

## بررسی اثر گرمایش ماکروویو بر خودترمیمی مخلوط‌های آسفالتی حاوی الیاف رسانا

سعید حسامی\*، استادیار گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی

نوشیروانی بابل

ابراهیم حسامی، استادیار گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی

نوشیروانی بابل

محمد قلی‌پور گودرزی، دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران،

دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

Email: S.hesami@nit.ac.ir

دریافت: ۹۵/۰۸/۰۵ - پذیرش: ۹۵/۱۱/۰۷

### چکیده

بتن آسفالتی یک ماده خودترمیم است و هنگامی که در معرض دوره‌های استراحت قرار می‌گیرد، قادر است به صورت خودکار خرابی‌ها را ترمیم نماید. ترمیم بتن آسفالتی، بهبود مقاومت و سفتی آن، به دلیل بسته شدن ترک‌های داخلی، می‌باشد. با این حال، میزان ترمیم در دمای محیط، به‌ویژه در دمای کم، آهسته است و نمی‌توان جریان ترافیک روی جاده را برای رسیدن به ترمیم کافی مسدود نمود. علاوه بر این، خودترمیمی بتن آسفالتی به‌طور قابل توجهی به دما وابسته است و هنگامی که روسازی در معرض دمای بیشتر قرار گیرد، میزان ترمیم افزایش می‌یابد. در این تحقیق، به منظور افزایش ظرفیت خودترمیمی بتن آسفالتی از طریق افزایش دما، فرایند گرمایش ماکروویو استفاده شد. به منظور افزایش بازدهی گرمایش توسط ماکروویو، مقادیر مختلف فیبر کربن و الیاف آهن به مخلوط آسفالتی اضافه شد. طبق نتایج آزمایش تعیین نوع و درصد الیاف بهینه، مشخص گردید که نمونه‌های حاوی فیبر کربن بازدهی بهتری نسبت به نمونه‌های حاوی الیاف آهن دارند. همچنین، درصد بهینه فیبر کربن برابر ۰/۲ درصد وزن کل مخلوط آسفالتی به‌دست آمده است. علاوه بر این، به منظور بررسی فرایند خودترمیمی در مخلوط آسفالتی، نمونه‌های ساخته شده تحت آزمایش تعیین عمر خستگی، آزمایش دوام کانتابرو و آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم قرار گرفتند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که اعمال گرمایش سبب افزایش میزان ترمیم عمر خستگی و مقاومت کششی می‌گردد و نمونه‌های تخریب شده می‌توانند بخشی از خصوصیات از دست رفته خود را بازیابند. همچنین، با افزایش دمای گرمایش، میزان ترمیم افزایش می‌یابد. علاوه بر این، مشخص گردید که گرمایش نبایستی خیلی دیر اعمال گردد. نتایج آزمایش دوام کانتابرو نشان می‌دهد که چنانچه در بین دوران‌ها گرمایش اعمال گردد، به دلیل افزایش چسبندگی میان قیر و سنگدانه، شاهد کاهش جدایی سنگدانه خواهیم بود.

واژه‌های کلیدی: خودترمیمی، گرمایش ماکروویو، مخلوط آسفالتی، فیبر کربن، الیاف آهن

## ۱. مقدمه

خودترمیمی<sup>۱</sup> می‌تواند به عنوان توانایی موجود در یک ماده برای ترمیم خودکار آسیب‌های به‌وجود آمده در طول عمر بهره‌برداری آن تعریف شود (وایت و همکاران، ۲۰۰۱). 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 تمام عیار منجر شوند. در حال حاضر، محققین عرصه‌ی علم مواد تلاش می‌کنند تا با افزودن اجزای خودترمیم به مواد طبیعی، عمر بهره‌برداری آن‌ها را بهبود بخشند. مصالح با قابلیت خودترمیمی می‌توانند به صورت ذاتی خرابی‌های ناشی از استفاده‌ی معمولی را تصحیح کنند و سبب کاهش ناکارآمدی به‌وجود آمده در ماده شوند. همچنین، با افزایش عمر ماده، در طولانی مدت، هزینه‌های مربوط به برخی از فرایندهای تولید (به عنوان مثال هزینه مربوط به سنگدانه و قیر جدید) کاهش می‌یابد و از هزینه‌های به‌وجود آمده توسط خرابی مصالح نیز جلوگیری می‌شود (یوان و همکاران، ۲۰۰۸).

### ۱-۱. خودترمیمی بتن آسفالتی

بتن آسفالتی نیز می‌تواند خرابی‌ها را به‌صورت خودکار ترمیم کند. بتن آسفالتی هنگامی که در معرض دوره‌های استراحت قرار می‌گیرد دارای پتانسیل ترمیم سفتی<sup>۲</sup> و مقاومت<sup>۳</sup> خود می‌باشد. در دهه‌ی ۱۹۶۰، با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی و همچنین، عملیات میدانی، قابلیت خودترمیمی بتن آسفالتی مورد تأیید قرار گرفت (بازین و سانیر، ۱۹۶۷؛ ون دیک و همکاران، ۱۹۷۲؛ فرانکن، ۱۹۷۹). برخی از پژوهشگران دریافته‌اند که

- 1- Self-healing
- 2- Stiffness
- 3- Strength

تیرچه‌های بتن آسفالتی شکسته شده تحت بارهای کششی تک‌محوره، پس از استراحت در دمای ۲۵ درجه‌ی سلسیوس می‌توانند ۹۰٪ مقاومت اصلی خود را بازیابند (بازین و سانیر، ۱۹۶۷). همچنین، دریافته‌اند نمونه تیرچه‌های معیوب ناشی از خستگی می‌توانند مجدداً بیش از نیمی از عمر خستگی اصلی خود را پس از یک دوره استراحت یک روزه به‌دست آورند. بهبود مقاومت و عمر خستگی نشان می‌دهد که طی دوره استراحت در نمونه‌ها، ترمیم صورت گرفته است. همچنین، تحقیقاتی برای بررسی تأثیر اعمال دوره‌های استراحت در حین بارگذاری بر بهبود مقاومت و افزایش عمر خستگی مخلوط آسفالتی صورت گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد در صورت اعمال دوره‌های استراحت در بین سیکل‌های بارگذاری، عمر خستگی افزایش می‌یابد (کاسترو و سانچز، ۲۰۰۶؛ لیتل و باسین، ۲۰۰۷). مطالعات میدانی نیز خواص خودترمیمی بتن آسفالتی را مورد تأیید قرار می‌دهد. سفتی روسازی با استفاده از اندازه‌گیری امواج سطحی قبل از بارگذاری، بلافاصله بعد و ۲۴ ساعت پس از آن ارزیابی شد. مشاهده گردید که پس از ۲۴ ساعت استراحت، سفتی به‌طور کامل بهبود یافت (ویلیامز و همکاران، ۲۰۰۱). همچنین، بسیاری از محققین گزارش کرده‌اند که ترک‌های مشاهده شده در زمستان در فصل تابستان ناپدید می‌شوند.

### ۲-۱. تشریح خودترمیمی بتن آسفالتی

مکانیسم ترمیم بتن آسفالتی توسط بسیاری از پژوهشگران ارائه گردیده است (کاسترو و سانچز، ۲۰۰۶؛ فیلیپس، ۱۹۸۸؛ باسین و همکاران، ۲۰۰۸؛ کرینگوس و همکاران، ۲۰۰۹). ترمیم معمولاً مربوط به خواص سئل-ژل<sup>۴</sup> قیر می‌باشد. قیر به صورت مرسوم به

4 Sol-Gel

می‌شود (فیلیپس، ۱۹۸۸؛ باسین و همکاران، ۲۰۰۸). همچنین، از مدل شیمی- مکانیکی برای شبیه‌سازی ترمیم قیر استفاده گردید. از لحاظ مکانیکی، ثابت شده است که خط اتصال بین دو ماده با خصوصیات سفتی متفاوت نقش القا کننده‌ی طبیعی تنش را دارند. این بدان معناست که وقتی مواد تحت بارگذاری مکانیکی یا محیطی قرار می‌گیرند تمایل به جدایش فازی دارد و خط اتصال حاصل از فازها تنش‌های زیادی را جذب می‌کند و مستعد ترک خوردگی می‌باشد. با افزایش دما، یا وارد کردن انرژی مکانیکی، فازها مجدداً خودشان را به شکل جدید مرتب می‌کنند و یا خود را برای یک حالت همگن‌تر ترکیب می‌نمایند و یک تک‌فاز را ارائه می‌دهند. مواد بدین گونه ترک‌ها را پوشش می‌دهند و در نتیجه خواص مکانیکی بهبود می‌یابد (کرینگوس و همکاران، ۲۰۰۹).

### ۳-۱. عوامل مؤثر بر خودترمیمی بتن آسفالتی

عوامل بسیاری می‌تواند میزان ترمیم بتن آسفالتی را تحت تأثیر قرار دهد (آیار و همکاران، ۲۰۱۶). این عوامل را می‌توان در سه دسته کلی خواص قیر، ترکیبات مخلوط آسفالتی و محیط مورد ارزیابی قرار داد:

**خواص قیر:** با توجه به این که بتن آسفالتی به دلیل پتانسیل خودترمیمی قیر توانایی ترمیم خود را دارد، نمی‌توان تأثیر خواص قیر در پتانسیل خودترمیمی بتن آسفالتی را انکار نمود. از جمله مواردی که بر خواص خودترمیمی قیر تأثیرگذار هستند شامل: نوع قیر، خواص ویسکوالاستیک قیر، تراکم انرژی سطحی، ترکیبات قیر، پخش مولکولی، پیر شدگی و اصلاح کننده‌ها می‌باشند.

**ترکیبات مخلوط آسفالتی:** ترکیبات مخلوط آسفالتی که شامل مقدار قیر، دانه‌بندی، ویژگی‌های ساختاری دانه‌ها

عنوان یک سیستم کلوئیدی شامل ذرات آسفالتن<sup>۱</sup> با وزن مولکولی زیاد که در مالتن‌های<sup>۲</sup> روغنی با وزن مولکولی کمتر پراکنده شده و یا به صورت محلول در آن وجود دارد، در نظر گرفته می‌شود (شل، ۱۹۹۵). در سیستم سُل- ژل قیر، تبدیل سُل به ژل یا ژل به سُل با توجه به تغییرات دما و تنش اتفاق می‌افتد. خواص کلوئیدی قیر از نوع ژل مانند در دمای کم به نوع سُل مانند در دمای زیاد تغییر می‌کند. هنگامی که دما کاهش می‌یابد، خواص کلوئیدی قیر از سُل به ژل تغییر می‌کند. بارگذاری سبب می‌گردد قیر مانند سُل رفتار کند (درست مانند آب) و هنگامی که بارگذاری پایان می‌یابد، خواص قیر بلافاصله به حالت ژل مانند تغییر می‌کند. برخی پژوهشگران، ترمیم مخلوط آسفالتی در طول دوره‌های استراحت را به وسیله‌ی تئوری سُل- ژل بیان کردند. در آزمایش خستگی، هنگامی که نمونه آسفالتی تحت بارهای تکراری قرار می‌گیرد، خواص کلوئیدی قیر به تدریج از حالت ژل به حالت سُل تغییر می‌کند. در نتیجه در دوره‌های استراحت، ترمیم با توجه به بازگشت مجدد سُل به ساختار ژلاتینی قیر صورت می‌گیرد. در صورتی که زمان استراحت کافی باشد، ترمیم تقریباً کامل می‌شود. در دمای کم، دوره‌های استراحت اجازه‌ی ترمیم خرابی‌های ساختاری به وجود آمده توسط چرخه- های بارگذاری را نمی‌دهد و ترمیم تنها به صورت جزئی می‌باشد (کاسترو و سانچز، ۲۰۰۶). همچنین، یک مدل سه مرحله‌ای برای تشریح ترمیم قیر پیشنهاد شد که شامل: ۱- نزدیک شدن سطوح به دلیل تحکیم تنش و جریان قیر، ۲- خیساندن<sup>۳</sup> (چسبندگی دو سطح ترک به یکدیگر به دلیل تراکم انرژی سطحی) و ۳- انتشار<sup>۴</sup> ساختار آسفالتن. مراحل اول و دوم سبب ترمیم مدول (سفتی) و مرحله‌ی سوم سبب ترمیم مقاومت

- 
- 1- Asphaltene
  - 2- Maltene
  - 3- Wetting
  - 4- Diffusion

به‌طوری که مخلوط آسفالتی فاقد افزودنی رسانا تحت گرمایش القایی گرم نمی‌شود. همچنین، در برخی از تحقیقات (وو و همکاران، ۲۰۰۵؛ لیو و همکاران، ۲۰۱۰؛ گارسیا و همکاران، ۲۰۱۱، ۲۰۱۲) مقدار بهینه‌ی افزودنی‌های رسانا را بین ۱/۵ تا ۵ درصد وزنی بیان نمودند که ترکیب این مقدار افزودنی رسانا در مخلوط آسفالتی بسیار مشکل است و در حین اختلاط در هم پیچیده شده و تشکیل توده می‌دهد. علاوه بر این، دستگاه القای الکترومغناطیسی بسیار پیچیده است و نیازمند یک منبع تغذیه‌ی ۵۰ کیلو وات می‌باشد.

در این پژوهش، برای افزایش ظرفیت خودترمیمی از طریق افزایش دما، نوع دیگری از گرمایش مخلوط آسفالتی، که گرمایش توسط ماکروویو می‌باشد، ارائه شده است. در سال‌های اخیر، این روش گرمایش برای وصله‌کاری روسازی در حال خدمت مورد استفاده قرار گرفته است. به‌طوری که امواج ماکروویو، مخلوط آسفالتی مورد استفاده برای وصله و همچنین آسفالت اطراف آن را گرم می‌نماید تا وصله بتواند به‌خوبی به روسازی موجود بچسبد (زانکو و همکاران، ۲۰۱۶).

## ۲. گرمایش ماکروویو

ماکروویو، امواج الکترومغناطیسی مشابه ماهیت رادیویی، نور مرئی و امواج اشعه‌ی ایکس می‌باشد. وجه تمایز امواج ماکروویو، طول موج (فرکانس) آن‌ها است. برای مثال، محدوده طول موج نورهای مرئی بین  $10^{-7}$  تا  $10^{-6}$  متر (بنفش) و  $10^{-7}$  تا  $10^{-4}$  متر (قرمز) می‌باشد. در حالی که ماکروویو دارای طول موج ۳ میلی‌متر تا ۳ متر هستند که متناظر با فرکانس ۱۰۰ مگاهرتز تا ۱۰۰ گیگاهرتز می‌باشند (گالگو و همکاران، ۲۰۱۳). هنگامی که مولکول‌های قطبی مواد در معرض امواج ماکروویو قرار گیرند، شروع به چرخش خواهند کرد. چرخش مولکول‌ها سبب فشار، کشش و برخورد با سایر مولکول‌ها می‌شود و در نتیجه باعث انتقال انرژی به

و ضخامت لایه‌های آسفالتی می‌باشد، بر میزان خودترمیمی بتن آسفالتی تأثیر می‌گذارد.

**محیط:** عوامل محیطی نظیر دما، سابقه‌ی بارگذاری، دوره‌های استراحت و آب نیز خودترمیمی بتن آسفالتی را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

همانطور که قبلاً مطرح گردید، بتن آسفالتی دارای پتانسیل خودترمیمی می‌باشد. با این حال، میزان ترمیم در دمای محیط، به‌ویژه در دمای کم کافی نیست. علاوه بر این، توقف جریان ترافیک به منظور رسیدن به ترمیم کامل غیر منطقی است. بنابراین، افزایش میزان خودترمیمی بتن آسفالتی در مهندسی راه یک کار چالشی می‌باشد.

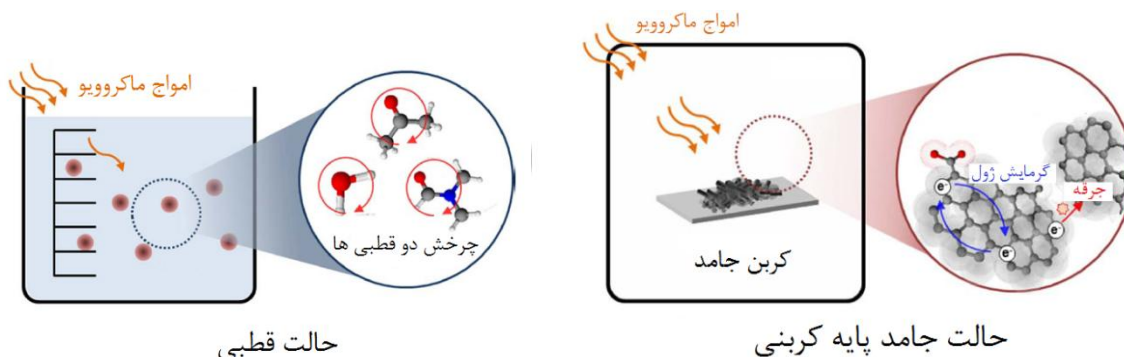
با توجه به مطالب عنوان شده، مشخص گردید که ماهیت ترمیم وابسته به دما می‌باشد و پتانسیل ترمیم ترک‌ها در روسازی آسفالتی، از طریق انتشار و جریان قیر در دمای زیاد، به‌دست می‌آید. بدین منظور، در سال‌های اخیر، جهت به‌دست آوردن توانایی خودترمیمی بتن آسفالتی، از روش گرمایش القایی<sup>۱</sup> برای گرم کردن روسازی استفاده گردیده است (لیو و همکاران، ۲۰۱۱، ۲۰۱۲، ۲۰۱۳، ۲۰۱۴؛ دای و همکاران، ۲۰۱۳؛ کیو و همکاران، ۲۰۱۲؛ گارسیا و همکاران، ۲۰۱۳). این روش، شیوه‌ای امیدبخش می‌باشد زیرا می‌توان از آن برای روسازی‌های در حال خدمت و دست‌یابی به خودترمیمی درجا استفاده نمود. با این حال، یکی از شرایط روش گرمایش مخلوط آسفالتی به‌وسیله‌ی القای الکترومغناطیسی اضافه کردن افزودنی‌های فلزی می‌باشد. این افزودنی‌ها رسانایی مخلوط آسفالتی را افزایش می‌دهد و در نتیجه مخلوط را برای القا حساس‌تر می‌کند و از نظر مصرف انرژی حرارت مؤثرتری را فراهم می‌سازد. روش گرمایش القایی دارای معایبی نیز می‌باشد. از جمله معایب این روش، لزوم استفاده از افزودنی‌های رسانا در مخلوط آسفالتی است.

### 1 Induction Heating

گرمایش مخلوط آسفالتی توسط ماکروویو افزایش یابد. فیبر کربن که عمدتاً از اتم‌های کربن ساخته می‌شود، یکی از مواد جامد پایه کربنی است که به منظور افزایش بازده گرمایش ماکروویو می‌توان آن را با مخلوط آسفالتی ترکیب نمود. همچنین، تحقیقات انجام شده نشان داده که الیاف آهن نیز سرعت گرمایش ماکروویو را افزایش می‌دهد (گالگو و همکاران، ۲۰۱۳). از این رو، جهت افزایش بازده گرمایش ماکروویو و بررسی اثر گرمایش ماکروویو بر خودترمیمی مخلوط‌های آسفالتی، فیبر کربن و الیاف آهن به مخلوط آسفالتی اضافه شد. انتظار می‌رود گرمایش ماکروویو پتانسیل ترمیم در مخلوط‌های آسفالتی آسیب دیده را افزایش دهد.

مولکول‌ها و اتم‌های مجاور می‌گردند. پس از توزیع، این انرژی به صورت گرما ظاهر می‌شود. در مواد جامد غنی از الکترون، مانند مواد جامد پایه کربنی، که هیچ دو قطبی با حرکت چرخشی آزادانه‌ای ندارد، حرکت الکترون‌ها از طریق گرمایش ژول یا تولید جرقه سبب ایجاد گرما می‌شود (کیم و همکاران، ۲۰۱۴). تفاوت مکانیسم گرمایش مواد قطبی و مواد جامد پایه کربنی در شکل ۱ نشان داده شده است.

با توجه به مطالب بیان شده، مواد جامد پایه کربنی توانایی گرم شدن تحت ماکروویو را دارند. در نتیجه، انتظار می‌رود مخلوط آسفالتی حاوی این مواد نسبت به گرمایش توسط ماکروویو حساس‌تر باشند و سرعت



شکل ۱. مکانیسم گرمایش مواد قطبی و مواد جامد پایه کربنی (کیم و همکاران، ۲۰۱۴)

مصالح سنگی از نوع شکسته بوده و از معادن کوهپایه‌ای مازندران تهیه شده است. مشخصات مصالح سنگی در جدول ۲ ارائه شده است. پودر سنگ عبوری از الک ۲۰۰ نیز به عنوان فیلر استفاده شده است. همچنین، مشخصات فیبر کربن مورد استفاده در تحقیق در جدول ۳ ارائه شده است. الیاف آهن مورد استفاده نیز دارای طول ۵ تا ۱۰ میلی‌متر و وزن مخصوص ۷/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد.

### ۳. مواد و روش‌ها

#### ۳-۱. تهیه مصالح مصرفی

مصالح به کار رفته در این تحقیق شامل قیر، مصالح سنگی، فیبر کربن و الیاف آهن می‌باشد. قیر مورد استفاده با درجه نفوذ ۷۰-۶۰ از شرکت نفت جی اصفهان تهیه گردید. مشخصات قیر مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات قیر مورد استفاده در تحقیق

حدود مجاز		نتایج آزمایش	استاندارد روش آزمایش	شرح آزمایش
حد بالا	حد پایین			
۱/۰۱	۱/۰۶	۱/۰۱۳	ASTM D3289	وزن مخصوص ( $gr/cm^3$ )
۶۰	۷۰	۶۸	ASTM D5	درجه نفوذ ( $0.1/mm$ )
۴۹	۵۶	۴۹/۴	ASTM D36	نقطه نرمی ( $^{\circ}C$ )
۱۰۰	---	+۱۰۰	ASTM D113	کشش‌پذیری ( $cm$ )
۲۳۲	---	۳۳۴	ASTM D92	نقطه اشتعال ( $^{\circ}C$ )
۹۹	---	۹۹/۹۷	ASTM D2042	حلالیت ( $wt\%$ )
---	۰/۲	۰/۰۰۳	ASTM D6	اُفت وزنی در اثر حرارت ( $wt\%$ )
---	۲۰	۷/۸	ASTM D6 & D5	کاهش در درجه نفوذ پس از اُفت در اثر دما (%)
Negative		Neg.	AASHTO T102	اثر لکه ی مواد قیری

جدول ۲. مشخصات مصالح سنگی مورد استفاده در تحقیق

مقدار مجاز آیین‌نامه	نتایج آزمایش	استاندارد روش آزمایش	شرح آزمایش
۲۵	۱۸	ASTM C131	درصد سایش به روش لس آنجلس
۸	۱/۸	ASTM C88	حداکثر افت وزنی با سولفات سدیم
۲/۵	۰/۷۲	ASTM C127	حداکثر جذب آب، درصد
---	۲/۶۹	ASTM C127	وزن مخصوص حقیقی مصالح

جدول ۳. مشخصات فیبر کربن مورد استفاده در تحقیق

طول ( $mm$ )	وزن مخصوص ( $gr/cm^3$ )	مقاومت کششی ( $MPa$ )	مدول کششی ( $GPa$ )
۱۰	۱/۷۸	۳۸۰۰-۴۰۰۰	۲۳۰

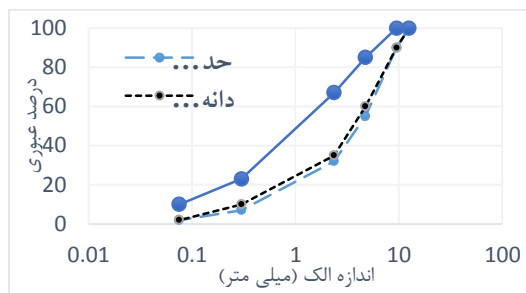
### ۲-۳. دانه‌بندی مصالح سنگی

به منظور بررسی خودترمیمی بتن آسفالتی در لایه‌ی رویه، از بین دانه‌بندی‌های مختلف پیشنهادی نشریه ۲۳۴ (آئین‌نامه روسازی راه‌های آسفالتی ایران، ۱۳۹۰) که به عنوان مرجع اصلی طرح روسازی آسفالتی در ایران استفاده می‌شود، دانه‌بندی شماره ۵ (رویه) برای ساخت نمونه‌های مخلوط آسفالتی انتخاب گردید.

دانه‌بندی مورد استفاده به همراه حدود بالا و پایین آن در شکل ۲ نشان داده شده است.

منظور بررسی سرعت گرمایش ماکروویو، ۳۰ نمونه‌ی آسفالتی مارشال با درصدهای مختلف و انواع متفاوت الیاف ساخته شد.

به منظور بررسی سرعت گرمایش نمونه‌های حاوی فیبر کربن و الیاف آهن، هر نمونه‌ی استوانه‌ای درون ماکروویو قرار داده شد و به مدت ۲۰ ثانیه تحت امواج ماکروویو ۹۰۰ وات با فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز قرار گرفت. سپس نمونه‌ی آسفالتی از ماکروویو خارج شده و دمای سطح آن توسط دماسنج لیزری اندازه‌گیری گردید. چهار دما به صورت تصادفی از سطح نمونه‌ی آزمایش گرفته شد و میانگین آن‌ها محاسبه گشت. سپس، نمونه مجدداً درون ماکروویو قرار داده شد و تحت گرمایش قرار گرفت. این کار ۶ مرتبه برای هر نمونه در زمان کل گرمایش (۱۲۰ ثانیه) انجام شد. با توجه به اینکه نمونه پس از ۱۲۰ ثانیه نرم می‌شود، یک دماسنج میله‌ای درون نمونه قرار داده می‌شود تا دمای داخلی آن نیز اندازه‌گیری شود.



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی مخلوط آسفالتی (آئین نامه روسازی راه‌های آسفالتی ایران، ۱۳۹۰)

### ۳-۳. تعیین درصد قیر بهینه

برای تعیین درصد قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی، از روش طرح اختلاط مارشال (ASTM D1559) استفاده گردید. برای این منظور، سه نمونه برای هر یک از درصدهای قیر ۳/۵، ۴، ۴/۵، ۵، ۵/۵ و ۶ ساخته شد. سپس، به منظور تراکم نمونه‌ها، ۷۵ ضربه چکش مارشال به هر طرف آن اعمال گردید. با توجه به منحنی‌های حاصل از آزمایش مارشال، مقدار قیر بهینه ۴/۵ درصد وزنی مخلوط آسفالتی در نظر گرفته شد.

### ۴. مطالعات آزمایشگاهی

#### ۴-۱. تعیین نوع و درصد الیاف بهینه

به منظور تعیین نوع و درصد الیاف بهینه، نمونه‌های آسفالتی حاوی فیبر کربن و الیاف آهن با استفاده از طرح اختلاط مارشال (ASTM D1559) و اعمال ۷۵ ضربه به هر طرف نمونه، ساخته شد. برای هر درصد فیبر کربن و الیاف آهن مورد استفاده، سه نمونه آسفالتی تهیه گردید. برای فیبر کربن مقادیر ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱ درصد وزنی به مخلوط آسفالتی اضافه شد. پخش و ترکیب الیاف آهن بیشتر از ۰/۲ درصد در مخلوط آسفالتی به سختی صورت می‌پذیرد و الیاف آهن در حین اختلاط در هم پیچیده شده و تشکیل توده می‌دهد. لذا مقدار الیاف آهن مورد استفاده در مخلوط آسفالتی برابر ۰/۲ درصد وزنی در نظر گرفته شد. در نهایت، به

#### ۴-۲. آزمایش تعیین عمر خستگی مخلوط

##### آسفالت متراکم شده تحت خمش تکراری

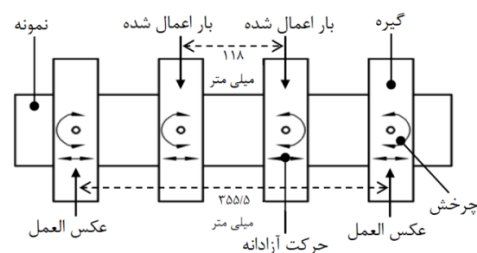
در این تحقیق، آزمایش تعیین عمر خستگی مخلوط آسفالتی حاوی فیبر کربن تحت خمش تکراری، جهت تعیین عمر خستگی و اثر گرمایش ماکروویو انجام گردید. ابعاد تیرچه‌های مورد استفاده در این تحقیق  $۶۳ \times ۳۸۰$  میلی‌متر بود.

قبل از اندازه‌گیری میزان ترمیم، ابتدا عمر خستگی تیرچه‌ها توسط آزمایش تعیین عمر خستگی مخلوط آسفالتی تحت خمش تکراری مطابق استاندارد AASHTO T321 تعیین می‌گردد. هدف از انجام این آزمایش به دست آوردن عمر خستگی تیرچه‌ها تحت آزمایش کرنش کنترل شده می‌باشد. به طوری که میزان خرابی در آزمایش ترمیم بعدی قابل اندازه‌گیری باشد. طرح شماتیک این آزمایش در شکل ۳ ارائه شده است.

سفتی به نصف مقدار اولیه کاهش پیدا کند ادامه می‌یابد.

#### ۴-۲-۱. آزمایش افزایش عمر خستگی

ابتدا برای مقایسه‌ی ترمیم به واسطه‌ی استراحت و ترمیم به واسطه‌ی گرمایش، عمر خستگی افزایش یافته-ی تیرچه‌ها، ناشی از دوره‌های استراحت و گرمایش ماکروویو در فرکانس ۱۰ هرتز، کرنش ۷۰۰ میکرو استرین و دمای ۲۰ درجه‌ی سلسیوس مورد مطالعه قرار گرفت. روش آزمایش شامل مراحل زیر می‌باشد: ۱- شکست تیرچه‌ها در آزمایش تعیین عمر خستگی تحت خمش تکراری تا زمانی که سفتی خمشی به ۵۰٪ مقدار اولیه کاهش یابد. ۲- استراحت تیرچه‌ها برای ۱۸ ساعت در دمای محیط یا گرمایش تیرچه‌ها تا دمای ۷۰ درجه‌ی سلسیوس توسط ماکروویو و سپس ۱۸ ساعت استراحت در دمای محیط. ۳- انجام مجدد آزمایش تعیین عمر خستگی روی تیرچه‌هایی که استراحت داده شده‌اند و یا تحت گرمایش قرار گرفته‌اند. در مرحله‌ی سوم، مقدار عمر خستگی به‌دست آمده نشانه‌ای از ترمیم ناشی از استراحت در دمای محیط و گرمایش ماکروویو می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده، شاخص افزایش عمر خستگی از تقسیم  $\Delta f$  بر  $f$  به‌دست می‌آید، که در آن  $\Delta f$  عمر خستگی افزایش یافته ناشی از بهبود سفتی خمشی پس از ترمیم طبیعی یا ترمیم به‌واسطه‌ی ماکروویو و  $f$  عمر خستگی اصلی نمونه برای رسیدن سفتی خمشی به ۵۰٪ مقدار اولیه می‌باشد.



شکل ۳. طرح شماتیک و نحوه‌ی انجام آزمایش تعیین عمر خستگی مخلوط آسفالتی تحت خمش تکراری (لیو و همکاران، ۲۰۱۲)

آزمایش تحت کرنش ۷۰۰ میکرو استرین در دمای ۲۰ درجه‌ی سلسیوس و فرکانس ۱۰ هرتز انجام شد. مقدار اولیه‌ی مدول سفتی خمشی با مقادیر اندازه‌گیری شده نیرو، جابجایی و اختلاف فاز پس از ۵۰ سیکل براساس روابط (۱) تا (۳) محاسبه می‌شود:

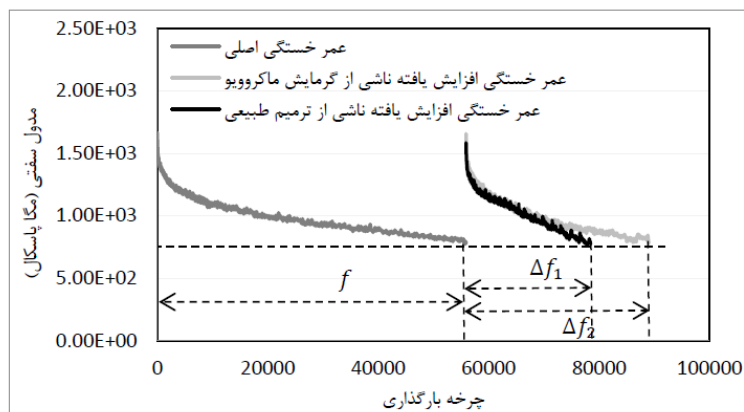
$$\varepsilon = \frac{12\delta h}{(3L^2 - 4a^2)} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{LP}{bh^2} \quad (2)$$

$$S = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3)$$

که  $\varepsilon$  حداکثر ریزکرنش (میکرو استرین) اعمال شده،  $\delta$  حداکثر تغییرشکل بر حسب متر،  $h$  حداکثر ارتفاع نمونه بر حسب متر،  $L$  فاصله‌ی بین دو گیره‌ی بیرونی (۰/۳۵۵ متر)،  $a$  فاصله‌ی بین دو گیره‌ی درونی (۰/۱۱۸۵ متر)،  $\sigma$  حداکثر تنش کششی بر حسب پاسکال،  $P$  بار اعمال شده بر حسب نیوتن،  $b$  میانگین عرض نمونه بر حسب متر و  $S$  سفتی خمشی بر حسب پاسکال می‌باشد. آزمایش خستگی تا زمانی که مدول





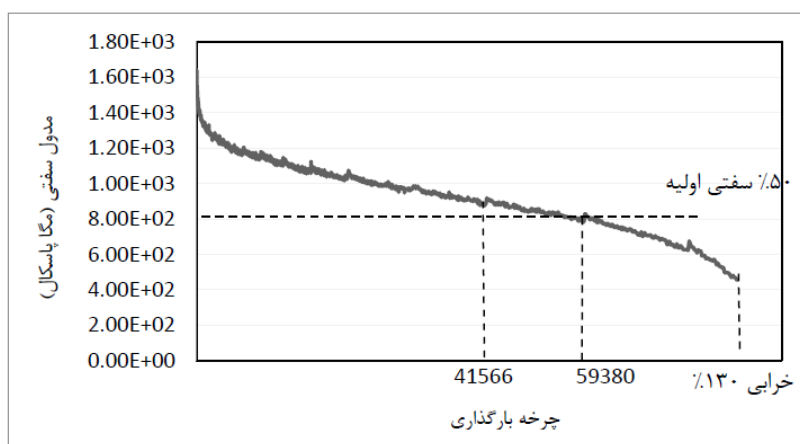
شکل ۴. تعیین نسبت عمر خستگی افزایش یافته

محیط استراحت داده می‌شوند. عمر خستگی تیرچه‌های ترمیم شده در همان سطح کرنش اندازه‌گیری می‌شود.

#### ۳-۴. آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم<sup>۱</sup> مخلوط آسفالتی

این آزمایش به منظور تعیین مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های آسفالتی و تأثیر گرمایش ماکروویو بر ترمیم مقاومت نمونه‌های شکسته شده مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌های آسفالتی حاوی فیبر کربن مورد استفاده در این آزمایش به روش طرح اختلاط مارشال و اعمال ۷۵ ضربه به هر طرف نمونه ساخته شد، که قطر ۱۰۱/۶ و ارتفاع ۶۳/۵ میلی‌متر دارند.

سپس، به منظور تعیین زمان مناسب برای شروع گرمایش، ارتباط بین میزان خرابی و میزان ترمیم مورد مطالعه قرار گرفت. مطابق شکل ۵، سفتی اولیه تیرچه پس از ۵۹۳۸۰ سیکل به ۵۰٪ مقدار اولیه کاهش می‌یابد. میزان خرابی را می‌توان به عنوان چرخه‌های بارگذاری تقسیم بر عمر خستگی اصلی (۵۹۳۸۰ چرخه) تعریف کرد. بنابراین، ۴۱۵۶۶ چرخه‌ی بارگذاری مربوط به میزان خرابی ۷۰٪ و ۵۹۳۸۰ چرخه‌ی بارگذاری مربوط به میزان خرابی ۱۰۰٪ می‌باشد. همچنین، میزان خرابی دیگری برابر ۱۳۰٪ نیز در نظر گرفته شد. مشابه حالت قبل، تیرچه‌های آسیب دیده تحت گرمایش ۷۰ درجه‌ی سلسیوس قرار می‌گیرند و به مدت ۱۸ ساعت در دمای



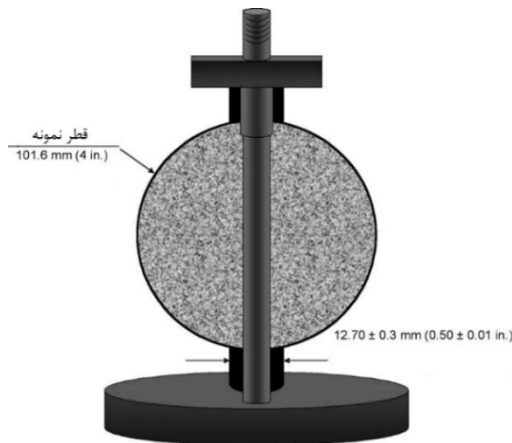
شکل ۵. میزان خرابی‌های متفاوت در آزمایش افزایش عمر خستگی

1- Indirect Tensile (IDT) Strength

#### ۳-۴-۱. بررسی ترمیم مقاومت کششی غیر مستقیم

##### نمونه‌های شکسته شده

در مرحله‌ی اول، به منظور بررسی اثر گرمایش ماکروویو بر میزان ترمیم نمونه‌های شکسته شده، پس از انجام آزمایش IDT جهت قرار گرفتن سطوح ترک در کنار یکدیگر، یک فشار جزئی به طرفین ترک وارد گردید. سپس، نمونه‌ها تا دمای ۷۰ درجه سلسیوس توسط ماکروویو گرم شدند و به مدت ۱۸ ساعت در دمای محیط تحت استراحت قرار گرفتند. پس از ۱۸ ساعت استراحت، نمونه‌ها مجدداً به وسیله‌ی آزمایش IDT شکسته شدند. مقدار مقاومت کششی به دست آمده در آزمایش مجدد IDT نشانه‌ای از ترمیم ناشی از گرمایش ماکروویو می‌باشد.



شکل ۶. طرح شماتیک آزمایش IDT (ASTM D6931)

در مرحله دوم، به منظور تعیین اثر دمای گرمایش ماکروویو بر میزان ترمیم، مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های شکسته شده پس از اعمال دماهای متفاوت بر نمونه اندازه‌گیری شد. برای این منظور، ابتدا نمونه‌های آسفالتی به صورت ۱۰٪ شکسته شد. سپس، نمونه‌ها در دو دمای ۷۰ و ۸۵ درجه سلسیوس توسط ماکروویو تحت حرارت قرار گرفت و پس از آن به مدت ۱۸ ساعت در دمای محیط استراحت داده شد. سرانجام

مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای توسط آزمایش IDT مطابق استاندارد ASTM D6931 تعیین می‌گردد. طرح شماتیک آزمایش IDT در شکل ۶ ارائه شده است.

#### ۳-۴-۳. آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم<sup>۱</sup>

##### مخلوط آسفالتی

این آزمایش به منظور تعیین مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های آسفالتی و تأثیر گرمایش ماکروویو بر ترمیم مقاومت نمونه‌های شکسته شده مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌های آسفالتی حاوی فیبر کربن مورد استفاده در این آزمایش به روش طرح اختلاط مارشال و اعمال ۷۵ ضربه به هر طرف نمونه ساخته شد، که قطر ۱۰۱/۶ و ارتفاع ۶۳/۵ میلی‌متر دارند.

مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای توسط آزمایش IDT مطابق استاندارد ASTM D6931 تعیین می‌گردد. طرح شماتیک آزمایش IDT در شکل ۶ ارائه شده است.

آزمایش در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و نرخ بارگذاری ۵۰ میلی‌متر در دقیقه انجام می‌شود. برای محاسبه‌ی مقاومت کششی غیر مستقیم می‌توان از رابطه-ی (۴) استفاده نمود:

$$S_t = \frac{2000 \times P}{\pi \times t \times D} \quad (4)$$

که در آن  $S_t$  مقاومت کششی غیر مستقیم بر حسب کیلوپاسکال،  $P$  حداکثر بار بر حسب نیوتن،  $t$  ارتفاع نمونه قبل از آزمایش بر حسب میلی‌متر و  $D$  قطر نمونه بر حسب میلی‌متر می‌باشد.

آسفالتی متراکم پیوسته<sup>۵</sup> نیز مشاهده شده است (دویل و همکاران، ۲۰۱۱).

دوام مخلوط آسفالتی متراکم پیوسته با توجه به عملکرد بلندمدت روسازی یک موضوع کلیدی می باشد. بنابراین، می بایست یک آزمایش مؤثر و عملی برای تخمین این پارامتر تبیین گردد. نتایج تحقیقات انجام شده نشان می دهد که آزمایش کانتابرو ملاحظات مهمی به عنوان یک ابزار اندازه گیری دوام مخلوط آسفالتی متراکم پیوسته ارائه می دهد و می توان از آن برای ارزیابی دوام مخلوط آسفالتی استفاده نمود (هاوارد و همکاران، ۲۰۱۴).

نمونه های آسفالتی حاوی فیبر کربن با قطر ۱۰۱/۶ و ارتفاع ۶۳/۵ میلی متر به روش طرح اختلاط مارشال و اعمال ۷۵ ضربه به هر طرف نمونه ساخته شد. نمونه های آسفالتی بدون گوی های فلزی درون استوانه ای دستگاه لس آنجلس قرار می گیرد و ۳۰۰ دور دوران داده می شود. بزرگ ترین تکه ای نمونه از دستگاه خارج شده و توسط بُرس کمی تمیز می گردد و سپس وزن می شود. آزمایش در دمای ۲۵ درجه ی سلسیوس انجام می شود.

#### ۴-۴-۱. بررسی ترمیم دوام

به منظور بررسی ترمیم دوام مخلوط های آسفالتی: ۱- نمونه های آسفالتی تحت ۷۵، ۱۵۰ و ۲۲۵ دور چرخش قرار می گیرند و به ترتیب ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد تخریب می شوند. ۲- نمونه ها از دستگاه لس آنجلس خارج و وزن آن ها اندازه گیری می شود. سپس تحت گرمایش ۸۵ درجه سلسیوس توسط ماکروویو قرار می گیرند. در نهایت، به مدت ۱۸ ساعت در دمای محیط به نمونه ها استراحت داده می شود. ۳- جهت تکمیل آزمایش (۳۰۰ چرخش) نمونه ها به ترتیب ۲۲۵، ۱۵۰ و ۷۵ دور چرخانده می شوند. شکل ۷ نمونه های تخریب شده را قبل و پس از گرمایش نشان می دهد.

مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه ها مجدداً اندازه گیری گردید. در مرحله ی سوم، ارتباط بین میزان خرابی و میزان ترمیم مورد مطالعه قرار گرفت. به این منظور، تعدادی از نمونه ها به صورت ۱۰۰٪ شکسته شدند و تعدادی دیگر تا ۸۰٪ مقاومت کششی غیر مستقیم خود تحت بارگذاری قرار گرفتند. مشابه حالت قبل نمونه های شکسته شده، تحت گرمایش ۸۵ درجه ی سلسیوس قرار می گیرند و به مدت ۱۸ ساعت در دمای محیط استراحت داده می شوند. سپس، مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه های ترمیم شده اندازه گیری می شود. در مرحله ی چهارم برای مقایسه ی ترمیم به واسطه ی استراحت و ترمیم به واسطه ی گرمایش، مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه های شکسته شده پس از دوره های استراحت و گرمایش ماکروویو مورد مطالعه قرار گرفت. روش آزمایش شامل مراحل زیر می باشد: ۱- شکستن ۸۰ درصدی نمونه های استوانه ای (بارگذاری تا ۸۰٪ مقاومت کششی غیر مستقیم) تحت آزمایش IDT؛ ۲- استراحت نمونه ها برای ۱۸ ساعت در دمای محیط یا گرمایش نمونه ها تا دمای ۸۵ درجه ی سلسیوس توسط ماکروویو و سپس ۱۸ ساعت استراحت در دمای محیط و ۳- انجام مجدد آزمایش IDT در همان صفحه ی قطری روی نمونه هایی که استراحت داده شده اند و یا تحت گرمایش قرار گرفته اند.

#### ۴-۴-۲. آزمایش دوام کانتابرو<sup>۱</sup>

آزمایش دوام کانتابرو معمولاً برای مخلوط آسفالتی با دانه بندی باز<sup>۲</sup> و مخلوط آسفالتی متخلخل<sup>۳</sup> جهت تعیین پتانسیل خرابی دانه دانه شدن<sup>۴</sup> و دوام مورد استفاده قرار می گیرد. استفاده از این آزمایش برای مخلوط های

- 1 Cantabro durability test
- 2 Open-graded
- 3 Porous asphalt
- 4 Ravelling

5 Dense-graded

## ۵. نتایج

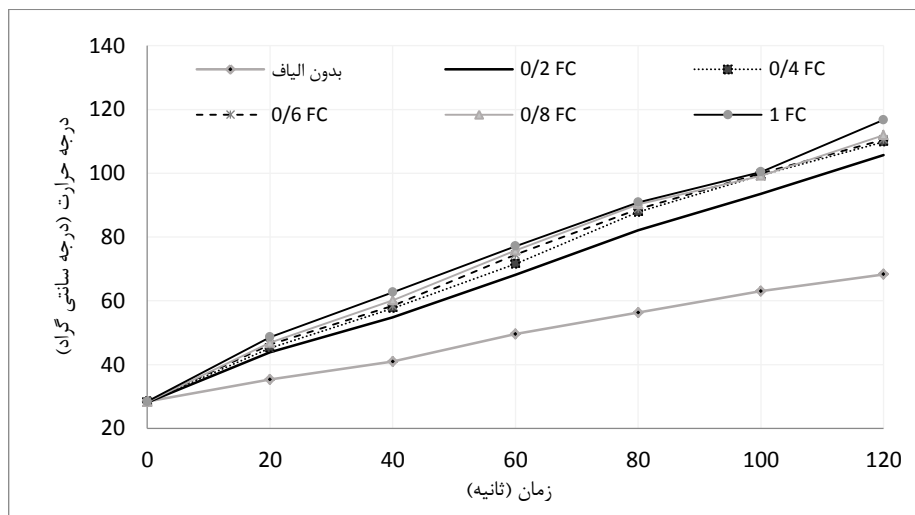
### ۱-۵. تعیین نوع و درصد الیاف بهینه

نتایج گرمایش ماکروویو در چهار نمودار زیر نشان داده شده است، که دو نمودار ۸ و ۱۰ نشان دهنده دمای

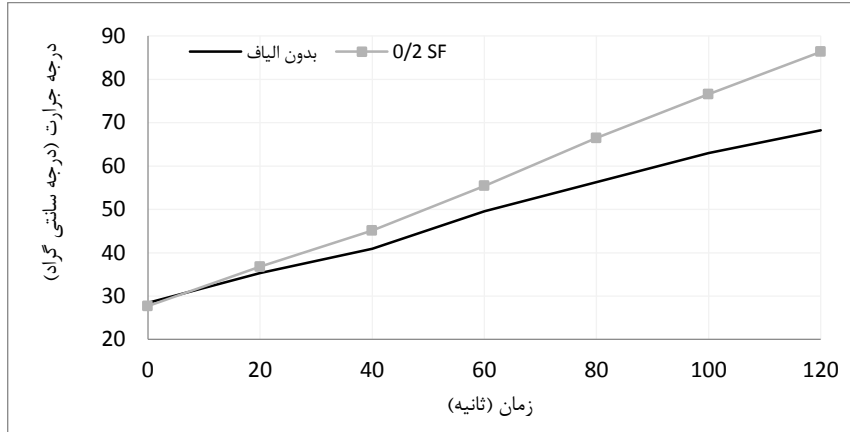
سطحی و داخلی نمونه‌های حاوی فیبر کربن و دو نمودار ۹ و ۱۱ نشان دهنده دمای سطحی و داخلی نمونه‌های حاوی الیاف آهن می‌باشند.



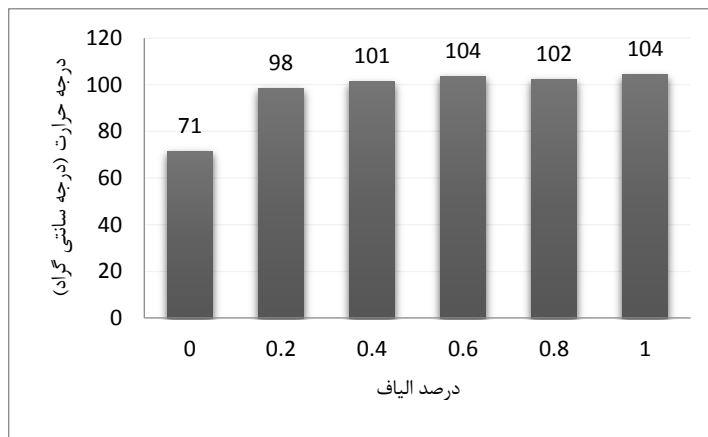
شکل ۷. نمونه‌های تخریب شده بر اثر آزمایش دوام کانتابرو: الف) قبل از اعمال گرمایش و ب) بعد از اعمال گرمایش



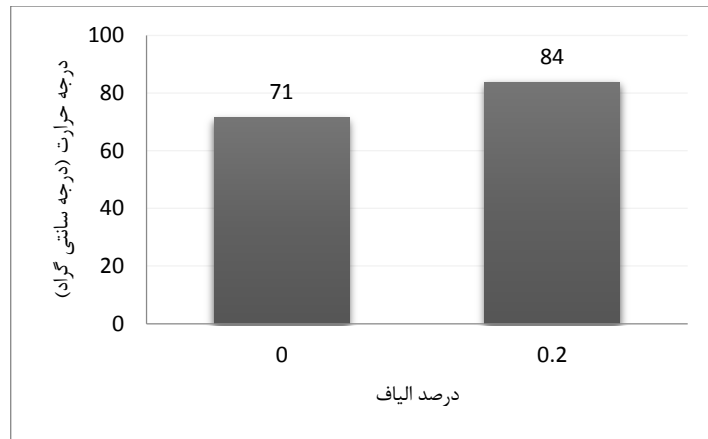
شکل ۸. افزایش دمای سطحی نمونه‌های حاوی فیبر کربن



شکل ۹. افزایش دمای سطحی نمونه‌های حاوی الیاف آهن



شکل ۱۰. افزایش دمای داخلی نمونه‌های حاوی فیبر کربن



شکل ۱۱. افزایش دمای داخلی نمونه‌های حاوی الیاف آهن

الیاف آهن موجب افزایش سرعت گرمایش و بازده ماکروویو می‌شود. همچنین، سرعت افزایش دمای سطحی و داخلی برای فیبر کربن بیشتر از الیاف آهن

با مقایسه‌ی سرعت گرمایش نمونه‌های آسفالتی فاقد افزودنی و نمونه‌های آسفالتی حاوی فیبر کربن و الیاف آهن، مشخص می‌گردد که اضافه نمودن فیبر کربن و

حال، این افزایش ترمیم قابل ملاحظه نمی‌باشد. علت این امر کاهش سریع دمای تیرچه از ۷۰ درجه سلسیوس به دمای استراحت (۲۰ درجه سلسیوس) می‌باشد که در کمتر از ۲ ساعت اتفاق می‌افتد. براساس مطالب گفته شده انتظار می‌رود چنانچه تیرچه‌ها در دمای کمتری استراحت داده شوند اختلاف میان شاخص ترمیم طبیعی و ترمیم به‌واسطه‌ی گرمایش ماکروویو افزایش یابد.

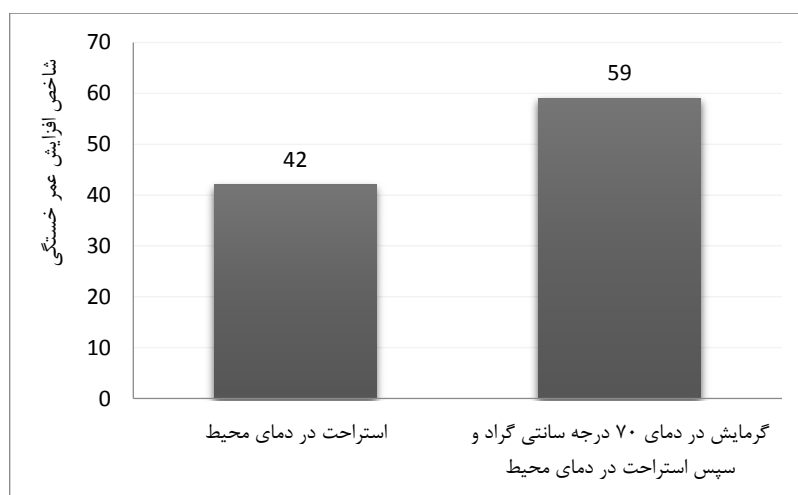
شکل ۱۳ رابطه‌ی بین میزان خرابی و شاخص افزایش عمر خستگی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین شاخص افزایش عمر خستگی برابر ۶۵/۱ است که مربوط به میزان خرابی ۰/۷۰٪ و متناظر با ۴۱۵۷۰ چرخه‌ی بارگذاری می‌باشد. همچنین، هنگامی که نمونه به‌طور کامل شکسته شود، شاخص افزایش عمر خستگی به نسبت کمتر خواهد بود. در این مورد ممکن است میزان خرابی برای ترمیم بزرگ باشد. علاوه بر این، خرابی‌های ایجاد شده در میزان خرابی ۰/۱۳٪ بیش از حد بزرگ می‌باشند. به نحوی که ترک‌های خستگی در نمونه نمایان می‌گردد. در نتیجه، ترمیم آن‌ها بسیار مشکل است و به همین دلیل دارای شاخص افزایش عمر خستگی کمتری می‌باشد.

می‌باشد که با مطالب بیان شده در مورد گرمایش مواد پایه کربنی تحت امواج ماکروویو مطابقت دارد. از طرف دیگر، افزودن الیاف آهن به مخلوط آسفالتی بسیار مشکل است. به نحوی که اضافه کردن بیشتر از ۰/۲ درصد الیاف آهن سبب در هم پیچیده شدن الیاف می‌شود و ایجاد توده می‌کند که روی خصوصیات مکانیکی مخلوط آسفالتی تأثیر منفی می‌گذارد. بنابراین، با توجه به سرعت افزایش دما و سهولت در پخش، فیبر کربن بازدهی بهتری نسبت به الیاف آهن دارد. همچنین، همان‌طور که در شکل‌های ۸ و ۱۰ مشاهده می‌شود، اختلاف دمای سطحی و داخلی برای ۰/۲ و ۰/۴ درصد فیبر کربن ناچیز است. در نتیجه، استفاده از ۰/۲ درصد فیبر کربن بهینه می‌باشد.

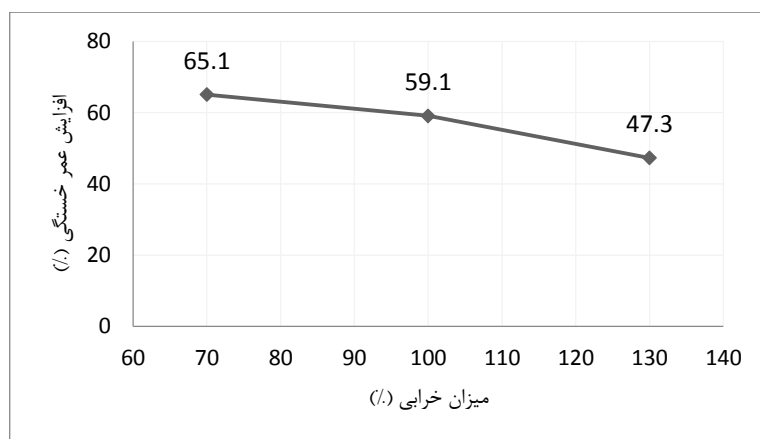
## ۵-۲. آزمایش تعیین عمر خستگی مخلوط

### آسفالت متراکم شده تحت خمش تکراری

براساس نتایج به‌دست آمده، شاخص افزایش عمر خستگی ( $\Delta f/f$ ) تیرچه‌های بتن آسفالتی با ترمیم طبیعی و گرمایش ماکروویو در شکل ۱۲ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با اعمال گرمایش ماکروویو، شاخص عمر خستگی افزایش می‌یابد. با این



شکل ۱۲. شاخص افزایش عمر خستگی



شکل ۱۳. شاخص افزایش عمر خستگی در برابر میزان خرابی

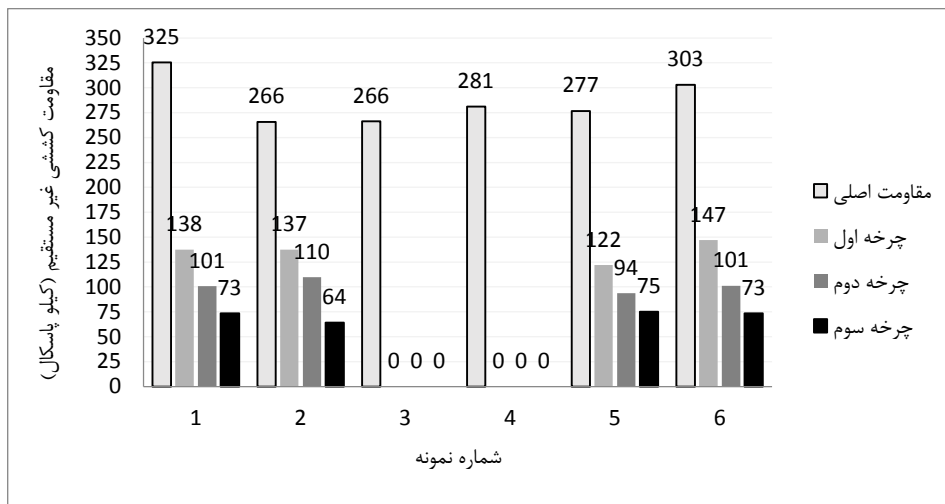
شکست- ترمیم ضریب مقاومت ترمیم شده برای دمای ۷۰ درجه سلسیوس ۴۷٪ می باشد و این مقدار برای دمای گرمایش ۸۵ درجه سلسیوس برابر ۷۱٪ است. همچنین، در سیکل دوم شکست- ترمیم، ضریب مقاومت ترمیم شده برای دمای ۷۰ و ۸۵ درجه‌ی سلسیوس به ترتیب ۳۷ و ۴۶ درصد می باشد. همان طور که قبلاً اشاره شد، افزایش دما سبب افزایش پتانسیل ترمیم می شود.

ارتباط بین میزان خرابی و میزان ترمیم در شکل ۱۶ نشان داده شده است. با توجه به شکل، می توان مشاهده نمود که ضریب مقاومت ترمیم شده برای تخریب ۸۰٪ بیشتر از تخریب ۱۰۰٪ می باشد. دلیل آن، باز شدن بیش از حد ترکها در تخریب ۱۰۰٪ است که ترمیم آنها را مشکل می سازد. همچنین، نمونه های تخریب شده بیش از ۱۰۰٪ به دلیل گسیختگی قابل ترمیم نمی باشند.

### ۳-۵. آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم مخلوط آسفالتی

شکل ۱۴ مقاومت کششی اصلی و بهبود یافته بر اثر گرمایش ماکروویو تا دمای ۷۰ درجه سلسیوس را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، نمونه های شکسته شده توسط آزمایش IDT که در معرض گرمایش ماکروویو قرار می گیرند بخشی از مقاومت کششی غیر مستقیم خود را باز می یابند. همچنین، با افزایش تعداد سیکل ها، میزان خرابی افزایش می یابد که باعث کاهش میزان مقاومت کششی غیر مستقیم می گردد. چنانچه ضریب مقاومت ترمیم شده را مقاومت بهبود یافته تقسیم بر مقاومت اصلی تعریف کنیم، این نسبت برای سیکل اول تا سوم شکست- ترمیم نمونه ها برابر مقادیر ارائه شده در جدول ۴ می باشد.

شکل ۱۵، تأثیر دمای گرمایش بر میزان ترمیم مقاومت کششی غیر مستقیم را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می گردد با افزایش دمای گرمایش، مقدار مقاومت کششی غیر مستقیم بهبود یافته برای تمامی سیکل ها افزایش می یابد. به نحوی که در سیکل اول



شکل ۱۴. مقاومت کششی غیر مستقیم اصلی و بهبود یافته

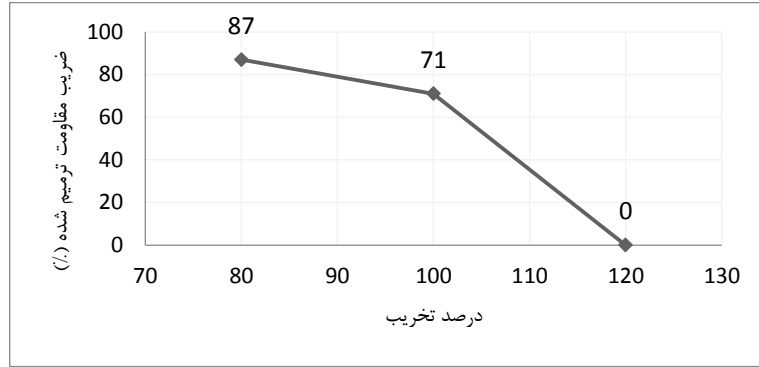
جدول ۴. ضریب مقاومت ترمیم شده (%)

نمونه	۱	۲	۳	۴	۵	۶
سیکل اول	۴۲	۵۲	—	—	۴۴	۴۸
سیکل دوم	۳۱	۴۱	—	—	۳۴	۳۳
سیکل سوم	۲۳	۲۴	—	—	۲۷	۲۴

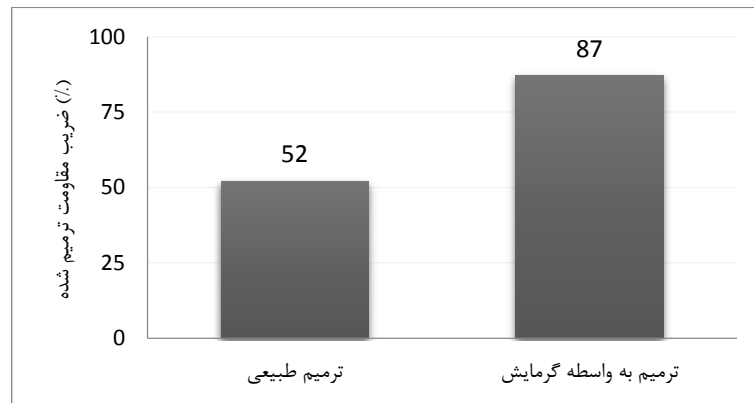


شکل ۱۵. ترمیم مقاومت کششی غیر مستقیم برای دمای گرمایش ۷۰ و ۸۵ درجه سلسیوس

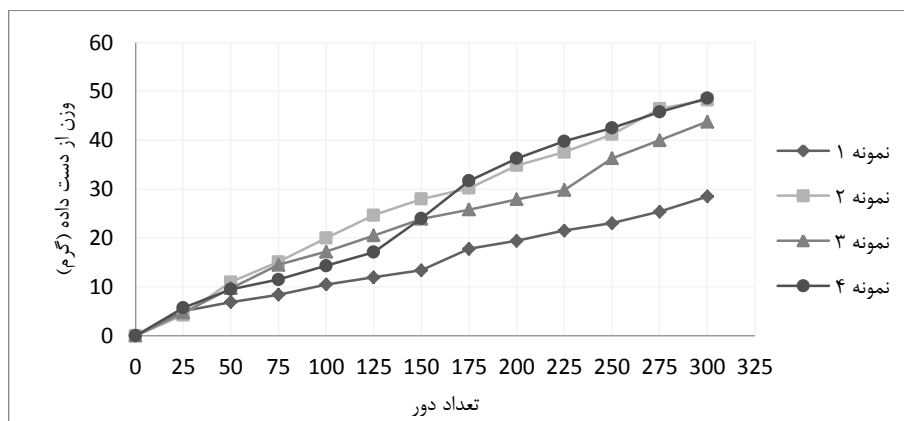




شکل ۱۶. ضریب مقاومت ترمیم شده در برابر میزان خرابی



شکل ۱۷. ضریب مقاومت ترمیم شده برای ترمیم طبیعی و ترمیم به واسطه گرمایش



شکل ۱۸. منحنی جدایی سنگدانه از نمونه

اعمال گرمایش ماکروویو ضریب مقاومت ترمیم شده افزایش می‌یابد.

#### ۴-۵. آزمایش دوام کانتابرو

شکل ۱۸ میزان جدایی سنگدانه از نمونه‌های استوانه‌ای را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، جدایی

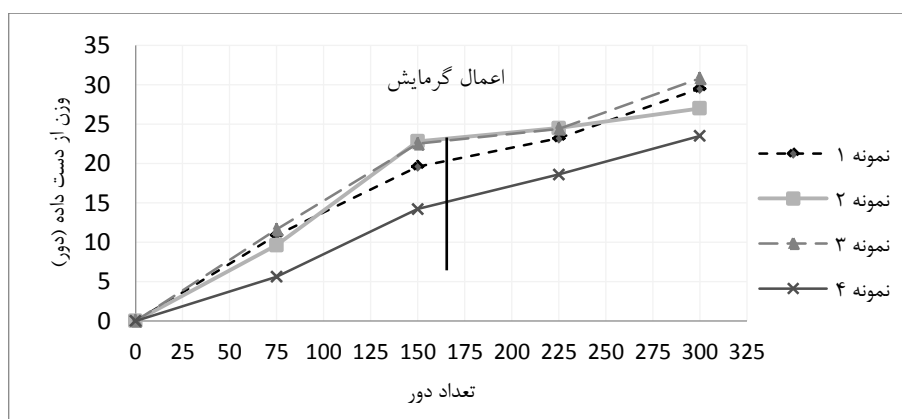
ضریب مقاومت ترمیم شده برای ترمیم طبیعی و ترمیم ماکروویو در شکل ۱۷ نشان داده شده است. با توجه به شکل می‌توان مشاهده نمود که ضریب مقاومت ترمیم شده برای ترمیم طبیعی برابر ۵۲٪ و برای ترمیم با استفاده از گرمایش برابر ۸۷٪ می‌باشد. بنابراین، با

تعداد دوران‌ها و کاهش اثر گرمایش شیب منحنی جدایی سنگدانه مجدداً افزایش می‌یابد. دلیل کاهش شیب منحنی جدایی سنگدانه آن است که گرمایش باعث می‌شود قیر نرم شود و سنگدانه‌های سست مجدداً چسبندگی لازم را با نمونه پیدا کنند. اما پس از چند دوره، اثر گرمایش از بین می‌رود و جدایی سنگدانه مجدداً افزایش می‌یابد.

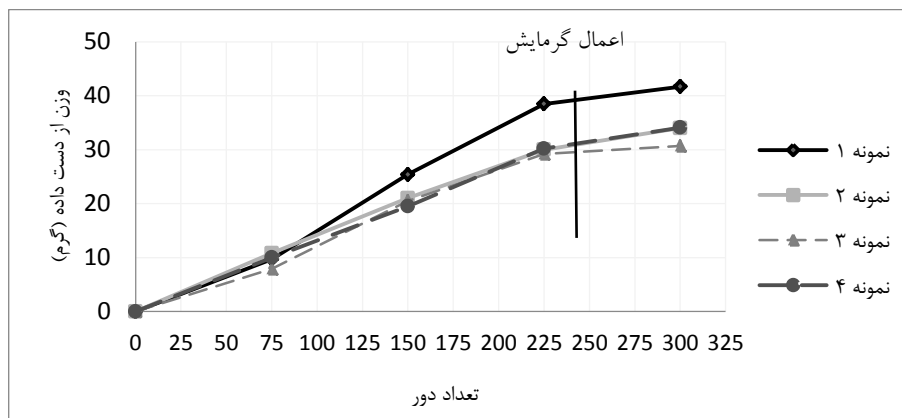
سنگدانه از نمونه‌های استوانه‌ای با افزایش تعداد دوران -ها افزایش می‌یابد و شیب تقریباً ثابتی دارد. نحوه جدایی سنگدانه با اعمال گرمایش ماکروویو پس از ۷۵، ۱۵۰ و ۲۲۵ دوران در شکل‌های ۱۹ تا ۲۱ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اعمال گرمایش در هر یک از درصدهای خرابی ۲۵، ۵۰ و ۷۵ سبب کاهش شیب منحنی جدایی سنگدانه می‌شود و جدا شدن سنگدانه از نمونه را کاهش می‌دهد. اما این شیب ثابت نمی‌ماند و با افزایش



شکل ۱۹. منحنی جدایی سنگدانه با اعمال گرمایش پس از ۷۵ دوران



شکل ۲۰. منحنی جدایی سنگدانه با اعمال گرمایش پس از ۱۵۰ دوران



شکل ۲۱. منحنی جدایی سنگدانه با اعمال گرمایش پس از ۲۲۵ دوران

## ۶. نتیجه گیری

در این تحقیق، امکان استفاده از روش گرمایش ماکروویو به منظور افزایش ظرفیت خودترمیمی بتن آسفالتی مورد بررسی قرار گرفت. گرمایش ماکروویو ظرفیت خودترمیمی بتن آسفالتی را در دمای بالا فعال می‌کند. هنگامی که انتظار می‌رود ریزترک‌ها در مخلوط آسفالتی ایجاد شوند، می‌توان از گرمایش ماکروویو برای افزایش دمای مصالح استفاده نمود. ریزترک‌ها می‌توانند در دمای زیاد به واسطه‌ی انتشار و جریان قیر بسته شوند. بسته شدن ریزترک‌ها مانع از تشکیل ترک‌های بزرگتر می‌شود و از خرابی‌های بزرگ جلوگیری می‌کند. براساس نتایج حاصل از این تحقیق مشخص گردید که: ۱- استفاده از ماکروویو برای گرمایش مخلوط آسفالتی امکان پذیر می‌باشد. همچنین، به منظور افزایش بازده گرمایش ماکروویو، افزودن فیبر کربن لازم است. علاوه بر این، درصد بهینه‌ی فیبر کربن برابر ۰/۲ درصد وزنی نمونه آسفالتی به دست آمد.

۲- براساس نتایج آزمایش تعیین عمر خستگی مخلوط آسفالت متراکم شده تحت خمش تکراری، اعمال گرمایش سبب افزایش طول عمر خستگی تیرچه‌های آسفالتی می‌شود. همچنین، بررسی رابطه‌ی میان میزان خرابی و میزان ترمیم نشان می‌دهد که گرمایش نبایستی خیلی دیر اعمال گردد زیرا در این حالت ممکن است

خرابی‌های ساختاری نظیر تغییرشکل‌های ماندگار یا شکستن سنگدانه‌ها روی دهد که فراتر از ظرفیت ترمیم بتن آسفالتی می‌باشد و در نتیجه میزان ترمیم بسیار ناچیز می‌شود.

۳- براساس نتایج آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم مخلوط آسفالتی، اعمال گرمایش سبب بازیابی بخشی از مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های شکسته شده می‌شود. همچنین، میزان ترمیم وابستگی زیادی به دما دارد و با افزایش دمای گرمایش میزان ترمیم نیز افزایش پیدا می‌کند. مقایسه‌ی ترمیم طبیعی و ترمیم به واسطه‌ی گرمایش نشان می‌دهد که میزان ترمیم به واسطه‌ی گرمایش ماکروویو بسیار بیشتر از ترمیم طبیعی می‌باشد. در نهایت، ثابت گردید که نرخ ترمیم با میزان خرابی ارتباط دارد و برای نرخ خرابی کمتر شاهد میزان ترمیم بیشتری می‌باشیم.

۴- نتایج آزمایش دوام کانتابرو نشان می‌دهد که جدا شدن سنگدانه‌ها از نمونه با افزایش تعداد دوران‌ها افزایش می‌یابد و دارای شیب ثابت است. اما چنانچه در میان دوران‌ها گرمایش اعمال گردد به دلیل افزایش چسبندگی میان قیر و سنگدانه شاهد کاهش شیب از دست دادن سنگدانه‌ها و در نتیجه کاهش جدایی سنگدانه از نمونه خواهیم بود.

## ۷. مراجع

- معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری. ۱۳۹۰. "آئین‌نامه روسازی راه‌های آسفالتی ایران". نشریه شماره ۲۳۴، وزارت راه و شهرسازی، پژوهشکده حمل و نقل، مؤسسه قیر و آسفالت ایران، تجدید نظر اول.
- AASHTO T 321-07. 2011. "Determining the Fatigue Life of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending". American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ASTM D6931-12. 2012. "Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Bituminous Mixtures". American Society for Testing and Materials, May.
- Ayar, P., Moreno-Navarro, F. and Rubio-Gámez, M. C. 2016. "The healing capability of asphalt pavements: A state of the art review". *J. Cleaner Prod.*, 113: 28-40.
- Bazin, P. and Saunier, J. 1967. "Deformability, fatigue, and healing properties of asphalt mixes". *Proceedings of the Second International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, Ann Arbor, Michigan, pp. 553-569.
- Bhasin, A., Little, D. N., Bommavaram, R. and Vasconcelos, K. L. 2008. "A framework to quantify the effect of healing in bituminous materials using material properties". *Int. J. Road Mater. Pavement Des.* 8: 219-242.
- Castro, M. and Sánchez, J. A. 2006. "Fatigue and healing of asphalt mixtures: Discriminate analysis of fatigue curves". *J. Transport. Eng.*, 132(2): 168-174.
- Dai, Q., Wang, Z. and Hasan, M. R. M. 2013. "Investigation of induction healing effects on electrically conductive asphalt mastic and asphalt concrete beams through fracture-healing tests". *Constr. Build. Mater.*, 49: 729-737.
- Doyle, J. D. and Howard, I. L. 2011. "Evaluation of the cantabro durability test for dense graded asphalt". *Proc. Geo-Frontiers Congress*.
- Francken, L. 1979. "Fatigue performance of a bituminous road mix under realistic best conditions". *Transport Res. Record*, 712: 30-37.
- Gallego, J., del Val, M. A., Contreras, V. and Páez, A. 2013. "Heating asphalt mixtures with microwaves to promote self-healing". *Constr. Build. Mater.*, 42: 1-4.
- García, A., Bueno, M., Norambuena-Contreras, J. and Partl, M. N. 2013. "Induction healing of dense asphalt concrete". *Constr. Build. Mater.*, 49: 1-7.
- García, Á., Schlangen, E., van de Ven, M. and van Bochove, G. 2012. "Optimization of composition and mixing process of a self-healing porous asphalt". *Constr. Build. Mater.*, 30: 59-65.
- García, Á., Schlangen, E., van de Ven, M. and van Vliet, D. 2011. "Induction heating of mastic containing conductive fibers and fillers". *Mater. Struc.*, 44(2): 499-508.
- Howard, I. L. and Doyle, J. D. 2014. "Characterization of dense-graded asphalt with the Cantabro Test". *J. Test. Eval.*, 44(1): 77-88.
- Kim, T., Lee, J. and Lee, K. H. 2014. "Microwave heating of carbon-based solid materials". *Carbon Lett.*, 15(1): 15-24.
- Kringos, N., Schmits, A., Pauli, T. and Scarpas, T. 2009. "A finite element base chemomechanical model to simulate healing in bitumen". *Chemo-mechanics of Bituminous Materials*, Group of the Mechanics of Infrastructure Materials.
- Little, D. N. and Bhasin, A. 2007. "Exploring mechanisms of healing in asphalt mixtures and quantifying its impact. *Self Healing Materials an Alternative Approach to 20 Centuries of Materials Science*, Springer Series in Materials Science, 100: 205-218.
- Liu, Q., García, Á., Schlangen, E. and van de Ven, M. 2011. "Induction healing of asphalt mastic and porous asphalt concrete". *Constr. Build. Mater.*, 25(9): 3746-3752.
- Liu, Q., Schlangen, E., García, Á. and van de Ven, M. 2010. "Induction heating of electrically conductive porous asphalt concrete". *Constr. Build. Mater.*, 24(7): 1207-1213.
- Liu, Q., Schlangen, E., van de Ven, M., van Bochove, G. and van Montfort, J. 2012. "Evaluation of the induction healing effect of porous asphalt concrete through four point bending fatigue test". *Constr. Build. Mater.*, 29: 403-409.
- Liu, Q., Wu, S. and Schlangen, E. 2013. "Induction heating of asphalt mastic for crack control". *Constr. Build. Mater.*, 41: 345-351.
- Liu, Q., Yu, W., Schlangen, E. and van Bochove, G. 2014. "Unravelling porous asphalt concrete with induction heating". *Constr. Build. Mater.*, 71: 152-157.

- Phillips, M. C. 1998. "Multi-step Models for Fatigue and Healing, and Binder Properties Involved in Healing". Proceedings, Eurobitume Workshop on Performance Related Properties for Bituminous Binders, Luxembourg, Paper No. 115.
- Qiu, J., Molenaar, A. A. A., Van de Ven, M. F. C., Wu, S. and Yu, J. 2012. "Investigation of self healing behaviour of asphalt mixes using beam on elastic foundation setup". *Mater. Struc.*, 45(5): 777-791.
- Shell Bitumen. 1995. "The shell Bitumen Industrial Handbook". Surrey, U.K.
- Van Dijk, W., Moreaud, H., Quedeville, A. and Uge, P. 1972. "The Fatigue of Bitumen and Bituminous Mixes". Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on the Structure Design of Pavement, London, pp. 354-366.
- White, S. R., Sottos, N. R., Geubelle, P. H., Moore, J. S., Kessler, M. R., Sriram, S. R., Brown, E. N. and Viswanathan, S. 2001. "Autonomic healing of polymer composites". *Nature*, 409: 794-797.
- Williams, D., Little, D. N., Lytton, R. L., Kim, Y. R. and Kim, Y. 2001. "Microdamage healing in asphalt and asphalt concrete". Volume II: Laboratory and Field Testing to Assess and Evaluate Microdamage and Microdamage Healing. Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-RD-98-142.
- Williams, D., Little, D. N., Lytton, R. L., Kim, Y. R. and Kim, Y. 2001. "Microdamage healing in asphalt and asphalt concrete". Res. Rep. 7229, A&M University, College Station, Texas.
- Wu, S., Mo, L., Shui, Z. and Chen, Z. 2005. "Investigation of the conductivity of asphalt concrete containing conductive fillers". *Carbon*, 43(7): 1358-1363.
- Yuan, Y. C., Yin, T., Rong, M. Z. and Zhang, M. Q. 2008. "Self healing in polymers and polymer composites, concepts, realization and outlook: A review". *Express Polym. Lett.*, 2: 238-250.
- Zanko, L. M., Hopstock, D. M. and DeRocher, W. 2016. "Evaluate and Develop Innovative Pavement Repair and Patching: Taconite-Based Repair Options. Minnesota Department of Transportation.

