

## مخلوط میکروسرفیسینگ اصلاح شده با قیر امولسیون حاوی پلی فسفریک اسید در ترکیب با فیلر سرباره فولاد جایگزین فیلر مصالح طبیعی: ارزیابی آزمایشگاهی و طرح اختلاط

محمد جواد اخوان بهابادی، دانشجوی دکتری گرایش راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد

محمد مهدی خبیری\*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد

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

Email: mkhabiri@yazd.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۲ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۰۴

### چکیده

یکی از اقدامات مؤثر در نگهداری پیشگیرانه راه‌ها، استفاده از آسفالت حفاظتی میکروسرفیسینگ است. پژوهش حاضر با هدف بررسی اصلاح قیر امولسیون با پلی فسفریک اسید و امکان‌سنجی استفاده از پودر سرباره فولاد به جای فیلر معمولی مصالح سنگی در طراحی مخلوط میکروسرفیسینگ برای بهبود عملکرد نهایی آن انجام شد. برای این منظور، ابتدا از پلی فسفریک اسید در مقادیر ۰/۴، ۰/۸، ۱/۲ و ۱/۶ درصد بر اساس وزن قیر باقی مانده جهت اصلاح قیر امولسیون استفاده گردید. ارزیابی قیرهای امولسیون اصلاح شده با استفاده از شاخص‌های فیزیکی و بسکوزیته سیبولت فیورل، نقطه نرمی، درجه نفوذ و حساسیت حرارتی انجام شد. سپس، از قیر امولسیون اصلاح شده با درصد بهینه به منظور کاربرد در مخلوط‌های میکروسرفیسینگ استفاده گردید. مخلوط‌های میکروسرفیسینگ با پنج ترکیب مختلف حاوی فیلر سرباره فولادی در سطوح صفر، 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. ارزیابی مخلوط‌های آسفالتی به واسطه آزمایش‌های چسبندگی مرطوب، سایش در شرایط مرطوب، بارگذاری چرخ-جابه‌جایی و بارگذاری چرخ-چسبندگی ماسه انجام شد. نتایج آزمایش‌های قیری نشان داد که استفاده از پلی فسفریک اسید منجر به بهبود خواص قیر شامل کاهش درجه نفوذ، افزایش نقطه نرمی و کاهش حساسیت حرارتی می‌شود. با افزایش درصد پلی فسفریک اسید تا ۰/۸ درصد قیر باقی مانده، تغییرات درجه نفوذ و نقطه نرمی قابل توجه است و باعث بهبود عملکرد قیر امولسیون می‌گردد. نتایج آزمایش‌های آسفالتی روی نمونه‌ها نشان داد که مخلوط حاوی ۷/۵ و ۱۰ درصد فیلر سرباره فولاد بهترین عملکرد را در میان مخلوط‌ها ایجاد می‌کند. به طوری که عملکرد میکروسرفیسینگ را از نظر چسبندگی، مقاومت در برابر سایش، قیرزدگی 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.

واژه‌های کلیدی: اصلاح قیر امولسیون، سرباره فولاد، پلی فسفریک اسید، میکروسرفیسینگ، نگهداری پیشگیرانه.

## ۱. مقدمه

و همکاران، ۲۰۲۰). سرباره‌ها دارای دانه‌هایی با گوشه‌های تیز و سطحی زیر و سفت بوده و به دلیل حضور اکسیدهای فلزی، چگالی و وزن مخصوص آن بیشتر از مصالح سنگی معمولی بوده و نسبت به آن‌ها دارای خواص مکانیکی بسیار مناسب از جمله مقاومت لغزشی، سختی و سایش زیاد است. از طرفی، به دلیل خاصیت سرباره‌ها، مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره، در مقابل عریان‌شدگی مقاوم هستند (وانگ، ۲۰۱۶). سرباره‌های فولادی معمولاً به دو صورت قوس الکتریکی (EAF) و کوره اکسیژن-بازی (BOF) تولید می‌گردند. در روش قوس الکتریکی، از جریان با ولتاژ زیاد جهت ذوب کردن آهن استفاده می‌گردد. ولی در روش کوره اکسیژن بازی، از دمیدن اکسیژن به درون دریاچه‌های فولادسازی در جریان تولید استفاده می‌شود. تفاله‌های کوره‌های ذوب روی فلز مذاب قرار می‌گیرد و با ترکیب با آهن از فولاد ذوب شده جدا می‌گردد، این سرباره‌ها به درون یک محوطه باز ریخته شده تا به حالت جامد تبدیل شوند (هانت و بویل، ۲۰۰۰). در این پژوهش، از سرباره کارخانه فولاد آلیاژی یزد که به صورت قوس الکتریکی تولید می‌شود استفاده گردید. همچنین، علاوه بر مسائل محیط‌زیستی، دلایل اقتصادی و مشخصات عملکردی بالای سرباره فولاد، از دلایل استقبال به استفاده از آن و تبدیل تهدیدهای محیط‌زیستی به فرصت مناسب است (حسن‌زاده خباز، ۲۰۲۰).

شبکه راه‌های کشور به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های توسعه اقتصادی فرهنگی و اجتماعی در دنیا به‌حساب می‌آید، لذا، نگهداری و بهینه‌سازی راه‌های کشور در توسعه ملی و اقتصادی از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. تمامی روسازی‌ها پس از مدتی دچار خرابی‌هایی می‌گردند که این خرابی‌ها با توجه به مشخصات مصالح به کار رفته، حجم ترافیک، شرایط جوی و توپوگرافی منطقه شدت متفاوتی دارند و تعمیر و نگهداری آن‌ها به‌عنوان متداول‌ترین روش بهسازی و

بخش مهمی از تخریب محیط‌زیست، ناشی از پیشرفت فناوری و افزایش تولید در صنعت است که نتیجه آن تولید مقدار قابل توجهی زباله و موارد ضایعاتی است که باعث نگرانی‌های زیادی در این حوزه گردیده و محیط‌زیست را تبدیل به یکی از مهم‌ترین موضوعات عصر حاضر گردانیده است (گالان آربولداس و همکاران، ۲۰۱۷). بنابراین، امروزه اکثر صنایع تهدید جدی برای محیط‌زیست به‌وجود آورده و همچنین، پسماندهای جامد صنعتی تولید شده آن‌ها حجم زیادی از زمین را اشغال می‌نمایند (ڈلیمی و همکاران، ۲۰۲۰). به‌منظور کاهش اثرات زیست‌محیطی ساخت و نگهداری راه‌ها و کاهش هزینه‌ها، تحقیقات بسیاری در زمینه بازیافت و استفاده از ضایعات صنعتی به‌عنوان بخشی از مواد مخلوط آسفالتی صورت گرفته است. استفاده بیش از حد از منابع طبیعی و استخراج سنگدانه‌ها می‌تواند باعث بروز مشکلاتی از جمله تولید گردوغبار، از بین رفتن چشم‌انداز طبیعی و تخریب و تخلیه منابع طبیعی گردد. همچنین، در بسیاری از مناطق، عدم دسترسی کافی به مصالح باکیفیت و هزینه‌بر بودن استخراج آنها موجب افزایش هزینه‌های پروژه‌های بزرگراهی گردیده است (راتالا و همکاران، ۲۰۲۱).

سرباره فولاد یکی از محصولات جانبی فرآیند تولید فولاد بوده که استفاده از آن به‌عنوان جایگزین مصالح سنگی، سابقه طولانی دارد (عاصی و همکاران، ۲۰۰۷). این سرباره، در کارخانه‌های فولادی معمولاً در هوای آزاد سرد شده و به شکل سنگی جامد که ظاهری شبیه سنگ‌های آذرین دارد تبدیل می‌گردد (زال‌نژاد و حسامی، ۲۰۲۰). از آنجا که این سرباره‌ها در طبیعت رها گردیده و بدون استفاده می‌مانند و باعث آسیب به محیط‌زیست می‌گردند، استفاده از آنها به‌عنوان بخشی از سنگدانه در صنعت راه‌سازی منجر به کاهش هزینه تولید و مدیریت این پسماند می‌گردد (چن و همکاران، ۲۰۲۰؛ چودھاری

متفاوت را به روش مارشال تهیه و آزمایش‌های مقاومت مارشال، مدول ارتجاعی و کشش غیرمستقیم را روی آن‌ها انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از سرباره فولاد به‌عنوان سنگدانه در مخلوط آسفالتی گرم، خواص مکانیکی مخلوط آسفالتی را بهبود می‌بخشد. در تحقیقی دیگر، هوجونگ و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی عددی و آزمایشگاهی مخلوط آسفالت گرم تهیه شده با سرباره فولاد پرداختند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از سرباره فولاد به‌عنوان جایگزین سنگدانه در آسفالت گرم باعث بهبود عملکرد آسفالت گردیده و به‌خصوص در آسفالت‌های لایه نازک نتایج بهتری را نشان می‌دهد. آن‌ها همچنین به این نتیجه رسیدند که آسفالت گرم تهیه شده با سرباره فولاد نسبت به روکش آسفالت گرم، رقابتی‌تر و اقتصادی‌تر است. اثر سرباره فولادی به‌صورت فیلر بر خواص رئولوژی آسفالت ماستیک توسط لی و همکاران (۲۰۱۷) مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها با انجام آزمایش BBR در دمای کم و آزمایش DSR در دمای زیاد به این نتیجه رسیدند که سرباره، پتانسیل بالقوه‌ای برای جایگزینی به‌جای فیلر سنگ آهکی دارد و فیلر به دست آمده از سرباره فولاد با اندازه کوچک‌تر بهترین خواص رئولوژی در دمای زیاد را دارد و سرباره فولاد با اندازه متوسط بهترین خواص رئولوژی در دمای کم را دارا می‌باشد. همچنین، آسفالت‌های ماستیک ساخته شده با فیلر سرباره فولادی در دمای زیاد، مقاومت بیشتری در مقابل تغییر شکل از خود نشان دادند (لی و همکاران، ۲۰۱۷). در پژوهشی، اسکاف و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی خواص اصلی سرباره فولاد و ویژگی‌های مهم مخلوط‌های ساخته شده با این سرباره مانند رفتار مکانیکی، مقاومت در برابر خستگی و تغییر شکل دائمی، حساسیت به رطوبت، مقاومت در برابر لغزش، نفوذپذیری و جذب صدا پرداختند و به این نتیجه دست یافتند که استفاده از سرباره فولاد به‌عنوان جایگزین مواد سنگدانه در انواع مخلوط‌های قیری باعث بهبود عملکرد

حفظ عملکرد درازمدت روسازی آسفالتی ضروری است (اخوان بهابادی و همکاران، ۲۰۱۶؛ زال نژاد و حسامی، ۲۰۲۰). یکی از بهترین روش‌های حفظ عملکرد راه‌ها، استفاده از روش‌های نگهداری پیشگیرانه برای جلوگیری از خرابی‌های جزئی و به تأخیر انداختن خرابی‌های شدیدتر قبل از بحرانی شدن خرابی‌ها است. یکی از متداول‌ترین روش‌های نگهداری پیشگیرانه استفاده از آسفالت‌های حفاظتی بوده که در بین آن‌ها میکروسرفیسینگ به دلیل مزایایی از جمله عمر زیاد، کیفیت خوب و مصرف در بزرگراه‌ها و راه‌های اصلی با ترافیک سنگین و عملکرد عالی در اصلاح عمده خرابی‌های روسازی از پرکاربردترین آسفالت‌های حفاظتی است (وانگ و همکاران، ۲۰۱۹). میکروسرفیسینگ ترکیبی از مصالح سنگی باکیفیت خوب، قیر امولسیون، فیلرهای معدنی، آب و مواد افزودنی شیمیایی است که به‌عنوان یکی از انواع مخلوط‌های سرد اغلب در اصلاح شیارشدگی، بهبود اصطکاک سطح و افزایش عمر روسازی استفاده می‌گردد. کیفیت مصالح سنگی با توجه به اینکه حدود ۸۲ تا ۹۰ درصد وزن مخلوط را تشکیل می‌دهد تأثیر زیادی در عملکرد میکروسرفیسینگ دارد (کویی و همکاران، ۲۰۲۰). استفاده از فیلر سرباره به‌جای فیلرهای سنگدانه‌های طبیعی در طرح اختلاط، موجب کم شدن آلودگی محیط‌زیست و بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی می‌گردد (چودھاری و همکاران، ۲۰۲۰). تحقیقات بسیاری در زمینه استفاده از سرباره فولاد به‌عنوان بخشی از مصالح سنگی ریزدانه و درشت‌دانه و بهبود خصوصیات عملکردی مخلوط‌های آسفالتی و تأثیر آن بر کاهش نشست‌های موضعی و شیارشدگی و رشد ترک وجود دارد (شن و همکاران، ۲۰۰۹). تیشیرا و همکاران (۲۰۱۹) اثر انبساط سرباره فولاد را بر عملکرد مخلوط آسفالت گرم مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها سه نمونه مخلوط آسفالتی حاوی سرباره فولاد با درجه انبساط

سال‌های اخیر، اصلاح قیر توسط اسیدها، به دلیل توجیه اقتصادی و عدم وجود معایب قیرهای دمیده، مجدداً مورد توجه قرار گرفته است. به طور خاص، استفاده از پلی-فسفریک اسید (PPA) بسیار اهمیت یافته چون اجازه می‌دهد که سختی قیر را به طور کنترل شده افزایش داد (لسور، ۲۰۰۹). همچنین، این افزودنی در مقایسه با سایر افزودنی‌های مورد مصرف در صنعت راهسازی افزودنی جدیدی به شمار می‌رود که عمدتاً به منظور افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی و بهبود رفتار قیر در دمای زیاد به کار می‌رود (حاجی کریمی و همکاران، ۱۳۹۸). همچنین، در تحقیقی که توسط لی و همکاران (۲۰۱۱) در بررسی تأثیر انواع افزودنی بر خواص قیر در دمای کم صورت گرفت، ملاحظه گردید که قیر اصلاح شده توسط پلی فسفریک اسید داری بهترین عملکرد از نظر شیارشدگی است. لذا، در این پژوهش، از این افزودنی جهت اصلاح قیر استفاده گردید. ادواردز و همکاران (۲۰۰۶) با استفاده آزمایش جاروب حرارتی دریافتند که سخت‌شدگی قیر حاوی پلی فسفریک اسید افزایش پیدا کرده و حساسیت حرارتی آن با توجه به شیب تغییرات مدول پیچیده ( $G^*$ )، کاهش پیدا می‌کند و افزودن پلی-فسفریک اسید به قیر، خواص رئولوژی قیر را به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌بخشد. کودرات و همکاران (۲۰۰۷) در پژوهشی، مقادیر مختلفی از پلی فسفریک اسید را به منظور اصلاح قیرهای مختلف به کار گرفتند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که پلی فسفریک اسید باعث افزایش رتبه قیر در سیستم درجه بندی PG شده و عملکرد دمای زیاد در تمامی نمونه‌ها بدون آنکه عملکرد دمای کم بیشتر آن‌ها تغییر زیادی داشته باشد بهبود پیدا کرد.

تحقیقات متعددی با موضوع اثربخشی سرباره فولاد به عنوان جایگزین بخشی از مصالح سنگی درشت‌دانه در مخلوط‌های آسفالتی گرم صورت گرفته است. اما

مکانیکی و دوام مخلوط‌ها و همچنین پایداری طولانی مدت آن‌ها می‌شود. عاصی و همکاران (۲۰۰۷) درصدهای متفاوتی از سرباره فولاد را به عنوان سنگدانه، جایگزین سنگدانه‌های آهکی در بتن آسفالتی کردند و با انجام آزمایش‌های تنش کششی غیرمستقیم، مدول ارتجاعی، مقاومت شیارشدگی، خستگی، خزش و مقاومت در برابر سایش، به ارزیابی نمونه‌های حاوی سرباره فولاد پرداختند. آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که استفاده از سرباره فولادی تا ۷۵٪ خواص مکانیکی مخلوط را افزایش می‌دهد و جایگزینی ۲۵٪ سنگدانه با سرباره فولاد بهترین نتیجه را می‌دهد. همچنین، بهنود و عامری (۲۰۱۲) استفاده از سرباره فولاد را به عنوان جایگزین بخشی از مصالح درشت‌دانه در آسفالت SMA مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که استفاده از سرباره فولادی باعث افزایش پایداری مارشال، مدول برجهنگی، مقاومت کششی، مقاومت در برابر آسیب‌های رطوبت و مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی SMA می‌شود. در مطالعه دیگری، زال‌نژاد و حسامی (۲۰۲۰) تأثیر استفاده از مصالح سرباره فولادی بر مشخصات چسبندگی و شیارشدگی آسفالت حفاظتی میکروسرفیسینگ را مورد بررسی قرار دادند و با ارزیابی آزمایشگاهی نشان دادند که سرباره فولاد به دلیل برخورداری از خواص مکانیکی و فیزیکی مطلوب باعث بهبود عملکرد میکروسرفیسینگ در شیارشدگی و چسبندگی با قیر شده است.

از طرفی، برای ارتقای عملکرد آسفالت حفاظتی، کاهش خرابی‌ها، انسجام و چسبندگی بهتر، مقاومت زودرس و بهبود زمان گیرش، استفاده از قیرهای امولسیون اصلاح شده توصیه گردیده است (هو و همکاران، ۲۰۱۹؛ جین و همکاران، ۲۰۱۹). همچنین، تغییر رفتار رئولوژیک و مکانیکی قیر خالص از مهمترین دلایل اصلاح قیر توسط افزودنی‌ها به شمار می‌رود. در

#### ۱ Polyphosphoric acid

امولسیفایر کاتیونی تندشکن با نام تجاری CECA ساخت کشور فرانسه استفاده گردید. در ادامه، جهت اصلاح قیر امولسیون از پلی فسفریک اسید تولید شرکت سیگما آلدریچ با چگالی  $1/9$  گرم بر سانتی متر مکعب در دمای  $25$  درجه سلسیوس، استفاده شده است. مشخصه ارائه شده توسط تولیدکننده محصول در جدول ۱ آمده است. بر اساس تحقیقات پیشین، ملاحظه گردید که واکنش این افزودنی به شدت وابسته به منبع نفت خامی است که قیر از آن به دست آمده است (چاوشی و همکاران، ۱۳۹۷). به طوری که افزایش تنها نیم درصد پلی فسفریک اسید به قیر ونزوئلا باعث بالا رفتن یک پله ای قیر مصرفی در دمای زیاد می گردد. این در حالی است که تأثیر این مقدار بر قیر عربستان سعودی ناچیز است (دآنجلو، ۲۰۰۹). از طرفی، مشاهده گردید که حداکثر درصدی که برای این افزودنی مورد استفاده قرار گرفته است  $1/5$  تا  $2$  درصد است که مقدار بهینه به دست آمده عمدتاً کمتر از  $1/5$  درصد بوده است (بامگاردنر، ۲۰۱۰). لذا، در این پژوهش، با در نظر گرفتن بازه کوچک تر به منظور دستیابی به نتایج دقیق تر، پلی فسفریک اسید در  $4$  درصد وزنی (بر اساس وزن قیر خالص)  $0/4$ ،  $0/8$ ،  $1/2$  و  $1/6$  درصد به قیر امولسیون اضافه گردید.

مطالعات محدودی در زمینه استفاده از سرباره فولاد به عنوان فیلر در آسفالت های حفاظتی، به خصوص میکروسرفیسینگ، انجام شده است. همچنین، عمده موارد استفاده از پلی فسفریک اسید نیز در آسفالت گرم بوده و تحقیقات بسیار کمی در زمینه اصلاح قیر امولسیون با استفاده این افزودنی صورت گرفته است. ضمن اینکه استفاده هم زمان از سرباره فولاد به عنوان بخشی از مصالح سنگی میکروسرفیسینگ و پلی فسفریک اسید به منظور اصلاح قیر آن، در پژوهش دیگری مشاهده نگردید. لذا، در این پژوهش، ابتدا خصوصیات فیزیکی باقی مانده قیر امولسیون اصلاح شده توسط پلی فسفریک اسید در درصدهای مختلف این افزودنی با انجام آزمایش های نقطه نرمی، درجه نفوذ و حساسیت حرارتی بررسی و مقایسه گردید و سپس نمونه های مختلفی از مخلوط میکروسرفیسینگ حاوی درصدهای مختلف فیلر سرباره فولاد به همراه قیر امولسیون اصلاح شده توسط پلی فسفریک اسید ساخته شد و پس از بررسی مشخصات مصالح سنگی و سرباره فولاد، به ارزیابی عملکرد مخلوط میکروسرفیسینگ پرداخته شد. سنجش نمونه های ساخته شده به وسیله آزمایش های زمان اختلاط، چسبندگی، چرخ بارگذاری شده و سایش در شرایط مرطوب مطابق با دستورالعمل  $ISSA A143$  و استاندارد  $ASTM D6372$  انجام شد.

## ۲. مواد و مصالح

### ۲-۱. قیر امولسیون کاتیونی، امولسیفایر و

#### پلی فسفریک اسید

در این تحقیق، برای تهیه قیر امولسیون کاتیونی، از قیر با رده نفوذ  $60 - 70$  تهیه شده از شرکت نفت پاسارگاد و

جدول ۱. مشخصات پلی فسفریک اسید به کار رفته در این پژوهش

نام محصول	پلی فسفریک اسید
نام اختصاری	PPA
فرمول شیمیایی	$H_{n+2}P_nO_{3n+1}$
نقطه جوش	۳۰۰°C
چگالی (در دمای ۲۵ °C)	۱/۹

## ۲-۲. مصالح سنگی، فیلر فعال معدنی (سیمان) و آب

در این پژوهش، مصالح سنگی کوهی در اندازه ۵-۰ میلی متر و پودر سرباره کوره قوس الکتریک (کارخانه فولاد آلیاژی یزد) مورد استفاده واقع شد. دانه بندی مورد استفاده، دانه بندی نوع II مطابق با دستورالعمل ISSA A143 بوده و محدوده آن مطابق جدول ۲ است. ویژگی سنگدانه های مخلوط پس از آزمایش در این پژوهش در جدول ۳ ارائه شده است. مصالح سنگی مطابق دستورالعمل ISSA A143 دارای ویژگی های مشخصی است. همان طور که مشخص است که ارزش ماسه ای، سلامت در برابر سولفات سدیم و سایش به وسیله لس آنجلس مصالح سنگی قابل قبول بوده، به همین جهت انتظار می رود، پایداری مشخصات آسفالت، به خصوص در هنگام یخبندان و حضور رطوبت، عملکرد مصالح در برابر تغییرات شرایط جوی و آب و هوایی و همچنین عملکرد مصالح در برابر سایش و ضربه مناسب باشد. همچنین، ترکیب شیمیایی سنگدانه و پودر سرباره کوره قوس الکتریک پس از انجام آزمایش XRF به شرح جدول ۴ است. همان طور که از نتایج جدول ۴ مشخص است، مصالح مورد استفاده در این پژوهش از نوع کلسیمی بوده (حاوی ۶۸ درصد CaO) و پودر سرباره نیز دارای مقدار قابل توجهی از اکسید آهن (به میزان ۳۲/۳۹ درصد) نسبت به مصالح معدنی است.

در این مطالعه، از یک آسیاب کلوئیدی با سرعت چرخشی ۲۸۴۰ دور در دقیقه برای تهیه قیر امولسیون اصلاح شده استفاده گردید. جهت اصلاح قیرهای امولسیون با پلی فسفریک اسید از فرمولاسیون ثابت و روش پیش اختلاط استفاده شد. به طوری که اصلاح کننده بر اساس وزن جامد قیر به محلول صابونی حاوی آب، اسید و امولسیفایر اضافه شده و به مدت ۶۰ ثانیه در دستگاه امولسیون ساز مخلوط شد. سپس، قیر به مقدار ۶۲ درصد در دمای ۱۴۰ درجه سلسیوس به آن اضافه شده و مورد اختلاط و امولسیون سازی قرار گرفت. روش تولید قیر امولسیون مطابق استاندارد ASTM D2397 و مطالعات دیگر پژوهشگران انجام شد (ایزدی و همکاران، ۲۰۲۱؛ کی منش و همکاران، ۲۰۲۱). بیان این موضوع ضروری است که آزمایش تبخیر سرد قیر امولسیون اصلاح شده مطابق با ASTM D7497 (۲۰۲۱) روی قیرهای امولسیونی انجام گرفته است. سپس، آزمایش های نقطه نرمی قیر و درجه نفوذ روی قیر باقی مانده حاصل از روش تبخیر در دمای کم انجام می شود. در حقیقت، به دلیل کاربرد قیر امولسیون در آسفالت های سرد، فرآیند تقطیر و تبخیر در دماهای زیاد برای بازیابی قیر باقی مانده نمی تواند عمل آوری میدانی را شبیه سازی کند و باعث پیرشدگی، آسیب رساندن به اصلاح کننده ها و اکسیداسیون بیشتر از نمونه های واقعی میدانی می گردد (میشل و همکاران، ۲۰۱۰؛ زال نژاد و حسامی، ۲۰۲۰).

قیر امولسیوننی وجود دارد. آب اضافه شده هیدراسیون سیمان را تسریع کرده و باعث پوشش بهتر مصالح و بهبود کارایی مخلوط می‌شود (یوهانس، ۲۰۱۴؛ کی منش و همکاران، ۲۰۲۱). آب مورد استفاده در تمامی مخلوط‌های میکروسرفیسینگ، آب شرب با درجه اسیدی-قلیایی ۷ بود.

در این پژوهش، از سیمان پرتلند نوع II تهیه شده از کارخانه سیمان فیروزکوه در درصد وزنی ۱ درصد به‌عنوان فیلر معدنی فعال جهت افزایش چسبندگی بین مصالح سنگی و سرعت بخشیدن به زمان گیرش و عمل‌آوری، در مخلوط‌های میکروسرفیسینگ استفاده شد. در ارتباط با آب اضافه شده، منظور آبی است که در هنگام هم زدن مخلوط اضافه شده و علاوه بر آبی است که در

## جدول ۲. دانه‌بندی مصالح سنگی میکروسرفیسینگ

درصد عبور کرده از الک		اندازه الک
محدوده نوع II دستورالعمل ISSA A143	دانه‌بندی انتخابی نوع II	
۱۰۰-۹۰	۱۰۰	۴/۷۵ میلی‌متر (شماره ۴)
۹۰-۶۵	۷۲	۲/۳۶ میلی‌متر (شماره ۸)
۷۰-۴۵	۴۶	۱/۱۸ میلی‌متر (شماره ۱۶)
۵۰-۳۰	۳۰	۶۰۰ میکرون (شماره ۳۰)
۳۰-۱۸	۲۱	۳۰۰ میکرون (شماره ۵۰)
۲۱-۱۰	۱۶	۱۵۰ میکرون (شماره ۱۰۰)
۱۵-۵	۱۰	۷۵ میکرون (شماره ۲۰۰)

جدول ۳. خصوصیات مصالح سنگی

آزمایش‌ها	استاندارد	درشت‌دانه	ریزدانه	مشخصات مطابق ISSA A143
وزن مخصوص حقیقی ( $\text{gr/cm}^3$ )	ASTM C127 & C128	۲/۶۴	۲/۶۷	-
درصد جذب آب	ASTM C127 & 128	۱/۳۳	۲/۳۷	-
ارزش ماسه‌ای مصالح ریزدانه و خاک‌ها (%)	ASTM D2419	-	۷۲	حداقل ۶۵
سلامت مصالح با سولفات سدیم (%)	ASTM C88	۰/۲	۴	حداکثر ۱۵
مقاومت سایشی در ماشین لس‌آنجلس (%)	ASTM C131	۱۴	-	حداکثر ۳۰

جدول ۴. ترکیب شیمیایی سنگدانه و پودر سرباره کوره قوس الکتریکی

نوع مواد	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{MgO}$	$\text{CaO}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{SiO}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{TiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{SrO}$	$\text{V}_2\text{O}_5$
مصالح کوهی	۰/۰۱	۳/۹۳	۴/۶۲	۶/۰۱	۴/۰۴	۱/۴۸	۱/۴۵	۰/۵۷	۰/۳۷	۰/۰۱	۰/۱۸	۰/۰۱
سرباره کوره قوس الکتریکی	<	۳۲/۳۹	۷/۷۸	۲/۳۵	۳/۷۹	۲/۳۲	۰/۲۷	۰/۰۱	۷/۹۸	۰/۸۲	۰/۰۱	۲/۳۹
ی	<	۰/۶۷	۳	۸	۵	۰		<		<	<	<

### ۳. برنامه آزمایشگاهی و آزمایش‌ها

در این مطالعه، ابتدا به اصلاح قیر امولسیون کاتیونی با پلی فسفریک اسید در درصدهای ۰/۴، ۰/۸، ۱/۲ و ۱/۶ بر اساس وزن جامد قیر پرداخته شده و سپس ارزیابی قیرهای امولسیون اصلاح شده با استفاده از شاخص‌های فیزیکی همچون درجه نفوذ، نقطه نرمی، ویسکوزیته سیولت فیورل و حساسیت حرارتی (PI) انجام شد. در مرحله بعد، از بهینه قیرهای امولسیون اصلاح شده در مخلوط‌های میکروسرفیسینگ استفاده گردید. پودر سرباره فولاد کوره قوس الکتریکی به عنوان جایگزین فیلر مصالح سنگی در درصدهای صفر، ۲/۵، ۵/۰، ۷/۵ و ۱۰/۰ بر اساس وزن کل مصالح سنگی مورد استفاده قرار گرفت. درجه بندی هر یک از مخلوط‌های

میکروسرفیسینگ در جدول ۵ آورده شده است. طراحی میکروسرفیسینگ و آزمایش‌های مرتبط با آن به ترتیب در دستورالعمل و آیین‌نامه ISSA A143 و ASTM D6372 ارائه شده است. طرح اختلاط و ارزیابی عملکرد مخلوط‌ها با آزمایش‌های زمان اختلاط، چسبندگی مرطوب، سایش در شرایط مرطوب، تعیین حداکثر قیر به وسیله چرخ بارگذاری شده- چسبندگی ماسه و ارزیابی میزان جابه‌جایی عمودی با چرخ بارگذاری شده انجام می‌شود. مقدار بهینه قیر امولسیونی توسط نتایج آزمایش‌های چرخ بارگذاری شده- چسبندگی ماسه و سایش در شرایط مرطوب مشخص می‌شود. با توجه به الزام‌های مشخص شده برای حداکثر و حداقل قیر امولسیون، اگر اختلاف بین حداکثر و حداقل قیر از ۳



درصد بیشتر باشد، مقدار قیر امولسیون بهینه در وسط دامنه ۳ درصدی از بیشترین مقدار محدودیت است. همچنین، اگر مقدار حداکثر و حداقل قیر از ۳ درصد کمتر باشد، میزان قیر امولسیون بهینه در وسط دامنه مذکور انتخاب می‌گردد (کی‌منش و همکاران، ۲۰۲۱؛ زال نژاد و حسامی، ۲۰۲۰). روند کلی آزمایش‌ها در این پژوهش در شکل ۱ ارائه شده است.

جدول ۵. درجه‌بندی مخلوط‌های میکروسرفیسینگ حاوی قیرهای امولسیون اصلاح‌شده در درصدهای مختلف

نوع مخلوط	فیلر سرباره کوره فوس الکتریک جایگزین فیلر مصالح سنگی (%)
M0	۰
M2.5	۲/۵
M5.0	۵/۰
M7.5	۷/۵
M10	۱۰/۰



شکل ۱. روند پژوهش در این مطالعه

### ۳-۱. آزمایش های تعیین مشخصات قیر امولسیون اصلاح شده

در این مطالعه، قیر امولسیون و باقی مانده آن با استفاده از آزمایش های درجه نفوذ، نقطه نرمی و سیبولت فیورل به ترتیب برای اندازه گیری سفتی (میزان نفوذ)، نقطه نرمی و ویسکوزیته مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، شاخص حساسیت حرارتی- نفوذ قیر ارائه شده در رابطه (۱) برای ارزیابی حساسیت دمایی نمونه ها مورد استفاده قرار گرفت.

$$PI = \frac{1952 - 500 \times \log(Pen_{25}) - 20 \times SP}{50 \times \log(Pen_{25}) - SP - 120} \quad (1)$$

### ۳-۲. آزمایش های طرح اختلاط و عملکرد مخلوط میکروسرفیسینگ

آزمایش های طرح اختلاط و ارزیابی عملکرد مخلوط های میکروسرفیسینگ در این پژوهش زمان اختلاط، چسبندگی مرطوب، سایش در شرایط مرطوب، چرخ بارگذاری شده- چسبندگی ماسه و چرخ بارگذاری شده- جابه جایی بوده که هرکدام از آنها در ادامه شرح داده شده است.

آزمایش زمان اختلاط در طراحی مخلوط شامل اختلاط قیر امولسیون کاتیونی اصلاح شده، مصالح سنگی، فیلر فعال (معمولاً سیمان) و آب است. در آسفالت حفاظتی میکروسرفیسینگ، ضروری است تا از شکست زودهنگام قیر امولسیونی جلوگیری شود. در این آزمایش، مدت زمان شکستن مخلوط در اثر اختلاط به عنوان زمان اختلاط معرفی شده که بایستی حداقل ۱۲۰ ثانیه باشد (ISSA, 2017e). جهت تعیین چسبندگی اولیه، عمل آوری و همچنین تعیین حداقل زمان مناسب برای بازگشایی ترافیک عبوری از روی آسفالت حفاظتی میکروسرفیسینگ، از آزمایش چسبندگی مرطوب استفاده شد (ISSA, 2017d). در این رابطه، مخلوط مناسب جهت بازگشایی ترافیک بر اساس نتایج حاصل شده بعد از ۳۰ و ۶۰ دقیقه عمل آوری در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، انتخاب می شود. حداقل مقادیر چسبندگی به منظور ارزیابی خاصیت شکنندگی قیر امولسیون در مدت زمان ۳۰ دقیقه و بازگشایی ترافیک در مدت زمان ۶۰ دقیقه به ترتیب ۱۲ کیلوگرم- سانتی متر و ۲۰ کیلوگرم- سانتی متر است (ISSA, 2017d). نمایی از دستگاه ارزیابی چسبندگی و نمونه ها قبل و بعد از آزمایش در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲. نمایی از دستگاه آزمایش چسبندگی و نمونه ها بعد از آزمایش

مرطوب و نمونه‌های آن در شکل ۳ ارائه شده است. حداکثر افت وزنی ناشی از سایش در ۱ ساعت مطابق با دستورالعمل ISSA A143، به ۵۳۸ گرم بر متر مربع محدود می‌شود.

حداقل مقدار قیر امولسیون در آزمایش سایش در شرایط مرطوب به دلیل جلوگیری از وقوع خرابی شن‌زدگی اندازه‌گیری می‌شود. سپس، مقدار از دست رفتن سنگدانه نمونه‌ها، بعد از سایش مشخص می‌شود (ISSA, 2017c). دستگاه آزمایش سایش در شرایط



شکل ۳. نمایی از دستگاه آزمایش WTAT و نمونه‌های آن

در آزمایش چرخ بارگذاری شده- چسبندگی ماسه، حداکثر قیر جهت جلوگیری از خرابی قیرزدگی در مخلوط‌های میکروسرفیسینگ تعیین می‌شود. در این آزمایش، اختلاف بین وزن اندازه‌گیری شده و وزن اولیه پس از ۱۰۰۰ سیکل تراکم به‌عنوان مقدار ماسه‌ای که چسبیده است، گزارش می‌گردد. بدین ترتیب، حداکثر مقدار مجاز قیر در هر یک از مخلوط‌ها تعیین می‌شود (ISSA, 2017a).

ویژگی‌های تغییرشکل مخلوط‌های میکروسرفیسینگ تحت بار ترافیک شبیه‌سازی شده با آزمایش چرخ بارگذاری شده- جابه‌جایی نشان داده می‌شود. بر اساس دستورالعمل ISSA TB147، تغییرشکل‌های افقی و عمودی مخلوط‌ها نایستی به ترتیب از ۵ و ۱۰ درصد بیشتر شود (ISSA, 2017b). نمایی از دستگاه چرخ بارگذاری و نمونه‌های آن در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴. دستگاه چرخ بارگذاری - ارزیابی جابه‌جایی و نمونه‌های آن

#### ۴. نتایج و بحث

##### ۴-۱. نتایج مشخصات قیر امولسیون اصلاح شده

##### با پلی فسفریک اسید

در جدول ۶، مقادیر به دست آمده از آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی، سیبولت فیورل و حساسیت حرارتی نمونه‌های حاوی پلی فسفریک اسید به میزان ۰/۴، ۰/۸، ۱/۲ و ۱/۶ درصد وزن قیر باقی مانده نوشته شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، اصلاح قیر با پلی فسفریک اسید به میزان ۰/۴ و ۰/۸ درصد، نقطه نرمی قیر را به ترتیب ۴/۸۴ و ۹/۶۸ درصد نسبت به قیر شاهد افزایش داده و درجه نفوذ را به ترتیب ۵/۰۸ و ۱۵/۲۵ درصد نسبت به قیر شاهد کاهش می‌دهد و افزودن مقادیر بیشتر پلی فسفریک اسید موجب کاهش نقطه نرمی و افزایش درجه نفوذ می‌گردد. آسفالتی که با قیرهای با نقطه نرمی کمتر ساخته می‌شوند حساسیت کمتری نسبت به تغییرات دمایی داشته و در مقابل تغییر شکل‌های دائمی و

شیارشده‌گی در دمای زیاد عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند. همچنین، کاهش درجه نفوذ نشان‌دهنده سفتی قیر اصلاح شده است و باعث عملکرد بهتر آسفالت در مقابل بارهای وارده می‌گردد.

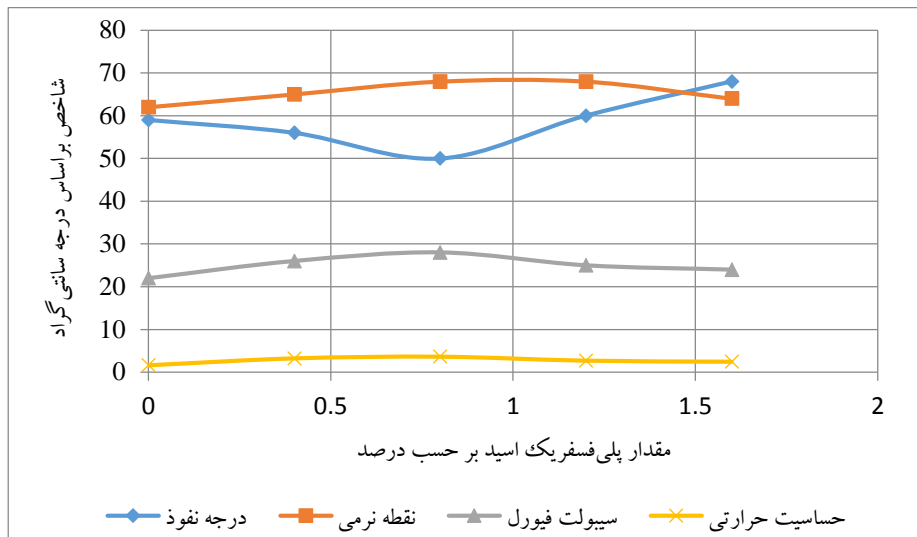
اندیس نفوذ، معیاری از حساسیت حرارتی است و هرچه مقدار آن بیشتر باشد نشان‌دهنده حساسیت کمتر قیرها به دما بوده و تغییر شکل‌های دائمی کمتر است. در قیرهای حاوی پلی فسفریک اسید به میزان ۰/۴ و ۰/۸ درصد نسبت به نمونه شاهد ۲۲/۶۴ و ۳۷/۳۶ درصد افزایش یافته و در قیرهای حاوی ۱/۲ و ۱/۶ درصد پلی فسفریک اسید، مقدار آن کاهش یافته است. همچنین، از نتایج آزمایش سیبولت فیورل مشخص گردید که افزایش پلی فسفریک اسید تا سطح ۰/۸ درصد موجب افزایش ویسکوزیته قیر تا ۲۷ درصد گردیده و افزودن مقادیر بیشتر، موجب کاهش ویسکوزیته می‌شود.

جدول ۶. خصوصیات فیزیکی قیر امولسیون

استاندارد	محدوده آزمایش	PPA1.6	PPA1.2	PPA0.8	PPA0.4	SB	نمونه
ASTM D88	۱۰۰-۲۰	۲۴	۲۵	۲۸	۲۶	۲۲	سیبولت فیورل
ASTM D5	۹۰-۴۰	۶۸	۶۰	۵۰	۵۶	۵۹	درجه نفوذ
ASTM D36	بزرگ‌تر از ۵۷	۶۴	۶۸	۶۸	۶۵	۶۲	نقطه نرمی
-	-	۲/۴۸	۲/۷۲	۳/۶۴	۳/۲۵	۲/۶۵	PI

اسید بر قیر و تغییرات ایجاد شده در ریزساختار قیر و ترکیب شیمیایی، می‌توان دلیل این امر را افزایش میزان مؤثر آسفالتین و کاهش رزین‌ها و روغن‌های اشباع قیر دانست که باعث بهبود خواص عملکرد قیر گردیده و نشان‌دهنده پایداری حرارتی ترکیبات قیری اصلاح شده است (بامگاردنر و همکاران، ۲۰۰۵؛ واراندا و همکاران، ۲۰۱۶).

نتایج ارائه شده در جدول ۶ در شکل ۵ ترسیم گردیده است. در مجموع، ملاحظه می‌گردد که از میان نمونه‌های اصلاح شده، نمونه حاوی ۰/۸ درصد پلی فسفریک اسید، مناسب‌ترین عملکرد را در بهبود فاکتورهای نقطه نرمی، درجه نفوذ، سیبولت فیورل و PI داشته و با افزایش بیشتر مقدار آن، عملکرد قیر کاهش می‌یابد. با توجه به تحقیقات صورت گرفته در خصوص بررسی تأثیر پلی فسفریک



شکل ۵. نتایج استفاده از پلی فسفریک اسید در اصلاح قیر

می‌شود، با افزایش درصد قیر امولسیون در همه مخلوط‌ها، به دلیل رطوبت بیشتر، میزان آب برای رساندن زمان اختلاط به حد مشخص شده ۱۲۰ ثانیه در دستورالعمل ISSA TB113 کاهش یافته است. از سوی دیگر، با افزایش درصد سرباره فولاد، میزان آب برای رساندن زمان اختلاط به محدوده دستورالعمل ISSA کاهش یافت. به عبارت دیگر، با افزایش فیولر سرباره، کارایی تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

#### ۲-۴. نتایج عملکرد مخلوط‌های میکروسرفیسینگ

##### ۱-۲-۴. آزمایش زمان اختلاط

در جدول ۷، مقادیر مناسب آب و مقادیر اولیه قیر امولسیون در سه سطح مشخص گردیده است. در این آزمایش، برای هر یک از مخلوط‌های حاوی درصد‌های مختلف قیر امولسیون، حداقل زمان اختلاط ۱۲۰ ثانیه مورد بررسی واقع شده است. همان‌طور که مشاهده

جدول ۷. آزمایش زمان اختلاط برای مخلوط‌های میکروسرفیسینگ

M10			M7.5			M5.0			M2.5			M0			نوع مخلوط
۹	۸	۷	۹	۸	۷	۹	۸	۷	۹	۸	۷	۹	۸	۷	درصد قیر باقی‌مانده
۸	۸	۹	۸	۸	۹	۸	۸/۵	۹	۹	۹/۵	۹/۵	۹	۱۰	۱۰	درصد آب
۱۲۵	۱۲۴	۱۲۲	۱۲۵	۱۲۶	۱۲۳	۱۲۴	۱۲۴	۱۲۵	۱۲۳	۱۲۶	۱۲۶	۱۲۲	۱۲۷	۱۲۷	زمان اختلاط به دست آمده

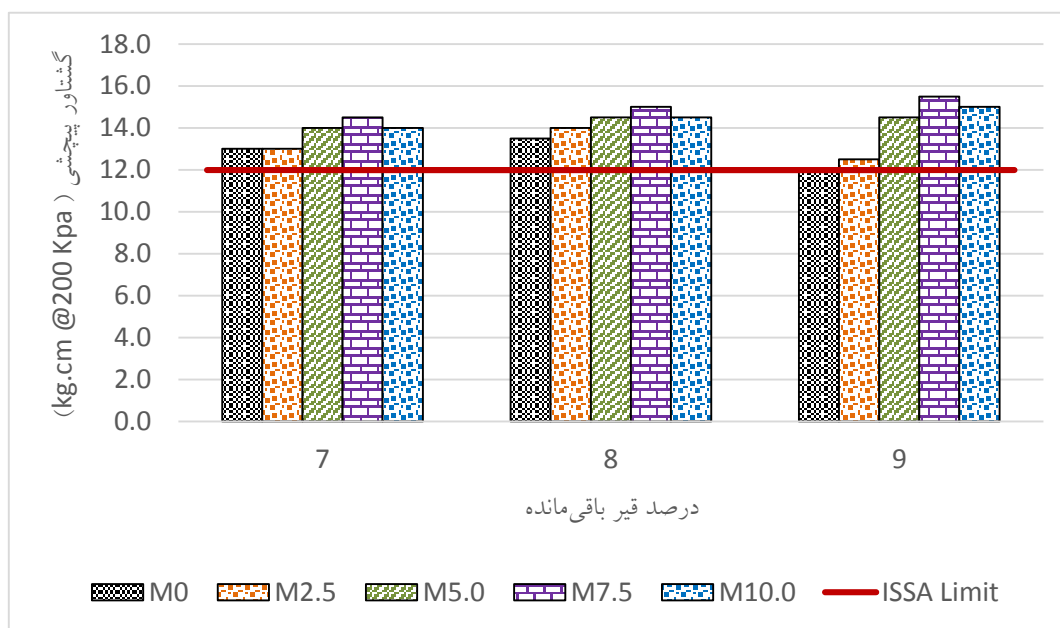
گیرش و مقاومت لازم برای بازگشایی ترافیک به ترتیب در مدت زمان ۳۰ و ۶۰ دقیقه را کسب کرده‌اند. همان‌طور که از نتایج مشخص می‌گردد، با افزایش قیر باقی‌مانده در همه مخلوط‌ها، میزان چسبندگی افزایش پیدا کرده است. به طوری که در قیر باقی‌مانده ۹ درصد مخلوط‌های M2.5، M5، M7.5 و M10 نسبت به نمونه شاهد (M0) به ترتیب

##### ۲-۲-۴. آزمایش چسبندگی مرطوب

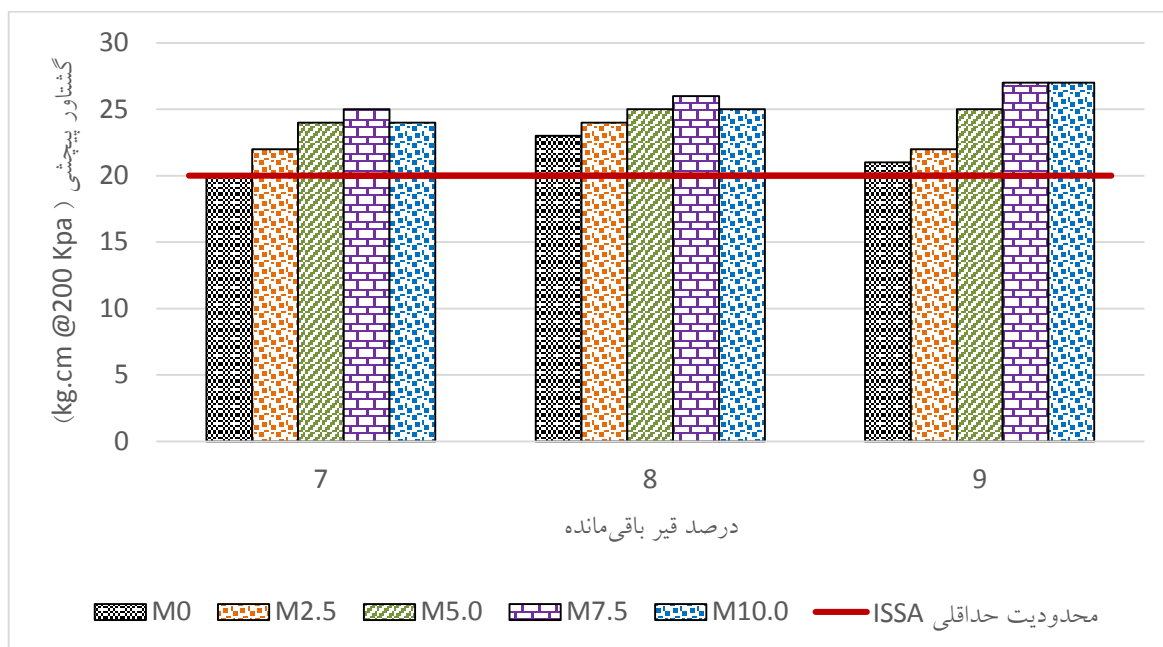
برای مخلوط‌های آسفالتی، نتایج آزمایش چسبندگی مرطوب در زمان‌های ۳۰ و ۶۰ دقیقه مطابق شکل‌های ۶ و ۷ است. با توجه به نتایج به دست آمده، تمامی مخلوط‌ها با توجه به محدوده مشخص دستورالعمل،

می‌کند. مقدار بهینه پودر سرباره فولاد در افزایش چسبندگی با توجه به نتایج، ۷/۵ درصد بوده و افزایش مقدار آن به بیش از ۷/۵ درصد در مخلوط، تفاوت معناداری در نتایج ایجاد نخواهد کرد. نکته‌ی دیگر که در نمودار حائز اهمیت است این است که میزان رشد مقدار چسبندگی در مخلوط‌ها، متفاوت است. در مدت زمان ۱ ساعت، در مخلوط‌های M0 و M2.5 نرخ رشد چسبندگی در مقدار قیر باقی مانده از ۷ به ۸ درصد، بیشتر از ۸ به ۹ درصد است. این در حالی است که میزان رشد مقدار چسبندگی در مخلوط‌های M5.0، M7.5 و M10 در همه درصدها تفاوت معناداری نداشته است. به عنوان یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان این‌طور استنباط کرد که با افزایش درصد قیر تا مقدار معینی، چسبندگی در نمونه‌های M0 و M2.5 افزایش یافته و سپس با افزایش بیشتر مقدار قیر امولسیون و به تبع آن افزایش زمان عمل‌آوری، مقدار چسبندگی افزایش چندانی نخواهد داشت.

موجب افزایش چسبندگی در مدت زمان ۳۰ دقیقه به میزان ۴/۲، ۲۰/۸، ۲۹/۲ و ۲۵/۰ و در مدت زمان ۱ ساعت به میزان ۴/۸، ۱۹/۰، ۲۸/۶ و ۲۸/۶ شده‌اند. در این خصوص، بیشترین مقدار چسبندگی در مدت زمان ۱ ساعت متعلق به مخلوط‌های M7.5 و M10 (با نتایج نزدیک به هم) در قیر باقی مانده ۹ درصد بوده و پودر سرباره فولاد نیز دارای عملکردی مناسب در بالا بردن میزان چسبندگی مخلوط میکروسرفیسینگ در همهی درصدهای قیر امولسیون است. علت چنین موضوعی این است که مصالح روسازی از نظر الکتریکی خشی نبوده و به عنوان نمونه شن و ماسه که عمدتاً از جنس سیلیس می‌باشند دارای بار منفی بوده و تمایل به بارهای مثبت دارند و قیر که دارای هیدروکربن‌های طولیل است تمایل به بارهای منفی دارد. لذا اتصال قیر و مصالح از نوع الکترواستاتیک بوده و نیروی جاذبه ضعیف است. اما سرباره فولاد که به علت وجود ترکیبات  $CaO$  و  $SiO_2$  دارای خاصیت بازی است با پلی فسفریک اسید و قیر که نسبتاً خاصیت اسیدی دارند ترکیب مقاوم‌تری ایجاد



شکل ۶. نتایج آزمایش چسبندگی در ۳۰ دقیقه برای هریک از مخلوط‌های میکروسرفیسینگ



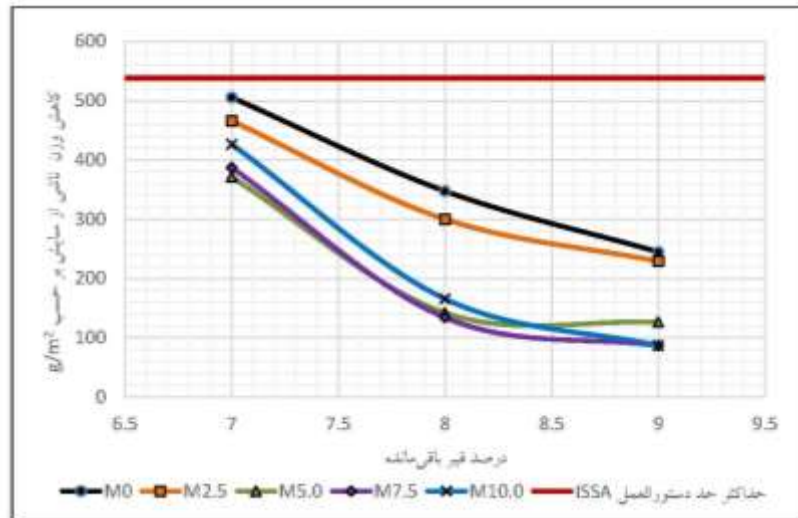
شکل ۷. نتایج آزمایش چسبندگی در ۶۰ دقیقه برای هر یک از مخلوط‌های میکروسرفیسینگ

#### ۳-۲-۴. آزمایش سایش در شرایط مرطوب

نتایج این آزمایش در مدت زمان ۱ ساعت غوطه‌وری مخلوط‌ها، در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۸، افزایش مقدار قیر باقی مانده در همه نمونه‌ها سبب بهبود عملکرد در مقابل خرابی رطوبتی و سایش می‌شود. نتایج سایش در شرایط مرطوب حاکی از آن است که نمونه M7.5 عملکرد بهتری نسبت به سایر نمونه‌ها در درصد‌های مختلف قیر باقی مانده داشته است. به‌عنوان نمونه، در ۹ درصد قیر باقی مانده، مخلوط‌های M2.5، M5، M7.5 و M10 نسبت به نمونه شاهد به ترتیب به مقدار ۶/۵، ۴۸/۴، ۶۴/۵ و ۶۴/۳ درصد عملکرد سایش را بهبود داده‌اند. به طوری که کمترین مقدار افت وزنی در نمونه‌ها در ۹ درصد قیر باقی مانده متعلق به نمونه M7.5 با عدد ۸۱ گرم بر سانتی‌متر مربع است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که در صورت جایگزینی پودر سرباره فولاد، عملکرد سایشی مخلوط‌ها بهبود می‌یابد. البته بایستی قیر متناسب با آن به منظور به حداقل رساندن پدیده عریان‌شدگی تعیین و تأمین شود. موضوع دیگر که در شکل مشاهده می‌شود، نرخ رشد مقاومت در

برابر سایش (مقاومت در برابر خرابی رطوبتی) در همه درصد‌های قیر در نمونه‌های میکروسرفیسینگ ثابت نیست. به طوری که در نمونه‌های M0 و M2.5 با افزایش درصد قیر از ۷ به ۹ درصد کاهش وزن در برابر سایش، با نرخ تقریباً ثابتی کاهش می‌یابد. این در حالی است که در مخلوط‌های M10 و M7.5، M5 نرخ بهبود مقاومت در برابر سایش نمونه‌ها از قیر باقی مانده ۷ به ۸ درصد بیشتر از قیر باقی مانده ۸ تا ۹ درصد است. بنابراین، می‌توان با انتخاب درصد مناسب قیر باقی مانده و درصد مناسب پودر سرباره فولاد، پدیده عریان‌شدگی را به حداقل رساند. از آنجا که عریان‌شدگی به دلیل پیوند ضعیف بین مصالح سنگی و قیر است، در صورتی که مصالح سنگی و قیر بتوانند پیوند قوی‌تری با هم ایجاد کنند، احتمالاً وقوع پدیده عریان‌شدگی کاهش می‌یابد. از آنجا که سرباره فولاد دارای سطحی زبر، سخت و گوشه‌دارتر است، قفل و بست بهتری بین سنگدانه‌ها ایجاد می‌نماید و باعث به وجود آمدن ترکیبی پایدارتر می‌گردد. همچنین، درصد قیر بیشتر نمونه‌های حاوی

سرباره و پوشش بیشتر سنگدانه‌ها، از عوامل دیگر مقاومت بیشتر در مقابل عریان‌شدگی است.



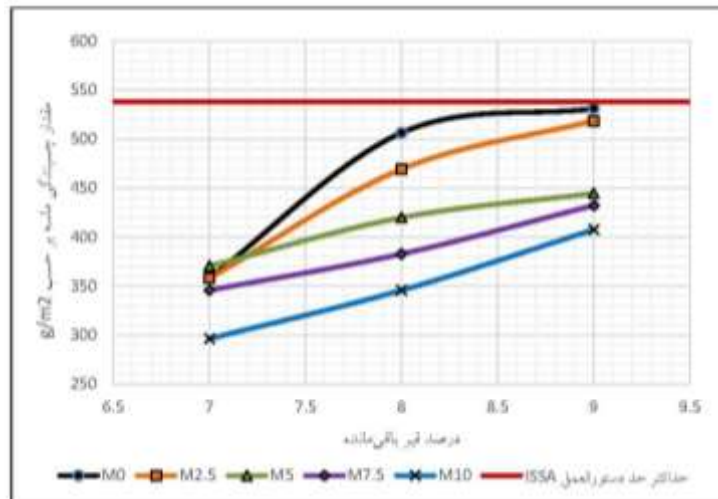
شکل ۸. نتایج آزمایش سایش در شرایط مرطوب در ۱ ساعت برای هر یک از مخلوط‌های میکروسرفیسینگ

کاهش می‌یابد. مطابق شکل ۹، با افزایش درصد قیر باقی‌مانده از ۷ به ۹ درصد، جذب ماسه (قیرزدگی) نمونه‌های آسفالتی M5، M7.5 و M10 با یک شیب تقریباً ثابت افزایش می‌یابد. به طوری که نمونه‌های نامبرده شده در قیر ۷ و ۹ درصد به ترتیب دارای کمترین و بیشترین مقدار قیرزدگی هستند. این در حالی است که در نمونه‌های M0 و M2.5 نرخ افزایش چسبندگی در مقدار قیر باقی‌مانده ۷ تا ۸ درصد سیر صعودی داشته و پس از آن با افزایش مقدار قیر از ۸ به ۹ درصد، نسبت به حالت اول، رشد چندانی نداشته است. در مجموع، این شکل نشان داد که همه نمونه‌ها در محدوده الزام آیین‌نامه قرار داشته و از میان نمونه‌های اصلاح‌شده، نمونه‌های M7.5 و M10، مناسب‌ترین عملکرد را در بین نمونه‌های آسفالتی از لحاظ مقاومت مناسب در برابر خرابی قیرزدگی کسب کرده‌اند. این نتایج حاکی از آن است که سرباره فولاد قدرت بالایی در جذب قیر داشته و می‌توان با انتخاب درصد مناسب از پودر سرباره و قیر امولسیون، مقدار قیرزدگی را به حداقل رساند.

#### ۴-۲-۴. آزمایش تعیین حداکثر قیر به‌وسایله چرخ بارگذاری شده و چسبندگی ماسه

نتایج آزمایش بارگذاری چرخ-چسبندگی ماسه (ارزیابی پتانسیل قیرزدگی) برای مخلوط‌های آسفالتی میکروسرفیسینگ در شکل ۹ ارائه شده است. همان‌طور که از نتایج دریافت می‌شود، کاهش درصد قیر و افزایش درصد سرباره، قیرزدگی مخلوط‌ها (جذب ماسه) را کاهش می‌دهد. به طوری که همه نمونه‌ها در قیر ۸ و ۹ درصد به ترتیب دارای کمترین و بیشترین مقدار قیرزدگی هستند. در ۹ درصد قیر باقی‌مانده، مقدار جذب ماسه نمونه‌های M2.5، M5، M7.5 و M10 نسبت به نمونه M0 به ترتیب ۲/۳، ۱۶/۳، ۱۸/۶ و ۲۳/۳ درصد کاهش یافته است. البته، این روند کاهش قیرزدگی مخلوط‌ها در همه درصدهای قیر از ۸ تا ۹ تکرار شده است. این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش پودر سرباره تا ۱۰ درصد جایگزینی بر اساس وزن کل سنگدانه، مقدار قیرزدگی به‌طور چشمگیری در همه درصدهای قیر باقی‌مانده





شکل ۹. حداکثر قیر در مخلوط‌های میکروسرفیسینگ به وسیله آزمایش چرخ بارگذاری و چسبندگی ماسه

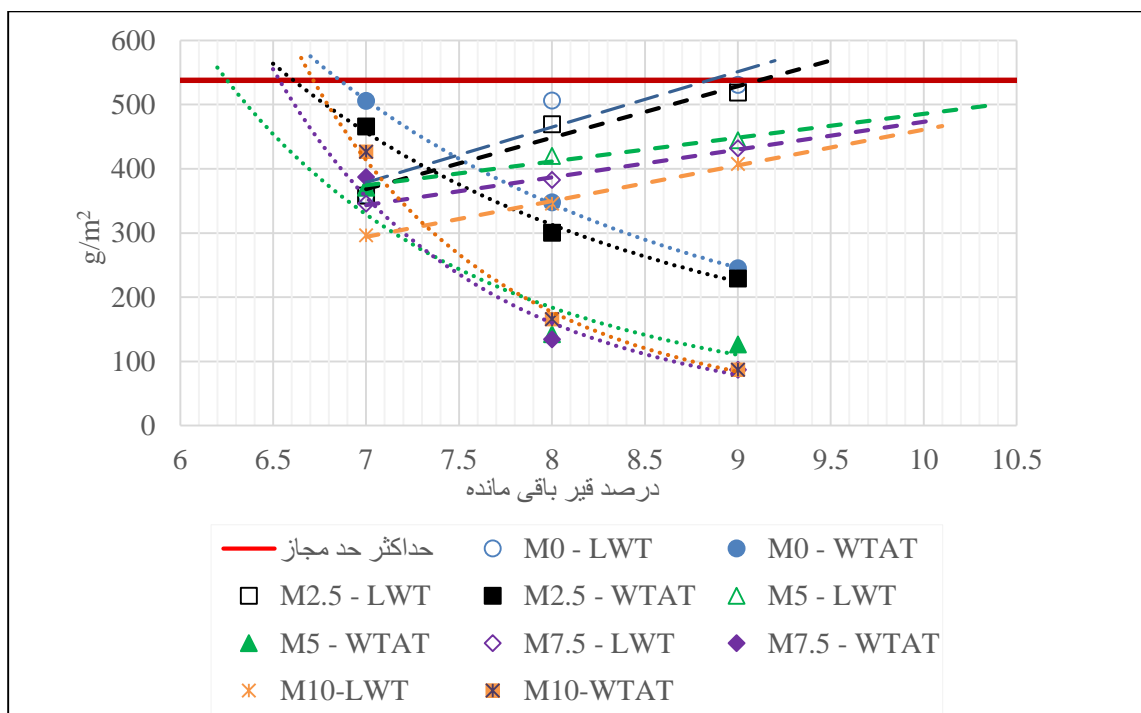
آزمایش ماسه چسبیده به صورت یک نمودار خطی و نتایج آزمایش سایش مرطوب به صورت نمودارهای توابع توانی نشان داده می‌شوند (کی منش و همکاران، ۲۰۲۱). درصد بهینه قیر امولسیون کاتیونی برای تمامی مخلوط‌ها در جدول ۸ و شکل ۱۰ ارائه شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، درصد بهینه قیر امولسیون مخلوط‌های حاوی سرباره فولاد نسبت به مخلوط شاهد افزایش داشته است. به طوری که مقدار بهینه قیر امولسیون مخلوط‌های M10، M7.5، M5، M2.5 نسبت به نمونه شاهد (M0) به ترتیب به مقدار ۰/۵، ۲/۸، ۲/۸ و ۲/۸ افزایش داشته است.

#### ۴-۲-۵. تعیین مقدار بهینه قیر امولسیون مخلوط‌های میکروسرفیسینگ

با رسم نتایج حاصل از آزمایش‌های سایش در شرایط مرطوب و چرخ بارگذاری شده - چسبندگی ماسه و تلفیق نمودارهای این دو آزمایش، مقدار بهینه و محدوده مجاز قیر امولسیون به دست می‌آید. پس از مشخص شدن حداقل و حداکثر مقدار قیر، اگر اختلاف مقدار حداقل و حداکثر قیر کمتر از ۳ درصد باشد، مقدار قیر بهینه، میانگین این دو عدد است و اگر این اختلاف بیش از ۳ درصد بود، مقدار قیر بهینه ۱/۵ درصد کمتر از میزان حداکثر قیر قابل قبول است. در تلفیق دو نمودار، نتایج

جدول ۸. محدوده مجاز قیر امولسیون و درصد بهینه آن

نوع مخلوط	حداقل مقدار قیر امولسیون به دست آمده از آزمایش سایش (%)	حداکثر مقدار قیر امولسیون به دست آمده از چسبندگی ماسه (%)	دامنه قابل قبول قیر امولسیون (%)	مقدار بهینه قیر امولسیون (%)
M0	۱۱/۱	۱۴/۱	۱۴/۱۱-۱/۱	۱۲/۶
M2.5	۱۰/۷	۱۴/۶	۱۴/۱۱-۶/۶	۱۳/۱۰
M5	۱۰/۱	۱۶/۹	۱۶/۱۳-۹/۹	۱۵/۴
M7.5	۱۰/۶	۱۶/۹	۱۶/۱۳-۹/۹	۱۵/۴
M10	۱۰/۹	۱۶/۹	۱۶/۱۳-۹/۹	۱۵/۴



شکل ۱۰. ترکیب نتایج آزمایش سایش در شرایط مرطوب و آزمایش چرخ بارگذاری شده- چسبندگی ماسه جهت تعیین قیر بهینه

باقی مانده ۸ به ۹ درصد روند میزان جابه جایی به صورت کاهشی تغییر می کند.

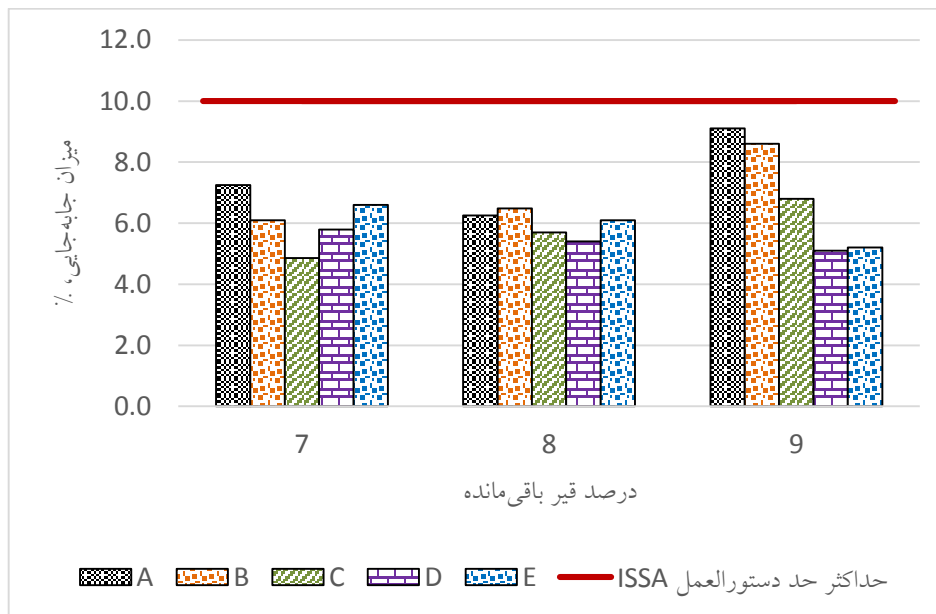
از منظر مقدار سرباره، با توجه به نتایج حاصله در تمامی مخلوطها، نمونه های حاوی سرباره در تمامی مخلوطها، عملکرد بهتری از نمونه شاهد در همه جابه جایی های افقی و عمودی داشته اند. به طوری که با افزایش میزان سرباره، از جابه جایی عمودی و جانبی کاسته شده و کمترین میزان جابه جایی مربوط به نمونه های M7.5 و M10 است. به طور جزئی تر، نمونه های M5 (با ۴/۹ درصد جابه جایی) در قیر باقی مانده ۷ درصد و همچنین، نمونه های M75 (با ۵/۲ درصد جابه جایی) و M100 (با ۵/۱ درصد جابه جایی) در قیر باقی مانده ۹ درصد بهترین عملکرد را در میزان جابه جایی عمودی داشته اند. البته، با افزایش درصد قیر باقی مانده، مخلوط های با درصد سرباره بیشتر عملکرد بهتری در مقادیر جابه جایی ها داشته اند. به طوری که مخلوط های

۴-۲-۶. تعیین میزان جابه جایی مخلوط با آزمایش چرخ بارگذاری شده

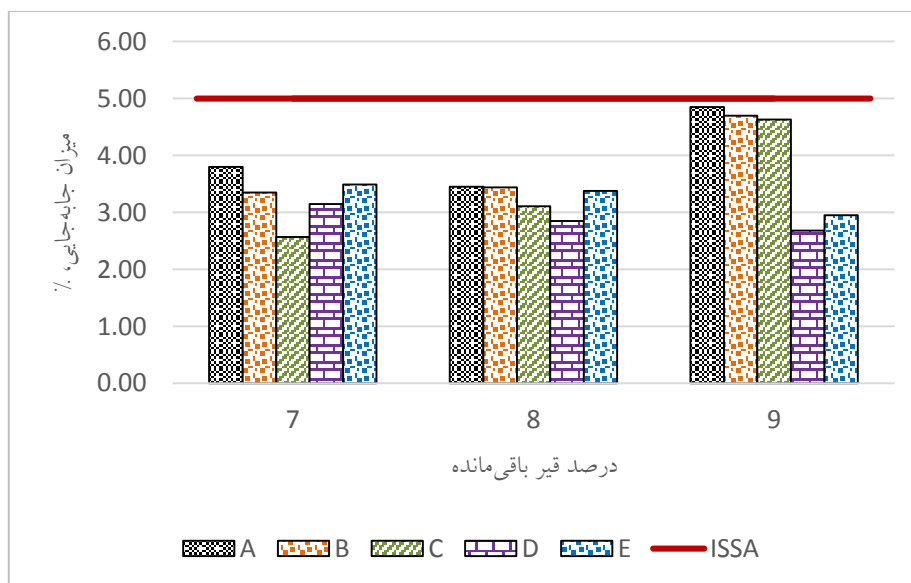
نتایج این آزمایش از دو منظر مقدار قیر باقی مانده و مقدار درصد سرباره جایگزین در مخلوطها قابل بررسی است که در شکل های ۱۱ و ۱۲ ارائه شده است. از منظر قیر باقی مانده، افزایش قیر باقی مانده از ۷ به ۹ درصد باعث افزایش جابه جایی عمودی مخلوط های M0، M2.5 و M5 و کاهش جابه جایی عمودی مخلوط های M7.5 و M10 شده است. لذا، عملکرد مخلوطها در برابر جابه جایی با افزایش قیر باقی مانده متفاوت است. در این خصوص، در مخلوط های M0، M2.5 و M5 با افزایش قیر باقی مانده از ۸ به ۹ درصد، مقدار جابه جایی ها با نرخ بیشتری نسبت به قیر باقی مانده ۷ به ۸ درصد افزایش یافته ولی در مخلوط های M7.5 و M10 ابتدا میزان جابه جایی در قیر باقی مانده ۷ به ۸ درصد تقریباً ثابت و سپس از قیر

۴۴/۷، ۴/۵ و ۳/۱ درصد شده‌اند. به‌طور خلاصه، در مخلوط‌هایی که مستعد شیارشدگی هستند، می‌توان پس از تأمین قیر کافی، احتمال وقوع خرابی شیارشدگی را با افزودن سرباره به مقدار ۷/۵ تا ۱۰ درصد، به میزان مؤثری کاهش داد که این موضوع به دلیل افزایش اصطکاک بین مصالح به دلیل بافت سخت و زبر سرباره فولاد و قفل و بست بهتر مصالح سنگی است.

M7.5 و M10 به قیر باقی‌مانده بیشتری برای عملکرد بهتر در برابر جابه‌جایی نیاز دارند. از لحاظ مقایسه آماری، میزان رشد مقاومت در برابر بارگذاری ترافیکی مخلوط‌های M2.5، M5، M7.5 و M10 در قیر باقی‌مانده ۹ درصد نسبت به نمونه شاهد، موجب بهبود عملکرد جابه‌جایی عمودی به میزان ۵/۵، ۲۵/۳، ۴۴/۰ و ۴۲/۹ درصد و بهبود عملکرد جابه‌جایی افقی به میزان ۳۹/۲



شکل ۱۱. میزان جابه‌جایی عمودی مخلوط‌ها در درصد‌های مختلف قیر



شکل ۱۲. میزان جابه‌جایی افقی مخلوط‌ها در درصد‌های مختلف قیر

## ۵. نتیجه گیری

- در آزمایش سایش در شرایط مرطوب، مشخص گردید که افزایش مقدار قیر باقی مانده در همه نمونه‌ها سبب بهبود عملکرد در مقابل خرابی رطوبتی و سایش می‌شود. نتایج نمودار سایش در شرایط مرطوب حاکی از آن است که نمونه M7.5 عملکرد سایشی بهتری نسبت به سایر نمونه‌ها در درصد‌های مختلف قیر باقی مانده داشته است. به طوری که کمترین مقدار افت وزنی در نمونه‌ها در ۹ درصد قیر باقی مانده متعلق به نمونه M7.5 با عدد ۸۱ گرم بر سانتی متر مربع است. بنابراین، در صورت جایگزینی پودر سرباره فولاد، عملکرد سایشی مخلوط‌ها بهبود یافت. البته بایستی قیر متناسب با آن به منظور به حداقل رساندن پدیده عریان‌شدگی تعیین و تأمین شود.
- در آزمایش تعیین حداکثر قیر به وسیله چرخ بارگذاری - چسبندگی ماسه معلوم گردید که کاهش درصد قیر و افزایش درصد سرباره، قیرزدگی مخلوط‌ها (جذب ماسه) را کاهش می‌دهد. در مجموع، نتایج این آزمایش نشان داد که همه نمونه‌ها در محدوده الزام آیین‌نامه قرار داشته و از میان نمونه‌های اصلاح شده، M7.5 و M10 مناسب‌ترین عملکرد را در بین نمونه‌های آسفالتی از لحاظ مقاومت مناسب در برابر خرابی قیرزدگی داشته‌اند.
- در آزمایش ارزیابی میزان جابه‌جایی مشخص شد که افزایش قیر باقی مانده از ۷ به ۹ درصد موجب کاهش جابه‌جایی عمودی و جانبی مخلوط‌های حاوی درصد زیاد پودر سرباره فولاد (M7.5 و M10) خواهد شد. همچنین، نمونه‌های حاوی سرباره در تمامی مخلوط‌ها، عملکرد بهتری از نمونه شاهد در همه جابه‌جایی‌های افقی و عمودی داشته‌اند. به طوری که با افزایش میزان سرباره از جابه‌جایی عمودی و جانبی کاسته شده و کمترین میزان جابه‌جایی مربوط به نمونه‌های M7.5 و M10 است.

در این پژوهش، به بررسی استفاده از پلی فسفریک اسید جهت اصلاح قیر امولسیون در طرح اختلاط میکروسرفیسینگ حاوی سرباره فولاد برای سنجش عملکرد آن پرداخته شد. در این راستا، ابتدا مشخصات قیر امولسیون مورد بررسی قرار گرفته و سپس به منظور ارزیابی عملکرد مخلوط، پودر سرباره فولاد کوره قوس الکتریکی به عنوان جایگزین فیلر مصالح سنگی در درصد‌های صفر، ۲/۵، ۵/۰، ۷/۵ و ۱۰/۰ بر اساس وزن کل مصالح سنگی مورد استفاده واقع شد. ارزیابی نمونه‌های آسفالتی به واسطه آزمایش‌های چسبندگی مرطوب، چرخ بارگذاری شده و سایش در شرایط مرطوب مطابق با دستورالعمل ASTM D6372 انجام شد. در این پژوهش، نتایج آزمایش‌های انجام شده به طور خلاصه در ادامه ارائه شده است:

- نتایج آزمایش‌های قیری نشان داد که استفاده از پلی فسفریک اسید تا سطح ۰/۸ درصد وزن باقی مانده قیر امولسیون، منجر به افزایش نقطه نرمی و ویسکوزیته قیر و کاهش درجه نفوذ قیر امولسیون گردیده و باعث بهبود عملکرد قیر امولسیون می‌شود و استفاده از درصد‌های بیشتر نتیجه عکس دارد. همچنین، ملاحظه گردید که قیرهای حاوی پلی فسفریک اسید تا سطح ۰/۸ درصد حساسیت حرارتی کمتری نسبت به نمونه شاهد دارند.
- در آزمایش چسبندگی مرطوب مشخص گردید که تمامی مخلوط‌ها مقاومت لازم جهت عبور بار ترافیک را کسب کردند. در این خصوص، بیشترین مقدار چسبندگی در مدت زمان ۱ ساعت متعلق به مخلوط‌های M7.5 و M10 در قیر باقی مانده ۹ درصد بوده است. مقدار بهینه پودر سرباره فولاد در بالا بردن چسبندگی با توجه به نتایج ۷/۵ درصد بوده و افزایش مقدار آن به بیش از ۷/۵ درصد در مخلوط، تفاوت معناداری در نتایج ایجاد نکرد.

- درصد بهینه قیر امولسیون مخلوط‌های حاوی سرباره فولاد نسبت به مخلوط شاهد افزایش داشته است. به طوری که مقدار بهینه قیر امولسیون مخلوط‌های M2.5، M5، M7.5 و M10 نسبت به نمونه شاهد (M0) به ترتیب به مقدار ۰/۵، ۲/۸، ۲/۸ و ۲/۸ افزایش داشته است. به عنوان نتیجه‌گیری کلی، با توجه به دلایل فنی و مکانیکی، استفاده از پودر سرباره فولاد به عنوان فیلر مصالح سنگی به میزان تا ۱۰ درصد بر اساس وزن کل مصالح سنگی پیشنهاد می‌شود.

## ۶. مراجع

- چاوشی نجف آبادی، س.، خبیری، م. و خانی سانجی، ح. ۱۳۹۷. "امکان‌سنجی افزودن پلی فسفریک اسید به قیر اصلاح شده با پودر لاستیک جهت کاهش مخاطرات زیست محیطی لاستیک‌های بازیافتی". اولین کنفرانس ملی نقش مهندسی عمران در کاهش مخاطرات، کرمانشاه. <https://civilica.com/doc/869817>
- حاجی کریمی، پ.، راهی، م.، بابایی عاشورآبادی، ا. و مقدس نژاد، ف. ۱۳۹۸. "بررسی تأثیر اصلاح قیر با پلی فسفریک اسید بر مشخصات ویسکوالاستیک قیر". یازدهمین همایش قیر و آسفالت ایران. <https://civilica.com/doc/966107>
- Ahmedzade, P. and Sengoz, B. 2009. "Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete". *J. Hazard. Mater.*, 165(1-3): 300-305.
- Akhavan-behabadi, M. J., Khabiri, M. M. and Fotuhi-Firozabadi, A. R. 2016. "Numerical analysis of stress intensity factors in airport asphalt pavement by aircraft wheel loading". *J. Transp. Res.*, 13(3): 14-30. [http://www.trijournal.ir/article\\_48163.html](http://www.trijournal.ir/article_48163.html)
- Asi, I. M., Qasrawi, H. Y. and Shalabi, F. I. 2007. "Use of steel slag aggregate in asphalt concrete mixes". *Can. J. Civ. Eng.*, 34(8): 902-911. <https://doi.org/10.1139/107-025>
- ASTM D7497. 2021. "Standard practice for recovering residue from emulsified asphalt using low-temperature evaporative technique". American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- Baumgardner, G. L. 2010. "Why and how of polyphosphoric acid modification-an industry perspective". *Asphalt Paving Technology*, 2010, Sacramento, CA, 79: 663-678.
- Baumgardner, G. L., Masson, J., Hardee, J. R., Menapace, A. M. and Williams, A. G. 2005. "Polyphosphoric acid modified asphalt: Proposed mechanisms". *J. Assoc. Asphalt Paving Technol.*, 74: 283-305.
- Behnood, A. and Ameri, M. 2012. "Experimental investigation of stone matrix asphalt mixtures containing steel slag". *Scientia Iranica*, 19(5): 1214-1219. <https://doi.org/10.1016/j.scient.2012.07.007>
- Chen, Z., Gong, Z., Jiao, Y., Wang, Y., Shi, K. and Wu, J. 2020. "Moisture stability improvement of asphalt mixture considering the surface characteristics of steel slag coarse aggregate". *Constr. Build. Mater.*, 251: 118987. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118987>
- Choudhary, J., Kumar, B. and Gupta, A. 2020. "Utilization of solid waste materials as alternative fillers in asphalt mixes: A review". *Constr. Build. Mater.*, 234: 117271. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117271>
- Cui, P., Wu, S., Xiao, Y., Yang, C. and Wang, F. 2020. "Enhancement mechanism of skid resistance in preventive maintenance of asphalt pavement by steel slag based on micro-surfacing". *Constr. Build. Mater.*, 239: 117870. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117870>
- D'Angelo, J. A. 2009. "Effect of polyphosphoric acid on asphalt binder properties". Workshop on Polyphosphoric Acid Modification of Asphalt Binders, Minneapolis, Minnesota, USA.
- Dulaimi, A., Shanbara, H. K. and Al-Rifaie, A. 2020. "The mechanical evaluation of cold asphalt emulsion mixtures using a new cementitious material comprising ground-granulated blast-furnace slag and a calcium carbide residue". *Constr. Build. Mater.*, 250: 118808. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118808>
- Edwards, Y., Tasdemir, Y. and Isacsson, U. 2006. "Rheological effects of commercial waxes and polyphosphoric acid in bitumen 160/220-low temperature performance". *Fuel*, 85(7): 989-997. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.09.014>
- Galán-Arboledas, R. J., Álvarez de Diego, J., Dondi, M. and Bueno, S. 2017. "Energy, environmental and technical assessment for the incorporation of EAF stainless steel slag in ceramic building materials". *J. Clean. Prod.*, 142: 1778-1788. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.110>

- Hassanzadeh Khabbaz, E. 2020. "Evaluation of mechanical properties of hot mix asphalt mixture containing electric arc furnace (EAF) steel slag". *J. Transp. Res.*, 17(3): 19-32. <http://www.trijournal.ir/article/112904.html>
- Hojoung, L., Dongbok, J., Hyunwook, K., In-Ta, I. K., Kibyoung, K. and Jaehoon, L. 2017. "Experimental and numerical analysis of warm mix asphalt pavement prepared using steel slag and RAP". *Int. J. Highway Eng.*, 19(2): 55-65.
- Hu, C., Zhao, J., Leng, Z., Partl, M. N. and Li, R. 2019. "Laboratory evaluation of waterborne epoxy bitumen emulsion for pavement preventative maintenance application". *Constr. Build. Mater.*, 197: 220-227. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.223>
- Hunt, L. and Boyle, G. E. 2000. "Steel slag in hot mix asphalt concrete". Final Report, State research Project No. 511, Oregon Department of Transportation.
- ISSA. 2010. "Recommended performance guideline for micro surfacing A143". International Slurry Surfacing Association.
- ISSA. 2017a. "Test method for measurement of excess asphalt in bituminous mixtures by use of a loaded wheel tester and sand adhesion". Technical Bulletin 109, 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". Technical Bulletin 147, International Slurry Surfacing Association.
- ISSA. 2017c. "Test method for wet track abrasion of slurry surfacing systems". Technical Bulletin 100, 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". Technical Bulletin 139, International Slurry Surfacing Association.
- ISSA. 2017e. "Trial mix procedure for slurry seal design". Technical Bulletin 113, International Slurry Surfacing Association.
- Izadi, A., Zalnezhad, M., Zalnezhad, H. and Bozorgimakrani, P. 2021. "Laboratory evaluation of coloured microsurfacing surface treatment performance contains iron oxide red pigments". *J. Transp. Infrastruct. Eng.*, 6(4): 99-120. <https://doi.org/10.22075/jtie.2020.20189.1449>
- Jin, T., M. Warid, M. N., Idham, M., Hainin, M. R., Yaacob, H., Hassan, N., Ismail, C. R. and Afiqah, R. 2019. "Modification of emulsified bitumen using styrene-butadiene rubber (SBR)". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 527: 012050. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/527/1/012050>
- Johannes, P. T. D. 2014. "Development of an improved mixture design framework for slurry seals and micro-surfacing treatments". Ann Arbor, MI, ProQuest LLC. <https://search.library.wisc.edu/catalog/9910207940402121>
- Keymanesh, M. R., Ziari, H., Zalnezhad, H. and Zalnezhad, M. 2021. "Mix design and performance evaluation of microsurfacing containing electric arc furnace (EAF) steel slag filler". *Constr. Build. Mater.*, 269: 121336. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121336>
- Kodrat, I., Sohn, D. and Hesp, S. A. M. 2007. "Comparison of polyphosphoric acid-modified asphalt binders with straight and polymer-modified materials". *Transp. Res. Record*, 1998(1): 47-55. <https://doi.org/10.3141/1998-06>
- Lesueur, D. 2009. "The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification". *Adv. Colloid Interface Sci.*, 145(1): 42-82. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2008.08.011>
- Li, X., Clyne, T., Reinke, G., Johnson, E. N., Gibson, N. and Kutay, M. E. 2011. "Laboratory evaluation of asphalt binders and mixtures containing polyphosphoric acid". *Transp. Res. Record*, 2210(1): 47-56.
- Li, C., Chen, Z., Wu, S., Li, B., Xie, J. and Xiao, Y. 2017. "Effects of steel slag fillers on the rheological properties of asphalt mastic". *Constr. Build. Mater.*, 145: 383-391. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.034>
- Mitchell, M., Link, R., Prapaitrakul, N., Han, R., Jin, X., Epps Martin, A. and Glover, C. 2010. "Comparative study on recovered binder properties using three asphalt emulsion recovery methods". *J. Test. Eval.*, 38: 653-659. <https://doi.org/10.1520/JTE102739>
- Rautela, R., Arya, S., Vishwakarma, S., Lee, J., Kim, K.-H. and Kumar, S. 2021. "E-waste management and its effects on the environment and human health". *Sci. Total Environ.*, 773: 145623. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145623>
- 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". *Constr. Build. Mater.*, 23(1): 453-461. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.001>

- Skaf, M., Manso, J. M., Aragón, Á., Fuente-Alonso, J. A. and Ortega-López, V. 2017. "EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use". *Resour., Conserv. Recy.*, 120: 176-185. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.12.009>
- Teixeira, J., Schumacher, A., Pires, P., Castelo Branco, V. and Martins, H. 2019. "Expansion level of steel slag aggregate effects on both material properties and asphalt mixture performance". *Transp. Res. Record*, 2673: 036119811983551. <https://doi.org/10.1177/0361198119835513>
- Varanda, C., Portugal, I., Ribeiro, J., Silva, A. and Silva, C. M. 2016. "Influence of polyphosphoric acid on the consistency and composition of formulated bitumen: standard characterization and NMR insights". *J. Anal. Method. Chem.*, 2016.
- Wang, G. 2016. "Slag use in asphalt paving". pp. 201-238. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100381-7.00010-0>
- Wang, A., Shen, S., Li, X. and Song, B. 2019. "Micro-surfacing mixtures with reclaimed asphalt pavement: Mix design and performance evaluation". *Constr. Build. Mater.*, 201: 303-313. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.164>
- Zalnezhad, M. and Hesami, E. 2020. "Effect of steel slag aggregate and bitumen emulsion types on the performance of microsurfacing mixture". *J. Traffic Transp. Eng. (English Edition)*, 7(2): 215-226. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.12.005>