

## ارزیابی آزمایشگاهی شاخص خودترمیمی در مخلوط های آسفالتی

حسن آذرگهر، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران  
سیدعلی حسینی (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

**E-mail: ahosseini@shahroodut.ac.ir**

محمد یوسفی مقدم، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۰۶

دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۲۹

### چکیده

در این تحقیق به منظور ساخت مخلوط های آسفالتی سبز دوستدار محیط زیست از سرباره فولادی با اندازه ۹/۵-۴/۷۵ میلیمتر به نسبت حجمی ۶۰ درصد مصالح سنگی و پسماند گل قرمز با نسبت های ۵۰ و ۱۰۰ درصد از فیلر به عنوان جایگزین فیلر آهکی استفاده گردیده و شاخص خودترمیمی و حساسیت رطوبتی این مخلوط ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. به منظور ارزیابی شاخص خودترمیمی، آزمایش خمش ۳ نقطه ای بر روی نمونه های نیمه استوانه ای به صورت ۷ سیکل ترمیم با استفاده از روش گرمادهی امواج ماکروویو انجام گرفته است. نتایج حاکی از آن بود که سرباره و ۵۰ درصد گل قرمز در اولین سیکل ترمیم، مقدار نرخ ترمیم بهینه را نسبت به نمونه شاهد به ترتیب؛ ۵۳/۰۱ و ۳۲/۳۵ درصد افزایش داده اند. همچنین نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی نشان داد که میزان مقاومت خرابی رطوبتی در مخلوط های حاوی سرباره و ۵۰ درصد گل قرمز نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۱۶ و ۲۱ درصد کاهش داشته است. استفاده از ۵۰ و ۱۰۰ درصد گل کربناته به صورت جایگزین فیلر مصالح آهکی در مخلوط های حاوی سرباره مقاومت رطوبتی را به ترتیب ۹ و ۱۳ درصد افزایش داده است. همچنین این ضعف مقاومتی در نمونه شامل ۵۰ درصد گل قرمز به کمک استفاده از ۵۰ درصد گل کربناته جبران گردیده و مقاومت رطوبتی به میزان ۱۲ درصد افزایش یافته است. باتوجه به نتایج بدست آمده استفاده از این مواد ضایعاتی به جای منابع طبیعی تجدیدناپذیر نظیر مصالح سنگی، علاوه بر کمک به حفظ محیط زیست باعث بهبود عملکرد ترمیم مخلوط های آسفالتی خواهد شد.

واژه های کلیدی: حساسیت رطوبتی، خودترمیمی، سرباره فولادی، گل قرمز، گل کربناته

## ۱. مقدمه

ترک هستند. پارامترهای بیرونی را نظیر؛ درجه حرارت، دوره های استراحت، شرایط بارگذاری و رطوبت تشکیل می دهند. دما و دوره استراحت؛ مهم ترین پارامترهای تأثیرگذار خارجی هستند که می توانند قابلیت ترمیم را تا حد زیادی بهبود ببخشند [Ayar, Moreno-Navarro and Rubio-Gámez, 2016].

در فرآیند ترمیم تأمین حرارت مورد نیاز به منظور افزایش دمای قیر و به تبع آن پر کردن ترکها در مخلوط آسفالتی، مسأله ای بسیار مهم است. بنابراین از جمله روش های گرمادهی می توان به گرمایش القایی<sup>۱</sup>، گرمایش ماکروویو<sup>۲</sup>، گرمایش با نور خورشید (که با اشعه مادون قرمز<sup>۳</sup> مدل می گردد) و گرمایش مستقیم (حرارت شعله یا گرمخانه) اشاره کرد.

مخلوط های آسفالتی ترکیبی از مصالح سنگی دانه بندی شده، فیلر و قیر به عنوان یک ماده اتصال دهنده هستند [Riara et al. 2018]. بیش از ۹۰ درصد وزن یک مخلوط آسفالتی را مصالح سنگی معدنی تشکیل می دهند [Huang, Bird and Heidrich, 2007]. کمبود منابع طبیعی و ضررهای ناشی از استخراج آنها و نیز مسأله آلودگی محیط زیست به خاطر تولید ضایعات و پسماندهای ناشی کارخانه جات و صنایع؛ پژوهشگران را به سمت استفاده مجدد از بازیافت منابع طبیعی با کیفیت پایین تر و مواد زائد جامد در روسازهای آسفالتی متمایل ساخت [Chen et al. 2015]. بر همین اساس نظریه آسفالت سبز مطرح گردید. آسفالت سبز نوعی آسفالت است که با هدف جلوگیری از آلودگی محیط زیست با استفاده از پسماندها و ضایعات صنعتی یا فرآورده ها و محصولات جانبی کارخانه جات ساخته می شود [Pouranian and Shishehbor, 2019].

یکی از انواع این مواد زائد جامد، سرباره فولادی<sup>۴</sup> است که محصول جانبی کارخانه های تولید فولاد هست. سرباره فولادی به عنوان یک پسماند تولیدی ۱۳ درصد از فولاد خام خروجی را تشکیل می دهد [Shen, Wu and Du, 2009].

پس از طراحی و اجرای یک روسازی آسفالتی که متداول ترین نوع روسازی انعطاف پذیر است، مهم ترین مسأله ای که مطرح می شود؛ موضوع تعمیر و نگهداری راه است. معمولاً عمر بهره برداری روسازی های آسفالتی حدود ۲۰ سال در نظر گرفته می شود [Von Quintus et al. 2007]. یک روسازی آسفالتی در طول عمر سرویس دهی به دلیل عوامل متعددی نظیر؛ رفت و آمد وسایل نقلیه، تغییرات دمایی، شرایط جوی و بارندگی در معرض فرآیند خرابی<sup>۱</sup> قرار می گیرد. این خرابی ها در ابتدا به صورت ترک های ریز<sup>۲</sup> در سطح آسفالت ظاهر می شوند و به تدریج این ترک های ریز به هم متصل شده و شبکه ای از ترک ها را تشکیل می دهند [Riara et al. 2018]. به همین خاطر محققین و پژوهشگران صنعت راهسازی به سوی تکنولوژی هایی سوق داده شدند که بتوان ترکها را در نخستین مراحل تشکیل ترمیم نمود و با صرف کمترین هزینه ها عمر سرویس دهی روسازی آسفالتی را افزایش داد [Roque et al. 2012, Karki, Li and Bhasin, 2015]. پدیده خودترمیمی<sup>۳</sup> بتن آسفالتی از جمله این روش هاست که برای اولین بار در دهه ۱۹۶۰ مطرح گردید [Amani, Kavussi and Mohammad karimi, 2020].

پدیده خودترمیمی به صورت ذاتی در بعضی از مواد از جمله قیر وجود دارد؛ بنابراین داشتن درک کاملی از خصوصیات شیمیایی و مکانیکی قیر به عنوان یک ماده ویسکو الاستیک، از جمله توانایی ترمیم آن، می تواند به طور قابل توجهی به توسعه روسازی های آسفالتی با دوام و پایدار که حداقل آسیب را به محیط زیست وارد می کنند، کمک نماید. پارامترهای تأثیرگذار بر روی پتانسیل ترمیم را می توان به دو دسته درونی و بیرونی تقسیم بندی نمود. پارامترهای درونی شامل: خصوصیات قیر، اصلاح کننده های آسفالت، افزودنی ها، ویژگی های مخلوط آسفالتی (مانند نوع سنگدانه ها و نوع دانه بندی)، عرض و طول

## ارزیابی آزمایشگاهی شاخص خودترمیمی در مخلوط های آسفالتی

گرفته پیرامون موضوع خودترمیمی و نیز افزودنی های به کار گرفته شده در این تحقیق پرداخته شده است.

### ۲-۱ خودترمیمی

توانایی ترمیم بطور کلی به عنوان پاسخ ذاتی قیر به منظور کاهش ترک های تولید شده در بدنه آن در نظر گرفته شده که در نتیجه باعث بهبود نسبی خواص اصلی مواد قیری می شود [Canestrari et al. 2015].

گنجه ای و افلاکی (۲۰۱۶) برای بررسی تأثیر نانو - سیلیکا و استایرن - بوتادین - استایرن (SBS) بر بهبودی توانایی خودترمیمی مخلوط آسفالتی از درصدهای مختلف این دو افزودنی استفاده کردند. بهینه ترین ترکیب شامل ۳ درصد استایرن - بوتادین - استایرن، ۲ درصد نانو - سیلیکا و ۷ درصد قیر نتیجه داده شده است. همچنین آن ها پی بردند که بهترین زمان استراحت ۱ هفته بوده است [Ganjei and Aflaki, 2016].

کانتیراس و توره (۲۰۱۷) برای ارزیابی تأثیر پارامتر زمان گرمایش ماکروویو بر خصوصیات خودترمیمی مخلوط های آسفالتی از یک دستگاه ماکروویو با توان ۷۰۰ وات استفاده کردند. از الیاف فلزی با مقادیر ۰، ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد در مخلوط ها استفاده شده است. زمان های گرمایش هم ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ ثانیه انتخاب گردیده است. آن ها نتیجه گرفتند که بهترین زمان برای ترمیم ۴۰ ثانیه و بهینه ترین درصد الیاف فلزی، ۴ و ۶ درصد بوده است [Norambuena-Contreras and Gonzalez-Torre, 2017].

یلدیز و آتاکان (۲۰۲۰) به منظور بررسی تأثیر میزان عرض ترک بر خودترمیمی مخلوط های آسفالتی از دو نوع فیلر پودر سنگ آهک و خاکستر بادی استفاده نمودند. آن ها برای گرمایش نمونه های نیمه استوانه ای از دستگاه ماکروویو با توان ۸۰۰ وات بهره برده اند. نتایج نشان داد که خاکستر بادی قابلیت ترمیم ترک هایی با عرض ۳۰۰ - ۱۰۰ میکرومتر در نمونه های آسفالتی را داشته است [Yıldız and Atakan, 2020].

باگسترش سریع صنعت راهسازی به خصوص در کشورهای درحال توسعه، فیلرهای معدنی طبیعی با تقاضای بسیار زیادی رو به رو شده است. از طرفی تأثیرات بد زیست محیطی و آلودگی ناشی از فرآیند خرد و آسیاب کردن کارخانه جات تولید کننده فیلرهای معدنی، ذهن محققین را برای جایگزین کردن سایر مصالح به جای فیلرهای معدنی طبیعی در مخلوط های آسفالتی به خود جلب کرده است. حال چه بهتر که این مصالح جایگزین، از پسماندها و ضایعات صنایع مختلف باشد. گل قرمز<sup>۹</sup> از جمله این پسماندهاست که باقی مانده سنگ معدن بوکسیت بوده و درحقیقت محصول جانبی تولید شده در کارخانه جات آلومینا است [Zhang et al. 2018].

افزودنی دیگری که در قالب فیلر در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت، گل کربناته<sup>۱۰</sup> بود که ضایعات کارخانه جات تولید قند و شکر است.

هدف اصلی در این پژوهش ارزیابی میزان نرخ خودترمیمی مخلوط های آسفالتی سبز دوستدار محیط زیست است. برای این منظور از سرباره فولادی و گل قرمز به صورت مجزا و ترکیبی در مخلوط های آسفالتی استفاده گردیده است. دلیل انتخاب این دو مصالح، حضور اکسیدهای فلزی در ساختارشان بوده است. به جهت بررسی میزان ترمیم، آزمایش خمش سه نقطه ای<sup>۱۱</sup> بر روی نمونه های نیمه استوانه ای<sup>۱۲</sup> انجام گرفته شد. نوع گرمایش انتخاب شده در این تحقیق، امواج ماکروویو بوده است. مقدار حساسیت رطوبتی نمونه های حاوی سرباره فولادی، گل قرمز و گل کربناته به کمک آزمایش لاتمن اصلاح شده با استاندارد AASHTO-T283 مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. درنهایت هم با استفاده از پارامتر ضریب مارشال<sup>۱۳</sup> بدست آمده از آزمایش مارشال، میزان مقاومت هریک از نمونه های آسفالتی در برابر تغییر شکل های دائمی بررسی شده است.

### ۲. مروری بر پیشینه تحقیق

در این بخش به بررسی برخی از مطالعات و تحقیقات انجام

سرباره‌ها معمولاً موادی هستند که در فرآیند ذوب فلزات به دست آمده و با توجه به نوع فلز مربوطه و شیوه عملیات تولیدی؛ خصوصیات فیزیکی و شیمیایی گوناگونی دارند. از معروف ترین نوع سرباره‌ها براساس کوره‌های ذوب، می‌توان به سرباره‌های کوره بلند آهن گدازی و سرباره‌های فولادی اشاره کرد. سرباره‌های فولادی براساس نوع کوره‌ای که در آن تولید شده اند به سه دسته کلی؛ کوره قوس الکتریکی<sup>۴</sup>، کوره اکسیژن-بازی<sup>۵</sup> و کوره شعله‌ای تقسیم بندی می‌شوند. خصوصیات و ویژگی‌های مهم سنگدانه‌های سرباره فولادی نظیر؛ تیزگوشه بودن، بافت سطحی زبر، زاویه‌داری بسیار خوب، وزن مخصوص بالا، سختی زیاد، مقاومت بالا در برابر سایش و درصد شکستگی بیشتر، باعث شده که جایگزین مناسبی برای مصالح طبیعی باشد [Shafabakhsh and Ahmadi, 2019]. حضور آهک آزاد (CaO) در سرباره موجب انبساط حجمی سنگدانه‌ها در مخلوط آسفالتی می‌گردد که باید قبل از استفاده، با پاشیدن آب در طی فرآیند هوازادگی، عملیات هیدراتاسیون انجام گیرد.

لیو و همکاران (۲۰۱۷) بیان کردند که وجود تعداد زیاد منافذ و حفرات در ساختار سرباره، باعث شده که سنگدانه‌های سرباره فولادی در مقایسه با سنگدانه‌های طبیعی برای مدت زمان طولانی‌تری؛ گرما را در خود حفظ نمایند [Liu et al. 2017].

کومار و وارما (۲۰۲۱) اشاره کردند که با توجه با ساختار متخلخل سرباره فولادی، جایگزین نمودن آن به جای مصالح طبیعی، با افزایش مقدار قیر، استقامت مارشال، وزن مخصوص همراه بوده است [Kumar and Varma, 2021].

شن و همکاران (۲۰۰۹) با جایگزین نمودن سرباره فولادی نوع اکسیژن-بازی (BOF) در بخش درشت‌دانه به جای مصالح آهکی، مشاهده کردند که مقاومت اصطکاکی در مخلوط آسفالتی افزایش می‌یابد [Shen, Wu and Du, 2009].

عاملیان و همکاران (۲۰۱۸) نتیجه گرفتند که با جایگزینی

[2020].

لی و همکاران (۲۰۲۰) برای بررسی تأثیر نوع سنگدانه، سرباره آهن گدازی را با نسبت های حجمی ۰، ۱، ۲ و ۴ درصد در کل سنگدانه‌ها جایگزین مصالح سنگی آهکی نموده اند. طول ترک در نمونه‌ها را به ۳ مقدار ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد تقسیم بندی کرده اند. شیوه گرمایش انتخابی در این مطالعه از نوع تابش فروسرخ بوده است. نتایج نشان داد که، بهترین دما و زمان ترمیم به ترتیب ۶۰ درجه سانتی گراد و ۳۰ دقیقه بوده است. همچنین مشخص شد که نمونه‌های آسفالتی حاوی ۲ درصد سرباره و ۳۰ درصد طول ترک، بهترین عملکرد خودترمیمی را نشان داده اند [Li et al. 2020].

لو و همکاران (۲۰۲۰) تأثیر اندازه ذرات سنگدانه سرباره فولادی با درصد های مختلف را بر عملکرد خودترمیمی مخلوط‌های آسفالتی مورد ارزیابی قرار دادند. برای گرمایش نیز از ماکروویو ۷۰۰ وات استفاده نمودند. آن‌ها نتیجه گرفتند که، نمونه‌های آسفالتی حاوی ۶۰ درصد سرباره فولادی با اندازه ذرات ۹/۵-۴/۷۵ میلیمتر بالاترین میزان ترمیم را داشته اند [Lou et al. 2020].

کاتریراس و گارسیا (۲۰۱۶) برای مقایسه دو نوع گرمایش تابش امواج ماکروویو و جریان مغناطیسی القایی از یک عدد دستگاه ماکروویو با توان ۷۰۰ وات و یک دستگاه القایی با توان ۶۰۰۰ وات استفاده نموده اند. در مخلوط‌های آسفالتی درصد های متنوعی از الیاف فولادی استفاده شده است. نتایج نشان داد که گرمایش ماکروویو در ترمیم، عملکرد بهتری داشته است [Norambuena-Contreras and Garcia 2016].

یاماگ و همکاران (۲۰۲۱) بیان کردند که استفاده از حداقل ۰/۵ درصد کپسول‌های جوانساز حاوی روغن‌های ضایعاتی در ماستیک‌های آسفالتی، میزان ترمیم را به بالای ۸۰ درصد می‌رساند [Yamaç et al. 2021].

۲-۲ سرباره

حاوی پودرسنگ آهک از مقاومت خوبی در برابر تغییر شکل های دائمی برخوردار بوده اما مقاومت در برابر خرابی رطوبتی آن کمتر بوده است. که البته این ضعف با افزودن آهک هیدراته جبران گردیده است [Zhang et al. 2019].

#### ۲-۴ گل کربناته

پس از اعمال شیرآهک به مخازن شربت خام چغندر قند، به منظور تصفیه آن و جداسازی ناخالصی ها، در نهایت پسماندی که باقی می ماند، به گل کربناته یا کیک کربناته معروف است. بخش قابل توجهی از این پسماند را آهک تشکیل می دهد. تولید حجم زیاد این پسماند دغدغه ای است که کارخانه های قند و شکر با آن رو به رو هستند.

آزدمیر و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از گل کربناته به منظور ارزیابی خواص رئولوژیکی قیر، اشاره کردند که این ماده درجه نفوذ، نقطه نرمی و ویسکوزیته قیر را افزایش داده است [Özdemir et al. 2021].

#### ۳. مواد و مصالح

قیر مصرفی در این پژوهش قیر ۶۰/۷۰ بوده است که از شرکت نفت پاسارگاد تهران فراهم گردیده است. مشخصات آن در جدول ۱ آورده شده است. مصالح طبیعی که از نوع آهکی است، از معدنی در شهر میامی استان سمنان تهیه گردیده است. مشخصات مصالح سنگی، در جدول ۲ ارائه شده است. دانه بندی انتخاب شده در این تحقیق، دانه بندی پیوسته شماره ۵ آیین نامه روسازی آسفالتی راه های ایران (نشریه ۲۳۴) است که منحنی های آن در شکل ۱ مشاهده می شود.

سرباره فولادی استفاده شده از نوع کوره قوس الکتریکی (EAF) بوده که از کارخانه ذوب آهن فولاد مبارکه اصفهان تهیه شده است. ترکیبات این ماده در جدول ۳ نشان داده شده است. گل قرمز مصرفی از کارخانه آلومینا جاجرم واقع در استان خراسان شمالی گردآوری شده است. مهم ترین ترکیبات شیمیایی گل قرمز به شرح جدول ۴ است. گل کربناته یا گل

بخش درشت دانه مصالح آهکی با سرباره فولادی نوع BOF. عملکرد شیارشدگی بهتر شده است [Amelian et al. 2018].

کاوسی و قاضی زاده (۲۰۱۴) با جایگزینی سرباره فولادی از نوع کوره قوس الکتریکی (EAF) به صورت درشت دانه به جای مصالح آهکی با نسبت های ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد، دریافتند که عمر خستگی با افزایش درصد جایگزینی سرباره، افزایش می یابد [Kavussi and Qazizadeh, 2014]. حسامی و همکاران (۲۰۱۵) سرباره فولادی نوع EAF را در قسمت های درشت دانه، ریزدانه و کل مصالح جایگزین مصالح آهکی نمودند. آن ها نتیجه گرفتند که افزودن سرباره خرابی رطوبتی را افزایش می دهد [Hesami et al. 2015].

#### ۲-۳ گل قرمز

گل قرمز که پسماند بوکسیت هم نامیده می شود؛ درحقیقت یک محصول جانبی است که در طی فرآیند استخراج آلومینا از بوکسیت تولید می گردد. این پسماند به دلیل دارا بودن مقدار بالایی از اکسید آهن، قرمز رنگ است. علاوه بر اکسید آهن، اکسید سایر عناصر فلزی مانند تیتانیوم، سیلیسیم، منیزیم و آلومینیوم را در ترکیب خود دارد. کلید حل مشکلات زیست محیطی مربوط به انباشت گل قرمز، توسعه فناوری هایی است که بتوان به این پسماند به عنوان یک ماده مصرفی نگاه کرد.

لیانگ یائو و همکاران (۲۰۲۰) با جایگزین نمودن گل قرمز به عنوان فیلر به جای پودرسنگ آهک مشاهده کردند که، درجه نفوذ قیر کاهش، نقطه نرمی و ویسکوزیته آن افزایش پیدا کرده است. همچنین آن ها اشاره کردند که مخلوط دارای گل قرمز، از مقاومت شیارشدگی بالایی برخوردار است [Yao et al. 2020].

زانگ و همکاران (۲۰۱۹) برای مقایسه رفتار رئولوژیکی و حساسیت رطوبتی ماستیک های آسفالتی، از ۳ نوع فیلر پودرسنگ آهک، گل قرمز و آهک هیدراته استفاده کردند. آن ها مشاهده نمودند که ماستیک حاوی گل قرمز نسبت به ماستیک

درجه سانتی‌گراد به عنوان دمای اختلاط با توجه به مشخصات قیر انتخاب شده است. مخلوط قیر و سنگدانه پس از ریخته شدن در داخل قالب استوانه‌ای مارشال به قطر ۴ اینچ (۱۰۱/۶ میلی‌متر) و ارتفاع ۲/۵ اینچ (۶۳/۵ میلی‌متر)، توسط چکش مارشال با اعمال ۷۵ ضربه در دو وجه نمونه متراکم شده‌اند.

برای تعیین درصد قیر بهینه؛ نمونه‌هایی با درصد قیرهای مختلف (۴، ۴/۵، ۵، ۵/۵، ۶ و ۶/۵ درصد) با ۳ تکرار ساخته شده و پارامترهای میزان درصد فضای خالی، وزن مخصوص و استقامت و روانی مارشال برای هر یک از نمونه‌ها محاسبه گشته است. در نهایت متوسط درصد قیر تولید شده از طریق سه عامل ۴ درصد فضای خالی، حداکثر وزن مخصوص و حداکثر استقامت مارشال با رعایت محدودیت‌های مربوط به نشریه ۲۳۴ (شامل کنترل حداقل استقامت مارشال، حداقل و حداکثر روانی و حداقل درصد فضای خالی مصالح سنگی)، به عنوان درصد قیر بهینه نمونه اعلام گردیده است. انواع ترکیبات اصلی مصالح سنگی برای ساخت نمونه‌های متنوع آسفالتی مطابق جدول ۶ بوده است.

کربنات کلسیم مورد استفاده در این تحقیق از کارخانه قند و شکر واقع در جاده مغان شهرستان شاهرود استان سمنان تهیه گردیده است. آنالیز ترکیبات شیمیایی این ماده ضایعاتی که توسط شرکت مذکور ارائه شده به صورت جدول ۵ است.

#### ۴. روش تحقیق

##### ۴-۱ ساخت نمونه

در این پژوهش از روش طرح اختلاط مارشال طبق استاندارد ASTM-D1559 در تعیین درصد قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده است. دو نوع مصالح گل قرمز و گل کربناته به عنوان فیلر استفاده شده‌اند. سرباره فولادی هم فقط با اندازه ذرات عبوری از الک ۳/۸ اینچ و مانده روی الک شماره ۴ (۹/۵ - ۴/۷۵ میلی‌متر) به صورت جایگزینی حجمی مورد استفاده قرار گرفته است. مصالح سنگی پس از توزین و جایگزینی حجمی (برای نمونه‌هایی که حاوی مصالح افزودنی بودند) به مدت ۲۴ ساعت در گرمخانه با دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته اند تا به خوبی خشک شوند. دمای ۱۵۵

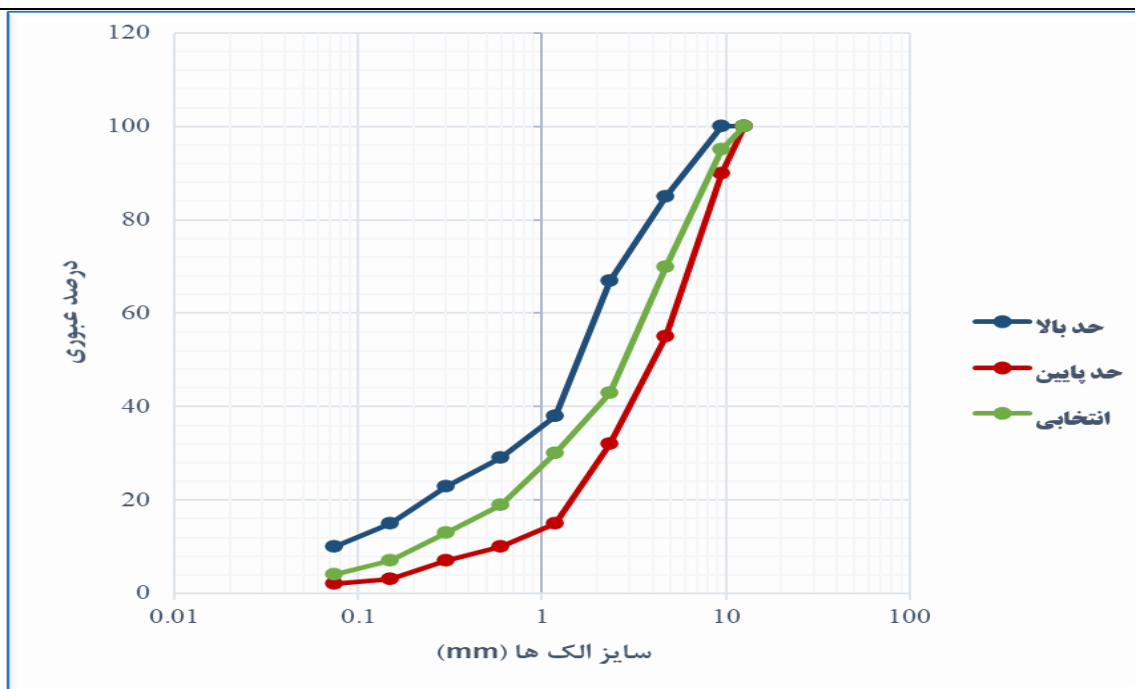
جدول ۱. نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی قیر مصرفی

| نوع آزمایش | استاندارد آزمایش | واحد اندازه گیری      | حدود مجاز آیین نامه‌ای | نتایج |
|------------|------------------|-----------------------|------------------------|-------|
| ۱          | ASTM-D70         | گرم بر سانتی‌متر مکعب | ۱/۰۱ - ۱/۰۶            | ۱/۰۳  |
| ۲          | ASTM-D5          | درجه سانتی‌گراد       | ۶۰-۷۰                  | ۶۲    |
| ۳          | ASTM-D36         | درجه سانتی‌گراد       | ۴۹-۵۶                  | ۴۹    |
| ۴          | ASTM-D92         | درجه سانتی‌گراد       | حداقل ۲۵۰              | ۳۰۸   |
| ۵          | ASTM-D113        | سانتی‌متر             | حداقل ۱۰۰              | ۱۰۰   |
| ۶          | ASTM-D2170       | سانتی استوکس          | -                      | ۸۱۰   |
| ۷          | ASTM-D2170       | سانتی استوکس          | -                      | ۴۲۰   |
| ۸          | ASTM-D2170       | سانتی استوکس          | -                      | ۲۳۲   |

جدول ۲. مشخصات مربوط به کیفیت مصالح سنگی

ارزیابی آزمایشگاهی شاخص خودترمیمی در مخلوط های آسفالتی

| آزمایش                                      | مشخصات        | نتایج آزمایش    |                  |      | حدود مجاز آیین نامه ای |
|---|---------------|-----------------|------------------|------|------------------------|
|   |               | مخلوط درشت دانه | ماسه ۰-۶ میلیمتر | فیلر |                        |
| ارزش ماسه ای<br>AASHTO-T176                 |               | -               | ۹۳               | -    | حداقل ۵۰               |
| درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لس آنجلس | نوع دانه بندی | B               | -                | -    |                        |
| AASHTO-T96                                  | تعداد دور     | ۵۰۰             | -                | -    | حداکثر ۲۵              |
|   | درصد سایش     | ۲۳              | -                | -    |                        |
| درصد شکستگی مصالح سنگی روی                  | در یک وجه     | ۹۰              | -                | -    | حداقل ۸۵               |
| الک شماره ۴                                 | در دو وجه     | ۸۸              | -                | -    | حداقل ۸۰               |
| ASTM-D5821                                  |               |                 |                  |      |                        |
| درصد افت وزنی در سولفات سدیم                | ریز دانه      | -               | ۰/۲۲             | -    | حداکثر ۱۲              |
| AASHTO-T104                                 | درشت دانه     | ۰/۶۱            | -                | -    | حداکثر ۸               |



شکل ۱. نمودار دانه بندی مصالح سنگی (دانه بندی شماره ۵ نشریه ۲۳۴)

جدول ۳. ترکیبات شیمیایی مصالح سنگی آهکی و سرباره ای

| نوع مصالح | ترکیبات شیمیایی (درصد) |                               |      |                                |                                |                  |     |     |        |
|-----------|------------------------|-------------------------------|------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|-----|-----|--------|
|           | Free CaO               | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | MnO  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | MgO | CaO | Others |
| سرباره    | ۰/۲                    | ۲                             | ۱    | ۵                              | ۲۷                             | ۱۶               | ۵   | ۴۰  | ۳/۴    |
| آهکی      | -                      | ۰/۱                           | ۰/۰۳ | ۰/۲                            | ۰/۴                            | ۹                | ۶/۲ | ۴۵  | ۵/۳    |

جدول ۴. ترکیبات شیمیایی تشکیل دهنده گل قرمز کارخانه بوکسیت جاجرم

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال چهاردهم / شماره چهارم (۵۷) / تابستان ۱۴۰۲

| نوع مصالح | ترکیبات شیمیایی (درصد)         |                                |                  |       |                   |                  |      |
|-----------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|-------|-------------------|------------------|------|
|           | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | CaO   | Na <sub>2</sub> O | TiO <sub>2</sub> | MgO  |
| گل قرمز   | ۲۶/۵۵                          | ۱۸/۸۱                          | ۱۵/۳۲            | ۱۵/۴۰ | ۵/۱۸              | ۶/۰۸             | ۰/۹۶ |

جدول ۵. ترکیبات شیمیایی گل کربناته کارخانه شکر (قند) شاهرود

| نوع مصالح  | ترکیبات شیمیایی (درصد) |                                |      |       |                  |                 |                               |                  |                                |      |       |
|------------|------------------------|--------------------------------|------|-------|------------------|-----------------|-------------------------------|------------------|--------------------------------|------|-------|
|            | SrO                    | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MnO  | CaO   | K <sub>2</sub> O | SO <sub>3</sub> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO  | LOI   |
| گل کربناته | ۰/۰۶                   | ۰/۶۰                           | ۰/۰۱ | ۴۹/۵۴ | ۰/۰۳             | ۰/۷۲            | ۰/۰۴                          | ۰/۵۸             | ۰/۱۳                           | ۰/۹۶ | ۴۷/۳۰ |

جدول ۶. نام گذاری نمونه‌ها و ترکیبات حجمی مصالح استفاده شده در هر نمونه

| گل کربناته                    |                               | گل قرمز                       |                               | سرباره                       |                              | سنگدانه طبیعی آهکی            |                              | نام مخلوط |
|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------|
| عبوری از الک شماره ۲۰۰ (درصد) | عبوری از الک شماره ۲۰۰ (درصد) | عبوری از الک شماره ۲۰۰ (درصد) | عبوری از الک شماره ۲۰۰ (درصد) | مانده روی الک شماره ۴ (درصد) | مانده روی الک شماره ۴ (درصد) | عبوری از الک شماره ۲۰۰ (درصد) | مانده روی الک شماره ۴ (درصد) |           |
| -                             | -                             | -                             | -                             | -                            | -                            | ۱۰۰                           | ۱۰۰                          | L         |
| -                             | -                             | -                             | -                             | ۶۰                           | -                            | ۱۰۰                           | ۴۰                           | SL        |
| -                             | ۵۰                            | -                             | -                             | -                            | -                            | ۵۰                            | ۱۰۰                          | LR50      |
| -                             | ۱۰۰                           | -                             | -                             | -                            | -                            | -                             | ۱۰۰                          | LR100     |
| ۵۰                            | -                             | -                             | -                             | -                            | -                            | ۵۰                            | ۱۰۰                          | LP50      |
| ۱۰۰                           | -                             | -                             | -                             | -                            | -                            | -                             | ۱۰۰                          | LP100     |
| -                             | ۵۰                            | -                             | -                             | ۶۰                           | -                            | ۵۰                            | ۴۰                           | SLR50     |
| -                             | ۱۰۰                           | -                             | -                             | ۶۰                           | -                            | -                             | ۴۰                           | SLR100    |
| ۵۰                            | -                             | -                             | -                             | ۶۰                           | -                            | ۵۰                            | ۴۰                           | SLP50     |
| ۱۰۰                           | -                             | -                             | -                             | ۶۰                           | -                            | -                             | ۴۰                           | SLP100    |
| ۵۰                            | ۵۰                            | -                             | -                             | -                            | -                            | -                             | ۱۰۰                          | LR50P50   |
| ۵۰                            | ۵۰                            | -                             | -                             | ۶۰                           | -                            | -                             | ۴۰                           | SLR50P50  |

توضیح: در همه نمونه‌ها، مصالح عبوری از الک شماره ۴ و مانده روی الک شماره ۲۰۰ از سنگدانه‌های طبیعی آهکی استفاده شده است





شکل ۲. آزمایش خمش سه نقطه‌ای با دستگاه تک محوری

پس از شکست کلیه نمونه‌ها و ثبت مقاومت اولیه‌شان، ۴ ساعت در دمای محیط استراحت داده شدند. پس از سپری شدن این مدت زمان، نمونه‌ها برای فرآیند ترمیم آماده شدند. برای گرمایش نمونه‌های نیمه استوانه‌ای از یک دستگاه ماکروویو ۴۰ لیتری سامسونگ مدل J5133 با توان ۸۰۰ وات و فرکانس ۲۴۵۰ مگا هرتز استفاده شد. نمونه‌های نیمه استوانه‌ای تحت زمان‌های مختلف گرمایشی ۷، ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ ثانیه قرار گرفتند. دمای نمونه‌ها با استفاده از دوربین حرارتی مدل R300SR-HD با دقت ۱ درجه سانتی‌گراد کنترل شده است. پس از آنکه ۲ قسمت شکسته شده هر نمونه که در اثر فرآیند گرمایش به هم چسبیده شده بودند؛ بیرون آورده شدند و برای رسیدن به حداکثر میزان ترمیم به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط تحت استراحت قرار گرفتند. نمونه‌ها مجدداً با کیسه پلاستیکی به مدت ۲۴ ساعت درون فریزر با دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد قرار گرفته‌اند تا برای شکست بعدی آماده گردند. ۷ سیکل شکست-ترمیم در پژوهش حاضر در نظر گرفته شد و میزان نرخ ترمیم در هر سیکل، با استفاده از رابطه (۱) تعیین گردید.

$$HL = \frac{F_i}{F_0} \quad (1)$$

که در رابطه (۱)؛ HL میزان نرخ ترمیم (سطح ترمیم) نمونه،

در جدول ۶؛ L معرف مصالح سنگی آهکی (Lime Stone)، S معرف سرباره (Steel Slag)، R نمایانگر گل قرمز (Red Mud Waste) و P بیانگر گل کربناته (Press Mud Waste) هست.

#### ۴-۲ آزمایش خودترمیمی

برای انجام آزمایش خمش نیمه دایره‌ای (SCB)، نمونه‌های استوانه‌ای ساخته شده با انواع ترکیبات مصالح آهکی، سرباره فولادی و گل قرمز؛ با استفاده از دستگاه برش به ۴ نمونه نیمه استوانه‌ای برش داده شدند. هر نمونه دارای ۱۰۰ میلی‌متر قطر و ۳۰ میلی‌متر ضخامت بوده است. برای هر نمونه یک شکاف<sup>۱۶</sup> در میانه آن به ضخامت ۲/۵ میلی‌متر و عمق ۱۰ میلی‌متر تعبیه شد. چون فرآیند برشکاری همراه با آب بوده است؛ نمونه‌ها به مدت ۴ روز در دمای محیط نگهداری شده‌اند تا رطوبت حاصل از برشکاری را از دست داده و به طور کامل خشک شوند.

آزمایش خمش سه نقطه‌ای با استاندارد ASTM-D8044 بر روی نمونه‌های نیمه استوانه‌ای با نرخ بارگذاری ۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفته شد. از آنجایی که دمای آزمایش ۲۰- درجه سانتی‌گراد بوده است؛ نمونه‌ها همراه با کیسه پلاستیکی به مدت ۲۴ ساعت در داخل فریزر قرار گرفتند تا برای یک شکست ترد آماده شوند. نمونه‌های نیمه استوانه‌ای درون قالب مخصوص SCB که در آن فاصله بین ۲ تکیه‌گاه تحتانی ۸۰ میلی‌متر و تکیه‌گاه فوقانی در میانه این فاصله است، قرار گرفتند. برای انجام آزمایش نیز از دستگاه تک محوری با ظرفیت ۵ تن استفاده گردیده است. نحوه قرارگیری نمونه نیمه استوانه‌ای به همراه قالب SCB در دستگاه تک محوری در شکل ۲ قابل ملاحظه است.

$F_0$  حداکثر نیروی شکست اولیه (مقاومت اولیه) نمونه و  $F_i$  حداکثر نیروی شکست نمونه بعد از  $i$  امین سیکل هستند.

#### ۴-۳ آزمایش حساسیت رطوبتی

برای بررسی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر خرابی رطوبتی، آزمایش کشش غیرمستقیم به روش لاتمن اصلاح شده مورد استفاده قرار گرفته است. طبق استاندارد AASHTO-T283 میزان درصد فضای خالی در نمونه‌ها باید حدود ۷ درصد باشد. برای رسیدن به این مقدار از فضای خالی با اعمال سعی و خطای بسیار در تعداد ضربات چکش مارشال به هنگام تراکم و انجام آزمایش رایس طبق استاندارد ASTM-D2041 مشخص گردید که نمونه‌های بدون سرباره با ۳۵ ضربه و نمونه‌های حاوی سرباره با ۲۸ ضربه در تراکم مارشال به درصد فضای خالی ۷ درصد دست یافته‌اند. روش لاتمن اصلاح شده، میزان حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی را براساس نسبت میانگین مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های گروه اشباع به خشک بیان می‌کند. به همین خاطر نمونه‌های استوانه‌ای آسفالتی به ۲ دسته کلی خشک و اشباع تقسیم شده و برای هر نمونه ۶ تکرار که ۳ تا از آن‌ها مربوط به حالت خشک و ۳ تای دیگر مربوط به حالت اشباع است؛ ساخته شده‌اند. درجه اشباع باید بین ۷۰-۸۰ درصد باشد که در این پژوهش با تنظیم فشار خلاً و زمان اشباع این امر نائل گردیده است. نمونه‌های استوانه‌ای اشباع شده درون کیسه پلاستیکی گذاشته شده و به مدت ۱۶ ساعت داخل فریزر با دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد قرار گرفته‌اند. پس از طی این زمان؛ نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در حمام آب ۶۰ درجه سانتی‌گراد گذاشته شده‌اند.

پس از آنکه نمونه‌های اشباع سیکل ذوب و یخ را سپری کردند؛ کلیه نمونه‌ها برای انجام آزمایش کشش غیرمستقیم مهیا گشتند. این آزمایش در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و با سرعت بارگذاری ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه توسط دستگاه جک فشاری انجام گرفته است. مقدار مقاومت کششی هر نمونه از رابطه (۲)

محاسبه گردیده است.

$$S_t = \frac{2000 P}{\pi t D} \quad (2)$$

که در رابطه (۲)؛  $S_t$  مقاومت کششی نمونه (کیلو پاسکال)،  $P$  حداکثر نیرو (نیوتن)،  $t$  ضخامت نمونه (میلی‌متر) و  $D$  قطر نمونه (میلی‌متر) هستند.

پس از محاسبه متوسط مقاومت کششی گروه خشک و مرطوب ( $S_t$ ) هر نمونه، میزان حساسیت رطوبتی مطابق رابطه (۳) برای هر نمونه تعیین گردید.

$$TSR = \frac{S_{t\text{مرطوب}}}{S_{t\text{خشک}}} \times 100 \quad (3)$$

که در رابطه (۳)؛ TSR شاخص حساسیت رطوبتی است.

#### ۴-۴ آزمایش مارشال

این آزمایش طبق استاندارد ASTM-D1559 با نرخ بارگذاری ۵۰/۸ میلی‌متر بر دقیقه و در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد انجام گرفته است. برای تأمین این دما، نمونه‌ها به مدت ۴۰ دقیقه در حمام آب با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته‌اند. درحقیقت خروجی‌های آزمایش مارشال ۲ پارامتر مهم استقامت مارشال (کیلونیوتن) و روانی مارشال (میلی‌متر) هستند که نسبت استقامت به روانی را، اصطلاحاً شاخص مارشال یا ضریب مارشال می‌نامند که طبق رابطه (۴) محاسبه می‌گردد. از این شاخص می‌توان برای بررسی میزان مقاومت نمونه‌های آسفالتی در برابر تغییرشکل پلاستیک یا حتی شیارشدگی استفاده کرد. هرچه میزان این ضریب بیشتر باشد، نشان می‌دهد که مخلوط از سختی بالاتری برخوردار بوده و مقاومت بیشتری در برابر تغییرشکل‌های دائمی دارد. در این تحقیق از دستگاه یونیورسال شرکت Zwick آلمان با ظرفیت ۱۵ تن؛ برای انجام این آزمایش استفاده گردید.

$$\text{ضریب مارشال} = \frac{\text{استقامت (KN)}}{\text{روانی (mm)}} \quad (4)$$

#### ۵. بررسی نتایج

در این بخش، ابتدا نتایج مربوط به درصد قیر بهینه نمونه‌ها

## ارزیابی آزمایشگاهی شاخص خودترمیمی در مخلوط های آسفالتی

از امواج ماکروویو بوده است و تنها ۲ نوع مصالح سرباره فولادی و گل قرمز به دلیل دارا بودن ترکیبات اکسیدفلزی در ساختارشان؛ قابلیت جذب امواج ماکروویو را داشته‌اند بنابراین نمونه‌های آسفالتی ساخته شده به منظور بررسی خاصیت خودترمیمی براساس ترکیبات این مصالح بوده است. به عبارت دیگر؛ فقط سرباره فولادی و گل قرمز در حیطه ترمیم کمک کننده بوده‌اند.

در بررسی خودترمیمی یک مخلوط آسفالتی ۲ پارامتر زمان بهینه ترمیم و دمای بهینه ترمیم از اهمیت بالایی برخوردارند که به مقایسه میزان ترمیم انواع مخلوط‌ها کمک می‌نمایند. به همین خاطر زمان‌های مختلف گرمایشی ۷، ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ ثانیه به نمونه‌ها اعمال گردیده است و در هریک از زمان‌های گرمایش، دمای نمونه‌ها با دوربین حرارتی ثبت و مورد بررسی قرار گرفته است. درپژوهش حاضر؛ به منظور بررسی بهتر و دقیق‌تر توانایی ترمیم، ۷ سیکل ترمیم در نظر گرفته شده است.

با بررسی نتایج آزمایش خودترمیمی، بالاترین مقدار نرخ ترمیم برای هر نمونه در هر سیکل ترمیم مشخص گردیده است که در شکل ۳ مشاهده می‌شود. دما و زمان بهینه ترمیم که متناظر با بهترین مقدار نرخ خودترمیمی است در جدول ۷ نشان داده شده است.

بررسی شده و سپس عملکرد خودترمیمی هریک از نمونه‌ها ارزیابی گردیده است. در آخر هم پس از بحث در مورد میزان خرابی رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی؛ براساس نتایج پارامتر ضریب مارشال، به تحلیل مقدار سختی هریک از مخلوط‌ها پرداخته شده است.

### ۱-۵ درصد قیر بهینه

درصد قیر بهینه نمونه‌های بدون سرباره ۴/۹ درصد و نمونه‌های آسفالتی حاوی سرباره ۵/۲ درصد بدست آمده‌است. لازم به ذکر است که دو افزودنی گل قرمز و گل کربناته هیچ تغییری در مقدار قیر بهینه نداشته‌اند. بنابراین فقط سرباره مقدار قیر بهینه را نسبت مصالح طبیعی حدود ۰/۳ درصد افزایش داده است که این افزایش نیز به دلیل بالابودن تخلخل ذاتی اینگونه مصالح بوده که در پژوهش‌های متعدد انجام گرفته روی این سنگدانه‌ها؛ به آن اشاره گردیده است.

### ۲-۵ آزمایش خودترمیمی

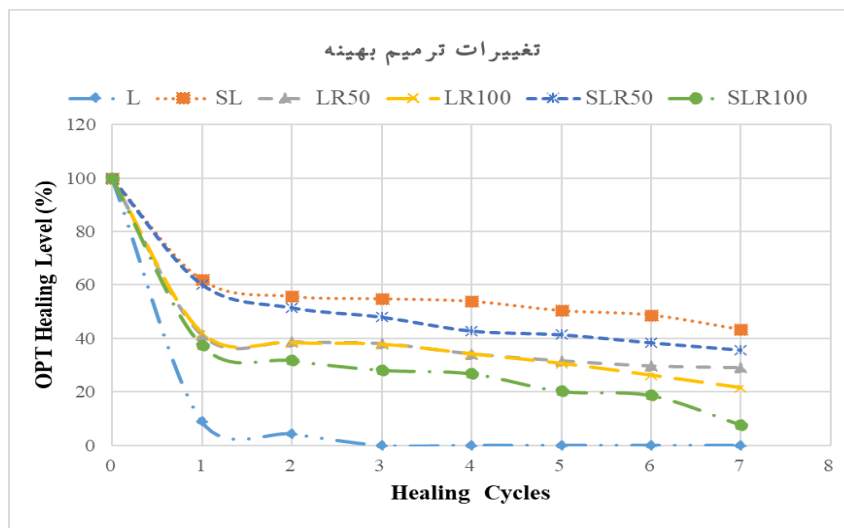
در ترمیم مسأله‌ای که بسیار حائز اهمیت است، تعیین سطح (نرخ) ترمیم هست که مقاومت نمونه پس از ترمیم را با مقاومت اولیه نمونه مقایسه می‌کند. حال هرچه میزان این شاخص بیشتر باشد؛ مخلوط آسفالتی از توانایی بالاتری در ترمیم برخوردار بوده و مشکلات مربوط به تعمیر و نگهداری کمتر می‌گردد.

از آنجایی که نوع گرمایش انتخاب شده در این تحقیق، استفاده

جدول ۷. زمان و دمای بهینه ترمیم برای انواع نمونه‌ها در تمامی سیکل‌های خودترمیمی

| نام نمونه | سیکل ۱       |          | سیکل ۲       |          | سیکل ۳       |          | سیکل ۴       |          | سیکل ۵       |          | سیکل ۶       |          | سیکل ۷       |          |
|-----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|
|           | زمان (ثانیه) | دما (°C) | زمان (ثانیه) | دما (°C) | زمان (ثانیه) | دما (°C) | زمان (ثانیه) | دما (°C) | زمان (ثانیه) | دما (°C) | زمان (ثانیه) | دما (°C) | زمان (ثانیه) | دما (°C) |
| L         | ۱۲۰          | ۳۱       | ۱۲۰          | ۳۲       | -            | -        | -            | -        | -            | -        | -            | -        | -            | -        |
| LR50      | ۱۲۰          | ۷۲       | ۱۲۰          | ۷۱       | ۱۲۰          | ۷۱       | ۱۲۰          | ۷۱       | ۱۲۰          | ۷۵       | ۱۲۰          | ۷۴       | ۱۲۰          | ۷۰       |
| LR100     | ۱۲۰          | ۷۴       | ۱۲۰          | ۷۸       | ۱۲۰          | ۷۸       | ۱۲۰          | ۷۸       | ۱۲۰          | ۷۶       | ۱۲۰          | ۷۶       | ۱۲۰          | ۷۴       |
| SL        | ۱۵           | ۵۵       | ۱۵           | ۵۲       | ۱۵           | ۵۲       | ۱۵           | ۵۲       | ۱۵           | ۵۲       | ۱۵           | ۵۶       | ۱۵           | ۵۰       |
| SLR50     | ۳۰           | ۸۲       | ۳۰           | ۷۰       | ۳۰           | ۹۰       | ۳۰           | ۸۵       | ۳۰           | ۸۵       | ۳۰           | ۷۶       | ۳۰           | ۸۲       |

| نام نمونه    | سیکل ۱       | سیکل ۲       | سیکل ۳       | سیکل ۴       | سیکل ۵       | سیکل ۶       | سیکل ۷       |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| زمان (ثانیه) | زمان (ثانیه) | زمان (ثانیه) | زمان (ثانیه) | زمان (ثانیه) | زمان (ثانیه) | زمان (ثانیه) | زمان (ثانیه) |
| دما (°C)     | دما (°C)     | دما (°C)     | دما (°C)     | دما (°C)     | دما (°C)     | دما (°C)     | دما (°C)     |
| SLR100       | ۳۰           | ۳۰           | ۳۰           | ۳۰           | ۳۰           | ۳۰           | ۳۰           |
|              | ۸۷           | ۸۰           | ۹۴           | ۸۸           | ۹۰           | ۸۶           | ۸۹           |



شکل ۳. نمودار تغییرات نرخ ترمیم بهینه در سیکل های مختلف برای تمامی نمونه‌ها

در این زمینه بهینه بوده است.

(۳) باتوجه به شکل ۳ نیز می‌توان دریافت که نمونه SL در بین تمامی نمونه‌ها بهترین مقدار ترمیم را به خود اختصاص داده است. بعد از آن ۲ نمونه SLR50 و LR50 بالاترین نرخ خودترمیمی را داشته‌اند. درحقیقت در پژوهش حاضر این سه ترکیب بهترین عملکرد خودترمیمی را از خود نشان داده‌اند.

(۴) با افزایش تعداد سیکل‌های ترمیم، میزان نرخ ترمیم تمامی نمونه‌ها کاهش یافته که این پدیده در نمودارهای نتایج بهینه ترمیم شکل ۳ به وضوح پیداست. که این مطلب با نتایج بدست آمده توسط تحقیقات دیگر نیز مطابقت دارد [Norambuena-Contreras and Gonzalez-Torre, 2017].

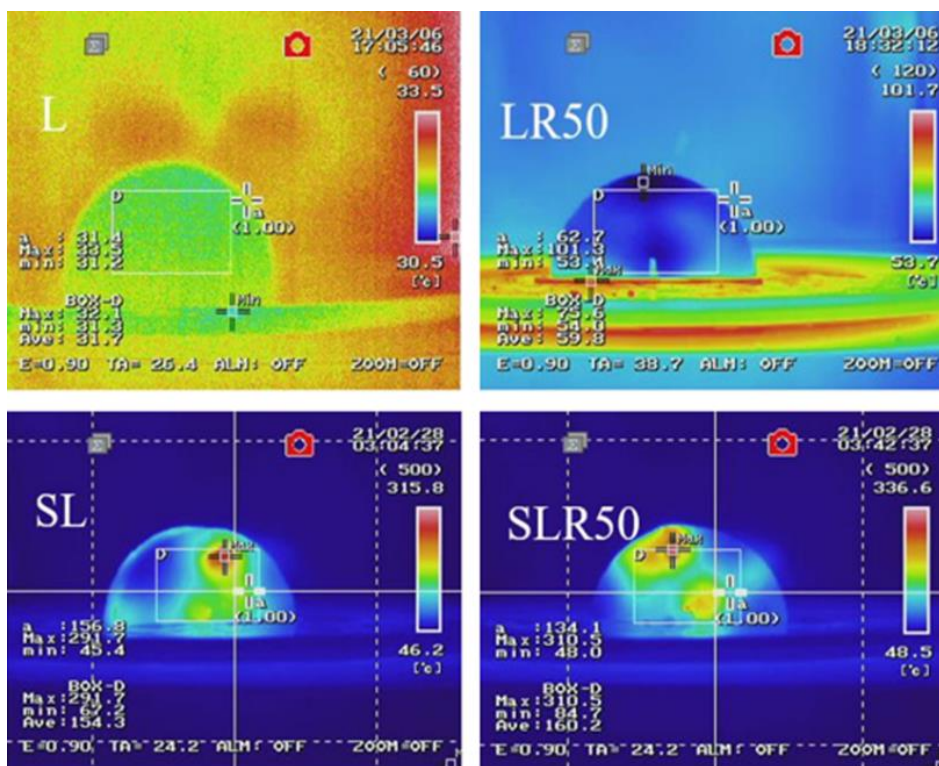
در شکل ۴ تصاویر حرارتی تعدادی از نمونه‌ها در اولین سیکل ترمیم با زمان گرمایش ۹۰ ثانیه‌ای را نشان داده شده است.

نتایج خودترمیمی نمونه‌ها به صورت زیر خلاصه شده است:

(۱) نمونه‌های شاهد به دلیل آنکه تنها با مصالح طبیعی ساخته شده‌اند و سنگدانه‌های آهکی و قیر به تنهایی قابلیت گرم شدن در ماکروویو را نداشتند به همین دلیل میزان ترمیم این نمونه‌ها در ۲ سیکل نخست بسیار اندک بوده و از سیکل سوم به بعد ترمیمی روی آن‌ها رخ نداده است. که اثر آن در جدول ۷ مشهود است. این موضوع تأثیر نوع مصالح و افزودنی‌ها را بر روی فرآیند گرمایش و خودترمیمی، به خوبی نشان می‌دهد.

(۲) استفاده از گل قرمز تنها به عنوان یک ماده جاذب ماکروویو؛ عملکرد خوبی در خودترمیمی نمونه‌های آسفالتی داشته است. همچنین طبق شکل ۳ با مقایسه نتایج بهینه ترمیم برای ۲ نوع نمونه LR50 و LR100 می‌توان بیان کرد که چون میزان ترمیم آن‌ها تفاوت چندانی با هم نمی‌کند و در برخی سیکل‌ها حتی ترمیم نمونه LR50 تا حدودی هم بهتر بوده است، بنابراین استفاده از گل قرمز به مقدار ۵۰ درصد

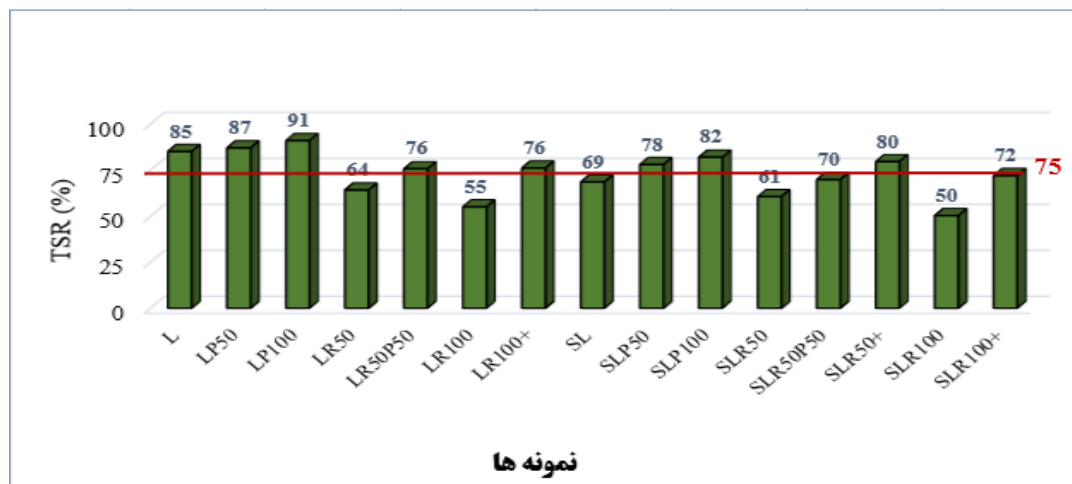
## ارزیابی آزمایشگاهی شاخص خودترمیمی در مخلوط های آسفالتی



شکل ۴. تصاویر مادون قرمز تعدادی از نمونه‌ها در اولین سیکل با زمان ترمیم ۹۰ ثانیه

### ۳-۵ آزمایش حساسیت رطوبتی

نتایج شاخص حساسیت رطوبتی در شکل ۵ مشاهده می‌گردد.



شکل ۵. مقایسه نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها (TSR)

مربوط به نمونه‌های حاوی زایکوترم است.

#### ۵-۴ آزمایش مارشال

به منظور بررسی میزان مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر تغییرشکل‌های دائمی از جمله شیارشدگی، آزمایش مارشال با استاندارد ASTM-D1559 بر روی نمونه‌های استوانه‌ای انجام گرفته است. پارامترهای خروجی این آزمایش برای هر نمونه، استقامت مارشال (کیلونیوتن) و روانی مارشال (میلیمتر) هستند که از نسبت استقامت به روانی؛ شاخص مارشال یا ضریب مارشال (MQ) بدست آمده که معیاری برای سنجش سختی نمونه‌ها است. نتایج بدست آمده از این آزمایش در شکل ۶ ملاحظه می‌گردد.

باتوجه به نتایج شکل ۶ می‌توان دریافت که تمامی نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد از مقدار MQ بالاتری برخوردار هستند. دربرخی از پژوهش‌های صورت گرفته پیرامون ضریب MQ اشاره شده است که هر چه مقدار این پارامتر بالاتر باشد، مخلوط آسفالتی در برابر تنش‌های برشی و تغییرشکل‌های ماندگار مقاوم‌تر است. بنابراین مواد مورد استفاده در این تحقیق نه تنها لطمه‌ای به سختی نمونه آسفالتی ساخته شده با مصالح آهکی وارد نکرده، بلکه عامل افزایش سختی نیز بوده‌اند.

طبق شکل ۶ مقدار MQ در نمونه SL که حاوی سرباره فولادی درشت دانه با سایز ذرات مانده روی الک شماره ۴ است، از ۲/۸۴ (کیلونیوتن بر میلیمتر) به ۴/۲۴ (کیلونیوتن بر میلیمتر) رسیده است که نسبت به نمونه شاهد (L) ۴۹/۳۰ درصد افزایش داشته است. دلیل این افزایش نیز به تیزگوشه بودن سنگدانه‌های سرباره مربوط می‌شود که قفل و بست محکمی را درخود ایجاد کرده و سختی مخلوط را بالا می‌برند.

درنمونه های LR50 و LR100 که به ترتیب شامل ۵۰ و ۱۰۰ درصد گل قرمز بوده‌اند، مقدار این ضریب از ۲/۸۴ (کیلونیوتن بر میلیمتر) در نمونه شاهد به ۴/۳۵ و ۴/۵۸ (کیلونیوتن بر میلیمتر) رسیده است که این افزایش بیش از ۵۰ درصد بوده است. افزایش ویسکوزیته و نقطه نرمی قیر به دلیل

حداقل مقدار قابل قبول برای شاخص حساسیت رطوبتی (TSR)، ۷۵ درصد است و هرچه مقدار این شاخص بیشتر باشد، مقاومت نمونه در برابر رطوبت بالاتر خواهد بود.

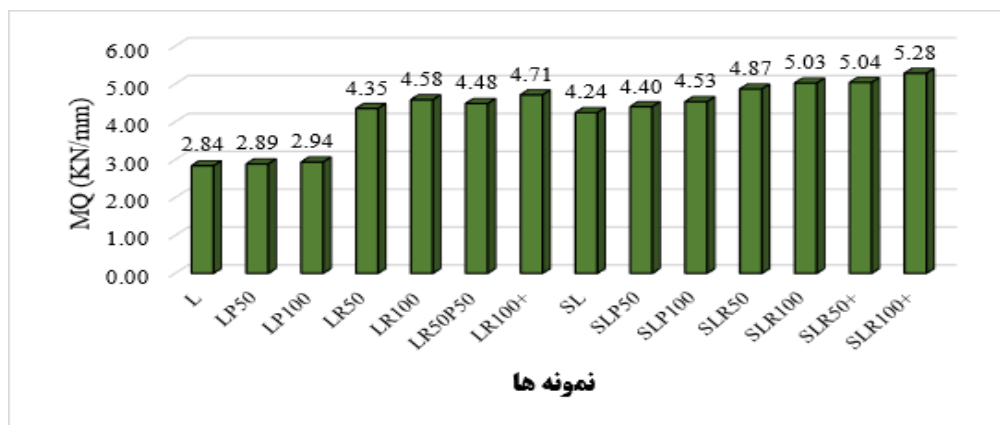
بامشاهده شکل ۵؛ به راحتی می‌توان عملکرد خوب ماده گل کربناته را نسبت به رطوبت درک کرد. زیرا در اکثر نمونه‌های حاوی گل کربناته در هر دو مقدار ۵۰ و ۱۰۰ درصد، مقدار TSR بالای ۷۵ درصد بوده است. اما برخلاف گل کربناته، مخلوط‌های محتوی سرباره فولادی و گل قرمز در مقاومت نسبت به خرابی رطوبتی به طور قابل قبولی ظاهر نشده‌اند. به همین خاطر افزودن گل کربناته به نمونه‌ها، به ویژه SL و LR50 که درترمیم توانایی بالایی از خود نشان داده‌اند، با ارتقاء مقاومت در برابر رطوبت، این ضعف را برطرف نموده است.

برای نمونه‌های LR100 و SLR100 که تمامی بخش فیبر این نمونه‌ها توسط گل قرمز تأمین شده و دیگر جایی برای افزودن فیبر گل کربناته نمانده است، برطرف نمودن ضعف مقاومتی در برابر خرابی رطوبتی به عنوان یک مسأله در روند پژوهش مطرح گردیده شد. همچنین مقاومت رطوبتی پایین نمونه SLR50 با افزودن گل کربناته مرتفع نگردیده است زیرا سرباره فولادی و گل قرمز که ۲ عامل فزاینده خرابی رطوبتی هستند، در این نمونه هر دو حضور داشته و میزان گل کربناته نمی‌توانست بیشتر از ۵۰ درصد باشد. برای رفع این مشکلات از ماده پلیمری ضد عریان شدگی زایکوترم به مقدار ۰/۰۵ درصد وزنی قیر استفاده گردیده است که این میزان براساس کاتالوگ ارائه شده توسط شرکت مربوطه انتخاب شده است. بدین ترتیب تمامی ترکیبات به ویژه نمونه‌هایی که در خودترمیمی بهترین عملکرد را داشته‌اند به کمک گل کربناته و پلیمر ضد عریان شدگی زایکوترم؛ از منظر مقاومت رطوبتی قابل قبول بوده‌اند. استفاده از این مقدار زایکوترم فقط نتوانست TSR نمونه SLR100 را به بالای ۷۵ درصد برساند که البته این نمونه در ترمیم هم عملکرد مناسبی نداشته است. علامت +

## ارزیابی آزمایشگاهی شاخص خودترمیمی در مخلوط های آسفالتی

۳/۵۲ درصد افزایش پیدا کرده است. در سایر نمونه‌ها هم که ترکیب این مصالح با یکدیگر هستند، شاخص مارشال همچنان رو به افزایش بوده است.

افزودن گل قرمز، می‌تواند دلیل بالا رفتن استقامت و درنهایت ضریب مارشال باشد. با توجه به همین دلایل، در نمونه‌های LP50 و LP100 که به ترتیب حاوی ۵۰ و ۱۰۰ درصد فیلر گل کربناته بوده‌اند؛ نسبت به نمونه شاهد، مقدار MQ ۱/۷۶ و



شکل ۶. مقایسه ضریب مارشال نمونه‌ها

های این مصالح است.

• نتایج آزمایش خودترمیمی نشان داده است که؛ مقدار ترمیم بهینه نمونه آسفالتی حاوی سرباره فولادی (SL) در مقایسه با نمونه شاهد (L) به میزان ۵۰/۸۴ درصد در تمامی سیکل‌های ترمیم افزایش پیدا کرده است. همچنین مشخص گردید که استفاده از گل قرمز با نسبت‌های ۵۰ و ۱۰۰ درصد؛ مقدار بهینه ترمیم را در مقایسه با نمونه کنترلی در ۷ سیکل ترمیم به ترتیب، ۳۲/۷۶ و ۳۱/۱۸ درصد افزایش داده است. باتوجه به این نتیجه پی برده شد که استفاده‌ی ۵۰ درصد از گل قرمز، مقدار بهینه بوده است. به طور کلی ۳ ترکیب SL، SLR50 و LR50 به ترتیب با مقادیر بهینه خودترمیمی ۵۲/۷۳، ۴۵/۳۸ و ۳۴/۶۵ درصد در تمامی سیکل‌های ترمیم؛ بهترین عملکرد را در حوزه ترمیم داشته‌اند. همانطور که مشاهده می‌گردد نرخ ترمیم نمونه حاصل شده از ترکیب ۵۰ درصد گل قرمز و سرباره فولادی (SLR50) از میزان ترمیم سرباره کمتر و از مقدار ترمیم گل قرمز تنها بیشتر بوده است.

• سرباره و گل قرمز به دلیل دارا بودن درصد بالایی از

## ۶. نتیجه‌گیری

باتوجه به اینکه هدف اصلی این پژوهش بررسی و ارزیابی قابلیت ترمیم مخلوط‌های آسفالتی سبز است، چه بهتر که مصالح بازیافتی مصرفی جایگزین درجهت ارتقای این ویژگی باشند. به همین خاطر از سرباره فولادی با نسبت حجمی ۶۰ درصد به صورت سنگدانه‌های درشت‌دانه مانده روی الک شماره ۴، گل قرمز پسماند کارخانه آلومینا با نسبت‌های ۵۰ و ۱۰۰ درصد به صورت فیلر و گل کربناته پسماند کارخانه چغندر قند با نسبت‌های ۵۰ و ۱۰۰ درصد به عنوان فیلر در این تحقیق استفاده شده است. برای تعیین درصد قیر بهینه و تعیین ضریب مارشال، از آزمایش مقاومت مارشال استفاده گردیده است. برای ارزیابی خودترمیمی، آزمایش خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌های آسفالتی نیمه استوانه‌ای انجام گرفته است. درنهایت هم به دلیل اهمیت جایگاه خرابی رطوبتی، نمونه‌های استوانه‌ای تحت آزمایش حساسیت رطوبتی قرار گرفته‌اند. جمع بندی نتایج تمامی آزمایشات به شرح زیر است:

• سرباره فولادی، درصد قیر بهینه را ۰/۳ درصد افزایش داده است. دلیل این افزایش نیز وجود تخلخل زیاد در سنگدانه

مخلوط‌های آسفالتی نیز شده است. که این موارد از کاربردهای عملی نتایج پژوهش حاضر بوده است.

#### ۷. پی‌نوشت‌ها

1. Deterioration
2. Micro-cracks
3. Self-healing
4. Rest periods
5. Induction heating
6. Microwave heating
7. Infrared radiation
8. Steel Slag
9. Red Mud waste
10. Carbonation cake or Press Mud waste
11. Three-Point Bending (TPB)
12. Semi-cylindrical specimen
13. Marshall Quotient (MQ)
14. Electric Arc Furnace (EAF)
15. Basic Oxygen Furnace (BOF)
16. Notch

#### ۸. مراجع

- امانی، سعید، کاوسی، امیر و محمدکریمی، محمد، (۱۳۹۹) "ارزیابی تأثیر کربن فعال در ترمیم القایی مخلوط‌های آسفالتی پیر شده تحت امواج ماکروویو"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۱۱، شماره ۳، ص. ۷۷۳-۷۹۲.

- شفابخش، غلامعلی و احمدی، سعید، (۱۳۹۸) "بررسی تأثیر استفاده از سرباره فولاد و اندودهای سطحی مختلف بر عملکرد مقاومت برشی بین لایه‌ای روسازی مرکب"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۱۱، شماره ۲، ص. ۴۷۵-۴۹۹.

- Amelian, S., Manian, M., Abtahi, S. M. and Goli, A. (2018) "Moisture sensitivity and mechanical performance assessment of warm mix asphalt containing by-product steel slag". Journal of Cleaner Production. Vol. 176, No., pp. 329-337.

ترکیبات فلزی مقاومت قابل قبولی نسبت به رطوبت نداشته اند. به گونه‌ای که در مخلوط سرباره‌ای مقدار شاخص TSR به میزان ۱۶ درصد و در مخلوط‌های دارای ۵۰ و ۱۰۰ درصد گل قرمز، این شاخص به ترتیب ۲۱ و ۳۰ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته است. این ضعف به کمک گل کربناته در اکثریت نمونه‌ها جبران شد. افزودن ۵۰ و ۱۰۰ درصد گل کربناته به مخلوط سرباره‌ای میزان شاخص TSR را به ترتیب ۱۳ و ۹ درصد نسبت به مخلوط سرباره‌ای تنها افزایش داده است. همچنین در مخلوط حاوی ۵۰ درصد گل قرمز که در ترمیم عملکرد خوبی داشته است با افزودن ۵۰ درصد گل کربناته، مقاومت رطوبتی ۱۲ درصد افزایش یافته و میزان شاخص TSR آن به بالای ۷۵ درصد ارتقا یافته است. علاوه بر این با اضافه نمودن ۵۰ و ۱۰۰ درصد گل کربناته تنها به نمونه شاهد میزان شاخص TSR به ترتیب ۲ و ۶ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش پیدا کرده است. فقط در ۳ ترکیب از نمونه‌ها که امکان استفاده از گل کربناته نبوده است از ماده ضدعریان شدگی زایکوترم استفاده گردیده است.

• نتایج ضریب مارشال که از استقامت و روانی آزمایش مارشال به دست آمده، نشان داده است که سرباره و گل قرمز با نسبت‌های ۵۰ و ۱۰۰ درصد پارامتر ضریب مارشال را به ترتیب ۴۹/۳۰، ۵۳/۱۷ و ۶۱/۲۷ درصد نسبت به نمونه کنترلی (L) افزایش داده‌اند. همچنین گل کربناته با مقادیر ۵۰ و ۱۰۰ درصد مقدار ضریب MQ را درمقایسه با نمونه شاهد (L) به ترتیب ۱/۷۶ و ۳/۵۲ درصد افزایش داده است. بنابراین می‌توان گفت کلیه مصالح پسماندی و ضایعاتی مورد استفاده در این تحقیق موجب افزایش سختی مخلوط‌های آسفالتی نسبت به مخلوط کنترلی شده‌اند.

• با توجه به نتایج حاصله؛ استفاده از این مواد پسماندی به جای مصالح طبیعی در آسفالت سبز علاوه بر حفظ و نگهداری محیط زیست، موجب ارتقاء عملکرد ترمیم



behaviour of asphalt materials using continuum damage approach". International Journal of Pavement Engineering. Vol. 16, No. 4, pp. 350-362.

- Kavussi, A. and Qazizadeh, M. J. (2014) "Fatigue characterization of asphalt mixes containing electric arc furnace (EAF) steel slag subjected to long term aging". Construction and Building Materials. Vol. 72, No., pp. 158-166.

- Kumar, H. and Varma, S. (2021) "A review on utilization of steel slag in hot mix asphalt". International Journal of Pavement Research and Technology. Vol. 14, No. 2, pp. 232-242.

- Li, M., Wu, G., Fini, E. H., Yu, M. and Xu, Z. (2020) "Investigating the healing capacity of asphalt mixtures containing iron slag". Construction and Building Materials. Vol. 261, No., pp. 119446.

- Liu, Q., Li, B., Schlangen, E., Sun, Y. and Wu, S. (2017) "Research on the Mechanical, Thermal, Induction Heating and Healing Properties of Steel Slag/Steel Fibers Composite Asphalt Mixture". Applied Sciences. Vol. 7, No. 10, pp. 1088.

- Lou, B., Sha, A., Li, Y., Wang, W., Liu, Z., Jiang, W. and Cui, X. (2020) "Effect of metallic-waste aggregates on microwave self-healing performances of asphalt mixtures". Construction and Building Materials. Vol. 246, No., pp. 118510.

- Norambuena-Contreras, J. and Garcia, A. (2016) "Self-healing of asphalt mixture by

- Ayar, P., Moreno-Navarro, F. and Rubio-Gómez, M. C. (2016) "The healing capability of asphalt pavements: a state of the art review". Journal of Cleaner Production. Vol. 113, No., pp. 28-40.

- Canestrari, F., Virgili, A., Graziani, A. and Stimilli, A. (2015) "Modeling and assessment of self-healing and thixotropy properties for modified binders". International Journal of Fatigue. Vol. 70, No., pp. 351-360.

- Chen, Z., Wu, S., Wen, J., Zhao, M., Yi, M. and Wan, J. (2015) "Utilization of gneiss coarse aggregate and steel slag fine aggregate in asphalt mixture". Construction and Building Materials. Vol. 93, No., pp. 911-918.

- Ganjei, M. A. and Aflaki, E. (2016) "Application of nano-silica and styrene-butadiene-styrene to improve asphalt mixture self healing". International Journal of Pavement Engineering. Vol. 20, No. 1, pp. 89-99.

- Hesami, S., Ameri, M., Goli, H. and Akbari, A. (2015) "Laboratory investigation of moisture susceptibility of warm-mix asphalt mixtures containing steel slag aggregates". International Journal of Pavement Engineering. Vol. 16, No. 8, pp. 745-759.

- Huang, Y., Bird, R. N. and Heidrich, O. (2007) "A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements". Resources, Conservation and Recycling. Vol. 52, No. 1, pp. 58-73.

- Karki, P., Li, R. and Bhasin, A. (2015) "Quantifying overall damage and healing

College of Engineering.

- Shen, D.-H., Wu, C.-M. and Du, J.-C. (2009) "Laboratory investigation of basic oxygen furnace slag for substitution of aggregate in porous asphalt mixture". *Construction and Building Materials*. Vol. 23, No. 1, pp. 453-461.

- Von Quintus, H. L., Mallela, J., Jiang, J. and Buncher, M. (2007) "Expected Service Life of Hot-Mix Asphalt Pavements in Long-Term Pavement Performance Program". *Transportation Research Record*. Vol. 1990, No. 1, pp. 102-110.

- Yamaç, Ö. E., Yilmaz, M., Yalçın, E., Kök, B. V., Norambuena-Contreras, J. and Garcia, A. (2021) "Self-healing of asphalt mastic using capsules containing waste oils". *Construction and Building Materials*. Vol. 270, No., pp. 121417.

- Yao, L., Gao, W., Ma, X. and Fu, H. (2020) "Properties Analysis of Asphalt Binders Containing Bayer Red Mud". *Materials*. Vol. 13, No. 5, pp. 1122.

- Yıldız, K. and Atakan, M. (2020) "Improving microwave healing characteristic of asphalt concrete by using fly ash as a filler". *Construction and Building Materials*. Vol. 262, No., pp. 120448.

- Zhang, J., Liu, S., Yao, Z., Wu, S., Jiang, H., Liang, M. and Qiao, Y. (2018) "Environmental aspects and pavement properties of red mud waste as the replacement of mineral filler in asphalt mixture". *Construction and Building*

*microwave and induction heating". Materials & Design*. Vol. 106, No., pp. 404-414.

- Norambuena-Contreras, J. and Gonzalez-Torre, I. (2017) "Influence of the Microwave Heating Time on the Self-Healing Properties of Asphalt Mixtures". *Applied Sciences*. Vol. 7, No. 10.

- Özdemir, A. M., Yalçın, E., Arslanoğlu, H., Yilmaz, M. and Baha, K. (2021) "Investigation of the effect of carbonation cake on rheological properties of bituminous binders". *The International Journal of Materials and Engineering Technology*. Vol. 4, No. 1, pp. 10-17.

- Pouranian, M. R. and Shishehbor, M. (2019). "Sustainability Assessment of Green Asphalt Mixtures: A Review". *Environments*. Vol. 6, No. 6, pp. 73.

- Riara, M., Tang, P., Mo, L., Hong, W., Chen, M. and Wu, S. (2018) "Evaluation of moisture and temperature effect on crack healing of asphalt mortar and mixtures using healing agents". *Construction and Building Materials*. Vol. 177, No., pp. 388-394.

- Riara, M., Tang, P., Mo, L., Javilla, B. and Wu, S. (2018) "Investigation into crack healing of asphalt mixtures using healing agents". *Construction and Building Materials*. Vol. 161, No., pp. 45-52.

- Roque, R., Simms, R., Chen, Y., Koh, C. and Lopp, G. (2012) "Development of a test method that will allow evaluation and quantification of the effects of healing on asphalt mixture", University of South Florida.

Materials. Vol. 180, No., pp. 605-613.

- Zhang, J., Sun, C., Li, P., Liang, M., Jiang, H .  
and Yao, Z. (2019) "Experimental study on  
rheological properties and moisture  
susceptibility of asphalt mastic containing red  
mud waste as a filler substitute". Construction  
and Building Materials. Vol. 211, No., pp.  
159-166.

حسن آذرگهر، سیدعلی حسینی، محمد یوسفی مقدم

حسن آذرگهر، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران - عمران را در سال ۱۳۹۷ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران - راه و ترابری را در سال ۱۴۰۰ از دانشگاه صنعتی شاهرود اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان شامل طراحی روسازی، بررسی آزمایشگاهی قیر و آسفالت، روش های نوین در ترمیم مخلوط های آسفالتی است.



سیدعلی حسینی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران - عمران را در سال ۱۳۸۳ از دانشگاه صنعتی شاهرود و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران - راه و ترابری را در سال ۱۳۸۶ از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی اخذ نمود. در سال ۱۳۹۵ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی عمران - راه و ترابری از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مدیریت و نگهداری روسازی راه، ارزیابی آزمایشگاهی و میدانی مخلوط های آسفالتی و طراحی روسازی راه بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه صنعتی شاهرود است.



محمد یوسفی مقدم، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران - عمران را در سال ۱۳۹۶ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران - راه و ترابری را در سال ۱۴۰۰ از دانشگاه صنعتی شاهرود اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان شامل تکنولوژی قیر و آسفالت، آزمایشگاه روسازی و مخلوط های آسفالتی است.

