

## مطالعه عملکرد مخلوط میکروسرفیسینگ حاوی پودر سرباره مس جایگزین فیلر

### طبیعی: ارزیابی آزمایشگاهی

مریم زروق، کارشناس ارشد گرایش راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شمال، مازندران، آمل، ایران

امیر ایزدی (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شمال، مازندران، آمل، ایران

**E-mail: amirizadi60@gmail.com**

مهدی زال‌نژاد، دانشجوی دکتری گرایش راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۷

دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۷

### چکیده

یکی از شیوه‌های کارآمد در نگهداری پیشگیرانه و حفظ رویه‌های آسفالتی، استفاده به‌موقع از آسفالت حفاظتی میکروسرفیسینگ است. این مطالعه باهدف امکان‌سنجی و تأثیر استفاده از پودر سرباره مس ضایعاتی جایگزین فیلر طبیعی در طرح اختلاط میکروسرفیسینگ جهت سنجش عملکرد آن انجام شده است. در این خصوص، در مرحله اول ویژگی‌های مصالح سنگی و پودر سرباره مس ضایعاتی بررسی گردید. در مرحله بعد جهت تحلیل عملکرد مخلوط‌های میکروسرفیسینگ، از ۵ ترکیب متفاوت شامل صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد پودر مس جایگزین فیلر در مخلوط میکروسرفیسینگ استفاده گردید. ارزیابی و مقایسه نمونه‌های آسفالتی با آزمایش‌های چسبندگی مرطوب (در زمان‌های ۳۰ و ۶۰ دقیقه)، سایش در شرایط مرطوب (در مدت‌زمان یک ساعت) و چرخ بارگذاری شده-چسبندگی ماسه و چرخ بارگذاری شده-میزان جابه‌جایی مطابق با آیین‌نامه ASTM D6372 صورت گرفت. نتایج نشان داد که نمونه های حاوی پودر مس ضایعاتی، سبب ارتقاء عملکرد میکروسرفیسینگ می‌شوند. همچنین در میان نمونه‌های آسفالتی، مخلوط حاوی ۱۰۰ درصد پودر مس دارای مناسب‌ترین عملکرد بوده به‌طوری که نسبت به نمونه اصلاح نشده (شاهد) سبب افزایش چسبندگی در مدت‌زمان ۳۰ و ۶۰ دقیقه به ترتیب به میزان ۲۵/۸ و ۲۷/۳ درصد و کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط به میزان ۳۳ درصد و کاهش میزان جابه‌جایی عمودی در برابر بارگذاری ترافیکی به میزان ۳۰ درصد گردید. مخلوط حاوی ۱۰۰ درصد پودر مس در مقایسه با نمونه شاهد دارای ۲ درصد قیر امولسیون کمتر جهت رسیدن به چسبندگی مناسب در زمان مشخص است.

واژه‌های کلیدی: آزمایش چسبندگی مرطوب، پودر سرباره مس، مقاومت در برابر سایش، مقاومت در برابر تغییر شکل، میکروسرفیسینگ

## ۱. مقدمه و ادبیات پژوهش

(2022; Zhu et al., 2022). در دهه‌های اخیر، تلاش‌های

قابل‌توجهی برای استفاده مجدد از این سرباره در صنعت ساختمان به‌منظور کاهش مقدار سرباره در حال‌ته‌نشینی انجام شده است. این تلاش منجر به استفاده از CS به‌عنوان سنگدانه‌های درشت یا ریز با خواص فیزیکی و مکانیکی مطلوب در زمینه‌های گسترده شده است. که عمدتاً شامل ساخت‌وساز جاده‌ای، راه‌آهن، روسازی آسفالت و همچنین تولید سیمان و بتن بود (Feng et al., 2019). سرباره مس به‌عنوان یک ماده افزودنی معدنی جدید دارای مزایای اقتصادی و اجتماعی مهمی است، بنابراین به‌طور گسترده توسط محققان موردبررسی قرار گرفته است. به‌کارگیری مواد سرباره مس به‌عنوان فیلر به‌جای فیلرهای متداول استخراج شده از سنگدانه‌های طبیعی و به‌عنوان بخشی از سنگدانه در طرح اختلاط، به‌طور قابل‌توجهی باعث کم شدن آلاینده‌گی محیط‌زیست در فرآیند ساخت‌وساز می‌شود (Choudhary, Kumar, & Gupta, 2020). به این دلیل که فیلرهای طبیعی و معدنی به‌واسطه استخراج از معادن سطح زمین، برداشت شده و در مخلوط بکار برده می‌شوند. استخراج بی‌رویه فیلرهای متداول باعث مشکلاتی از قبیل از بین رفتن پوشش گیاهی، پایین آمدن سطح آب زیرزمینی و اختلال در اکوسیستم موجود می‌شود (Choudhary et al., 2020; Robinson Jr, Menzie, & Hyun, 2004) میزان بهینه استفاده از مواد پسماند به‌عنوان بخشی از سنگدانه علاوه بر آنکه برای محیط‌زیست سودمند است، می‌تواند در عملکرد مخلوط‌های آسفالتی و بتنی نیز مفید واقع شود (Choudhary et al., 2020). در این خصوص مطالعاتی توسط پژوهشگران در استفاده از فیلرهای ضایعاتی در میکروسرفیسینگ و سرباره مس انجام شده است.

در خصوص عملکرد و طرح اختلاط میکروسرفیسینگ، جایگزینی فیلر ضایعات زغال‌سنگ با فیلر طبیعی در درصد‌های ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰، مطابق با دستورالعمل ISSA A143 و آزمایش‌های چسبندگی، حاسیت رطوبتی و بارگذاری چرخ

آگاهی اجتماعی ناشی از نیاز به توسعه صنعتی پایدار که در سال‌های اخیر در سرتاسر جهان راه‌اندازی شد، منجر به تقاضای فزاینده توافق‌نامه‌های زیست‌محیطی و سیاست‌های عمومی در زمینه‌ی تولید شده است. به حداقل رساندن بهره‌برداری از منابع طبیعی و انتشار آلاینده‌ها در فرآیندهای تولید، افزایش عمر روسازی و مدیریت ضایعات تولید شده از موضوعات مورد علاقه در مورد توسعه زیرساخت‌های جاده‌ای است. استفاده از آسفالت حفاظتی یکی از مناسب‌ترین جایگزین‌ها برای دستیابی به یک رویکرد پایدار است. در فرآیندهای احیای روسازی استفاده از آن باعث کاهش ضایعات تولید شده و دارای مزایای اقتصادی، انرژی و زیست‌محیطی قابل‌توجهی است (Gransberg, 2010; Muñoz-Cáceres et al., 2021).

از این‌رو جست‌وجوی مصالح جایگزین مواد خام و سازگار با محیط‌زیست برای تولید روبه‌های حفاظتی ضرورت دارد. مصالح به کار رفته در مخلوط‌های آسفالتی عامل مهمی است که به کاهش اثرات زیست‌محیطی مخلوط آسفالت و هزینه‌های تولید آن کمک می‌کند. زیرا مواد زائد، نیاز به سنگ‌دانه‌های بکر را در بخش ساخت‌وساز جاده کاهش می‌دهند (Ziari, Zalnezhad, Ali Ziari, & Nasiri Amiri, 2022).

سرباره مس یک زباله جامد صنعتی است که در طی فرآیند ذوب مس تولید می‌شود. حدود ۲ تا ۳ تن سرباره مس به ازای هر تن مس تولید می‌شود. تجمع و تخلیه سرباره مس به‌عنوان سرباره پسماند جامد نه تنها مقدار زیادی از زمین را اشغال می‌کند بلکه به دلیل ترکیب فلزات سنگین باعث آلودگی جدی زیست‌محیطی می‌شود (A. Zalnezhad, Hosseini, Shirinabadi, & Korandeh, 2022; Zhu et al., 2022).

ترکیب شیمیایی اصلی سرباره مس  $SiO_2$  و  $Fe_2O_3$  است که با مقدار کمی  $CaO$  و  $Al_2O_3$  همراه است. فاز کریستالی سرباره مس عمدتاً فایالیت ( $FeO \cdot SiO_2$ )، مخلوط با مقداری مگنتیت ( $FeO$ ) و  $Fe_2O_3$  و کوارتز ( $SiO_2$ ) است (A. Zalnezhad et al., ).

## مطالعه عملکرد مخلوط میکروسرفیسینگ حاوی پودر سرباره مس جایگزین فیلر طبیعی: ارزیابی آزمایشگاهی

از ۰ تا ۱۰۰ براساس جایگزینی با مصالح فیلر جهت بررسی عملکرد و ارزیابی اثرات زیست محیطی مخلوط استفاده نمودند. در بین مخلوط ها، مخلوط حاوی ۱۰ درصد پودر سرباره کوره باعث افزایش چسبندگی، کاهش جابجایی عمودی و کاهش قیرزدگی به ترتیب به میزان ۳۵، ۵ و ۴۸/۵ درصد شد. نتایج آزمایش های زیست محیطی نشان داد که نمونه های حاوی سرباره کوره سازگار با محیط زیست بوده و استفاده از آن ها در میکروسرفیسینگ به عنوان جایگزین فیلر تا ۱۰ درصد قابل قبول است (Shaygan, Izadi, & Zalnezhad, 2022). در پژوهشی دیگر کی منش و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی اثر پودر کوره قوس الکتریک بر عملکرد و طرح اختلاط میکروسرفیسینگ پرداختند. در این پژوهش پودر ضایعاتی در ۵ ترکیب در درصدهای ۰ تا ۱۰ درصد بر اساس وزن سنگدانه جایگزین فیلر گردید. نتایج طراحی نشان داد که مخلوط های حاوی سرباره الزامات عملکردی را برآورده نموده و مخلوط حاوی ۵۰ درصد سرباره دارای مناسب ترین عملکرد در میان مخلوط ها بوده است. همچنین، مخلوط حاوی ۵۰ درصد پودر ضایعاتی کوره می تواند عملکرد میکروسورفیسینگ را از نظر زمان چسبندگی، مقاومت در برابر سایش، قیرزدگی و جابجایی عمودی به ترتیب ۲،۹، ۱۹،۰، ۱۴،۰ و ۳۱،۰ درصد بهبود بخشد (Keymanesh, Ziari, Zalnezhad, & Zalnezhad, 2021). مشخصات آسفالت گرم (HMA) حاوی پودر سرباره مس توسط مدرس و بنگر (۲۰۱۹) مورد بررسی واقع شد. در این مطالعه از ۴ مخلوط HMA شامل ۶ درصد پودر سنگ آهک، ۴ درصد پودر سنگ آهک و ۲ درصد پودر سرباره مس، ۲ درصد پودر سنگ آهک و ۴ درصد پودر سرباره مس و ۶ درصد پودر سرباره مس بر اساس وزن کل مخلوط استفاده شد. در ادامه آزمایش های کشش غیرمستقیم، مدول برجهنگی و تست خستگی و به همراه آزمایش های زیست محیطی انجام شد. با توجه به نتایج به دست آمده، خواص مکانیکی HMA با افزایش محتوای پودر سرباره مس بهبود یافت. به طور متوسط کشش غیر

توسط زیاری و همکاران (۲۰۲۲) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نمونه های حاوی پودر ضایعات زغال سنگ، سبب ارتقاء عملکرد میکروسرفیسینگ می شوند. همچنین در میان نمونه های آسفالتی، مخلوط حاوی ۵۰ درصد پودر ضایعاتی دارای مناسب ترین عملکرد بوده به طوری که نسبت به نمونه اصلاح نشده (شاهد) سبب رشد چسبندگی در مدت زمان ۳۰ دقیقه و ۱ ساعت به ترتیب به مقدار ۱۱/۷ و ۱۳/۶ درصد و کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط به میزان ۲۵/۲ درصد و کاهش میزان جابه جایی عمودی در برابر بارگذاری ترافیکی به میزان ۳۲ درصد گردید (Ziari et al., 2022). در مطالعه ای مخلوط میکروسرفیسینگ اصلاح شده با قیر امولسیون حاوی پلی فسفریک اسید در ترکیب با فیلر سرباره فولاد جایگزین فیلر مصالح طبیعی توسط اخوان بهابادی و همکاران (۲۰۲۲) مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، ابتدا از پلی فسفریک اسید در درصدهای ۰/۴، ۰/۸، ۱/۲ و ۱/۶ درصد بر اساس وزن قیر باقی مانده جهت اصلاح قیر امولسیون استفاده گردید. سپس از قیر امولسیون اصلاح شده با درصد بهینه به منظور استفاده در مخلوط های میکروسرفیسینگ استفاده گردید. مخلوط های میکروسرفیسینگ با پنج ترکیب مختلف حاوی فیلر سرباره فولادی در سطوح ۰، ۲/۵، ۵/۰، ۷/۵ و ۱۰/۰ درصد بر اساس وزن کل سنگدانه به عنوان جایگزینی برای مصالح عبوری از الک ۰/۰۷۵ میلی متر تهیه شد. نتایج آزمایش های آسفالتی بر روی نمونه ها نشان داد که مخلوط حاوی ۷/۵ و ۱۰ درصد فیلر سرباره فولاد بهترین عملکرد را در میان مخلوط ها ایجاد می کند. به طوری که عملکرد میکروسرفیسینگ را از نظر چسبندگی، مقاومت در برابر سایش، قیر زدگی و جابجایی عمودی به ترتیب ۲۹/۲، ۶۴/۵، ۱۸/۶ و ۴۴/۰ درصد در مخلوط حاوی ۷/۵ درصد سرباره و ۲۵/۰، ۶۴/۳، ۲۳/۳ و ۴۲/۹ درصد در مخلوط حاوی ۱۰ درصد سرباره بهبود بخشیدند (akhavan bahabadi, Khabiri, & Zalnezhad, 2022). در دیگر تحقیق شایگان و همکاران (۲۰۲۲) از پودر سرباره کوره آهنگدازی در ۵ ترکیب

کششی غیرمستقیم، مدول ارتجاعی، عدد جریان و شیارشدگی نشان داد که ۲۰ درصد سرباره مس در WMA مدول ارتجاعی، پایداری مارشال، شیارشدگی و مقاومت در برابر ترک را افزایش می‌دهد و تأثیر مثبت قابل‌توجهی بر حساسیت رطوبت دارد (Ziari, Moniri, Imaninasab, & Nakhaei, 2019). در مطالعه‌ای دیگر از اسوالدو و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی خصوصیات مکانیکی مخلوط آسفالتی حاوی سرباره مس و درصد بالای آسفالت بازیافتی (RAP) پرداختند. این مطالعه عملکرد مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۵۰ تا ۷۰ درصد RAP و ۷,۵ و ۱۵ درصد سرباره مس را به‌عنوان جایگزینی جزئی سنگدانه‌ها ارزیابی کرد تا تأثیر بر افزایش مؤثر RAP در طراحی مخلوط‌ها تعیین شود. مخلوط‌ها با استفاده از آزمایش‌های خستگی، حساسیت رطوبتی و ردیابی چرخ هامبورگ ارزیابی شدند. اختلاط سرباره مس در مخلوط‌ها با RAP حساسیت رطوبتی را در مقایسه با مخلوط‌هایی که فقط RAP را شامل می‌شوند، بهبود بخشید و منجر به استفاده از میزان RAP بالاتر در آزمون‌های خستگی و چرخ هامبورگ بدون نشان دادن تأثیر منفی گردید (Muñoz-Cáceres et al., 2021).

#### ۱-۱ هدف و نوآوری پژوهش

تأثیر سرباره مس در بتن و مخلوط‌های گرم آسفالتی مورد مطالعه قرار گرفته است اما مطالعات محدودی در مورد تأثیر آن در مخلوط‌های آسفالتی سرد بالأخص میکروسرفیسینگ انجام شده است. بازیافت و استفاده مجدد از ضایعات و محصولات جانبی حاصل از فعالیت‌های صنعتی و بخش ساختمانی در دهه‌های اخیر در کاهش استفاده از مواد اولیه برای راه‌سازی اهمیت زیادی یافته است. لذا هدف این تحقیق ارائه آسفالت حفاظتی است که در مصرف انرژی و در مدیریت تعمیر و نگهداری گزینه‌ای کم‌هزینه محسوب شده و می‌تواند به مدیریت پسماند کمک کند. لذا در این تحقیق با ساخت نمونه‌هایی از مخلوط میکروسرفیسینگ، به بررسی اثر اضافه کردن درصد‌های مختلف فیلر سرباره مس بر خواص این نوع از آسفالت، پرداخته شده

مستقیم، مدول برجهندگی و عمر خستگی HMA حاوی ۶ درصد سرباره مس به میزان ۷,۵، ۱۰,۲ و ۲۱,۶ درصد بیشتر از مخلوط کنترل بود. نتایج آزمایش‌های زیست‌محیطی حاکی از آن بود که غلظت فلزات سنگین در شیرابه‌های جمع‌آوری شده از CSP و HMA حاوی این پرکننده، معیارهای مورد نیاز را برآورده می‌کند (Modarres & Alinia Bengar, 2019). رپوسیراس و همکاران (۲۰۱۶) مطالعه‌ای در مورد کاربرد سرباره مس در مخلوط‌های قیری با روسازی آسفالت بازیافتی (RAP) انجام داد. نتیجه نشان می‌دهد که استفاده از سرباره مس در درصد اضافی ۳۵ درصد مطلوب است. مخلوط آسفالتی نیمه گرم (WMA) ساخته شده با جایگزینی سنگدانه‌های ریز با سرباره مس استحکام و عملکرد بهتر مخلوط‌ها را نشان داد (A. Raposeiras, Vargas-Cerón, Movilla-Quesada, & Castro-Fresno, 2016). در دیگر تحقیق از رپوسیراس و همکاران (۲۰۲۱)، تولید مخلوط آسفالتی با سرباره مس جایگزین مصالح طبیعی موردبررسی واقع شد. در این تحقیق، مخلوط‌های آسفالتی با سرباره مس به‌عنوان جایگزین سنگدانه‌ها با اندازه ذرات در محدوده ۲,۵ تا ۰,۰۸ میلی‌متر تولید شد تا اندازه سرباره مس با بهترین عملکرد تعیین شود. آزمون‌های مقاومت کششی غیرمستقیم برای آنالیز نمونه‌هایی که در شرایط مختلف رطوبت و دما و درجه پیری قرار داشتند، استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که استحکام مخلوط آسفالت با افزایش اندازه سرباره مس، به‌ویژه در شرایط متغیر رطوبت و پیری افزایش یافت. بنابراین در صورت انتخاب اندازه مناسب، سرباره مس می‌تواند به‌عنوان جایگزین سنگدانه در مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار گیرد (A. C. Raposeiras, Movilla-Quesada, Muñoz-Cáceres, Andrés-Valeri, & Lagos-Varas, 2021). تأثیر سرباره مس بر عملکرد WMA توسط زیاری و همکاران (۲۰۱۹) موردبررسی واقع شد. در این مطالعه میزان قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره مس به میزان ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد نسبت به وزن کل سنگدانه با استفاده از روش مارشال تعیین شد. نتایج آزمون‌های استحکام

و خوب دانه‌بندی شده استفاده می‌شود (Zulu & Mukendi, 2018). در این تحقیق سنگدانه‌های کوهی (کارخانه چالدران، مازندران) در اندازه ۰-۵ میلی‌متر و پودر سرباره مس (کرمان، کارخانه مس سرچشمه) مطابق با شکل ۱ به‌عنوان جایگزین بخشی از فیلر استفاده گردید. از لحاظ دانه‌بندی، دانه‌بندی نوع II مورد استفاده واقع شده و حدود آن در جدول ۱ مشخص است. استفاده از این نوع دانه‌بندی به دلیل داشتن ریزدانه قابل توجه در مقایسه با نوع III و تولید صدای کمتری، در مکان‌های مسکونی و شهری مناسب است (Esfahani & Khatayi, 2020; Zulu & Mukendi, 2018). مشخصات مصالح سنگی در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین تصاویر میکرو ساختاری و ترکیب شیمیایی سنگدانه و پودر سرباره مس پس از انجام آزمایش به ترتیب در شکل ۲ و جدول ۳ ارائه شده است. مطابق شکل ۲، شکل ذرات و آنالیز سطح فیلهای طبیعی و پودر سرباره مس با میکروسکوپ الکترونی روبشی (FESEM) مورد سنجش واقع شد. بر اساس شکل ۲-(b)، ذرات پودر سرباره مس دارای اشکال زاویه‌ای، ساختار خرد شده و سطح زیر می‌باشند. این در حالی است که ذرات فیلر طبیعی (شکل ۲-(a))، دارای شکلی لایه‌ای و نامنظم می‌باشند. این موضوع بیانگر آن است که پودر سرباره مس می‌تواند چسبندگی بهتری را با قیر به همراه داشته باشد. همان‌طور که از نتایج جدول ۳ مشخص است، مصالح مورد استفاده در این پژوهش از نوع کلسیمی بوده (حاوی ۴۲/۵ درصد CaO) و پودر سرباره مس بازیافتی نیز دارای مقدار قابل توجهی از اکسید آهن (به میزان ۵۴/۸ درصد) و اکسید سیلیسی (۳۱/۸) نسبت به مصالح معدنی است. بار سطحی منفی سیلیس عاملی برای سازگاری مناسب با قیرهای امولسیون کاتیونی می‌باشد. علاوه بر این،  $\text{SiO}_2$  موجب سختی و استحکام مکانیکی شده و می‌تواند چسبندگی بین ذرات سنگدانه و قیر را بهبود بخشد (Sherre & Liao, 2022).

است. در این راستا، ابتدا مشخصات فیزیکی و شیمیایی مصالح سنگی و سرباره مس مورد ارزیابی قرار گرفته و سپس به‌منظور ارزیابی عملکرد مخلوط میکروسرفیسینگ حاوی سرباره، ۵ ترکیب مختلف حاوی صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد سرباره جایگزین فیلر تهیه شد. سنجش نمونه‌های آسفالتی به‌واسطه آزمایش‌های چسبندگی، چرخ بارگذاری شده و سایش در شرایط مرطوب مطابق با دستورالعمل ISSA A143 و استاندارد ASTM D6310 انجام شد. اهداف این تحقیق به‌صورت جزئی‌تر به شرح زیر است:

- ۱- بررسی تأثیر پودر سرباره مس به‌عنوان مصالح جایگزین فیلر بر عملکرد میکروسرفیسینگ از قبیل چسبندگی، پتانسیل قیرزدگی، مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی و بارگذاری ترافیکی
- ۲- تجزیه و تحلیل اثر درصد قیر امولسیون کاتیونی بر چسبندگی بین قیر و سنگدانه، زمان گیرش و عمل‌آوری، قیرزدگی، مقاومت در برابر سایش و بارگذاری ترافیکی
- ۳- تعیین مقدار مناسب قیر امولسیون و پودر سرباره مس در مخلوط میکروسرفیسینگ جهت دستیابی به مقاومت و عملکرد مناسب

## ۲. روش پژوهش

### ۲-۱ مواد و مصالح

#### ۲-۱-۱ مصالح سنگی

تعیین مصالح سنگی با کیفیت به دلیل قرارگیری مستقیم در شرایط آب‌وهوایی و در معرض بار ترافیک، یکی از قسمت‌های با اهمیت در طرح اختلاط مخلوط میکروسرفیسینگ است (Apaza, Guimarães, Vivoni, & Schroder, 2021; Esfahani & Khatayi, 2020). برای رسیدن به مخلوطی با عملکرد مناسب و مقاومت بالا، از مصالح سنگی شکسته، مرغوب

جدول ۱. حدود دانه‌بندی سنگدانه‌های مخلوط‌های میکروسرفیسینگ مطابق با دستورالعمل ISSA A143

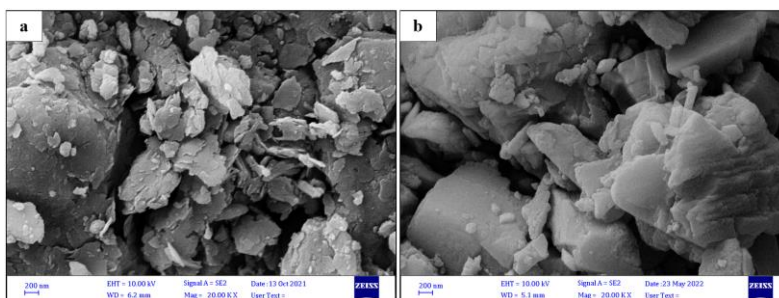
اندازه الک	محدوده مورد استفاده	محدوده نوع II دستورالعمل
۴/۷۵ میلی‌متر	۱۰۰	۱۰۰-۹۰
۲/۳۶ میلی‌متر	۷۷/۵	۹۰-۶۵
۱/۱۸ میلی‌متر	۵۷/۵	۷۰-۴۵
۶۰۰ میکرون	۴۰	۵۰-۳۰
۳۰۰ میکرون	۲۴	۳۰-۱۸
۱۵۰ میکرون	۱۵/۵	۲۱-۱۰
۷۵ میکرون	۱۰	۱۵-۵

جدول ۲. ویژگی‌های مصالح سنگی

آزمون‌ها	شماره استاندارد	سنگدانه درشت‌دانه	سنگدانه ریزدانه	ویژگی‌ها بر اساس ISSA A143
وزن مخصوص حقیقی ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	ASTM C127	۲/۶۵	۲/۶۷	-
وزن مخصوص ظاهری ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	ASTM C128	۲/۷۰	۲/۷۲	-
درصد جذب آب	ASTM C127	۱/۱۵	۱/۴۲	-
ارزش ماسه‌ای خاک‌ها و مصالح ریزدانه	ASTM D2419	۷۳٪	حد اقل ۶۰٪	
سلامت مصالح با سولفات سدیم	ASTM C88	۲٪	حداکثر ۱۵٪	
مقاومت سایشی در ماشین لس‌آنجلس	ASTM C131	۱۳٪	حداکثر ۳۰٪	



شکل ۱. تصاویر سرباره مس به همراه فیلر طبیعی



شکل ۲. تصاویر میکروسکوپی: a. پودر مصالح طبیعی و b. پودر سرباره مس

## مطالعه عملکرد مخلوط میکروسرفیسینگ حاوی پودر سرباره مس جایگزین فیلر طبیعی: ارزیابی آزمایشگاهی

جدول ۳. ترکیب شیمیایی سنگدانه و پودر سرباره مس ضایعاتی

نوع مواد	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	MnO	L.O.I
مصالح طبیعی	-	۱/۸۲	۳/۷۹	۴۲/۵	۲/۶۹	۷/۹۷	۰/۳۶	۰/۲۹	۰/۰۹	-	۳۹/۸۴
پودر سرباره مس	۲/۳۱	۵۴/۸۲	۱/۰۷	۱/۲۰	۵/۰۳	۳۱/۸۶	۱/۴۷	۰/۵۶	۰/۶۷	۰/۰۸	-

جدول ۴. مشخصات قیر امولسیون کاتیونی

آزمون‌ها	استاندارد آزمون	نتیجه	حدود مورد پذیرش
کندروانی سی بولت- فیورل در دمای ۲۵°C، ثانیه	AASHTO T59	۲۷	۱۰۰-۲۰
الک، %	ASTM D244	۰/۰۱	حداکثر ۰/۱
اندود، %	AASHTO T59	۹۹	-
بار ذرات	AASHTO T59	مثبت	مثبت
پایداری انبارش و ذخیره قیر امولسیون، ۲۴ ساعت، %	ASTM D6930	۰/۲	حداکثر ۱
تقطیر قیر امولسیون، جرم وزنی %	ASTM D7497	۶۲	حداقل ۶۲
آزمون‌ها بر روی باقی‌مانده قیر امولسیون			
درجه نفوذ در ۲۵°C، ۱۰۰ گرم، ۵ ثانیه	ASTM D5	۶۱*	۹۰-۴۰
نقطه نرمی قیر با آزمایش حلقه و گلوله، درجه سانتی‌گراد	ASTM D36	۶۶*	-

\* قیر پایه استفاده شده جهت تولید امولسیون از نوع ۶۰/۷۰ با درجه نفوذ ۶۶ و نقطه نرمی ۵۵ بوده است

### ۲-۱-۲ قیر امولسیون

جهت ساخت نمونه‌های میکروسرفیسینگ، قیر امولسیون کاتیونی بر اساس استاندارد ASTM D6372 مورد استفاده قرار گرفت. جهت تولید قیر امولسیون کاتیونی اصلاح شده با پلیمر، ۳۸ درصد محلول سوپ حاوی اسید HCL آب، پلیمر لاتکس استایرین-بوتادین-رابر و امولسیفایر دیر شکن (با نام تجاری سکا، فرانسه) با قیر با رده نفوذ ۶۰/۷۰ به میزان ۶۲ درصد (مطابق با ISSA A143) در دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد، در دستگاه امولسیون ساز آزمایشگاهی با سرعت ۲۸۴۰ دور بر دقیقه مخلوط شدند. این روش از ساخت قیر امولسیون کاتیونی بر اساس استاندارد ASTM D2397 و پژوهش‌های صورت گرفته دیگر پژوهشگران صورت گرفت (Izadi, shaygan, & Zalnezhad, 2022; Ziari, Mahdizadeh, & Zalnezhad, 2021; Ziari, Zalnezhad, Nasiri & Amiri, 2023). همچنین خصوصیات قیر امولسیون کاتیونی تولیدی در جدول ۴ ارائه شده است.

### ۳-۱-۲ سیمان پرتلند و آب

آهک هیدراته، میکروسلیس، سیمان پرتلند و خاکستر بادی از فیلرهای معدنی فعال قابل استفاده در مخلوط میکروسرفیسینگ می‌باشند. همچنین، این مواد باعث به حداقل رساندن جدایی مصالح سنگی از یکدیگر شده و منجر به افزایش چسبندگی مخلوط می‌شود. این موضوع به این دلیل است که یون‌های هیدروکسل فیلرهای معدنی فعال با یون‌های قیر امولسیون وارد واکنش می‌شوند. سپس قیر امولسیون سریع‌تر شکسته شده و عمل‌آوری مخلوط میکروسرفیسینگ سریع‌تر انجام خواهد شد (A. Wang, Shen, Li, & Song, 2019). در این مطالعه، سیمان پرتلند به مقدار ۱ درصد برای ارتقاء ویژگی‌های مخلوط به‌عنوان فیلر فعال معدنی در میکروسرفیسینگ مورد استفاده واقع شد. منظور از آب، آبی است که به هنگام هم‌زدن به مخلوط اضافه گردیده و موجب بهبود کارایی و پوشش بهتر مصالح می‌شود (A. Wang et al., 2019). آب مورد استفاده بایستی عاری از

می‌شوند. پس از برآورده شدن الزامات مصالح، طرح اختلاط و سنجش عملکرد نمونه‌ها با آزمایش‌های زمان اختلاط، چسبندگی مرطوب، سایش در شرایط مرطوب، تعیین حداکثر قیر به‌وسیله چرخ بارگذاری شده - چسبندگی ماسه و ارزیابی میزان تغییر عمودی و جانبی با چرخ بارگذاری شده انجام می‌شود (Keymanesh, Ziari, Zalnezhad, & Zalnezhad, 2020). در مشخص نمودن میزان بهینه قیر امولسیون و تعیین حداقل و حداکثر آن به ترتیب از نتایج آزمایش‌های سایش در شرایط مرطوب و آزمایش چرخ بارگذاری شده-چسبندگی ماسه استفاده می‌شود. بر اساس دستورالعمل ISSA A143، اگر مقدار حداکثر و حداقل قیر کمتر از ۳٪ باشد، مقدار بهینه قیر امولسیون متوسط مقدار حداکثر و حداقل است. اگر اختلاف بین حداکثر و حداقل قیر بیشتر از ۳ درصد باشد، مقدار بهینه قیر امولسیون در وسط دامنه ۳ درصدی از حداکثر حدود تعیین شده برای قیر است (M. Zalnezhad & Hesami, 2020).

مواد مضر مانند سولفات‌ها و نمک‌ها باشد. این موضوع بدان جهت است که ممکن است واکنش‌های شیمیایی ناخواسته در مخلوط ایجاد شود. آب استفاده شده در تمامی نمونه‌ها، آب شرب است.

## ۲-۲ طرح اختلاط و آزمایش‌ها

### ۲-۲-۱ طرح اختلاط

در این تحقیق پودر سرباره مس ضایعاتی عبوری از الک ۰/۰۷۵ میلی‌متر به‌عنوان جایگزین فیلر در درصدهای ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ در نمونه‌های میکروسرفیسینگ استفاده گردید. حدود مجاز هریک از آزمون‌ها و درجه‌بندی هریک از مخلوط‌های میکروسرفیسینگ به ترتیب در جداول ۵ و ۶ آورده شده است. طراحی میکروسرفیسینگ و آزمون‌های مرتبط با آن در آیین‌نامه ASTM D6372 ارائه شده است. در طراحی مخلوط میکروسرفیسینگ بعد از انتخاب قیر امولسیونی و سنگدانه‌های مناسب، آزمون‌ها بر اساس استاندارد ASTM D6372 بر روی مصالح صورت گرفته و حدود مجاز مشخصات موردبررسی واقع

جدول ۵. حدود قابل قبول آزمون‌های میکروسرفیسینگ (ISSA A143, 2010)

شماره استاندارد	حدود قابل قبول	آزمون‌ها
TB 113	حداقل ۱۲۰ ثانیه	زمان اختلاط
TB 139	حداقل ۱۲ کیلوگرم - سانتی‌متر	چسبندگی مرطوب در ۳۰ دقیقه
	حداقل ۲۰ کیلوگرم - سانتی‌متر	چسبندگی مرطوب در ۶۰ دقیقه
TB 109	حداکثر ۵۳۸ گرم بر مترمربع	تعیین حداکثر قیر به‌وسیله چرخ بارگذاری شده و چسبندگی ماسه
TB 100	حداکثر ۵۳۸ گرم بر مترمربع	افت سایش در شرایط مرطوب ۱ ساعت
TB 147	حداکثر ۱۰ درصد	تغییر مکان عمودی (چرخ بارگذاری شده)
	حداکثر ۵ درصد	تغییر مکان افقی (چرخ بارگذاری شده)

جدول ۶. درجه‌بندی مخلوط‌های حاوی درصد‌های مختلف فیلر پودر سرباره مس ضایعاتی

نوع مخلوط	فیلر پودر سرباره مس جایگزین فیلر مخلوط شاهد، %
CSP0	۰
CSP25	۱۰
CSP50	۲۰
CSP75	۳۰
CSP100	۴۰

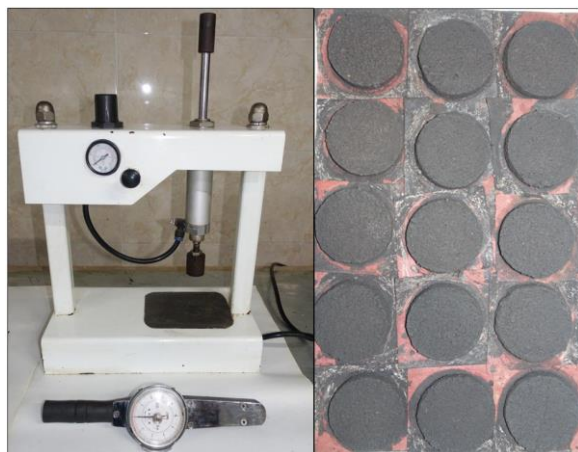
## ۲-۲-۲ آزمایش زمان اختلاط

آزمایش زمان اختلاط اولین مرحله در طراحی مخلوط و شامل اختلاط مصالح سنگدانه، فیلر، آب و قیر امولسیون کاتیونی است (de Matos et al., 2020). در آسفالت حفاظتی میکروسرفیسینگ ضروری است زمان اختلاط کافی و مناسب تعیین شده تا از شکست زود هنگام قیر امولسیونی جلوگیری شود. هنگام ساخت آسفالت سرد حفاظتی باید زمان کافی جهت پخش کردن توسط دستگاه وجود داشته و مخلوط بلافاصله پس از آن نشکند (Esfahani & Khatayi, 2020). همچنین این آزمون علاوه بر آنکه زمان لازم برای اختلاط را مشخص می‌کند، سازگاری مواد را با یکدیگر کنترل و تأیید می‌نماید. این آزمون مطابق با ISSA TB 113 انجام می‌شود. خلاصه روند آزمایش به این صورت است که ابتدا سنگدانه را تا رسیدن به رطوبت زیر ۱ درصد خشک کرده و سپس درصدی از فیلر فعال، آب و قیر امولسیون به آن اضافه می‌شود. مدت زمان شکستن نمونه در اثر اختلاط به عنوان زمان اختلاط معرفی شده که بایستی حداقل ۱۲۰ ثانیه باشد. به صورت جامع‌تر در بیش از این زمان، مخلوط دیگر نمی‌تواند به صورت همگن مخلوط شود (ISSA, 2017e).

## ۲-۲-۳ آزمایش چسبندگی مرطوب

آزمایش چسبندگی مرطوب مخلوط‌ها، جهت تعیین چسبندگی اولیه و عمل‌آوری، با اندازه‌گیری در زمان‌های مختلف برای تعیین حداقل زمان مناسب بازگشایی ترافیک، بر روی

مخلوط‌های میکروسرفیسینگ انجام می‌شود (Apaza et al., 2021; ISSA, 2017d). مخلوط آسفالتی مناسب جهت قرارگیری در ترافیک عبوری، مطابق نتایج حاصله در مدت زمان ۳۰ و ۶۰ دقیقه، انتخاب می‌گردد. حداقل میزان چسبندگی جهت بررسی خواص شکنندگی قیر امولسیون در مدت زمان ۳۰ دقیقه، ۱۲ کیلوگرم- سانتی‌متر بوده و برای قرارگیری زیر ترافیک عبوری در مدت زمان ۶۰ دقیقه، ۲۰ کیلوگرم- سانتی‌متر است. به‌طور خلاصه برای ساخت، مخلوط‌ها در قالب دایره‌ای متناسب با دانه‌بندی نوع II ریخته و پرداخت شده و سپس در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرند. زمانی که مخلوط‌ها به اندازه مناسب سفت شدند، قالب دور آن‌ها برداشته می‌شود. پس از حاصل شدن گیرش در نمونه‌ها، در دستگاه چسبندگی قرار داده می‌شوند. سپس از طریق سیلندر دستگاه با فشاری معادل ۱۹۳ کیلو پاسکال تحت پیچش قرار می‌گیرد. بدین صورت میزان پیچش بدست آمده در فواصل زمانی مناسب که در ارتباط با چسبندگی مخلوط تعریف شده، قرائت می‌شود (Bhargava, Siddagangaiiah, & Ryntathiang, 2020). از نتایج حاصله این آزمایش برای تعیین زمان مناسب جهت بازگشایی ترافیک عبوری بر روی نمونه‌های میکروسرفیسینگ استفاده می‌شود (ISSA, 2017d). تصویری از نمونه‌ها و دستگاه ارزیابی چسبندگی در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳. نمایی از دستگاه و نمونه‌های آزمایش چسبندگی



شکل ۴. نمایی از دستگاه آزمایش WTAT و نمونه‌های ساخته‌شده این آزمایش

کیلوگرمی متراکم شده و سپس مخلوط توزین می‌شود. در مرحله بعد، ماسه اتاوا با دمای ۸۲ درجه سانتی‌گراد بر روی نمونه در محل شیار ایجاد شده به‌صورت یکنواخت، پخش می‌گردد. در این حالت مشابه حالت قبل جهت تراکم نمونه ۱۰۰ سیکل بارگذاری انجام می‌شود. سپس نمونه پس از بارگذاری مجدداً توزین می‌شود. اختلاف بین وزن‌های اندازه‌گیری شده، به‌عنوان مقدار ماسه‌ای که چسبیده است، گزارش می‌شود. بدین صورت در هریک از مخلوط‌ها حداکثر مقدار مجاز قیر مشخص می‌گردد (ISSA, 2017a).

#### ۲-۲-۶ آزمایش سنجش تغییر شکل عمودی و جانبی

مخلوط میکروسرفیسینگ تحت چرخ بارگذاری شده آزمایش ارزیابی میزان تغییر مکان عمودی و جانبی با چرخ بارگذاری شده، ویژگی‌های تغییر شکل مخلوط را تحت بار ترافیک شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد. در این پژوهش مخلوط با استفاده از چرخ ۵۶/۷ کیلوگرم طی ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری متراکم می‌شود. متعاقباً ضخامت و عرض نمونه، قبل و بعد از تراکم، در مسیر چرخ و در وسط طول نمونه ارزیابی می‌شود. تغییر شکل‌های جانبی و عمودی نمونه‌ها نایستی به ترتیب از ۵ و ۱۰ درصد بیشتر شود (ISSA, 2017b). تصویری از مخلوط‌ها و دستگاه چرخ بارگذاری شده در شکل ۵ نشان داده شده است.

#### ۲-۲-۴ آزمون تعیین افت وزنی مخلوط‌ها بواسطه سایش

##### در شرایط مرطوب

در این آزمون برای جلوگیری از وقوع خرابی شن‌زدگی، حداقل میزان قیر امولسیون، تعیین شده و مقدار افت وزنی هریک از نمونه‌ها (از دست رفتن سنگدانه نمونه‌های ساخته‌شده)، بعد از سایش با لوله لاستیکی، معین می‌شود. به‌طور خلاصه در طی این آزمایش نمونه‌های میکروسرفیسینگ عمل‌آوری شده در گرمخانه به مدت حداقل ۱۵ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد، وزن شده و سپس در آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد به مدت زمان ۱ ساعت غوطه‌ور می‌شود. سپس نمونه‌ها در شرایط غوطه‌وری در آب به مدت ۵ دقیقه با یک نوار لاستیکی به روش چرخشی تحت عمل سایش قرار می‌گیرند. در پایان نمونه سایش یافته در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک و سپس توزین شده تا میزان افت وزنی معین شود (ISSA, 2017c). تصویری از نمونه‌ها و دستگاه آزمایش سایش در شرایط مرطوب در شکل ۴ نشان داده شده است.

#### ۲-۲-۵ آزمون چرخ بارگذاری شده - چسبندگی ماسه

این آزمون جهت اندازه‌گیری حداکثر قیر برای جلوگیری از خرابی قیر زدگی مخلوط‌های میکروسرفیسینگ است. در این آزمایش مخلوط‌ها طی ۱۰۰۰ سیکل با چرخ بارگذاری ۵۶/۷



شکل ۵. دستگاه چرخ بارگذاری و نمونه‌های ساخته شده

جدول ۷. نتایج آزمون زمان اختلاط نمونه‌های میکروسرفیسینگ

CSP40			CSP30			CSP20			CSP10			CSP0			نوع مخلوط
۸	۷	۶	۸	۷	۶	۸	۷	۶	۸	۷	۶	۸	۷	۶	درصد قیر باقی مانده
۷	۷	۸	۷/۵	۸	۹	۸/۵	۸/۵	۹	۹	۹	۹/۵	۹/۵	۱۰	۱۱	درصد آب
۱۲۴	۱۲۳	۱۲۴	۱۲۲	۱۲۶	۱۲۵	۱۲۱	۱۲۲	۱۲۲	۱۲۴	۱۲۵	۱۲۳	۱۲۱	۱۲۳	۱۲۶	زمان اختلاط بدست آمده

### ۳-۲- آزمایش چسبندگی مرطوب

با توجه به نمودارهای ۶ و ۷، تمامی مخلوط‌ها با توجه به دستورالعمل ISSA 143 گیرش و مقاومت لازم برای بازگشایی ترافیک به ترتیب در مدت زمان ۳۰ دقیقه و ۱ ساعت را کسب کرده و نمونه CSP100 در میزان قیر باقی مانده ۸ درصد، نسبت به سایر نمونه‌ها، دارای بیشترین مقدار گشتاور پیچشی (متناظر با چسبندگی) است. در مدت زمان ۳۰ و ۶۰ دقیقه با افزایش قیر از ۶ به ۸ درصد، چسبندگی به بیشترین مقدار می‌رسد لذا با افزایش درصد قیر، چسبندگی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، نمونه‌های اصلاح شده به خصوص نمونه‌های حاوی ۷۵ و ۱۰۰ درصد پودر سرباره مس، بیشترین مقدار گشتاور پیچشی را در درصد قیر ۷ و ۸ درصد بدست آورده‌اند. بنابراین دارای بیشترین مقدار چسبندگی نسبت به سایر مخلوط‌ها هستند. به‌عنوان نمونه در قیر باقی مانده ۸ درصد، مخلوط‌های CSP25، CSP50، CSP75 و CSP100 نسبت به نمونه شاهد CSP0 به ترتیب موجب افزایش چسبندگی در مدت زمان ۳۰ دقیقه به

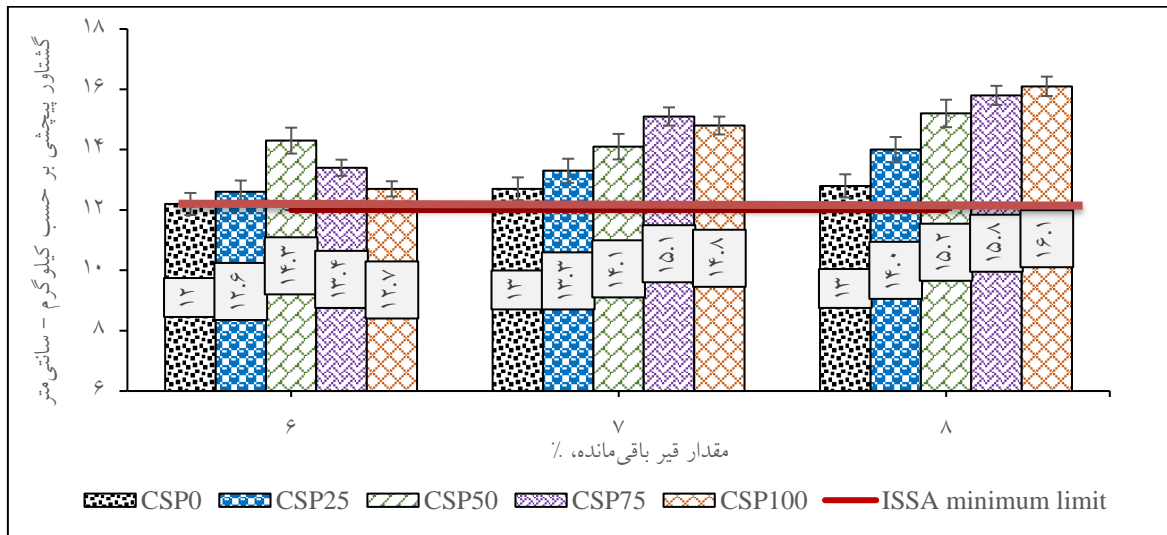
### ۳. تحلیل داده‌ها

#### ۳-۱- آزمایش زمان اختلاط

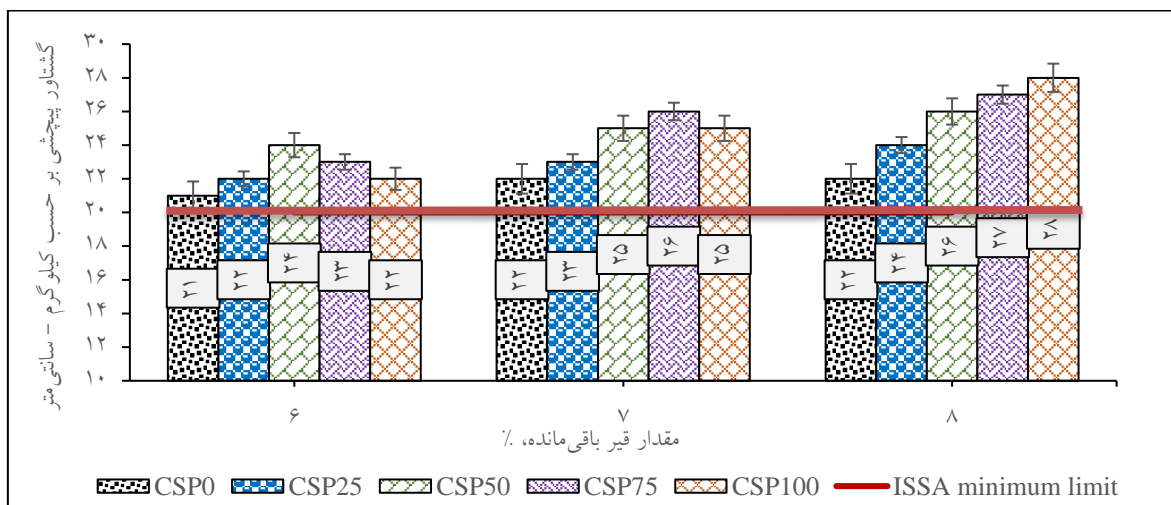
در جدول ۷ مقادیر اولیه قیر امولسیون در سه سطح، مقادیر مناسب سیمان و آب اضافه شده به مخلوط، تعیین شده است. زمان اختلاط حداقل ۱۲۰ ثانیه مطابق ISSA TB113 برای هر یک از نمونه‌های حاوی درصدهای مختلف از پودر سرباره مس و قیر امولسیون، مورد بررسی واقع شد. نتایج این آزمایش نشان داد با افزایش درصد پودر سرباره مس، مقدار آب جهت دستیابی به زمان اختلاط تا حدود مجاز دستورالعمل ISSA کاهش یافت. جذب آب بالای فیلر طبیعی نسبت به پودر سرباره مس به دلیل خصوصیات فیزیکی مانند شکل ظاهری فیلر بوده که بر خصوصیات مخلوط تأثیرگذار بوده و فیلر طبیعی به دلیل ساختار متخلخل و منافذ بالا باعث کاهش کارایی و مصرف بیشتر آب در انواع مخلوط‌های آسفالتی می‌شود.

مشخص، چسبندگی در مخلوط CSPO افزایش یافته و سپس با افزایش بیشتر مقدار قیر امولسیون و به تبع آن افزایش زمان عمل‌آوری، میزان رشد چسبندگی ثابت مانده است. این در حالی است که افزایش میزان پودر سرباره مس و مقدار قیر در مخلوط‌های اصلاح شده، باعث افزایش چسبندگی مخلوط‌ها شده است. بر اساس تصاویر FESEM، تیز گوشه بودن پودر سرباره مس و زاویه اصطکاک بالای این مواد نسبت به فیلر طبیعی، منجر به قفل و بست خوب سنگدانه‌ها نسبت به یکدیگر شده و باعث استحکام بیشتر و چسبندگی بهتر سنگدانه‌ها و قیر با یکدیگر می‌شود.

میزان ۹/۴، ۱۸/۸، ۲۳/۴ و ۲۵/۸ درصد و در مدت زمان ۱ ساعت به میزان ۹/۱، ۱۸/۲، ۲۲/۷ و ۲۷/۳ درصد شده است. نکته دیگری که حائز اهمیت است با افزایش قیر باقیمانده، مقدار بهینه پودر سرباره مس افزایش می‌یابد به طوری که در قیر باقیمانده ۷ درصد، مخلوط CSP50 بیشترین چسبندگی را دارد ولی با افزایش قیر به ۸ و ۹ درصد، به ترتیب مخلوط‌های CSP75 و CSP100 عملکرد بهتری نسبت به سایر مخلوط‌ها داشته است. در مخلوط CSPO و در مدت زمان ۱ ساعت با رشد میزان قیر از ۶ به ۷ درصد، چسبندگی به حداکثر میزان رسیده و آنگاه با افزایش مجدد مقدار قیر به ۸ درصد، میزان چسبندگی ثابت می‌ماند. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش درصد قیر تا میزان



شکل ۶. نتایج آزمایش چسبندگی مرطوب در ۳۰ دقیقه

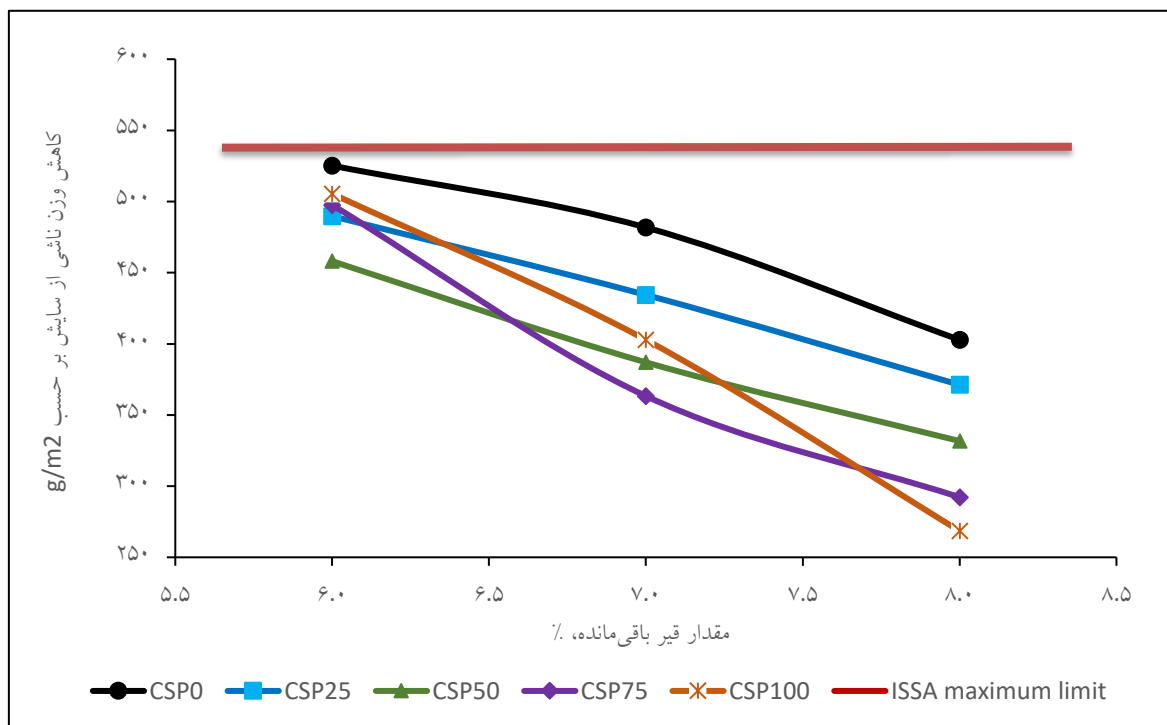


شکل ۷. نتایج آزمایش چسبندگی مرطوب در ۶۰ دقیقه

### ۳-۳ آزمون سایش در شرایط مرطوب

نتایج آزمایش WTAT در مدت زمان ۱ ساعت غوطه‌وری برای همه مخلوط‌های میکروسرفیسینگ در نمودار ۸ نشان داده شده است. مطابق با محدوده مشخص شده در ISSA TB100 مبنی بر حداکثر سایش ۵۳۸ گرم بر مترمربعی، همه مخلوط‌ها در محدوده مجاز دستورالعمل قرار دارند. مطابق گراف نشان داده شده، افزایش درصد قیر سبب بهبود عملکرد سایشی مخلوط‌ها شده است. لذا با افزایش قیر باقیمانده از ۶ به ۸ درصد، افت وزنی ناشی از سایش کاهش می‌یابد. از سوی دیگر از منظر پودر سرباره مس، در قیر باقیمانده ۸ درصد، مخلوط‌های CSP25، CSP50، CSP75 و CSP100 نسبت به نمونه شاهد (CSP0) به ترتیب به مقدار ۷، ۱۳، ۵ و ۴ درصد عملکرد سایش را بهبود داده‌اند. این موضوع با افزایش قیر به ۸ درصد، عملکرد مخلوط‌های CSP25، CSP50، CSP75 و CSP100 نسبت به نمونه شاهد (CSP0) به ترتیب به مقدار ۸، ۱۸، ۲۷ و ۳۳ درصد بهبود یافته است. بنابراین در قیر باقیمانده ۶ درصد مخلوط CSP50 افت وزنی کمتری نسبت به سایر مخلوط‌ها دارد ولی با افزایش قیر باقیمانده به ۸ درصد، مخلوط‌های CSP75 و CSP100 عملکرد بهتری نسبت به سایر مخلوط‌ها دارد. به‌طور کلی کمترین مقدار افت وزنی در نمونه‌ها در ۸ درصد قیر باقی‌مانده متعلق به نمونه CSP100 با عدد ۲۶۹ گرم بر مترمربع است و پس از آن نمونه‌های CSP75، CSP50 و

CSP25 با مقدار سایش به ترتیب ۲۹۲، ۳۳۲ و ۳۷۱ گرم بر مترمربع در رتبه‌های بعدی قرار دارند. این نشان‌دهنده آن است که با افزایش مقدار قیر باقیمانده درصد بهینه پودر سرباره مس افزایش می‌یابد. در مجموع در صورت جایگزینی پودر سرباره مس، عملکرد سایشی مخلوط‌ها بهبود می‌یابد ولی بایستی مقدار پودر سرباره مس بهینه به‌منظور به حداقل رساندن پدیده عریان شدگی تعیین گردد. موضوع دیگر که در نمودار قابل مشاهده است نرخ رشد مقاومت در برابر سایش (مقاومت در برابر خرابی رطوبتی) بوده که در درصدهای متفاوت از قیر مخلوط‌های میکروسرفیسینگ ثابت نیست. به‌طوری که در نمونه‌های CSP0، CSP25 و CSP50 نرخ کاهش افت وزنی نمونه‌ها از قیر باقیمانده ۶ به ۸ درصد نسبت به نمونه‌های CSP75 و CSP100 کمتر است. در نتیجه می‌توان با انتخاب درصد مناسب از پودر سرباره مس و قیر باقیمانده، پدیده عریان شدگی را به حداقل رساند. از آنجا که عریان شدگی به دلیل پیوند ضعیف بین مصالح سنگی و قیر است، در صورتی که مصالح سنگی و قیر بتوانند پیوند قوی‌تری باهم ایجاد کنند، احتمالاً وقوع پدیده عریان شدگی کاهش می‌یابد. از آنجا که پودر سرباره مس دارای سطحی زبر، سخت و گوشه‌دارتر است قفل و بست بهتری بین سنگدانه‌ها ایجاد می‌نماید و باعث به وجود آمدن ترکیبی پایدارتر می‌گردد. این موضوع باعث شده تا مقاومت در برابر سایش نمونه‌های اصلاح شده، بیشتر شود.



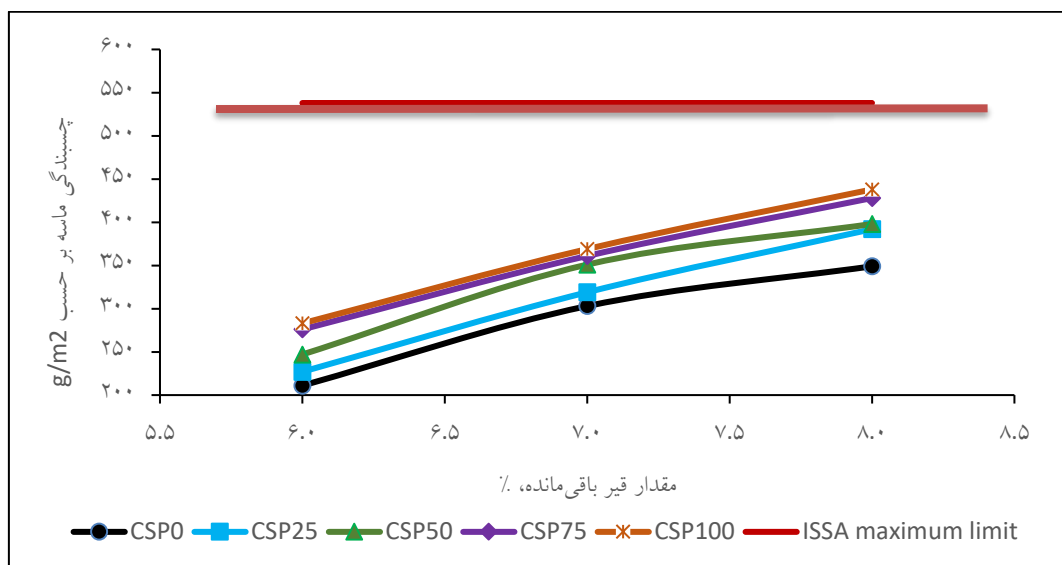
شکل ۸. نتایج مقدار افت وزنی نمونه‌های آزمایش سایش در شرایط مرطوب

### ۳-۴ آزمایش چرخ بارگذاری شده - چسبندگی ماسه

نتایج آزمایش بارگذاری چرخ-چسبندگی ماسه (ارزیابی پتانسیل قیر زدگی) برای مخلوط‌های آسفالتی میکروسرفیسینگ در ادامه در گراف ۹ ارائه شده است. مطابق نتایج این نمودار، عملکرد قیرزدگی مخلوط‌ها، با افزایش درصد پودر سرباره مس بهبود می‌یابد. به‌عنوان نمونه در قیر باقیمانده ۶ درصد، مخلوط‌های CSP25، CSP50، CSP75 و CSP100 نسبت به نمونه شاهد CSP0 به ترتیب به مقدار ۸، ۱۷، ۳۱ و ۳۴ درصد سبب افزایش قیرزدگی شده است که با افزایش قیر به ۸ درصد، قیرزدگی مخلوط‌ها CSP25، CSP50، CSP75 و

CSP100 نسبت به نمونه شاهد به ترتیب به مقدار ۱۲، ۱۴، ۲۳ و ۲۶ درصد افزایش یافته است. از سوی دیگر از منظر قیر باقیمانده، با افزایش قیر باقیمانده، قیرزدگی مخلوط‌ها به‌صورت صعودی افزایش پیدا می‌کند، ولی با این وجود، تمام مخلوط‌ها در محدوده مجاز آیین‌نامه می‌باشد. نکته دیگری که از گراف‌ها دریافت می‌شود، با افزایش قیر از ۶ به ۸ درصد، قیرزدگی همه مخلوط‌ها به‌صورت تقریباً خطی (یا با یک شیب تقریباً ثابت) افزایش می‌یابد. بنابراین، قیرزدگی مخلوط‌ها با مقدار درصد قیر و پودر سرباره مس رابطه مستقیم دارد، لذا در صورت استفاده از پودر مس، بهتر است مقدار قیر مخلوط‌ها برای جلوگیری از خرابی قیرزدگی کاهش یابد.

مطالعه عملکرد مخلوط میکروسرفیسینگ حاوی پودر سرباره مس جایگزین فیلر طبیعی: ارزیابی آزمایشگاهی



شکل ۹. چسبندگی ماسه (پتانسیل قیر زدگی) مخلوط‌های میکروسرفیسینگ در آزمایش چرخ بارگذاری- چسبندگی ماسه

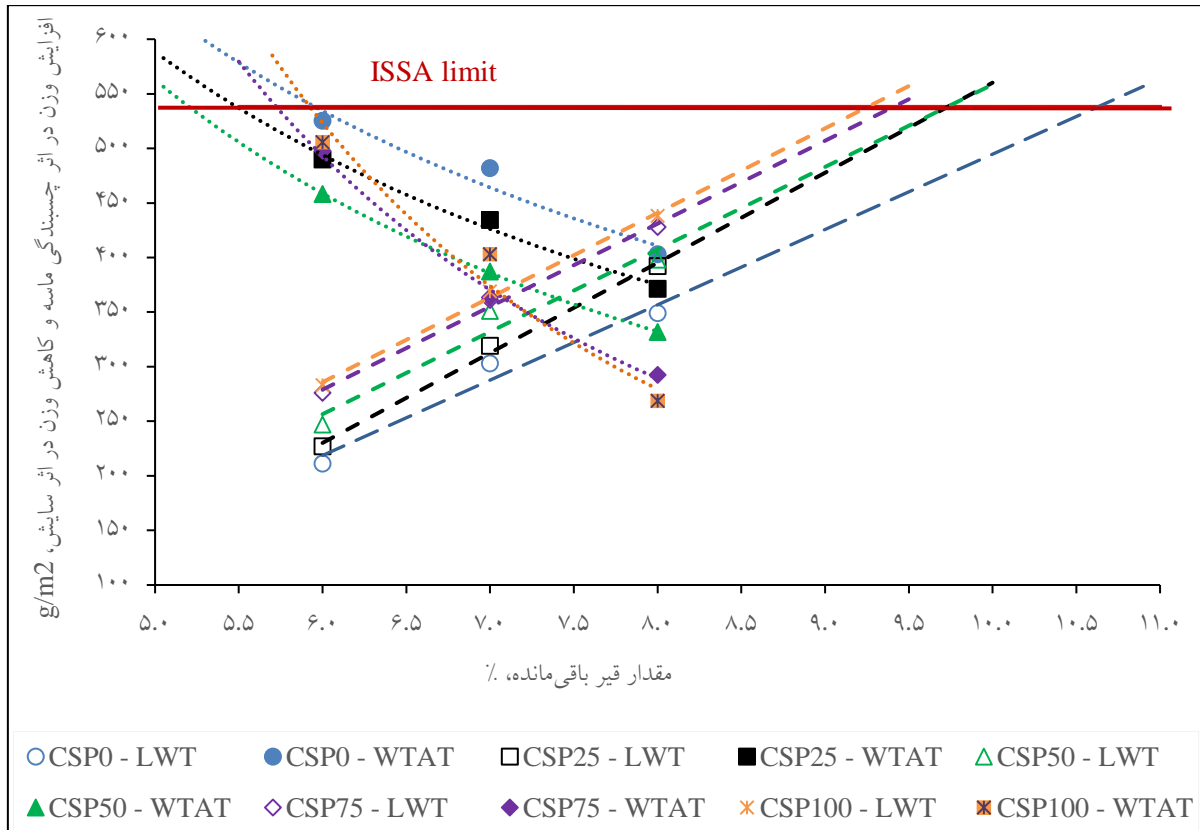
مرطوب و چرخ بارگذاری- چسبندگی ماسه ارائه شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، مقدار بهینه قیر امولسیون نمونه‌های آسفالتی حاوی پودر سرباره مس در مقایسه با نمونه شاهد کاهش یافته است. به طوری که درصد قیر امولسیون بهینه نمونه‌های CSP25، CSP50، CSP75 و CSP100 به ترتیب به مقدار ۰/۷۹، ۱/۲۱، ۱/۷۱ و ۲/۰۲ درصد نسبت به مخلوط شاهد کمتر بوده است. دلیل این موضوع آن است که فیلر طبیعی دارای سطح مخصوص بالاتری است که این امر باعث افزایش قابل توجه میزان قیر بهینه جهت پوشش سطح سنگدانه‌ها خواهد شد (Chen, Lin, & Wu, 2011; Liao, 2007; Taylor, 2007; Zulkati, Diew, & Delai, 2012).

### ۳-۵ تعیین کردن محدوده مجاز و بهینه قیر امولسیون

محدوده مجاز قیر امولسیون و مقدار بهینه آن از طریق رسم نتایج آزمون‌های سایش در شرایط مرطوب و چرخ بارگذاری شده - چسبندگی ماسه و تلفیق نمودارهای این دو آزمون مشخص می‌شوند. در ترکیب دو گراف، نتایج آزمایش سایش مرطوب به صورت نمودارهای توابع توانی و نتایج آزمایش ماسه چسبیده به صورت یک نمودار خطی ارائه می‌شوند (ISSA, 2017e; Keymanesh et al., 2020; M. Zalnezhad & Hesami, 2020). محدوده مجاز قیر امولسیون برای تمامی مخلوط‌ها در جدول ۸ ارائه شده است. در شکل ۱۰ برای هر یک از مخلوط‌های CSP0، CSP25، CSP50، CSP75 و CSP100 نتایج و نمودار آزمایش‌های سایش در شرایط

جدول ۸. محدوده مجاز قیر باقی مانده و درصد بهینه آن برای نمونه‌های میکروسرفیسینگ

نوع مخلوط	حداقل مقدار قیر امولسیون بدست آمده از آزمایش سایش	حداکثر مقدار قیر امولسیون بدست آمده از چسبندگی ماسه	دامنه قابل قبول قیر امولسیون	مقدار بهینه قیر امولسیون
CSP0	۹/۶۸	۱۶/۹۴	۱۶/۹۴-۱۳/۹۴	۱۵/۴۴
CSP25	۸/۹۵	۱۵/۶۵	۱۵/۶۵-۱۳/۶۵	۱۴/۶۵
CSP50	۸/۸۷	۱۵/۷۳	۱۵/۷۳-۱۲/۷۳	۱۴/۲۳
CSP75	۹/۳۱	۱۵/۲۳	۱۵/۲۳-۱۲/۲۳	۱۳/۷۳
CSP100	۹/۶۵	۱۴/۹۲	۱۴/۹۲-۱۱/۹۲	۱۳/۴۲



شکل ۱۰. ترکیب نتایج آزمون‌های سایش در شرایط مرطوب و چرخ بارگذاری شده -چسبندگی ماسه

داشته است. این بدان معنا است مشخص شدن مقدار مناسب از قیر جهت کاهش میزان جابه‌جایی‌ها امری لازم است. از منظر میزان فیلر، نمونه‌های حاوی پودر سرباره مس در تمامی مخلوط‌ها، عملکرد بهتری از نمونه شاهد در همه جابه‌جایی‌های افقی و عمودی داشته‌اند. به طوری که با افزایش میزان پودر مس، جابه‌جایی عمودی و جانبی کاهش یافته است. به طوری در درصد قیر باقی مانده ۶ تا ۸ درصد، مخلوط‌های حاوی ۰ و ۲۵ درصد فیلر جایگزین تفاوت محسوسی در عمق شیار باهم نداشته‌اند ولی با افزایش پودر سرباره مس تا ۵۰ درصد جابه‌جایی عمودی و جانبی کاسته شده است که تا ۱۰۰ درصد این روند بهبود پیدا کرده است. کمترین میزان جابه‌جایی مربوط به نمونه‌های CSP100 و CSP75 در درصد بالای قیر یعنی ۸ درصد است. اگرچه فاصله مقادیر تغییر شکل این مخلوط‌ها (CSP100 و CSP75) قابل توجه نیست.

### ۳-۶ تعیین میزان تغییر شکل عمودی و جانبی مخلوط

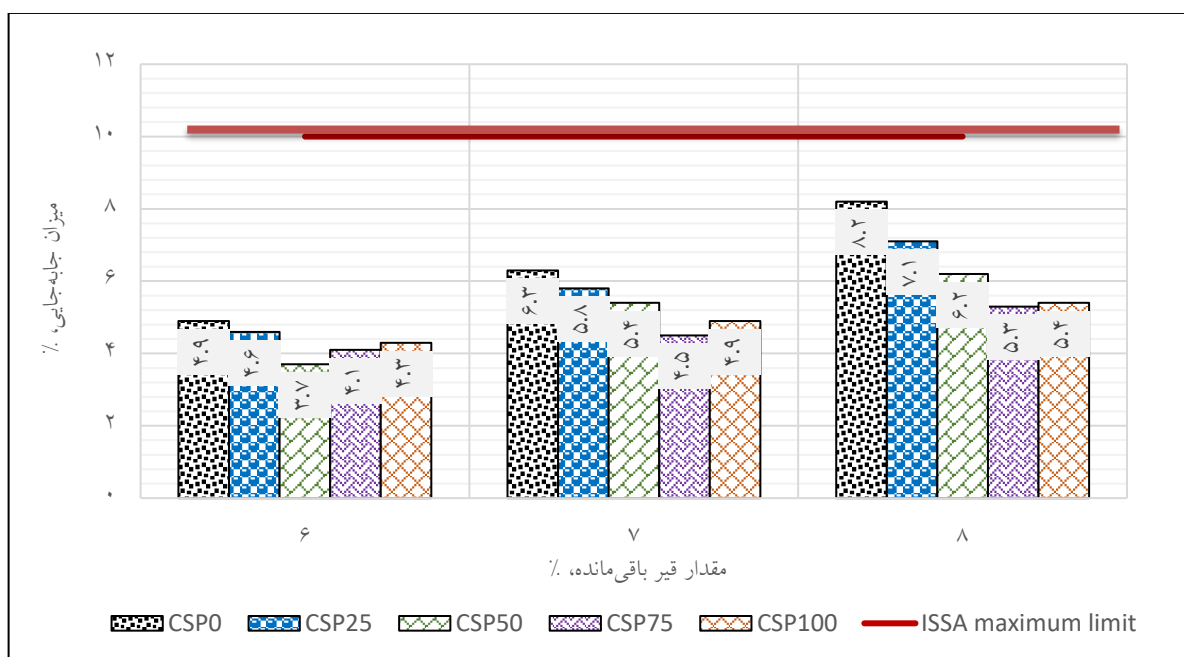
#### با آزمایش چرخ بارگذاری شده

نتایج آزمایش LWT برای مخلوط‌های میکروسرفیسینگ از دو منظر مقدار قیر امولسیون و مقدار پودر سرباره مس قابل بررسی است در مخلوط‌ها قابل بررسی است که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ ارائه شده است. مطابق نتایج حاصل شده، مقدار قیر باقیمانده و پودر سرباره مس بر عملکرد جابه‌جایی مخلوط‌ها مؤثر است. از منظر قیر باقی مانده، افزایش قیر باقیمانده از ۶ به ۸ درصد، باعث افزایش جابه‌جایی عمودی و افقی مخلوط‌ها می‌شود. مطابق این نتایج، نرخ جابه‌جایی افقی و عمودی مخلوط‌های CSP0، CSP25 و CSP50 با افزایش قیر از ۶ به ۸ درصد به صورت صعودی رشد داشته است. این در حالی است که در نمونه‌های CSP75 و CSP100 با افزایش قیر از ۶ به ۸ درصد، نرخ افزایش جابه‌جایی‌ها، رشد کمتری را نسبت به دیگر نمونه‌ها

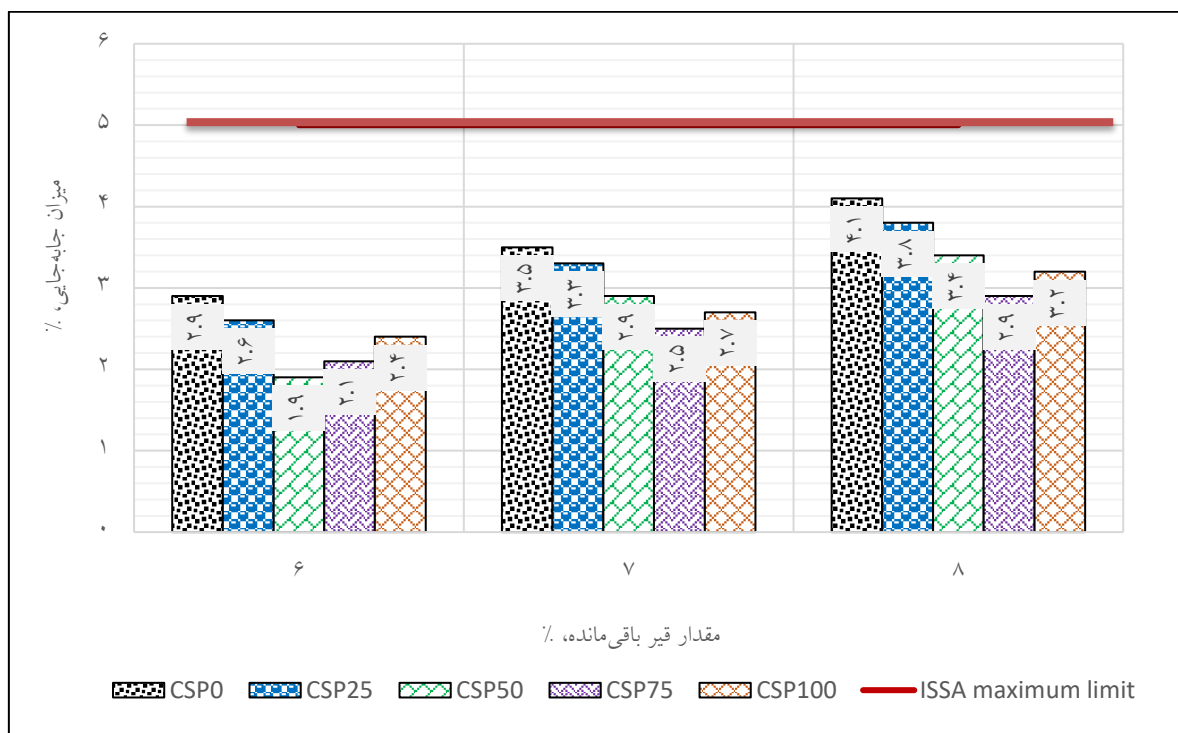
## مطالعه عملکرد مخلوط میکروسرفیسینگ حاوی پودر سرباره مس جایگزین فیلر طبیعی: ارزیابی آزمایشگاهی

قیرهای آزاد را در مخلوط به دلیل پر شدن حفرات با قیر به قیر سازه‌ای تبدیل کرده و باعث ساخت مخلوطی با ساختاری مستحکم‌تر و درنهایت مقاوم‌تر در برابر خرابی‌های شیارشدگی شوند (Mogawer & Stuart, 1996; H. Wang et al., 2011). شکل ظاهری فیلرها نیز بر روی عمق شیارشدگی و تغییر شکل‌های دائمی نیز تأثیر می‌گذارند (Melotti, Santagata, Bassani, Salvo, & Rizzo, 2013). پودر سرباره مس به دلیل ساختار نامنظم و تیز گوشه بودن و زاویه اصطکاک داخلی بالا و قفل و بست بهتر سنگدانه‌ها باهم که از دلایل اصلی مقاومت در برابر شیارشدگی در مخلوط‌های آسفالتی با ضخامت کم است، باعث افزایش مقاومت برشی مخلوط و کاهش عمق شیار می‌شوند (Rondón-Quintana, Ruge-Cárdenas, & Farias, 2019). به طور خلاصه در مخلوط‌هایی که مستعد خرابی شیارشدگی هستند، می‌توان پس از تأمین قیر کافی، احتمال وقوع خرابی شیارشدگی را با افزودن پودر سرباره مس بازیافتی به مقدار ۱۰۰ درصد، به میزان مؤثری کاهش داد که این موضوع به دلیل شکل‌گیری ماستیک قوی‌تر و قفل و بست بهتر مصالح سنگی است.

به‌عنوان نمونه در قیر باقیمانده ۸ درصد، مخلوط‌های CSP25، CSP50، CSP75 و CSP100 نسبت به نمونه شاهد CSP0، موجب بهبود عملکرد جابه‌جایی عمودی به ترتیب به میزان ۲۴، ۳۵ و ۳۰ درصد و بهبود عملکرد جابه‌جایی افقی به ترتیب به میزان ۷، ۱۷، ۲۹ و ۲۲ درصد شده‌اند. نکته‌ای که حائز اهمیت است در قیر باقیمانده ۶ درصد، مخلوط CSP50 بهترین عملکرد را در جابه‌جایی دارد ولی با افزایش قیر به ۸ و ۹ درصد، به ترتیب مخلوط‌های CSP75 و CSP100 با نتایج نزدیک به هم عملکرد بهتری نسبت به سایر مخلوط‌ها داشته است. بنابراین در صورت افزایش قیر باقیمانده، پودر سرباره مس باید برای رشد مقاومت در برابر ترافیک و کاهش جابه‌جایی افزایش یابد. پس می‌توان نتیجه گرفت که کاهش مقدار قیر باقیمانده و افزایش مقدار پودر سرباره مس تا مقدار بهینه برای کاهش میزان جابه‌جایی‌ها امری لازم و ضروری است. درنهایت این نتایج گواه آن است که افزایش فیلر پودر سرباره مس، سبب بهبود عملکرد آسفالت حفاظتی در برابر بارگذاری ترافیکی می‌شود. در حالت کلی با افزایش درصد قیر در مخلوط‌ها، قیر اضافی در فضای بین‌دانه‌ای به‌عنوان روان کننده عمل کرده و در نتیجه عمق شیار افزایش می‌یابد. درحالی‌که فیلرها با تخلخل بالاتر می‌توانند



شکل ۱۱. مقدار تغییر شکل عمودی نمونه‌های میکروسرفیسینگ



شکل ۱۲. مقدار تغییر شکل افقی نمونه‌های میکروسرفیسینگ

#### ۴. نتیجه‌گیری

نمودند. به‌طور خلاصه با افزایش میزان پودر سرباره مس و مقدار قیر، مقدار چسبندگی مخلوط‌ها افزایش یافته است. در آزمایش سایش در شرایط مرطوب مشخص گردید در همه نمونه‌ها افزایش درصد پودر سرباره مس و مقدار قیر باقی مانده سبب ارتقاء عملکرد در مقابل خرابی رطوبتی می‌شود. نتایج آزمایش سایش در شرایط مرطوب حاکی از آن است که مخلوط CSP100 عملکرد سایشی بهتری در مقایسه با سایر مخلوط‌ها در درصدهای مختلف قیر باقیمانده داشته است. از طرفی افزایش درصد قیر در نمونه‌های حاوی درصد بالای پودر سرباره مس، تأثیر کمی در کاهش میزان سایش و افزایش مقاومت مخلوط در برابر حساسیت رطوبتی داشته است. بنابراین توصیه می‌شود برای افزایش مقاومت در برابر سایش و عریان شدگی، پودر سرباره مس با درصد بالایی جایگزین فیلر مخلوط‌های میکروسرفیسینگ شود.

در این پژوهش به بررسی به‌کارگیری پودر سرباره مس در طرح اختلاط میکروسرفیسینگ جهت سنجش عملکرد آن پرداخته شد. در این راستا، ابتدا مشخصات فیزیکی و شیمیایی سرباره فولاد و مصالح طبیعی با آزمایش‌های XRF و FESEM-EDS مورد بررسی قرار گرفته و سپس به منظور ارزیابی عملکرد مخلوط‌ها، از ۵ ترکیب مختلف حاوی صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد سرباره جایگزین فیلر مصالح سنگی بر اساس وزن کل سنگدانه استفاده گردید. ارزیابی نمونه‌ها به‌واسطه آزمایش‌های چسبندگی مرطوب، چرخ بارگذاری شده و سایش در شرایط مرطوب مطابق با دستورالعمل ASTM D6372 انجام شد. نتایج آزمایش‌های انجام شده به‌طور خلاصه در ادامه ارائه شده است. نتایج آزمایش‌های انجام شده در این مطالعه به‌طور خلاصه در ادامه ارائه شده است:

- در آزمایش تعیین حداکثر قیر به‌وسیله چرخ بارگذاری - چسبندگی ماسه معلوم گردید که پتانسیل قیر زدگی مخلوط‌ها با افزایش درصد قیر امولسیون در مخلوط‌های آسفالتی افزایش

- در آزمایش چسبندگی مرطوب تمامی نمونه‌ها، در زمان‌های ۳۰ و ۶۰ دقیقه، مقاومت لازم جهت عبور بار ترافیک را کسب

– Apaza, F. R. A., Guimarães, A. C. R., Vivoni, A. M., & Schroder, R. (2021). Evaluation of the performance of iron ore waste as potential recycled aggregate for micro-surfacing type cold asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 266, 121020.

– Bhargava, N., Siddagangaiah, A. K., & Rynthiang, T. L. (2020). Reliability of Microsurfacing Mix Subjected to Variation in Aggregate Gradation. *Transportation research record*, 2674(11), 720-730.

– Chen, M., Lin, J., & Wu, S. (2011). Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 25(10), 3909-3914.

– Choudhary, J., Kumar, B., & Gupta, A. (2020). Utilization of solid waste materials as alternative fillers in asphalt mixes: A review. *Construction and Building Materials*, 234, 117271.

– de Matos, P. R., Oliveira, J. C., Medina, T. M., Magalhaes, D. C., Gleize, P. J., Schankoski, R. A., & Pilar, R. (2020). Use of air-cooled blast furnace slag as supplementary cementitious material for self-compacting concrete production. *Construction and Building Materials*, 262, 120102.

– Esfahani, M. A., & Khatayi, A. (2020). Effect of type and quantity of emulsifier in bitumen polymer emulsion on microsurfacing performance. *International Journal of Pavement Engineering*, 1-15.

– Feng, Y., Kero, J., Yang, Q., Chen, Q., Engström, F., Samuelsson, C., & Qi, C. (2019). Mechanical activation of granulated copper slag and its influence on hydration heat and compressive strength of blended cement. *Materials*, 12(5), 772.

خواهد یافت. همچنین با افزایش درصد فیلر مس از ۰ تا ۱۰۰ درصد پتانسیل قیر زدگی مخلوطها کاهش یافت. از این جهت بهترین عملکرد را مخلوطهای با مقدار پودر سرباره مس جایگزین فیلر ۷۵ و ۱۰۰ درصد داشته‌اند. در تعیین میزان تغییر شکل عمودی و جانبی مخلوط با آزمایش چرخ بارگذاری شده، افزایش فیلر پودر مس، سبب بهبود عملکرد آسفالت حفاظتی در برابر بارگذاری ترافیکی می‌شود. به طوری که کمترین میزان جابه‌جایی مربوط به نمونه‌های CSP75 و CSP100 با نتایج نزدیک به هم بوده است. افزایش درصد قیر در مخلوطهای حاوی درصد بالای پودر سرباره مس، در افزایش میزان جابه‌جایی نسبت به مخلوط شاهد تأثیری کمتری داشته است. لذا برای کاهش مقدار جابه‌جایی‌ها، مشخص نمودن میزان قیر مناسب امری لازم است

• در تعیین درصد بهینه قیر امولسیون، با افزایش پودر مس در مخلوطها درصد بهینه قیر امولسیون نسبت به نمونه شاهد کاهش می‌یابد. به طوری که مقدار بهینه قیر امولسیون با افزایش پودر سرباره مس از ۰ تا ۱۰۰ درصد، به مقدار ۲/۰۲ درصد نسبت به مخلوط CSPO (مخلوط شاهد) کمتر شده است.

## ۵. مراجع

– A143, I. (2010). Recommended Performance Guidelines for Micro Surfacing. International Slurry Surfacing Association, Annapolis, MD (Revised).

– akhavan bahabadi, m., Khabiri, M. M., & Zalnezhad, M. (2022). Microsurfacing Treatment Modified with Bitumen Emulsion Containing Polyphosphoric Acid in Combination with Steel Slag Filler as an Alternative to Natural Material Filler: Experimental Assessment and Mixture Design. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 8(3), 1-23. doi:10.22075/jtie.2022.27795.1608

- filler. *Construction and Building Materials*, 269, 121336.
- Keymanesh, M. R., Ziari, H., Zalnezhad, H., & Zalnezhad, M. (2021). Mix design and performance evaluation of microsurfacing containing electric arc furnace (EAF) steel slag filler. *Construction and Building Materials*, 269, 121336. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121336>
- Liao, M.-C. (2007). Small and large strain rheological and fatigue characterisation of bitumen-filler mastics. University of Nottingham.
- Melotti, R., Santagata, E., Bassani, M., Salvo, M., & Rizzo, S. (2013). A preliminary investigation into the physical and chemical properties of biomass ashes used as aggregate fillers for bituminous mixtures. *Waste management*, 33(9), 1906-1917.
- Modarres, A., & Alinia Bengar, P. (2019). Investigating the indirect tensile stiffness, toughness and fatigue life of hot mix asphalt containing copper slag powder. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(8), 977-985. doi:10.1080/10298436.2017.1373390
- Mogawer, W. S., & Stuart, K. D. (1996). Effects of mineral fillers on properties of stone matrix asphalt mixtures. *Transportation research record*, 1530(1), 86-94.
- Muñoz-Cáceres, O., Raposeiras, A. C., Movilla-Quesada, D., Castro-Fresno, D., Lagos-Varas, M., Andrés-Valeri, V. C., & Valdés-Vidal, G. (2021). Mechanical performance of sustainable asphalt mixtures manufactured with copper slag and high percentages of reclaimed asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 304, 124653.
- Gransberg, D. D. (2010). NCHRP synthesis 411: Microsurfacing. Transportation Research Board: National Cooperative Highway Research Program Synthesis Program.
- ISSA. (2017a). Test Method for Measurement of Excess Asphalt in Bituminous Mixtures by Use of a Loaded Wheel Tester and Sand Adhesion. In *Technical Bulletin: International slurry surfacing association*.
- ISSA. (2017b). Test method for measurement of stability and resistance to compaction, vertical and lateral displacement of multilayered fine aggregate cold mixes. In *Technical Bulletin: International Slurry Surfacing Association*.
- ISSA. (2017c). Test Method for Wet Track Abrasion of Slurry Surfacing Systems. In *Technical Bulletin: International Slurry Surfacing Association*.
- ISSA. (2017d). Test method to classify emulsified asphalt/aggregate mixture systems by modified cohesion tester measurement of set and cure characteristics. In *Technical Bulletin: International Slurry Surfacing Association*.
- ISSA. (2017e). Trial mix procedure for slurry seal design. In *Technical Bulletin: International Slurry Surfacing Association*.
- Izadi, A., shaygan, s., & Zalnezhad, M. (2022). Investigation of the Effect of Blast-Furnace Slag Powder on Slurry Seal Surface Treatment Performance. *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, -. doi:10.22119/jte.2021.298212.2550
- Keymanesh, M. R., Ziari, H., Zalnezhad, H., & Zalnezhad, M. (2020). Mix design and performance evaluation of microsurfacing containing electric arc furnace (EAF) steel slag

Hot-Mix Asphalt When Used as Limestone Filler Replacements. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(1), 04021395. doi:doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004033

– Taylor, R. E. (2007). Surface interactions between bitumen and mineral fillers and their effects on the rheology of bitumen-filler mastics. University of Nottingham Nottingham.

– Wang, A., Shen, S., Li, X., & Song, B. (2019). Micro-surfacing mixtures with reclaimed asphalt pavement: Mix design and performance evaluation. *Construction and Building Materials*, 201, 303-313.

– Wang, H., Al-Qadi, I. L., Faheem, A. F., Bahia, H. U., Yang, S.-H., & Reinke, G. H. (2011). Effect of mineral filler characteristics on asphalt mastic and mixture rutting potential. *Transportation research record*, 2208(1), 33-39.

– Zalnezhad, A., Hosseini, S. A., Shirinabadi, R., & Korandeh, M. E. (2022). Feasibility of using copper slag as natural aggregate replacement in microsurfacing for quality enhancement: Microscopic and mechanical analysis. *Construction and Building Materials*, 354, 129175. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129175>

– Zalnezhad, M., & Hesami, E. (2020). Effect of steel slag aggregate and bitumen emulsion types on the performance of microsurfacing mixture. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 7(2), 215-226. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.12.005>

– Zhu, J., Li, Q., Li, X., Zhou, Y., Liu, F., & Song, J. (2022). Effect of coupled mechanical-chemical activation on hydration activity of copper slag powder. *Applied Sciences*, 12(12), 6018.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124653>

– Raposeiras, A., Vargas-Cerón, A., Movilla-Quesada, D., & Castro-Fresno, D. (2016). Effect of copper slag addition on mechanical behavior of asphalt mixes containing reclaimed asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 119, 268-276.

– Raposeiras, A. C., Movilla-Quesada, D., Muñoz-Cáceres, O., Andrés-Valeri, V. C., & Lagos-Varas, M. (2021). Production of asphalt mixes with copper industry wastes: Use of copper slag as raw material replacement. *Journal of Environmental Management*, 293, 112867. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112867>

– Robinson Jr, G. R., Menzie, W. D., & Hyun, H. (2004). Recycling of construction debris as aggregate in the Mid-Atlantic Region, USA. *Resources, Conservation and Recycling*, 42(3), 275-294.

– Rondón-Quintana, H. A., Ruge-Cárdenas, J. C., & Farias, M. M. d. (2019). Behavior of hot-mix asphalt containing blast furnace slag as aggregate: Evaluation by mass and volume substitution. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(2), 04018364.

– Shaygan, S., Izadi, A., & Zalnezhad, M. (2022). Performance and environmental assessment of microsurfacing mixture using the granulated Blast-Furnace Slag Powder (GBSP) as potential recycled filler. *Construction and Building Materials*, 359, 129502. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129502>

– Sherre, T. K., & Liao, M.-C. (2022). Characteristics of Recycled Mineral Fillers and Their Effects on the Mechanical Properties of

- Ziari, H., Mahdizadeh, M. J., & Zalnezhad, M. (2021). Experimental Performance Evaluation of Microsurfacing Surface Treatment Containing Polypropylene Fibers. *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, -. doi:10.22119/jte.2021.298308.2551
- Ziari, H., Moniri, A., Imaninasab, R., & Nakhaei, M. (2019). Effect of copper slag on performance of warm mix asphalt. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(7), 775-781. doi:10.1080/10298436.2017.1339884
- Ziari, H., Zalnezhad, M., Ali Ziari, M., & Nasiri Amiri, E. (2022). Substitution of the natural aggregate filler by coal waste powder (CWP) in microsurfacing surface treatment: Mix design and performance evaluation. *Construction and Building Materials*, 354, 129132. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129132>
- Ziari, H., Zalnezhad, M., Nasiri Amiri, E., & Ziari, M. A. (2023). Functional analysis of the use of coal waste as a substitute of natural filler in slurry seal surface treatment. *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, -. doi:10.22119/jte.2023.365546.2625
- Zulkati, A., Diew, W. Y., & Delai, D. S. (2012). Effects of fillers on properties of asphalt-concrete mixture. *Journal of transportation engineering*, 138(7), 902-910.
- Zulu, K., & Mukendi, K. K. (2018). An in-depth evaluation of micro-surfacing treatment. *Civil Engineering Journal*, 4(9), 2242-2251.

## مطالعه عملکرد مخلوط میکروسرفیسینگ حاوی پودر سرپاره مس جایگزین فیلر طبیعی: ارزیابی آزمایشگاهی

مریم زروق درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران - عمران را در سال ۱۳۹۵ از دانشگاه غیرانتفاعی صنعتی مازندران بابل اخذ نموده است و در حال حاضر دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی راه و ترابری در دانشگاه غیرانتفاعی شمال آمل است. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان ارزیابی عملکردی انواع مخلوط‌های آسفالتی سرد با افزودنی‌ها و پسماندهای مختلف است.



امیر ایزدی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران - عمران از دانشگاه صنعتی اصفهان اخذ نموده است و دوره کارشناسی ارشد و دکتری را در دانشگاه علم و صنعت ایران در رشته عمران گرایش راه و ترابری به پایان رسانده است. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان تحلیل رفتاری و بهبود خصوصیات عملکردی مخلوط‌های آسفالتی گرم، سرد و آسفالت‌های حفاظتی است. در حال حاضر عضو هیأت علمی دانشگاه شمال می‌باشد.



مهدی زال‌نژاد، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران و کارشناسی ارشد-گرایش راه و ترابری را از دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل اخذ نموده است. در حال حاضر دانشجوی دکتری عمران گرایش راه و ترابری در دانشگاه علم و صنعت می‌باشد. به طور خاص، زمینه‌های اصلی تحقیقاتی ایشان رئولوژی چسباننده‌های قیری و امولسیون، تحلیل رفتاری آسفالت‌های سرد و حفاظتی (میکروسرفیسینگ، اسلاری سیل و غیره)، تعمیر و نگهداری پیشگیرانه روسازی راه و استفاده انواع مواد در ساختار مخلوط‌های آسفالتی است. در حال حاضر، او به عنوان مدیر فنی در شرکت عمارت گستر پیشگامان نوین و به عنوان دستیار آموزشی و تحقیقاتی در دانشگاه علم و صنعت ایران فعالیت دارد.

