi} مقاومت و کرنش و چقرمگی نمونه پس از i -امین سیکل ترمیم برای نمونه آسیب رطوبتی و ذوب و یخ دیده یا ندیده برحسب kPa و σ_{B1} و ϵ_{B1} و T_{B1} مقاومت و کرنش و چقرمگی نمونه آسیب ندیده در اولین سیکل شکست برحسب kPa است.

شکل ۲. مایکروویو، نمونه بتنی و دوربین حرارتی



Fig. 2. Microwave, concrete sample and thermal camera

۳-۲- شرح آزمایش

پس از عمل‌آوری، نمونه‌ها به مدت ۴ ساعت با توجه به آزمایش چسبندگی در استاندارد ASTM D5329 [19] در دماهای ۱۰-، ۲۰- و ۳۰- درجه سانتی‌گراد داخل فریزر گذاشته شدند. سپس بلافاصله در فیکسچر آزمایش کشش قرار داده شدند و آزمایش کشش با نرخ ۱۲/۵ میلی‌متر بر دقیقه مطابق استاندارد ASTM D5329 تا زمان شکست کامل انجام شد. پس از شکست، نمونه‌ها در قالب چوبی قرار داده شدند و به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط گذاشته شدند تا به دمای محیط برسند سپس نمونه‌ها به همراه قالب چوبی در درون مایکروویو به مدت ۲ دقیقه (زمان دو دقیقه با توجه به گرمایش کافی درزگیر برای روان شدن انتخاب شد). با قدرت خروجی ۱۰۰۰ وات گذاشته شدند تا برای ترمیم شکست دمايش بالا برود و درزگیر بعد از روان شدن ترک خود را بپوشانند. سپس دوباره نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط گذاشته شدند تا برای آزمایش کشش مجدد، عمل‌آوری شوند. این فرایند سه بار تکرار شد تا اثر ترمیم مجدد بررسی شود. تمامی نتایج آزمایش‌ها برای تحلیل و بررسی ثبت شد (شکل ۳).

۴. نتایج

در این قسمت به بررسی و تحلیل نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش کشش و عکس‌های حرارتی، پرداخته شده است. ابتدا زمان مورد نیاز برای گرمایش القایی نمونه‌ها با استفاده از دماسنج لیزری و عکس‌های حرارتی با استفاده از دوربین ترموگرافی بررسی شد. پس از آن نتایج حاصل از فرایند شکست-ترمیم نمونه‌ها توسط آزمایش کشش و گرمایش القایی بررسی شد.

۴-۱-۱- بررسی گرمایش با استفاده از امواج مایکروویو

۴-۱-۱-۱- بررسی گرمایش درزگیر قیری

در ابتدا نمونه ۱۰۰ گرمی قیری در یک بشر، به مدت ۳۶۰ ثانیه در مایکروویو با فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز و قدرت خروجی ۱۰۰۰ وات گذاشته شد. بعد از گذشت هر ۳۰ ثانیه درب دستگاه مایکروویو باز شد و با استفاده از دماسنج لیزری دمای درزگیر قیری گرفته شد. نتایج آن در شکل (۴) آورده شد. با توجه به شکل (۴) دمای درزگیر قیری پس از ۳۶۰ ثانیه گرمایش القایی از ۲۶ درجه سانتی‌گراد به ۵۴ درجه سانتی‌گراد رسید. از این آزمایش نتیجه می‌شود که امواج مایکروویو تأثیر چندانی روی نمونه درزگیر قیری به‌تنهایی ندارد. دلیل اصلی این اتفاق عدم وجود مواد رسانا یا دوقطبی در ماده درزگیر قیری می‌باشد که باعث عدم چرخش سریع مولکول‌ها در برابر امواج مایکروویو می‌شود و بین مولکول‌ها اصطکاک ایجاد نمی‌شود که نتیجه آن افزایش با شیب کم دما نسبت به زمان است.

شکل ۴. نمودار دما-زمان برای درزگیر قیری

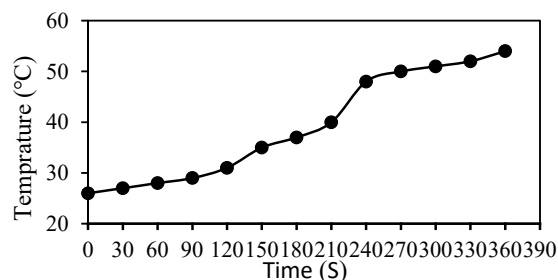


Fig. 4. Temperature-time diagram for bitumen sealant

۴-۱-۲- بررسی گرمایش ضخامت کم درزگیر قیری

با توجه به این‌که دمای درزگیر در وسط و رویه توسط گرمایش القایی بالا نرفت اما نمونه درزگیر شکسته شده بعد از ۲ دقیقه مایکروویو کاملاً روان شد و شکست‌های خود را پوشاند، یک‌لایه

نازک درزگیر بین دو بلوک به ابعاد ۴ در ۴ سانتی‌متر مربع گذاشته شد تا در مایکروویو به مدت ۱۸۰ ثانیه گرم شود. دمای سطح آن به وسیله دماسنج لیزری هر ۳۰ ثانیه اندازه گرفته شد و نتایج آن در شکل (۵ الف) ارائه شد. عکس حرارتی این نمونه بعد از باز کردن درب مایکروویو گرفته شد که در شکل (۵ ب) مشاهده می‌شود. دمای لایه نازک درزگیر بعد از ۱۲۰ ثانیه از ۲۳ درجه سانتی‌گراد به ۲۳۵ درجه رسید و بعد از ۱۸۰ ثانیه به ۲۸۲ درجه سانتی‌گراد رسید که دمای خیلی بالایی برای این ماده به حساب می‌آید زیرا در این دما ممکن است برخی خواص خود را از دست بدهد. به همین دلیل مدت زمان ۱۲۰ ثانیه مبنای گرمایش القایی برای نمونه‌های تحت کشش قرار گرفت. همچنین در شکل (۶) دماهای نمونه آزمایش کشش بعد از گرمایش القایی ماده درزگیر نشان داده شده است که نشان‌دهنده افزایش دمای لایه‌مرزی بین بتن و ماده درزگیر در مدت گرمایش القایی می‌باشد. این فرایند منجر به روان شدن ماده درزگیر و ترمیم کامل خرابی‌های چسبندگی و پیوستگی ماده درزگیر می‌شود و پیوند مستحکم‌تری بین ماستیک و بتن ایجاد می‌شود که در مرحله درزگیری این موضوع به دلیل پایین بودن دمای اتصال بین این مواد اتفاق نمی‌افتد. همچنین بالا نرفتن دمای بتن از مزایای استفاده از این تکنیک است.

شکل ۵. الف) دمای سطح نازک درزگیر قیری بین دو بتن با ابعاد ۴×۴ (ب) عکس حرارتی نمونه درزگیر نازک پس از ۱۸۰ ثانیه گرمایش القایی

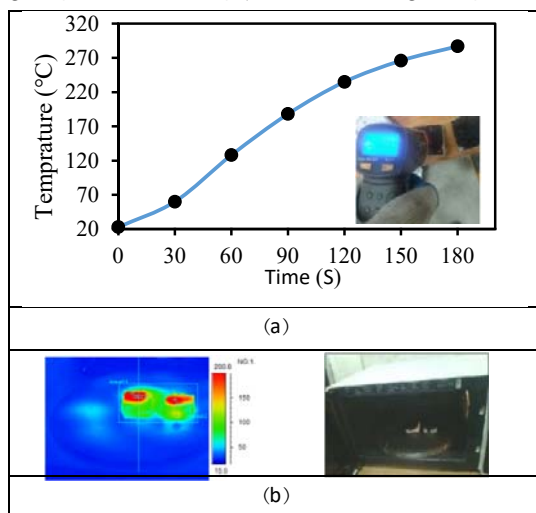


Fig. 5. (a) The temperature of the thin surface of the bituminous sealant between two concrete with dimensions of 4 × 4 (b) The thermal image of the specimen of the thin sealant after 180 seconds of induction heating

به ترمیم اول داشتند که این نشان‌دهنده تکرارپذیر بودن ترمیم با استفاده از گرمایش القایی می‌باشد. با توجه به شکل (۹) در دمای ۳۰- درجه سانتی‌گراد تنش و کرنش در اولین کشش با کشش در ترمیم‌های اول تا سوم تقریباً برابر بود، برای نمونه درکشش اول ماده درزگیر با کشش ۶۸۰ کیلوپاسکال دچار شکست شد و کرنش برابر با ۰/۰۴۱ را داشت و در اولین ترمیم کشش میانگین ۷۰۹ کیلوپاسکال را تحمل کرد و کرنش ۰/۰۴۱۷ را داشت که نشان‌دهنده ترمیم کامل شکست اول است. نوع شکست از نوع چسبندگی و یا چسبندگی و پیوستگی باهم بود. دلیل اصلی عدم افزایش زیاد مقاومت کششی ماده درزگیر نسبت به شکست اول، پایین بودن چسبندگی و انسجام ماده درزگیر در این دما می‌باشد به طوریکه هرچه دما پایین‌تر باشد مقاومت چسبندگی هم کمتر خواهد شد و شکست تردتر خواهد شد.

شکل ۷. روند تغییرات تنش-کرنش سیکل‌های شکست-ترمیم در دمای ۱۰- درجه سانتی‌گراد

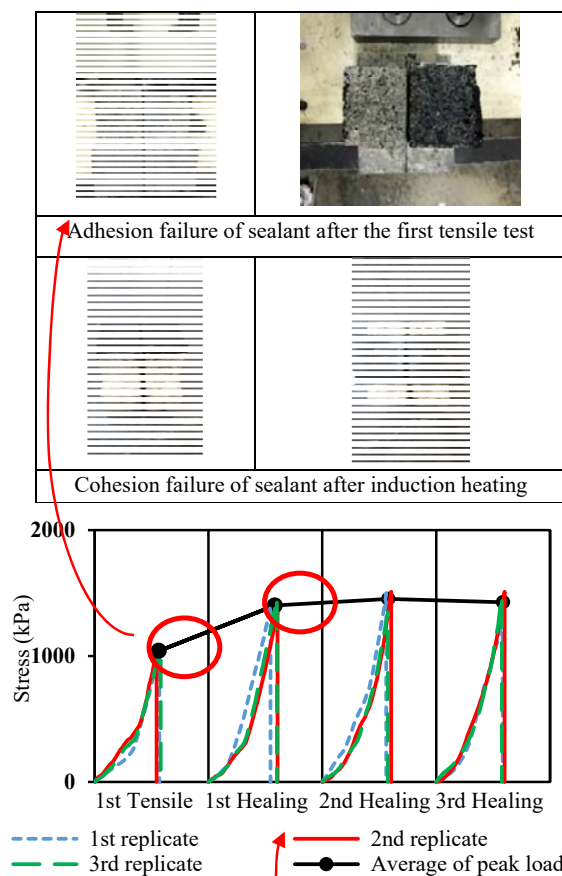


Fig. 7. The trend of stress-strain changes of failure-healing cycles at -10 °C

شکل ۶. دمای قسمت‌های مختلف نمونه بعد از گرمایش القایی (الف) بلوک بتنی: دمای بتن بعد از ۲ دقیقه گرمایش القایی از ۱۶ درجه به ۲۷ تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد رسید. دمای بتن به طور میانگین حدود ۴۰ درجه سانتی‌گراد شد. (ب) ماده درزگیر بین دو لایه مرزی که ضخامتی حدود ۸ تا ۱ میلی‌متر دارد. دمای این قسمت پس از دو دقیقه گرمایش القایی از ۲۶ به ۳۳ درجه رسید. (ج) لایه مرزی بین درزگیر قیری و بلوک بتنی: دما بعد از ۲ دقیقه گرمایش القایی بین ۱۹۰ تا ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد شد.

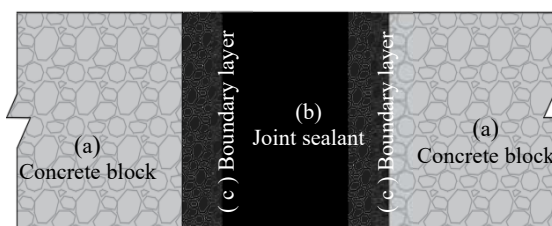


Fig. 6. The temperature of different parts of the specimen after induction heating

۴-۲- نتایج آزمایش کشش

بعد از تکمیل سیکل‌های شکست-ترمیم نمونه‌ها با آزمایش کشش در دماهای ۱۰-، ۲۰- و ۳۰- درجه سانتی‌گراد، نتایج با استفاده از نمودارهای روندی تنش-کرنش و همچنین انرژی شکست (چقرمگی) مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت که در ادامه به آن پرداخته شده است.

۴-۲-۱- بررسی روند تغییرات تنش-کرنش نمونه‌های مختلف باهم

نمودار روند تغییرات تنش کرنش در سیکل‌های مختلف در شکل‌های (۷ و ۸) نشان داده شده است. با توجه به این شکل‌ها در اولین کشش نمونه‌ها در دماهای ۱۰- و ۲۰- درجه سانتی‌گراد به ترتیب میانگین تنش ۱۰۴۱ و ۹۹۸ کیلو پاسکال و میانگین کرنش به ترتیب ۰/۰۵۶ و ۰/۰۵۴ داشتند و شکست‌ها از نوع چسبندگی و یا چسبندگی و پیوستگی (درون ماده) باهم بود. پس از اولین ترمیم نمونه‌ها به ترتیب میانگین تنش ۱۴۰۲ و ۱۳۷۸ کیلوپاسکال تحمل کردند و شکست‌ها بیشتر از نوع پیوستگی بود که این نشان‌دهنده قوی‌تر شدن پیوند بین ماده درزگیر به بتن بود. میانگین کرنش نمونه‌ها هم به ترتیب ۰/۰۵۸ و ۰/۰۵۷ بود که نشان می‌دهد، ماده خاصیت کشش‌پذیری ماده درزگیر با توجه به بانندینگ قوی‌تر به بتن بیشتر شده است. در دومین ترمیم و سومین ترمیم نیز نمونه‌ها تنش و کرنشی نزدیک

۲-۲-۴ بررسی تأثیر گرمایش القایی با استفاده از چقرمگی:

برای بررسی میزان ترمیم به وسیله گرمایش امواج مایکروویو در نظر گرفتن میزان انرژی جذب شده برای شکست ماده درزگیر بسیار حائز اهمیت است. چقرمگی در واقع میزان انرژی جذب شده توسط نمونه قبل از رسیدن به نقطه شکست می‌باشد که به وسیله محاسبه مساحت زیر نمودار تنش- کرنش به دست می‌آید. در جدول (۲) و شکل (۱۰) چقرمگی ماده درزگیر در دماهای مختلف نشان داده شده است. با توجه به نتایج مشخص می‌شود که گرمایش القایی با استفاده از اشعه الکترومغناطیس باعث ترمیم کامل شکست‌ها در هر سه دما و چسبندگی بیشتر نمونه در دماهای ۱۰- و ۲۰- درجه سانتی گراد شده است.

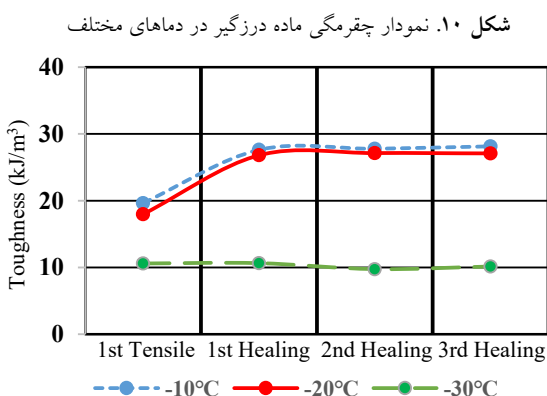


Fig. 10. Diagram of the toughness of the sealant at different temperatures

۴-۲-۳ بررسی تأثیر گرمایش القایی با استفاده از شاخص ترمیم

نتایج به دست آمده از آزمایش کشش نمونه‌ها در زمان شکست در جدول (۳) آورده شده است. با توجه به این نتایج، شاخص ترمیم (HI) نمونه‌ها در حالت‌های تنش، کشش و انرژی شکست محاسبه شد و در جدول (۴) آورده شده است. همان‌طور که در شکل‌های (۱۱ الف و ب) نشان داده شده است نمونه‌های مورد آزمایش در دماهای ۱۰- و ۲۰- درجه سانتی گراد به دلیل ترمیم کامل و چسبندگی قوی‌تر نسبت به کشش اول میزان شاخص ۱/۴ را نشان دادند و میزان کشش‌پذیری برابر ۱ و یا کمی بیش از ۱ داشتند. در دمای ۳۰- درجه سانتی گراد هم نمونه مشابه با کشش اول تنش و کرنش برابری تجربه

شکل ۸. روند تغییرات تنش-کرنش سیکل‌های شکست-ترمیم در دمای ۲۰- درجه سانتی گراد

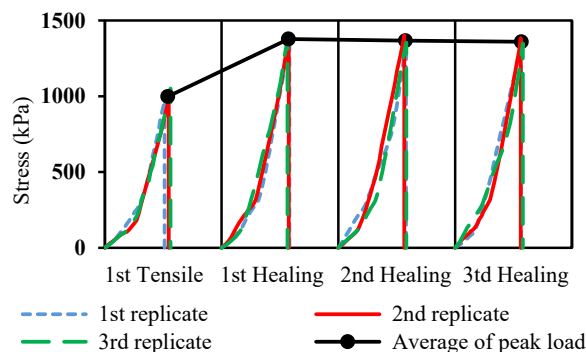


Fig. 8. The trend of stress-strain changes of failure-healing cycles at -20 ° C

جدول ۲. چقرمگی ماده درزگیر

Toughness kJ/m ³	First Tensile	First Healing	Second Healing	Third Healing
-10°C	18.31	27.62	30.01	26.58
	19.51	26.64	28.33	30.63
	21.15	28.6	25.01	27.18
Average	19.65	27.62	27.78	28.13
-20°C	16.51	25.6	27.79	27.84
	17.92	27.43	28	25.46
	19.5	27.37	25.6	27.9
Average	17.98	26.8	27.13	27.07
-30°C	10.6	11.42	10	9.07
	10.4	10.56	8.45	10.45
	10.8	9.94	10.81	10.92
Average	10.6	10.64	9.75	10.15

Table 2. Toughness of sealant

شکل ۹. روند تغییرات تنش-کرنش سیکل‌های شکست-ترمیم در دمای ۳۰- درجه سانتی گراد. شکست پیوستگی (از بین رفتن انسجام ماده درزگیر) بعد از آزمایش کشش سوم

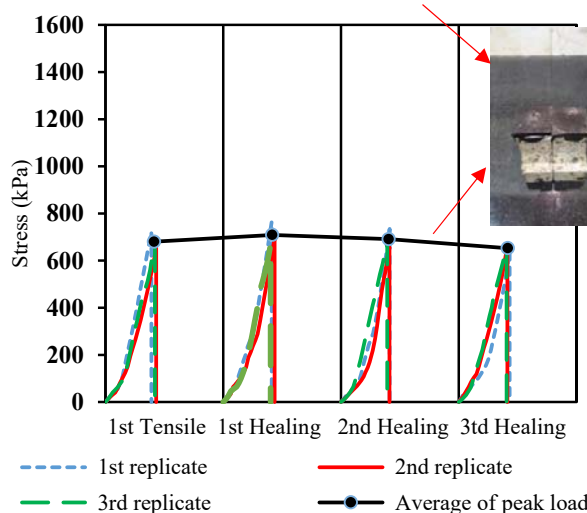


Fig. 9. Trend of stress-strain changes of failure-Healing cycles at -30 ° C .Cohesion failure (loss of sealant cohesion) after the third tensile test

کردند و HI آن تقریباً برابر با ۱ بود. همچنین در شکل (۱۱ ج) شاخص ترمیم ۱/۳ تا ۱/۵ داشتند و در دمای ۳۰- درجه سانتی روند تغییرات HI چقرمگی در سیکل‌های مختلف نشان داده شده است که در دماهای ۱۰- و ۲۰- درجه سانتی گراد تقریباً داشتند.

جدول ۳. نتایج تنش و کرنش نمونه‌ها در زمان شکست

		-10°C		-20°C		-30°C	
Temperature		Strain	Stress (kpa)	Strain	Stress (kpa)	Strain	Stress (kpa)
Specimen 1	First Tensile	0.057	1003	0.0512	966	0.039	723
	First Healing	0.0545	1399	0.058	1367	0.0412	765
	Second Healing	0.0562	1499	0.058	1346	0.0413	735
	Third Healing	0.0585	1295	0.0564	1346	0.0431	644
Specimen 2	First Tensile	0.0545	1062	0.0548	978	0.0431	655
	First Healing	0.0607	1346	0.0575	1391	0.0436	694
	Second Healing	0.0605	1511	0.0564	1402	0.0412	657
	Third Healing	0.0601	1511	0.0562	1384	0.0413	663
Specimen 3	First Tensile	0.058	1058	0.0562	1052	0.042	664
	First Healing	0.060	1460	0.0564	1377	0.0402	667
	Second Healing	0.0577	1349	0.0582	1354	0.0393	681
	Third Healing	0.0578	1475	0.058	1349	0.0406	653
Average	First Tensile	0.056	1041	0.054	998	0.041	680
	First Healing	0.058	1402	0.057	1378	0.042	709
	Second Healing	0.058	1453	0.058	1368	0.041	691
	Third Healing	0.059	1427	0.06	1360	0.042	653

Table 3. Stress and strain results of specimens at the time of failure

جدول ۴. شاخص ترمیم تنش و کرنش نمونه‌ها

Temperature		-10°C		-20°C		-30°C	
		HI (Strain)	HI (Stress)	HI (Strain)	HI (Stress)	HI (Strain)	Hi (stress)
First Healing	Specimen 1	0.96	1.39	1.13	1.42	1.06	1.06
	Specimen 2	1.11	1.27	1.05	1.42	1.01	1.06
	Specimen 3	1.03	1.38	1	1.32	0.96	1
	Average	0.99	1.39	1.12	1.4	1.07	0.99
Second Healing	Specimen 1	0.99	1.49	1.13	1.39	1.06	1.02
	Specimen 2	1.11	1.42	1.03	1.43	0.96	1
	Specimen 3	0.99	1.28	1.04	1.29	0.94	1.03
	Average	1.11	1.37	1.04	1.42	0.98	1.02
Third Healing	Specimen 1	1.03	1.29	1.1	1.39	1.11	0.89
	Specimen 2	1.1	1.42	1.03	1.42	0.96	1.01
	Specimen 3	1	1.39	1.03	1.28	0.97	0.98
	Average	1.01	1.35	1.01	1.29	0.96	1

Table 4. Stress and strain healing index of specimens

شکل ۱۱. روند تغییرات HI (الف) تنش، (ب) کرنش و (ج) چقرمگی در سیکل‌های مختلف

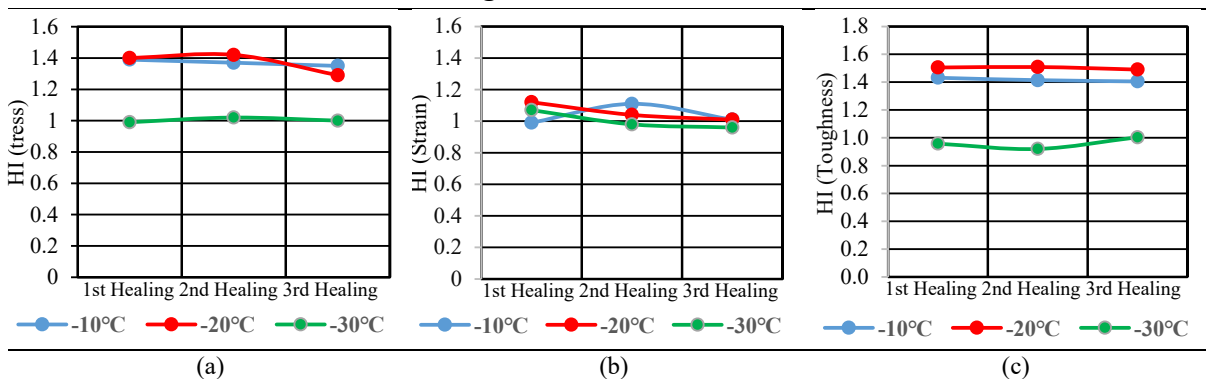


Fig. 11. HI trend changes (a) stress, (b) strain and (c) toughness in different cycles

۵. نتیجه گیری

در این پژوهش اثر ترمیم القایی به وسیله گرمایش ناشی از امواج مایکروویو برای ترمیم شکست‌های چسبندگی و پیوستگی ماده درزگیر قیری بررسی شد. در ابتدا برای بررسی تأثیر ترمیم القایی، نمونه و فیکسچر جدیدی برای آزمایش کشش درزگیر طراحی و ساخته شد. این آزمایش با توجه به شکست درزگیر قیری در دمای پایین، در دماهای ۱۰-، ۲۰- و ۳۰- درجه سانتی‌گراد انجام شد. پس از هر شکست نمونه توسط دستگاه مایکروویو به مدت ۲ دقیقه گرم شد و دوباره آزمایش کشش تا شکست انجام شد. این فرایند برای سه سیکل انجام گرفت. با استفاده از نتایج آزمایش کشش و همچنین عکس‌های حرارتی، نتایج ذیل حاصل شد:

۱- گرمایش القایی با استفاده از امواج مایکروویو باعث ترمیم کامل ماده درزگیر می‌شود به طوری که میزان تنش و چقرمگی بیشتری نسبت به کشش اول متحمل شدند.

۲- امواج مایکروویو دمای ماده درزگیر را در جایی که در تماس با بتن هست بالا می‌برد و این افزایش دما به اندازه‌ای است که باعث روان شدن ماده درزگیر می‌شود و دمای بتن خیلی بالا نمی‌رود که باعث آسیب بشود.

۳- از نتایج مهم این پژوهش، عدم استفاده از ماده رسانا یا دوقطبی برای ترمیم القایی است. این موضوع باعث استفاده این نوآوری برای درزگیرهایی که هم‌اکنون دچار خرابی شده‌اند، می‌شود.

۴- کاهش دما از ۲۰- به ۳۰- درجه سانتی‌گراد باعث افت چشمگیر مقاومت چسبندگی مواد درزگیر می‌شود و

خرابی آن از خرابی پیوستگی در ۲۰- درجه سانتی‌گراد به خرابی چسبندگی در ۳۰- درجه سانتی‌گراد تبدیل می‌شود.

۵- میانگین شاخص ترمیم برای نمونه‌ها در دمای ۳۰- درجه سانتی‌گراد تقریباً برابر با ۱ بود و مثل شاخص ترمیم در دماهای ۱۰- و ۲۰- نبود که دلیل آن کاهش شدید چسبندگی و پیوستگی ماده درزگیر در این دما بود.

۶- شاخص ترمیم تنش و چقرمگی بعد از ترمیم با استفاده از گرمایش القایی توسط امواج مایکروویو در دماهای ۲۰- و ۱۰- درجه سانتی‌گراد حدود ۱/۳ تا ۱/۵ می‌شود و شاخص ترمیم کرنش به اندازه ۱ می‌شود. در دمای ۳۰- درجه سانتی‌گراد شاخص ترمیم هر سه مورد حدود ۱ می‌شود که بسیار قابل قبول است.

۷- ترمیم القایی مواد درزگیر با استفاده از امواج مایکروویو روشی بسیار کم‌هزینه، کوتاه و پربازده در مقابل درزگیری مجدد درزهای روسازی بتنی است.

۶-مراجع

- [1] "Federal Highway Administration. Concrete Pavement Joints, US Department of Transportation Technical Advisory No. T 5040.30; November 30, 1990."
- [2] and A. R. R. L.D. Evans, K.L. Smith, "Materials and Procedures for Repair of Joint Seals in Portland Cement Concrete Pavements Manual of Practice," *Strateg. Highw. Res. Progr. Natl. Res. Counc.*, p. 127, 1999.
- [3] X. Hu, F. Zhou, and T. Scullion, "Development of the crack sealant adhesion test.," 2009.
- [4] S. R. White *et al.*, "Autonomic healing of polymer composites," *Nature*, vol. 409, no. 6822, pp. 794-797, Feb-2001.

- healing of asphalt mixture by microwave and induction heating," *Mater. Des.*, vol. 106, pp. 404–414, 2016.
- [14] M. M. Karimi, M. K. Darabi, H. Jahanbakhsh, B. Jahangiri, and J. F. Rushing, "Effect of steel wool fibers on mechanical and induction heating response of conductive asphalt concrete," *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–14, 2019.
- [15] M. M. Karimi, H. Jahanbakhsh, B. Jahangiri, and F. Moghadas Nejad, "Induced heating-healing characterization of activated carbon modified asphalt concrete under microwave radiation," *Constr. Build. Mater.*, vol. 178, pp. 254–271, 2018.
- [16] H. Jahanbakhsh, M. M. Karimi, B. Jahangiri, and F. M. Nejad, "Induction heating and healing of carbon black modified asphalt concrete under microwave radiation," *Constr. Build. Mater.*, vol. 174, pp. 656–666, 2018.
- [17] B. Chen, B. Li, Y. Gao, T. C. Ling, Z. Lu, and Z. Li, "Investigation on electrically conductive aggregates produced by incorporating carbon fiber and carbon black," *Constr. Build. Mater.*, vol. 144, pp. 106–114, 2017.
- [18] "AASHTO TP 91 - Standard Method of Test for Determining Asphalt Binder Bond Strength by Means of the Binder Bond Strength (BBS) Test | Engineering360."
- [19] ASTM, "Standard Test Methods for Sealants and Fillers, Hot-Applied, for Joints and Cracks in Asphaltic and Portland Cement Concrete Pavements," vol. D5329 – 15, pp. 1–9, 2016.
- [5] Y. C. Yuan, T. Yin, M. Z. Rong, and M. Q. Zhang, "Self healing in polymers and polymer composites. Concepts, realization and outlook: A review," *Express Polymer Letters*, vol. 2, no. 4, pp. 238–250, Apr-2008.
- [6] M. K. Darabi, R. K. Abu Al-Rub, and D. N. Little, "A continuum damage mechanics framework for modeling micro-damage healing," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 49, no. 3–4, pp. 492–513, Feb. 2012.
- [7] J. Gallego, M. A. Del Val, V. Contreras, and A. Páez, "Heating asphalt mixtures with microwaves to promote self-healing," *Constr. Build. Mater.*, vol. 42, pp. 1–4, 2013.
- [8] T. Kim, J. Lee, and K. H. Lee, "Microwave heating of carbon-based solid materials," *Carbon Letters*, vol. 15, no. 1, pp. 15–24, 2014.
- [9] Z. Zhang *et al.*, "Investigation on the rapid degradation of congo red catalyzed by activated carbon powder under microwave irradiation," *J. Hazard. Mater.*, vol. 147, no. 1–2, pp. 325–333, 2007.
- [10] J. A. Menéndez, M. Inganzo, and J. J. Pis, "Microwave-induced pyrolysis of sewage sludge," *Water Res.*, vol. 36, no. 13, pp. 3261–3264, 2002.
- [11] B. Krieger-Brockett, "Microwave pyrolysis of biomass," *Res. Chem. Intermed.*, vol. 20, no. 1, pp. 39–49, Jan. 1994.
- [12] A. Menozzi, A. Garcia, M. N. Partl, G. Tebaldi, and P. Schuetz, "Induction healing of fatigue damage in asphalt test samples," *Constr. Build. Mater.*, vol. 74, pp. 162–168, 2015.
- [13] J. Norambuena-Contreras and A. Garcia, "Self-

Healing of transverse joints fillers in concrete pavement using induced heating by electromagnetic radiations

Abolfazl Hasani ^{1*}, Mohammad Asadi ², Mohammad M. Karimi ³

1- Professor, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modarres University

2- M.Sc. Student, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University

3- Assistant Professor, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University

hassani@modares.ac.ir

Abstract

Proper and timely maintenance of concrete pavement plays a decisive role in increasing the life of these pavements. Joint plain concrete pavement is a type of concrete pavement used for roads. One of the important parts of this type of pavement is the joints created in it. The use of joints to provide conditions for expansion and contraction in concrete pavements and thus reduce stresses due to changes in weather conditions (temperature and humidity), friction, and facilitate the manufacturing process. Due to the fact that the joint in the joint plain concrete pavements is a weakened area for the conduction of cracks from unforeseen areas of the concrete slab to it, the entry of water and other materials into it causes penetration into the underlying layers of the slab to prevent penetration. Joint Sealants are used in these areas. Hot applied bitumen sealant is one of the most common sealants used in joints, which is based on bitumen. One of the key factors in the longevity of concrete pavement is the proper functioning of the joint and joint sealant. The adhesion and cohesion failures are two main damage types in the hot-applied bituminous joint sealants in concrete pavement joints. The mentioned failures are caused by the contraction of concrete pavement under the temperature drop and fluctuation as well as vertical displacement due to passing traffic load. The failure in joint sealant causes elimination of water proofing feature in joints leading to penetration of water into the sublayers. Subsequently, the presence of water in sublayers results in pumping of water under the concrete slab, which leads to other failures types, such as faulting, blow up, corner break. The resealing of joint sealant is the commonly used approach to repair the joints, which takes considerable costs, times and environmental consequences. In recent years, induction heating has attracted substantial attentions among the pavement engineers for innovative applications, specifically for induced healing. The researchers used this method in asphalt mixtures to heal cracks and microcracks. To make the electromagnetic radiations more effective, they used bipolar additives such as activated carbon and carbon black to raise the temperature of the asphalt mixture and cover the cracks and microcracks. In this study, the induction heating and induced healing of asphalt binder was carried out in reaping the joint sealant and to recover the cohesion-adhesion failures. To this end, a new testing setup and frame were designed to conduct the tensile test on hot-applied bituminous joint sealant. First, the sealant bitumen was placed between two concrete blocks, and then the specimens were conditioned at low temperatures (i.e. -10 °C, -20 °C, and -30 °C). After conditioning, the tensile under a displacement controlled loading test was carried out until failure point of joint sealant. Subsequently, the broken joint sealants were exposed to the electromagnetic radiation in a microwave machine to heat and heal the joint sealant. Then, the tensile test was again conducted on the specimen until failure point. The results showed that induced healing can recover and heal the joint sealant experienced cohesion-adhesion under contraction loading. This observation indicates that the induced heating is a potential technique to repair the joint sealants in jointed concrete pavements.

Keywords: Hot-applied bituminous joint sealant, Induction heating, concrete pavement joints, Induction healing, Microwave radiations