

## ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر استفاده از سرباره فولاد بر مشخصات آسفالت حفاظتی میکروسرفیسینگ

مهدی زال‌نژاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل  
ابراهیم حسامی\*، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

Email: Hesami@kth.se

دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۱۷ - پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۲۶

### چکیده

میکروسرفیسینگ مخلوطی از قیر امولسیون اصلاح شده پلیمری، مصالح سنگی شکسته با دانه‌بندی مناسب، فیلر معدنی، آب و افزودنی‌های شیمیایی است که در نگهداری پیشگیرانه روسازی‌ها استفاده می‌شود. یکی از اجزایی که تأثیر مهمی در عملکرد میکروسرفیسینگ دارد، مصالح سنگی بوده که حدوداً ۸۲ تا ۹۰ درصد وزن مخلوط را تشکیل می‌دهند. این پژوهش، نتایج آزمایشگاهی تأثیر استفاده از سرباره فولاد در بهبود مشخصات میکروسرفیسینگ را ارائه می‌دهد. لذا، از مصالح ۱۰۰٪ سیلیسی به‌عنوان مخلوط شاهد استفاده شد. سپس، سرباره فولاد در مقادیر ۴۲/۵، ۶۱ و ۱۰۰ درصد جایگزین سنگدانه‌های مخلوط شاهد گردید. مخلوط‌های میکروسرفیسینگ توسط آزمایش‌های چسبندگی در ۳۰ و ۶۰ دقیقه، سایش در شرایط مرطوب در مدت زمان یک ساعت و میزان جابه‌جایی عمودی و جانبی با چرخ بارگذاری شده بررسی گردیدند. نتایج آزمایش‌های چسبندگی و سایش در شرایط مرطوب حاکی از آن بود که مخلوط‌های حاوی مصالح سرباره فولاد نسبت به مخلوط شاهد، به‌دلیل برخورداری از خواص مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی مطلوب، موجب بهبود عملکرد میکروسرفیسینگ شامل افزایش چسبندگی قیر به مصالح سنگی و افزایش مقاومت در برابر سایش می‌شود. همچنین، در آزمایش تعیین میزان جابه‌جایی با چرخ بارگذاری شده، کمترین میزان جابه‌جایی در مخلوط حاوی ۶۱٪ سرباره فولاد مشاهده شد، که نسبت به نمونه شاهد موجب کاهش جابه‌جایی عمودی و جانبی به ترتیب به میزان ۴۵/۶۵ و ۳۵ درصد گردید.

واژه‌های کلیدی: میکروسرفیسینگ، سرباره فولاد کوره اکسیژنی، آزمایش چسبندگی مرطوب، آزمایش سایش، آزمایش چرخ بارگذاری شده

## ۱. مقدمه

می دهند عبارت‌اند از: بارهای ترافیک، شرایط محیطی، شرایط روسازی موجود، طرح اختلاط، کیفیت مصالح و ساخت و نحوه اجرا. استفاده از میکروسرفیسینگ موجب حفاظت و به تأخیر انداختن خرابی روسازی‌ها، آب‌بندی سطح راه، درزگیری ترک‌های غیرفعال راه، افزایش مقاومت لغزندگی و اصلاح سطح روسازی می‌شود. استفاده از میکروسرفیسینگ در شرایطی که نگرانی از معضلات ترافیکی وجود دارد برای پر کردن شیارها و بهبود ویژگی‌های سطح در روسازی با حجم ترافیک زیاد، کارا است (ISSA، ۲۰۱۰؛ گرانسبرگ، ۲۰۱۰؛ شیائو، ۲۰۱۳).

در کنار مزایای ذکر شده، شیارشدگی، قیرزدگی، عریان‌شدگی و شن‌زدگی از جمله خرابی‌های رایج در میکروسرفیسینگ بوده که به دلایلی از قبیل تخریب سایشی سنگدانه‌ها، جابجایی مصالح و مواد، تحکیم قشر یا قشرهای اجرا شده و یا جریان پلاستیک یا تغییر شکل مواد در اثر تردد وسایط نقلیه، استفاده از قیر امولسیون زیاد یا ناکافی در مخلوط، ضعف، عدم سازگاری و فقدان چسبندگی مناسب بین سنگدانه‌ها و قیر، عدم مقاومت سایشی مناسب سنگدانه‌ها در برابر ترافیک عبوری، نوع امولسیون، کیفیت نامطلوب طراحی مخلوط، انتخاب نامناسب اجزای مخلوط بالاخص انتخاب سنگدانه‌ها با کیفیت نامناسب، شرایط ناملاپم آب‌وهوایی در زمان ساخت‌وساز و اجرای نامناسب است (گرانسبرگ، ۲۰۱۰؛ ژوهانس، ۲۰۱۴؛ کوچارک و همکاران، ۲۰۱۰). یکی از اجزایی که تأثیر به‌سزایی در عملکرد آسفالت حفاظتی داشته و باید در انتخاب آن دقت نمود، مصالح سنگی بوده که از لحاظ وزنی حدود ۸۲ تا ۹۰ درصد وزن مخلوط را تشکیل می‌دهد. به‌طور مثال، مصالح مورد نیاز اولین پروژه آسفالت حفاظتی که در سال ۱۹۸۴ در تگزاس آمریکا به اجرا درآمد، از ایالت میسوری به دلیل وجود مصالح سنگی مرغوب تهیه شده بود. بعد از اجرای این پروژه موفق تا ۴ سال بعد که منابع مصالح با کیفیت در تگزاس احداث و تولید شد، هیچ پروژه‌ای در این زمینه

جاده‌ها و بزرگراه‌ها یک عضو حیاتی از اقتصاد کشورها برای جابه‌جایی مسافر و کالا محسوب می‌شوند. بنابراین، نگهداری و مدیریت آن‌ها یکی از مهم‌ترین و بنیادی‌ترین اصول زیربنایی کشورهاست (رباتی و همکاران، ۲۰۱۵). روسازی راه‌ها در طول دوران بهره‌برداری، در اثر بارهای ناشی از ترافیک عبوری وسایل نقلیه به همراه عوامل زیست‌محیطی نظیر دما، تورم ناشی از یخبندان و رطوبت، دچار تخریب و فرسایش می‌شود. برای پیشگیری از تشدید خرابی سطح راه‌ها بایستی اقدامات اصولی و مقرون به صرفه، در ابتدای دوران شروع خرابی‌ها صورت گیرد تا ضمن حفاظت از روسازی موجود، سطح خدمت‌دهی راه نیز در یک حد مناسب تأمین شده و بهره‌برداری از آن به‌صورت ایمن صورت پذیرد (رباتی، ۲۰۱۱).

در کشورهای توسعه یافته، در طول دو دهه گذشته، برنامه نگهداری پیشگیرانه روسازی توسط سازمان‌ها به‌عنوان بهترین رویکرد مقرون‌به‌صرفه برای گسترش عمر بهره‌وری روسازی، حفظ و نگه‌داشتن ظرفیت ساختاری آن و ارائه خدمات با کیفیت در زمان مواجهه با محدودیت بودجه‌ای، معرفی شده است (ژوهانس، ۲۰۱۴). طی سال‌های گذشته، میکروسرفیسینگ به‌عنوان روشی مؤثر و کارآمد در نگهداری پیشگیرانه‌ی روسازی‌ها به‌صورت گسترده‌ای مورد پذیرش قرار گرفته است (ژوهانس، ۲۰۱۴). مخلوط‌های میکروسرفیسینگ شامل مصالح ۱۰۰٪ شکسته با دانه‌بندی مشخص، قیر امولسیون کاتیونی اصلاح شده با پلیمر، آب، فیلرهای معدنی و افزودنی‌های شیمیایی برای کنترل زمان شکست است (ISSA، ۲۰۱۰؛ براتون و همکاران، ۲۰۱۲). عمر خدمت‌دهی میکروسرفیسینگ حدود ۷ سال یا حتی بیشتر است. این عمر، به شرایط روسازی در زمان اجرای آسفالت میکروسرفیسینگ بستگی داشته و عواملی که عملکرد این نوع آسفالت حفاظتی را تحت تأثیر قرار

اجرا نشد (ویمست و سولیون، ۲۰۰۳). برای مخلوط میکروسرفیسینگ با کارایی و خصوصیات مکانیکی بالا، به مصالح سنگی با کیفیت عالی نیاز است. به عبارتی، برای حصول بهترین نتیجه، سنگدانه‌های مورد استفاده در آن بایستی از کیفیت بالایی برخوردار بوده و تمیز، دارای گوشه، زاویه‌دار، با دوام، خوب دانه‌بندی شده و یکنواخت بوده و صاف و صیقلی نباشند (ISSA، ۲۰۱۰). استفاده از سنگدانه‌هایی که مقاومت، دوام و اصطکاک بالایی دارند، منجر به حفظ مقاومت روسازی در برابر تغییر شکل دائمی، سایش و لغزندگی پس از عبور بارهای ترافیکی می‌شود (براتون و لی، ۲۰۱۲؛ وانگ، ۲۰۱۶؛ گل‌علی پور و همکاران، ۲۰۱۲؛ گرانسبرگ، ۲۰۱۰). یکی دیگر از عوامل مهم در انتخاب مصالح سنگی مخلوط میکروسرفیسینگ، توجه به نوع آن‌ها است. نوع مصالح سنگی مشخص‌کننده ویژگی‌های سازگاری و چسبندگی سنگدانه‌ها با امولسیون است. از آنجا که هر ترکیب سنگدانه-امولسیون دارای ترکیبات شیمیایی منحصر به فرد است، این عامل در نتیجه پیوند بین سنگدانه و قیر امولسیونی تأثیرگذار است. قیر امولسیون پلیمری اصلاح شده مورد استفاده در میکروسرفیسینگ از نوع CSS-1h است. استفاده از سنگدانه با بار سطحی مشابه قیر امولسیون کاتیونیک CSS-1h از قبیل سنگدانه‌های آهکی، موجب چسبندگی ضعیف قیر و سنگدانه شده و نرخ شکست نیز به موجب آن به تأخیر می‌افتد (ژوهانس، ۲۰۱۴؛ براون و همکاران، ۲۰۰۹).

از آنجایی که میکروسرفیسینگ یکی از روش‌های مهم نگهداری و حفاظت از راه‌ها محسوب می‌شود، بررسی مدهای خرابی یا شکست در این نوع آسفالت حفاظتی امری حیاتی بوده و برای ادارات راه و شهرسازی این موضوع مهم است که آسفالت‌های حفاظتی طوری طراحی و بهینه‌سازی شده که دارای بهترین عملکرد و بیشترین عمر بهره‌وری باشند و سرعت اجرای آن‌ها سریع باشد تا تأخیر در بازگشایی ترافیک را به حداقل

برساند. بنابراین، ضروری است با استفاده از اصلاح و ارتقاء عملکرد میکروسرفیسینگ، خرابی‌های اشاره شده برای این نوع آسفالت حفاظتی کاهش یابد و یا حذف گردند. از این‌رو، در این پژوهش، به بررسی آزمایشگاهی اثر مصالح سرباره فولادی، به‌عنوان سنگدانه در آسفالت حفاظتی میکروسرفیسینگ، با هدف بهبود خواص و عملکرد مخلوط از جمله بهبود چسبندگی، مقاومت در برابر سایش، شیارشدگی، قیرزدگی و همچنین افزایش عمر بهره‌وری پرداخته شده است. با جایگزینی مصالح سرباره فولادی به‌جای مصالح سنگی، به سبب ایجاد قفل‌شدگی مناسب بین سنگدانه‌ها و تشکیل پیوند مناسب با قیر، امکان بروز خرابی‌هایی از قبیل شیارشدگی، عریان‌شدگی و صیقلی شدن سنگدانه‌ها کاهش پیدا می‌کند (عزیز و همکاران، ۲۰۱۴؛ چن و وی، ۲۰۱۶؛ چن و همکاران، ۲۰۱۴؛ کامبول و همکاران، ۲۰۱۷؛ وانگ، ۲۰۱۶). در صورتی که این امر مهم انجام‌پذیر و عملی باشد، به حفظ منابع مصالح طبیعی کمک نموده و از آلودگی‌های زیست‌محیطی نیز جلوگیری می‌شود. در تحقیقات اخیر، استفاده از سرباره فولاد به‌عنوان سنگدانه مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته و نتایج آن رضایت‌بخش توصیف شده است (وانگ، ۲۰۱۶). در تحقیقی از مسعودی و همکاران (۲۰۱۷)، به ارزیابی پیرشدگی بلندمدت مخلوط آسفالتی گرم حاوی سرباره فولادی کوره قوس الکتریک پرداخته شد. برای این منظور، آزمایش‌های استقامت مارشال، مدول برجهندگی در ۲۵ و ۴۰ درجه سلسیوس، مقاومت کششی غیر مستقیم و حساسیت رطوبتی انجام پذیرفت. در این آزمایش، مشخص شد که جایگزینی سنگدانه‌های معدنی با سرباره فولادی موجب افزایش استقامت مارشال، سفتی، مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیر مستقیم می‌شود. از این‌رو، استفاده از آن در مخلوط آسفالتی گرم پیشنهاد شده است. در مطالعه‌ای از گلی و همکاران (۲۰۱۷)، رفتار مخلوط آسفالتی گرم حاوی سرباره فولاد مورد بررسی واقع شد. در این پژوهش، رفتار خستگی و

شیارشدهگی مخلوط به ترتیب به وسیله تیر خمشی چهارنقطه‌ای و آزمایش خزش دینامیک مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از سرباره فولادی به‌عنوان قسمت درشت‌دانه در مخلوط آسفالتی گرم موجب بهبود عملکرد آن شده و استفاده از آن به‌عنوان مخلوط مناسب، اقتصادی و سازگار با محیط‌زیست توصیه شده است. در پژوهش فخری و احمدی (۲۰۱۷) به ارزیابی مقاومت شکست مخلوط آسفالتی حاوی سرباره فولاد و مصالح بازیافتی آسفالتی (RAP) پرداخته شد. نتایج نشان داد که سیکل‌های ذوب و یخبندان (FT)، پیری طولانی مدت (LT) و در نظر گرفتن مصالح RAP مقاومت شکستگی را کاهش داده، در حالی که استفاده مصالح سرباره فولادی موجب افزایش آن می‌شود. علاوه بر آن، ترکیب RAP موجب بهبود حساسیت رطوبتی شده، در حالی که ترکیب سرباره فولاد آن را افزایش می‌دهد. به‌طور کلی، در این مقاله مشخص شد که ترکیب هم‌زمان سرباره فولاد و RAP می‌تواند در بهبود مقاومت شکستگی و حساسیت رطوبتی مؤثر واقع شود. در تحقیق چن و وی (۲۰۱۶) به بررسی مشخصات و عملکرد مخلوط آسفالتی حاوی سرباره فولاد پرداخته شد. در این پژوهش، سرباره فولاد کوره اکسیژن-بازی (کنورتور) به جای سنگدانه‌های درشت‌دانه مورد ارزیابی آزمایشگاهی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از سرباره فولاد در مخلوط آسفالتی موجب مقاومت بهتر در برابر تغییر شکل دائمی و آسیب ناشی از رطوبت می‌شود.

از لحاظ سابقه بحث در خصوص ارتقا و عوامل مؤثر بر عملکرد میکروسرفیسینگ، مقالات متعددی به بررسی این موضوع پرداخته‌اند. اوتادی و تنزاده (۲۰۱۸) به ارزیابی آزمایشگاهی میکروسرفیسینگ اصلاح شده با نانومواد و الیاف پلی‌اتیلن پرداختند. مواد افزودنی شامل ۴٪ نانوسیلیکا و ۳٪ نانورس بوده که بر اساس درصد وزن قیر باقی‌مانده به قیر امولسیون اضافه گردید. علاوه بر آن، الیاف پلی‌اتیلن بر اساس وزن خشک سنگدانه به مقدار ۴٪ با مخلوط آسفالتی ترکیب شد. در این پژوهش،

طراحی مناسب مخلوط بر اساس آزمایش‌های چرخ بارگذاری شده، سایش در شرایط مرطوب و چسبندگی مرطوب انجام شد. نتایج نشان داد که اضافه شدن نانوسیلیکا بعد از شکست قیر امولسیون، موجب افزایش چسبندگی قیر امولسیون و مخلوط آسفالتی به ترتیب به میزان ۸٪ و ۵٪ شده است. از سوی دیگر، نانورس موجب افزایش ۱۲ درصدی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر سایش گردید. همچنین، افزودن الیاف به مخلوط‌ها موجب کاهش جابه‌جایی به میزان ۲۷٪ شد. در مطالعه‌ای از پورسلطانی و حسامی (۲۰۱۸)، تأثیر استفاده از خرده آسفالت بر ویژگی‌های مخلوط میکروسرفیسینگ مورد بررسی واقع شد. در این پژوهش، ابتدا ترکیب مناسب اختلاط مصالح برای نمونه‌های حاوی ۴۳، ۶۹ و ۹۵ درصد خرده آسفالت و نمونه‌های حاوی ۱۰۰٪ سنگدانه‌ی تازه تعیین و سپس آزمایش‌های طراحی اولیه‌ی مخلوط میکروسرفیسینگ روی آن‌ها انجام شد. نتایج به دست آمده نشان داد که نمونه‌های حاوی خرده آسفالت، گرچه معیارهای آیین‌نامه را برآورده می‌نمایند، اما در مقایسه با نمونه‌های حاوی سنگدانه‌ی تازه، نیاز به اندکی قیر بیشتر برای به دست آوردن به‌هم پیوستگی کافی در مدت زمان مشخص شده دارند. همچنین، از میان نمونه‌های حاوی خرده آسفالت، نمونه‌ی دارای ۶۹٪ خرده آسفالت عملکرد بهتری را از خود نشان داده است. در پژوهش دیگر، کاوسی و حافظ‌زاده (۲۰۱۶) به بررسی اثر درصد پلیمر لاتکس به عنوان اصلاح‌کننده‌ی قیر بر عملکرد میکروسرفیسینگ پرداختند. در این تحقیق، نمونه‌های مخلوط میکروسرفیسینگ با مقادیر قیر باقی‌مانده ۶/۳، ۸/۲ و ۱۰ درصد و پلیمر لاتکس در مقادیر ۳، ۴ و ۵ درصد وزنی قیر باقی‌مانده ساخته شده و جهت بررسی عملکرد آن‌ها آزمایش‌های روانی، چسبندگی، سایش در شرایط مرطوب و آزمایش بارگذاری چرخ انجام شد. نتایج نشان داد که خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های اصلاح شده با پلیمر لاتکس بهبود قابل ملاحظه‌ای پیدا کرده، به‌طوری

## ۲. مواد و برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱. مواد و مصالح

#### ۲-۱-۱. قیر امولسیون

در این تحقیق، از قیر امولسیونی کاتیونی پلیمری کند شکن (CSS-1h) با توجه به توصیه استاندارد ASTM D6372 استفاده گردید. مشخصات قیرهای امولسیون مصرفی پس از آزمایش در این پژوهش با توجه به دستورالعمل A143 (ISSA) مطابق با جدول ۱ است. لازم به ذکر است که آزمایش تقطیر قیر امولسیون مطابق با استاندارد ASTM D7497 انجام گرفته است. از آنجا که کاربرد قیر امولسیون در آسفالت‌های حفاظتی، فرایند تقطیر و تبخیر در دماهای زیاد برای بازیابی پسماند قیر امولسیونی نمی‌تواند عمل‌آوری میدانی را شبیه‌سازی کرده و سبب آسیب رساندن به اصلاح‌کننده‌های پلیمری قیر امولسیون، جدایی پلیمر از قیر، پیرشدگی و اکسیداسیون بیشتر از نمونه‌های واقعی میدانی می‌گردد، لذا اغلب مؤسسات معتبر تحقیقاتی روش بازیابی پسماند قیر امولسیون با استفاده از تکنیک تبخیر در دمای کم را پیشنهاد می‌دهند (پراپایتراکول و همکاران، ۲۰۱۰).

که افزودن ۵٪ پلیمر لاتکس در مخلوط میکروسرفیسینگ با مقدار قیر ۸/۲ تا ۵۰ درصد مقاومت سایشی و مقاومت شیارشدگی مخلوط را افزایش می‌دهد. همچنین، اصلاح قیر امولسیون با پلیمر لاتکس موجب بهبود عمل‌آوری و تسریع در گیرش نمونه‌ها می‌شود. لابی و همکاران (۲۰۰۷) در مطالعه‌ای نشان دادند که اثربخشی آسفالت حفاظتی تحت تأثیر شرایط آب‌وهوایی، بارگذاری ترافیکی و طبقه‌بندی جاده قرار دارد و اثربخشی درازمدت بیشتر در ارتباط با شرایط ترافیک کم یا تردد کمتر، یخ‌زدگی کمتر و پایین قرار داشتن درجه راه، است. همچنین، وود (۲۰۰۷) در تحقیقی، دریافت که آسفالت حفاظتی میکروسرفیسینگ می‌تواند به مدت ۷ سال روی جاده‌های با ترافیک متوسط تا سنگین دوام داشته باشد. علاوه بر این، پشکین و همکاران (۲۰۰۴) اظهار داشتند که میکروسرفیسینگ برای جاده‌های با ظرفیت کم و زیاد بسیار موفق بوده و برای استفاده و اجرا در شب در خیابان‌های با ترافیک زیاد توصیه می‌شود.

جدول ۱. مشخصات قیرهای امولسیون کند شکن اصلاح شده با پلیمر مورد استفاده در این پژوهش

معیارهای دستورالعمل ISSA A143		نتیجه‌ی آزمایش	روش آزمایش	آزمایش
بیشترین مقدار قابل قبول	حداقل مقدار قابل قبول			
۱۰۰	۲۰	۲۹	AASHTO T59	کندروانی سی بولت- فورل در دمای °C ۲۵، ثانیه
۱	-	۰/۵	ASTM D6930	نشست یا پایداری در انبار کردن قیر امولسیون، ۲۴ ساعت، %
-	۶۲	۶۵	ASTM D7497	تقطیر قیر امولسیون، درصد جرم وزنی
۰/۱	-	۰/۰۴	ASTM D244	الک، %
-	۸۰	۹۰	AASHTO T59	اندود، %
	مثبت	مثبت	AASHTO T59	بار ذرات
آزمایش‌های روی قیر باقی‌مانده از تقطیر قیر امولسیون				
	۵۷	۶۸	ASTM D36	نقطه نرمی قیر با آزمایش حلقه و گلوله، °C
۹۰	۴۰	۶۱	ASTM D5	درجه نفوذ در °C ۲۵، ۱۰۰ گرم، ۵ ثانیه
-	۴۰	+۱۰۰	ASTM D113	قابلیت کشش در دمای °C ۲۵، سانتی‌متر

میکروسرفیسینگ مطابق با دستورالعمل ISSA A143

استفاده شده و محدوده دانه‌بندی، متوسط حد بالا و پائین آیین‌نامه بوده که در شکل ۱ قابل مشاهده است.

## ۲-۱-۲. مصالح سنگی

در این پژوهش، از مصالح سنگی سیلیسی کوهی کارخانه چالدران استان مازندران و سرباره فولاد کوره اکسیژنی (BOF) کارخانه ذوب اصفهان به همراه دانه‌بندی نوع III



شکل ۱. محدوده دانه‌بندی نوع III مورد استفاده در پژوهش مطابق با استاندارد ISSA A143

شوند تا اینکه هیدراته شده و مقدارشان کاهش پیدا کند (پالانکار و همکاران، ۲۰۱۷). در این تحقیق، آنالیز شیمیایی مصالح سرباره فولادی صورت پذیرفت که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، میزان آهک آزاد در سرباره فولاد ۰/۴ درصد است که این مقدار در سرباره‌های تازه تولید شده عموماً

یکی از نگرانی‌ها در رابطه با استفاده از سرباره فولاد در مخلوط آسفالتی، پتانسیل افزایش حجم این سنگدانه‌ها به دلیل حضور آهک و منیزیم آزاد در ترکیب شیمیایی آن‌ها است (چن و وی، ۲۰۱۶). از این‌رو، توصیه شده که سرباره‌های فولاد قبل از اینکه بتوان در ساخت‌وساز از آن‌ها استفاده کرد، حداقل ۴ ماه در هوای آزاد قرار داده

خواهد داد. چون پیوستگی سنگدانه‌ها به قیر با خصوصیت قلیایی آن، یعنی نرخ  $CaO/SiO_2$  سنگدانه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، از این‌رو، نسبت زیاد  $CaO/SiO_2$  برای سرباره فولاد، نشان‌دهنده قلیایی‌تر بودن این نوع سنگدانه بوده و تضمینی برای چسبندگی بهتر به قیر است.

۰/۵٪ است. مقدار ۰/۴ درصد نشان‌دهنده آن است که این مصالح به‌خوبی دوره عمل‌آوری را طی کرده و خطر افزایش حجم ندارد. همچنین، با توجه به نتایج به‌دست آمده، سرباره‌های فولاد استفاده شده در این پژوهش دارای خاصیت قلیایی بوده و از این‌رو در تقابل با قیر، که دارای خاصیت اسیدی است، پیوند قوی‌تری را تشکیل

جدول ۲. ترکیب شیمیایی سرباره BOF اصفهان (اعداد بر حسب درصد)

CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Free CaO	L.O.I.*
۴۵/۶	۱۵/۱	۱۶/۱	۳/۴	۳/۸	۲/۸	۳/۱	۴/۵	۰/۳	۰/۲۹	۰/۶۲	۰/۴	۲/۵

\*L.O.I. = Loss on ignition

ریزدانه نسبت به سرباره‌های درشت‌دانه درصد جذب آب بیشتری داشته باشند.

سایر آزمایش‌های جدول ۳ مطابق با دستورالعمل ISSA A143 صورت گرفته است. نتایج نشان‌دهنده آن است که مصالح سرباره فولادی در مقایسه با سنگدانه‌های سیلیسی دارای ارزش ماسه‌ای زیاد بوده و به همین جهت، پایداری خواص آسفالت، به‌خصوص در حضور رطوبت و هنگام یخبندان (تورم بسیار کمتر)، بیشتر است. همچنین، نتایج آزمایش سلامت مصالح حاکی از آن است که عملکرد مصالح سرباره فولادی در برابر تغییرات شرایط جوی و آب‌وهوایی بهتر از مصالح سیلیسی است. در آزمایش سایش به‌وسیله لس‌آنجلس، مشخص شد که عملکرد مصالح سرباره‌ای در برابر سایش و ضربه بهتر از مصالح سیلیسی است. بالا بودن عدد سایش به دلیل میزان زیاد اکسیدهای آهن و فلز در ترکیب شیمیایی مصالح سرباره فولادی است.

روی مصالح سنگی، آزمایش‌های تعیین وزن مخصوص و درصد جذب آب به شرح جدول ۳ انجام شد. با توجه به نتایج آزمایش وزن مخصوص، چگالی بالای سرباره فولاد به دلیل وجود اکسیدهای فلزی موجود در این ترکیب است که موجب افزایش وزن مخصوص در مقایسه با سنگدانه‌های سیلیسی شده است. در نتیجه‌ی آزمایش درصد جذب آب مصالح مشخص شد که مصالح سرباره فولادی دارای جذب آب به مراتب بیشتر نسبت به سنگدانه‌های سیلیسی می‌باشند. این موضوع را می‌توان به تخلخل موجود در سنگدانه‌ها مرتبط دانست. تخلخل نشان‌دهنده حجم فضاهای خالی موجود در سنگ است و لذا سنگ با تخلخل کم، مقدار کمی می‌تواند آب جذب کند؛ اما سنگ با تخلخل زیاد ممکن است مقادیر زیادی آب جذب و در خود نگه دارد. البته باقی ماندن آب در سنگ بستگی به ابعاد و شکل منافذ نیز دارد. همین موضوع سبب شده تا سرباره‌های

جدول ۳. خصوصیات مصالح مورد استفاده در آسفالت حفاظتی میکروسرفیسینگ مطابق با استاندارد ISSA A143

محدودیت بر اساس	نوع سنگدانه	روش آزمایش	آزمایش‌ها
دستورالعمل ISSA A143	سنگدانه سیلیسی	سرباره فولادی	ASTM

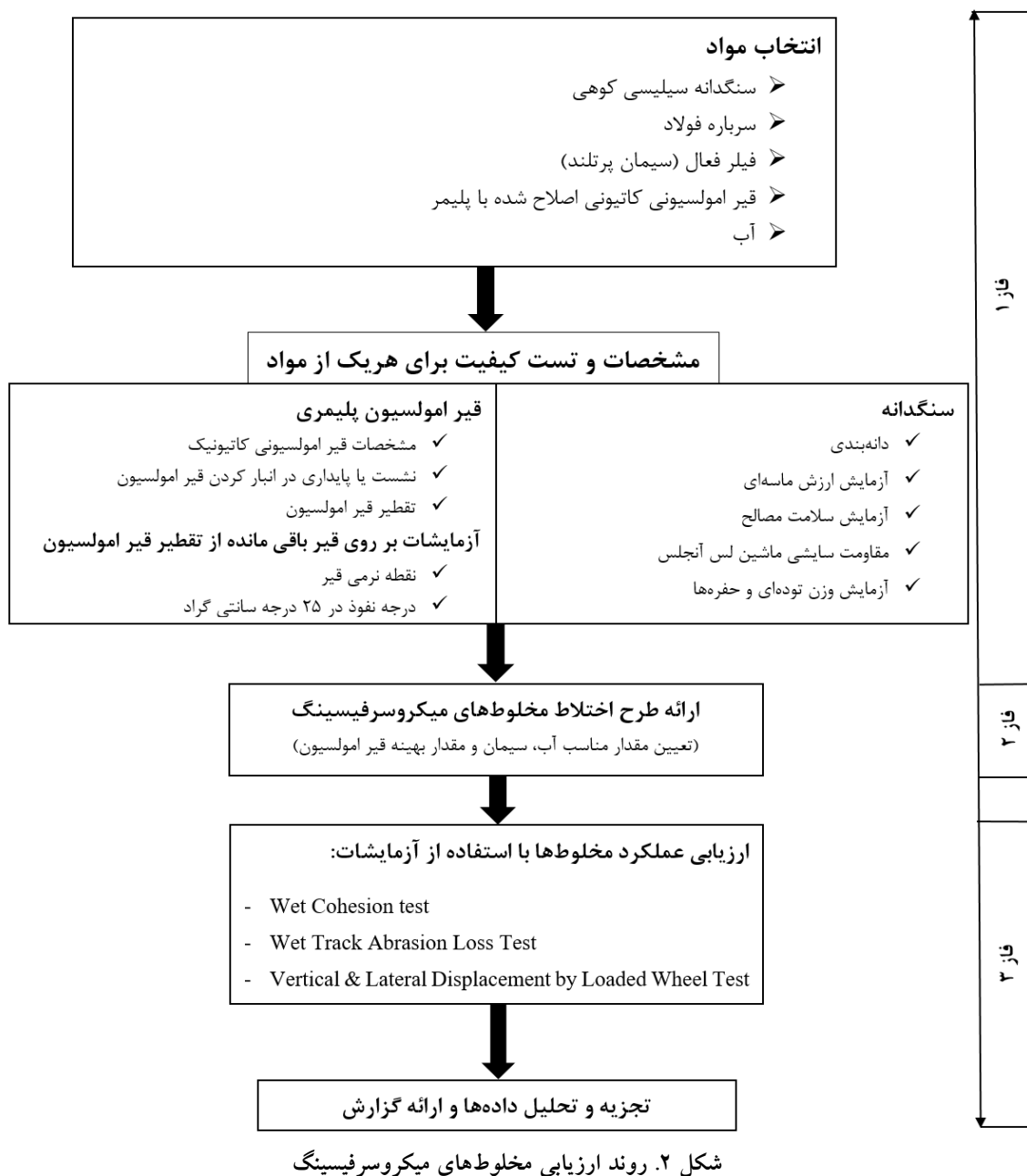
-	۲/۶۳	۳/۲۷	ASTM C127	وزن مخصوص حقیقی درشت‌دانه ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ) (
-	۲/۶۴	۳/۱۲	ASTM C128	وزن مخصوص حقیقی ریزدانه ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )
-	۲/۷۱	۳/۳۹	ASTM C127	وزن مخصوص ظاهری درشت‌دانه ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ) (
-	۲/۷۳	۳/۴۵	ASTM C128	وزن مخصوص ظاهری ریزدانه ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )
-	۱/۱۱	۱/۷۳	ASTM C127	درصد جذب آب درشت‌دانه
-	۱/۳۷	۵/۱	ASTM C128	درصد جذب آب ریزدانه
حداقل ۶۵٪	۶۷٪	۷۴٪	D 2419	ارزش ماسه‌ای مصالح ریزدانه و خاک‌ها
حداکثر ۱۵٪	۲٪	۰٪/۴	C88	سلامت مصالح با سولفات سدیم
حداکثر ۳۰٪	۲۶٪	۱۸٪/۲	C 131	مقاومت سایشی در ماشین لس‌آنجلس

## ۲-۲. برنامه آزمایشگاهی

فولاد به ترتیب در محدوده ۲/۳۶ الی ۴/۷۵ میلی‌متر (الک های نمره ۴ و ۸) و در محدوده ۱/۱۸ الی ۴/۷۵ میلی‌متر (الک‌های نمره ۴، ۸ و ۱۶) جایگزین مصالح سیلیسی شده است. برنامه آزمایشگاهی برای این پژوهش به سه قسمت اصلی تقسیم می‌شود که در شکل ۲ قابل مشاهده بوده و در ادامه به شرح مراحل آزمایشگاهی این پژوهش پرداخته می‌شود.

در این مطالعه، از دو نوع مصالح، به ترتیب سنگدانه سیلیسی و سرباره فولادی، در چهار نوع مخلوط آسفالتی (۱۰۰٪ سنگدانه سیلیسی (مخلوط شاهد) و ۴۲/۵، ۶۱ و ۱۰۰ درصد سرباره فولاد) استفاده گردید. در مخلوط‌های حاوی ۴۲/۵ و ۶۱ درصد سرباره فولاد، مصالح سرباره





درصدهای مختلف از سیمان، آب و قییر امولسیون ساخته می‌شوند. در این مرحله، مقدار مناسب آب و سیمان به‌وسیله آزمایش‌های زمان اختلاط<sup>۱</sup> و چسبندگی مرطوب<sup>۲</sup> تعیین می‌شوند. همچنین، مقدار بهینه قییر امولسیونی اصلاح شده با پلیمر توسط نتایج آزمایش سایش در شرایط مرطوب<sup>۳</sup> و آزمایش تعیین حد بالای

مرحله اول: پس از انتخاب مصالح سنگی و قییر امولسیونی مناسب، آزمایش‌های لازم مطابق با دستورالعمل ISSA A143 انجام گرفته و بایستی الزامات مربوط به آن را برآورده سازند.

مرحله دوم: با توجه به توصیه آیین‌نامه مطابق جدول ۴ و روش سعی و خطا، مخلوط‌های میکروسرفیسینگ با

1- Mix time test  
2- Wet cohesion test  
3- Wet track abrasion test

مرحله سوم: بعد از تعیین مقدار مناسب سیمان، آب و مقدار بهینه قیر امولسیون، چهار نوع درجه بندی مطابق با جدول ۵ در نظر گرفته شده و سپس آزمایش های چسبندگی مرطوب، سایش در شرایط مرطوب و تعیین جابه جایی جانبی با چرخ بارگذاری شده<sup>۲</sup> برای هر یک از مخلوط های میکروسرفیسینگ، در مقدار بهینه قیر امولسیون هر یک از ترکیب ها، به منظور بررسی رفتار و سنجش عملکرد آنها مطابق با دستورالعمل ISSA A143 انجام گرفت. مقدار مجاز هر یک از آزمایش ها در جدول ۶ نشان داده شده است.

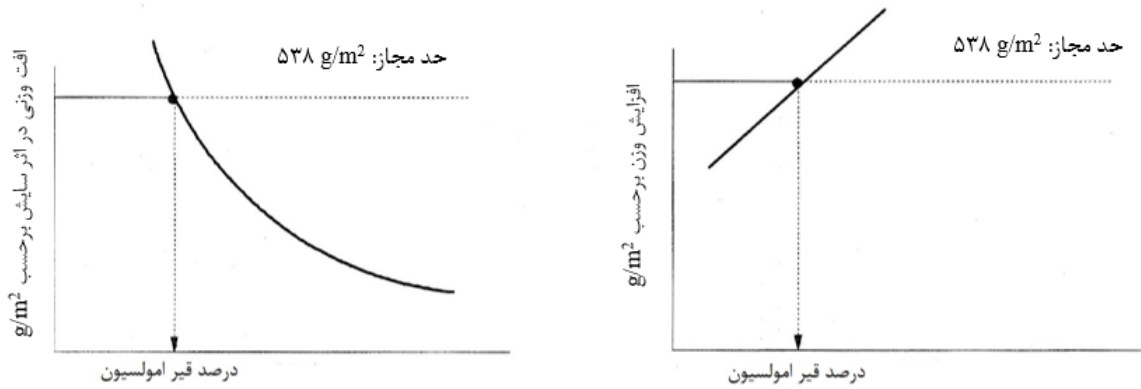
قیر با چرخ بارگذاری شده و چسبندگی ماسه<sup>۱</sup> مشخص می شود. روش تعیین درصد بهینه قیر امولسیون پلیمری در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به محدودیت های مشخص شده برای حداقل و حداکثر قیر، اگر اختلاف بین حداقل و حداکثر قیر بیشتر از ۳٪ باشد، مقدار بهینه قیر امولسیون در وسط دامنه ۳ درصدی از بیشترین مقدار محدودیت است. همچنین، اگر مقدار حداقل و حداکثر قیر کمتر از ۳٪ باشد، مقدار بهینه قیر امولسیون با توجه به محدودیت حداقل و حداکثر قیر، وسط دامنه مذکور انتخاب می گردد (براتون و لی، ۲۰۱۲).

جدول ۴. حدود مواد تشکیل دهنده میکروسرفیسینگ (ISSA، ۲۰۱۰)

حدود پیشنهادی	مواد تشکیل دهنده
۵/۵ تا ۱۰/۵ درصد نسبت به وزن خشک مصالح سنگی	قیر باقی مانده
صفر تا ۳ درصد نسبت وزن خشک مصالح سنگی	فیلر معدنی
حداقل ۳ درصد نسبت به وزن قیر خالص	میزان پلیمر
به میزان لازم برای ایجاد غلظت مناسب در مخلوط	آب

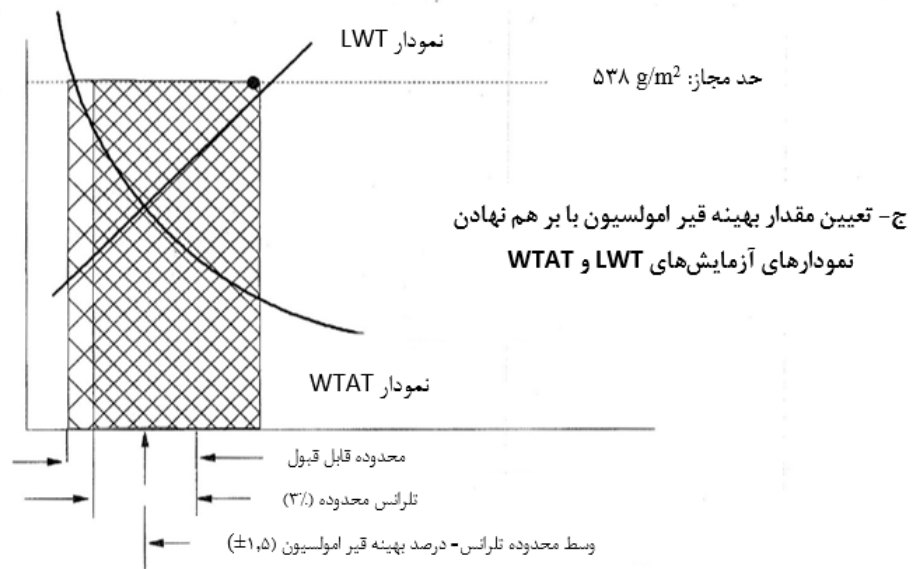
۱- Excess asphalt by loaded wheel test sand adhesion

۲- Vertical and lateral displacement by loaded wheel test



ب- تعیین حداقل مقدار قیر امولسیون با آزمایش سایش در شرایط مرطوب (WTAT)

الف- تعیین حداکثر مقدار قیر امولسیون با آزمایش چرخ بارگذاری شده و چسبندگی ماسه (LWT)



شکل ۳. نمودارهای سه گانه تعیین درصد بهینه قیر امولسیون پلیمری (ISSA TB 111, 2017 b)

جدول ۵. درجه بندی سنگدانه‌ها برای هر یک از مخلوط‌های آسفالتی

ترکیب مصالح	نوع مخلوط
مخلوط حاوی ۱۰۰٪ سنگدانه سیلیسی	A
مخلوط حاوی ۴۲,۵٪ سرباره فولاد	B
مخلوط حاوی ۶۱٪ سرباره فولاد	C
مخلوط حاوی ۱۰۰٪ سرباره فولاد	D

جدول ۶. مقادیر مجاز آزمایش‌های میکروسرفیسینگ (ISSA، ۲۰۱۰)

شماره استاندارد	مقدار	آزمایش
TB 113	حداقل ۱۲۰ ثانیه	زمان اختلاط
TB 139	حداقل ۱۲ کیلوگرم - سانتی متر حداقل ۲۰ کیلوگرم - سانتی متر	چسبندگی مرطوب در ۳۰ دقیقه چسبندگی مرطوب در ۶۰ دقیقه
TB 109	حداکثر ۵۳۸ گرم بر متر مربع	تعیین حد بالای قیر توسط چرخ بارگذاری و چسبندگی ماسه
TB 100	حداکثر ۵۳۸ گرم بر متر مربع	افت سایش در شرایط مرطوب ۱ ساعت
TB 147	حداکثر ۵٪	تغییر مکان جانبی (بارگذاری چرخ)

### ۳. آزمایش‌ها

آزمایش عبارت‌اند از: ۱۲ کیلوگرم - سانتی متر برای ۳۰ دقیقه و ۲۰ کیلوگرم - سانتی متر برای ۶۰ دقیقه. مقدار متناظر با ۳۰ دقیقه به منظور ارزیابی خاصیت شکنندگی قیر امولسیون و ۶۰ دقیقه برای ارزیابی زمان ترافیک جهت بازگشایی آن به کار گرفته می‌شود.

برای انجام این آزمایش، مخلوط‌ها در قالب حلقه‌ای متناسب با دانه‌بندی نوع III به ارتفاع ۱۰ و قطر ۶۰ میلی‌متر ریخته شده و مرکز به مرکز یک پوشش نمادی در دمای اتاق قرار داده می‌شوند. هنگامی که نمونه‌ها به اندازه کافی سفت شدند، قالب دور نمونه‌ها برداشته می‌شود. پس از حاصل شدن گیرش نمونه‌ها، در زمان‌های ذکر شده، در دستگاه چسبندگی قرار گرفته و آزمایش پیچش روی آنها انجام می‌گیرد. لازم به ذکر است که فشاری که از طریق سیلندر دستگاه روی نمونه وارد می‌شود برابر با ۲۰۰ کیلوپاسکال می‌باشد. نتیجه این آزمایش، رسم نمودار چسبندگی - زمان است که در حقیقت مخلوط‌های سریع شکن و کند شکن و نیز مناسب برای سرعت ترافیک زیاد و کم مشخص می‌شود (ISSA TB 139، d ۲۰۱۷). در شکل ۴، نمایی از دستگاه و نمونه‌های ساخته شده این آزمایش نشان داده شده است.

آزمایش‌های ارزیابی عملکرد مخلوط‌های میکروسرفیسینگ روی مقدار بهینه قیر امولسیون پلیمری کاتیونی در این پژوهش شامل آزمایش چسبندگی مرطوب، آزمایش سایش در شرایط مرطوب و آزمایش ارزیابی جابه‌جایی عمودی و جانبی با استفاده از چرخ بارگذاری شده بوده که هر کدام از آنها در ادامه شرح داده شده است.

#### ۳-۱. آزمایش چسبندگی مرطوب

این آزمایش جهت تعیین چسبندگی اولیه، مقاومت در برابر ترافیک و زمان عمل‌آوری مخلوط مطابق با دستورالعمل

ISSA TB 139 انجام می‌شود. عمل‌آوری کلی نمونه میکروسرفیسینگ زمانی کامل می‌شود که چسبندگی بین اجزای سنگدانه پدیدار شود. دستگاه آزمایش چسبندگی برای اندازه‌گیری زمان عمل‌آوری به کار می‌رود. به بیان دیگر، یک مخلوط مناسب بر اساس نتایج به دست آمده پس از ۳۰ و ۶۰ دقیقه عمل‌آوری در دمای اتاق (۲۵ درجه سلسیوس) در نظر گرفته می‌شود. حداقل مقادیر برای این



شکل ۴. دستگاه و نمونه‌های آزمایش چسبندگی

ترمزگیری و انحراف خودرو شبیه‌سازی شده، مقدار از دست رفتن سنگدانه نمونه‌های ساخته شده، بعد از سایش با لوله لاستیکی نیز مشخص می‌شود. به طور کلی، افت وزنی ناشی از سایش ممکن است به علت استفاده از سنگدانه و قیر با کیفیت پائین، عدم چسبندگی مناسب بین قیر و سنگدانه، درجه‌بندی نامناسب سنگدانه و درصد نامناسب قیر اتفاق بیافتد. نمونه‌ای از انجام آزمایش در شکل ۵ نشان داده شده است. برای مخلوط‌های میکروسرفیسینگ دستورالعمل ISSA A143 (۲۰۱۷ a)، حداکثر افت وزنی ناشی از سایش را در یک ساعت و ۶ روز را به ترتیب به ۵۲۸ و ۸۰۷ گرم بر متر مربع محدود می‌کند.

### ۳-۲. آزمایش سایش در شرایط مرطوب

آزمایش سایش در شرایط مرطوب به منظور ارزیابی مقاومت در برابر شن‌زدگی میکروسرفیسینگ، اندازه‌گیری کیفیت پوشش مخلوط دوغاب قیری تحت شرایط سائیدگی مرطوب، ارزیابی مقاومت سایشی مخلوط در ارتباط با میزان قیر و تعیین حداقل مقدار قیر امولسیون مورد نیاز جهت جلوگیری از بروز خرابی شن‌زدگی، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در این آزمایش، ضمن آنکه چگونگی سایش، گسیختگی و چرخش ترافیک روی سطح روسازی در حضور آب و پدیده‌های عریان شدگی سنگدانه‌ها در شرایط



شکل ۵. نمایی از دستگاه آزمایش WTAT و نمونه آن بعد از اعمال سایش

### ۳-۳. آزمایش ارزیابی جابه‌جایی جانبی با

#### استفاده از چرخ بارگذاری شده

از آنجایی که میکروسرفیسینگ برای پر نمودن محل شیار در روسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد، لذا بایستی مقاومت کافی در مقابل تغییر شکل عمودی و جانبی داشته باشد. این آزمایش، مقدار تراکم یا ویژگی‌های تغییر شکل مخلوط را تحت بار ترافیک غلتشی شبیه‌سازی شده نتیجه می‌دهد. در این پژوهش، مطابق با دانه‌بندی نوع III، قالب

۱۲/۷ میلی‌متری انتخاب شده و مخلوط با استفاده از ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری چرخ ۵۶۷ کیلوگرم مترکم گردید. عرض نمونه، قبل و بعد از تراکم با ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری، در مسیر چرخ و در وسط طول نمونه اندازه‌گیری می‌گردد. تغییر مکان عمودی و افقی نمونه‌ها نبایستی به ترتیب از ۱۰٪ و ۵٪ تجاوز نماید ISSA TB 147 (c) (۲۰۱۷). نمایی از دستگاه و نمونه‌های آزمایش چرخ بارگذاری شده در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶. دستگاه و نمونه‌های آزمایش چرخ بارگذاری

#### ۴. نتایج و بحث

##### ۴-۱. نتایج طرح اختلاط مخلوط‌های

##### میکروسرفیسینگ

در جدول ۷، مقادیر مناسب سیمان، آب و قیر امولسیون مطابق با دستورالعمل ISSA A143 مشخص گردیده است. همان‌طور که از نتایج دیده می‌شود، درصد بهینه قیر امولسیون مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره فولادی نسبت به دیگر نمونه‌ها افزایش یافته و مخلوط تمام سرباره فولادی دارای بیشترین درصد قیر امولسیون بهینه است. این افزایش به این دلیل است که در مخلوط تمام

سرباره فولادی به دلیل استفاده از سرباره‌های ریزدانه، سطح مخصوص و تخلخل کل مخلوط افزایش یافته و در نهایت میزان قیر بهینه برای پوشش و اندود سرباره‌ها نیز بیشتر شده است. در مجموع، سرباره‌ها از نظر بافت، تیزگوشگی و به‌خصوص تخلخل، تفاوت چشمگیری با سنگدانه‌های طبیعی دارند. به این ترتیب که میزان جذب بیشتر سرباره‌های فولادی نسبت به سنگدانه‌های معمولی باعث افزایش درصد قیر بهینه در مخلوط شده است. همچنین، با افزایش درصد قیر امولسیون، به دلیل بالا رفتن میزان آب موجود در قیر امولسیون، آب مصرفی برای رسیدن به کارایی مطلوب افزایش یافته است.

جدول ۷. خلاصه نتایج طرح اختلاط مخلوط‌های میکروسرفیسینگ

نوع مخلوط	نوع قیر امولسیون پلیمری	مقدار بهینه قیر امولسیون (%)	مقدار سیمان (%)	مقدار آب اضافه شده (%)	زمان اختلاط (ثانیه)
A	CSS-1h	۹/۹۲	۱/۷۵	۸/۵	۱۲۵
B	CSS-1h	۱۰/۱۵	۱/۵۰	۸/۰	۱۲۳
C	CSS-1h	۱۰/۶۵	۱/۵۰	۷/۵	۱۲۴
D	CSS-1h	۱۲/۵	۱/۷۵	۶/۵	۱۲۴

##### ۴-۲. بررسی رفتار و سنجش عملکرد مخلوط

##### میکروسرفیسینگ

در این بخش، به ارزیابی مخلوط‌های میکروسرفیسینگ با آزمایش‌های چسبندگی مرطوب، سایش در شرایط مرطوب و میزان جابه‌جایی جانبی به‌وسیله چرخ بارگذاری شده در درصد قیر امولسیون بهینه پرداخته شده است.

##### ۴-۲-۱. آزمایش چسبندگی مرطوب

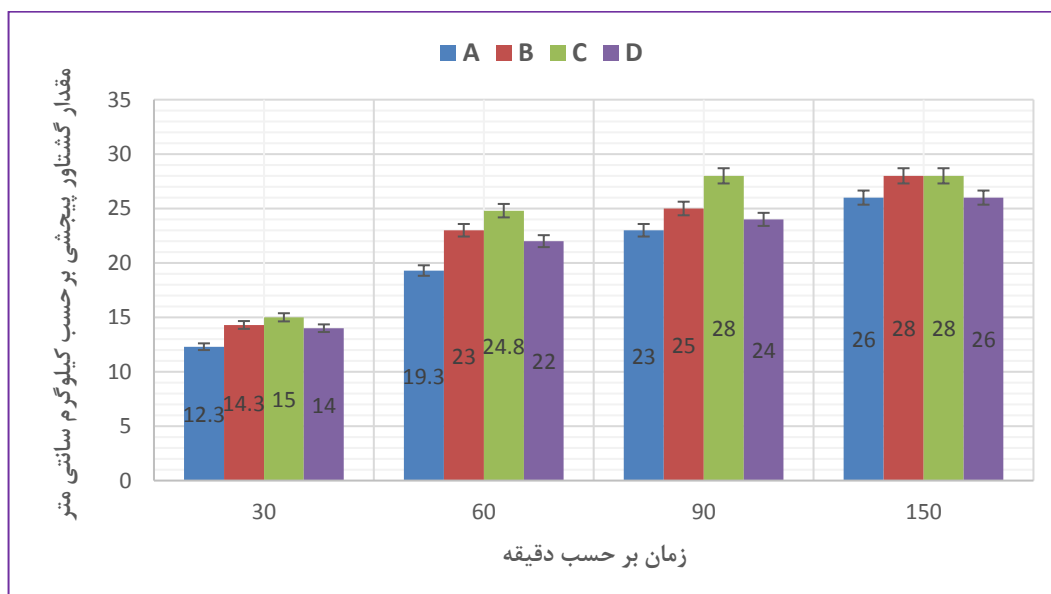
نتایج آزمایش چسبندگی مرطوب برای مخلوط‌های آسفالتی در چهار زمان ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۵۰ در نمودار میله‌ای شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به نتایج، مخلوط‌های حاوی سرباره فولاد، گشتاور پیچشی و چسبندگی بیشتری نسبت به نمونه شاهد کسب نموده و

مخلوط حاوی ۶۱٪ سرباره فولاد دارای بیشترین مقدار چسبندگی است. به‌طوری که نمونه‌های B، C و D منجر به افزایش چسبندگی نسبت به نمونه شاهد A به ترتیب به میزان ۱۶/۳، ۲۲ و ۱۲/۱ درصد در مدت زمان ۳۰ دقیقه و ۱۹/۲، ۲۸/۵ و ۲۱/۹ درصد در مدت زمان ۶۰ دقیقه شده‌اند. با افزایش زمان، چسبندگی همه مخلوط‌ها افزایش پیدا کرده و روند کسب مقاومت در مخلوط C بیشتر از تمامی مخلوط‌ها است. افزایش گشتاور پیچشی و به تبعیت از آن افزایش چسبندگی، از چند منظر قابل توجیه است که در ادامه به بررسی آن پرداخته می‌شود. بررسی تأثیر سرباره بر رفتار مخلوط‌های آسفالتی نیازمند شناخت اندرکنش میان قیر و مصالح سنگی است. بنابراین، بایستی اندرکنش‌های فیزیکی و شیمیایی بین قیر و مصالح سنگی مورد ارزیابی قرار گیرد. اساساً، مصالح

بیشتر باشد، چسبندگی بهتر قیر و مصالح سنگی را باعث خواهد شد (عزیز و همکاران، ۲۰۱۴).

از منظر دیگر، شکل ظاهری و بافت سنگدانه‌ها نیز عامل مهمی در چسبندگی با قیر، استحکام و پایداری مخلوط و اتصال سنگدانه‌ها به یکدیگر است. سرباره فولاد شامل سنگدانه‌هایی شکسته، گوشه‌دار و با سطحی زبر است. عموماً این سنگدانه‌ها در هر دو وجه ۱۰۰٪ شکسته، زاویه اصطکاک داخلی آن زیاد و در حدود ۴۵ درجه بوده و سنگدانه پولکی و سوزنی نیز ندارند. به این ترتیب، این سنگدانه‌ها قفل و بست بسیار خوبی با هم دارند. تمامی این عوامل موجب می‌شود که مصالح سرباره فولادی، به دلیل تشکیل پیوند قوی‌تر با قیر و همچنین ماهیت تیزگوشه، زبر و قفل و بست شدن مناسب سنگدانه‌ها با هم، ترکیب پایدارتر و چسبندگی بهتری را ایجاد نماید. نتایج چسبندگی مناسب سرباره فولاد با قیر، با تحقیق شن و همکاران (۲۰۰۹) مطابقت دارد.

راه‌سازی از نظر الکتریکی خنثی نیستند. به‌طور مثال، شن و ماسه که اکثراً از جنس سیلیس است، تمایل به بارهای مثبت نشان می‌دهند. یعنی خود دارای بارهای منفی هستند. از طرف دیگر، قیر که شامل هیدروکربن‌های طولیل است، حالت قطبی ضعیفی داشته و تمایل به بارهای منفی دارد. با این توضیحات، می‌توان نتیجه گرفت که اتصال قیر- مصالح سیلیسی از نوع الکترواستاتیک است که در آن نیروهای جاذبه، ضعیف هستند. در صورتی که سرباره فولاد دارای خاصیت بازی است و از این‌رو با قیر که به‌صورت نسبی خاصیت اسیدی دارد، ترکیب مقاوم و پیوند محکم‌تری ایجاد می‌کند. خاصیت بازی سرباره فولاد به علت وجود ترکیبات  $CaO$  و  $SiO_2$  در سرباره است که بخش عمده آن را تشکیل می‌دهند. هرچه نسبت  $CaO/SiO_2$



شکل ۷. نتایج آزمایش چسبندگی مخلوط‌های میکروسرفیسینگ

سرباره فولاد دارای کمترین افت وزنی است. به عبارتی، مخلوط‌های B، C و D منجر به کاهش افت وزنی نسبت به مخلوط شاهد A به میزان ۳۶/۱، ۵۰/۶۵ و ۵۶/۲۵ درصد در مدت زمان یک ساعت و ۲۳/۹، ۳۱/۷ و ۳۹/۴ درصد در مدت زمان ۶ روز شدند.

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

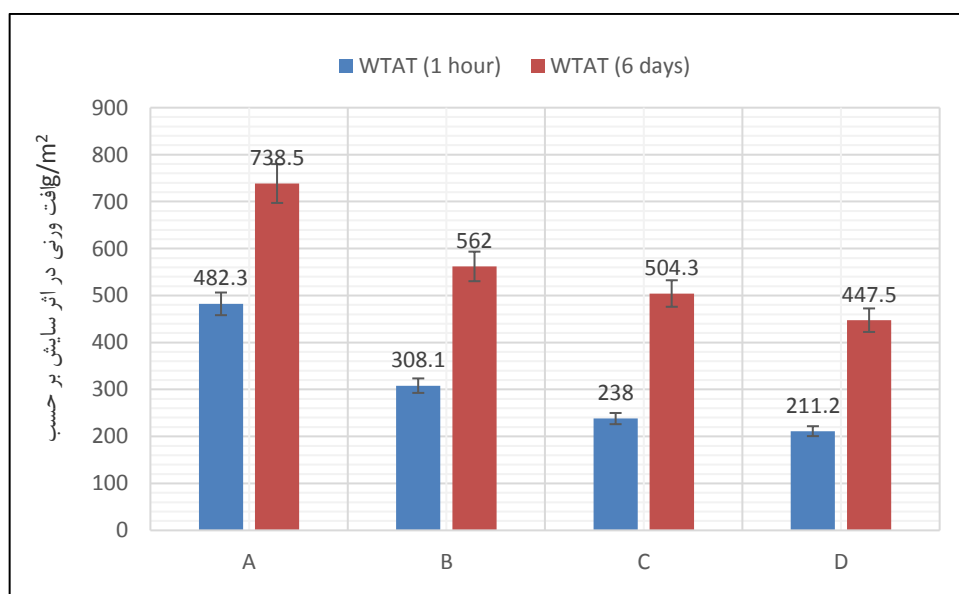
نتایج آزمایش سایش در شرایط مرطوب در مدت زمان یک ساعت و ۶ روز برای مخلوط‌های آسفالتی در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به نتایج، مخلوط‌های حاوی سرباره فولاد دارای افت وزنی به مراتب کمتری نسبت به مخلوط شاهد بوده و مخلوط حاوی ۱۰۰٪



مصالح با قیر پوشیده باشند، ممکن است آب بتواند اتصال مذکور را بر هم بزند. علت پدیده عریان‌شدگی، پیوند ضعیف بین قیر و مصالح سنگی است. بنابراین، در صورتی که مصالح سنگی به‌کار رفته در آسفالت بتواند با قیر پیوند محکم‌تری ایجاد کند، عریان‌شدگی دیرتر اتفاق می‌افتد. سنگدانه‌ها در مخلوط سرباره فولادی از اتصال و چسبندگی مناسبی با قیر برخوردار بوده و همچنین به لحاظ نظری این حادثه به دلیل بافت سطحی زبر، سخت، تیز گوشه و زاویه‌دار بودن سنگدانه‌های فولادی است که موجب درگیری و قفل و بست شدن ذرات به یکدیگر شده و باعث شده تا ذرات در شرایط خیس در برابر جابه‌جایی از خود مقاومت خوبی نشان دهند. از دیگر عوامل افزایش مقاومت در برابر عریان‌شدگی مخلوط‌های سرباره‌ای، درصد قیر بهینه بیشتر نمونه‌های حاوی سرباره و بافت متخلخل این نوع سنگدانه‌ها است.

علت افت وزنی ناشی از سایش بیشتر مخلوط سیلیس ناشی از آن است که اتصال قیر و مصالح سیلیسی از نوع الکترواستاتیک بوده که در آن نیروهای جاذبه، ضعیف هستند. از آنجایی که آب قطبی‌تر از قیر است، با حضور آب در این سیستم، مولکول‌های قیر به راحتی کنار زده شده و آب با مصالح پیوند الکترواستاتیک قوی‌تری تشکیل می‌دهد و اصطلاحاً آسفالت عریان می‌شود. معمولاً وقتی که چسبندگی کافی بین قیر و مصالح ایجاد شد، این پیوند به آسانی از بین نمی‌رود، مگر در مواردی که مولکول آب به اتصال قیر و مصالح نفوذ نموده و آن را از بین ببرد. از مطالب گفته شده دو نتیجه مهم حاصل می‌گردد:

اول اینکه، اگر مصالح مورد استفاده آغشته به آب باشند، امکان اینکه قیر معمولی بتواند در سطح مصالح، جایگزین آب گردد، بسیار کم است. دوم اینکه، چنانچه



شکل ۸. نتایج آزمایش سایش در شرایط مرطوب در مدت زمان ۱ ساعت و ۶ روز

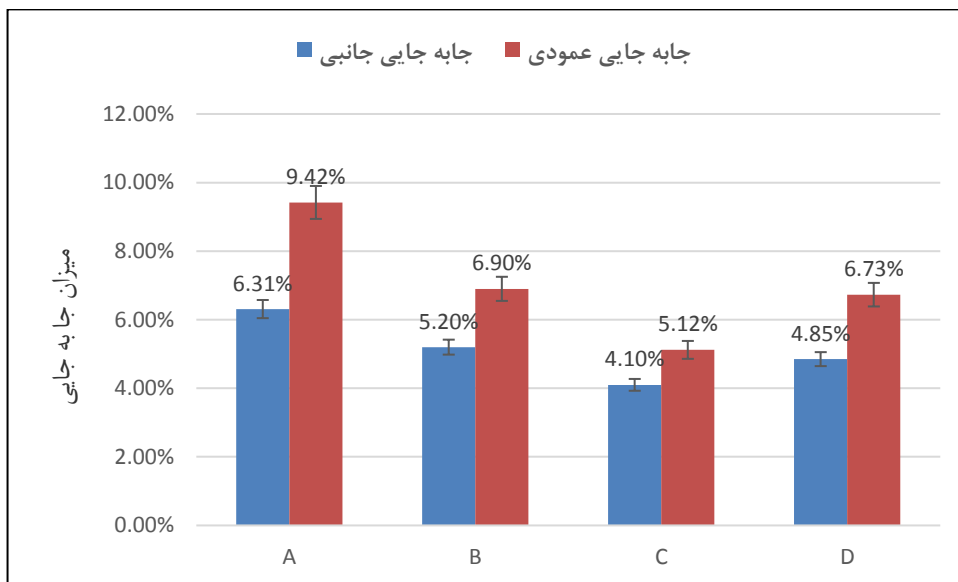
به نتایج حاصل شده از این آزمایش، مشخص شد که میزان جابه‌جایی عمودی و جانبی در میان نمونه‌های A، B، C با افزایش درصد سرباره فولاد، کاهش پیدا کرده است. ولی مخلوط D (حاوی ۱۰۰٪ سرباره فولاد) دارای جابه‌جایی بیشتری نسبت به مخلوط C است؛ مضاف بر آنکه محدوده

#### ۳-۲-۴. آزمایش تعیین میزان تغییر شکل مخلوط‌ها به وسیله چرخ بارگذاری شده

آزمایش بارگذاری چرخ به منظور بررسی عملکرد مخلوط در برابر بارگذاری ترافیک انجام شده و نتایج حاصل از آن برای مخلوط‌های میکروسرفیسینگ به شرح شکل ۹ است. با توجه

عوامل تأثیرگذاری که در شیارشدگی مورد توجه است، مشخصات و ویژگی‌های سنگدانه است. برای آسفالت حفاظتی که ضخامت کمی دارد، اصطکاک سنگدانه‌ها روی یکدیگر و قفل و بست و چسبندگی آن‌ها نسبت به یکدیگر، اصلی‌ترین مکانیسم در برابر شیارشدگی است. با افزایش ضخامت لایه آسفالتی، تأثیر اصطکاک و درگیری یا قفل و بست بین سنگدانه‌ها کمتر شده و از این رو خواص تغییرشکل و چسبندگی قیر و کیفیت اتصال و پیوستگی بین قیر و سنگدانه، بیشترین تأثیر را در برابر خرابی شیارشدگی دارد. با توجه به مطالب بیان شده، سنگدانه‌های سیلیسی در مقایسه با دیگر سنگدانه‌ها، مانند سرباره‌های فولادی، به دلیل اصطکاک کمتر و چسبندگی ضعیف بین قیر و سنگدانه، بیشتر در معرض ابتلا به پدیده شیارشدگی می‌باشند و از این رو استفاده از سرباره‌های فولادی جایگزین بخشی از سنگدانه‌های مخلوط در این نوع آسفالت‌ها برای بهبود عملکرد آن‌ها توصیه می‌شود.

موجود در آیین‌نامه را برآورده نموده است. این افزایش در مخلوط D نسبت به مخلوط C، مرتبط با مقدار مصالح ریزدانه، حفرت‌ها و مقدار قیر مصرفی است. به طوری که حضور حفرت‌های هوای بیشتر باعث افزایش تراکم (فشرده‌گی) مخلوط در طول آزمایش شده و از سوی دیگر، با افزایش درصد قیر مورد نیاز، این قیر به عنوان یک روان‌کننده عمل نموده و باعث کاهش مقاومت برشی در مخلوط می‌شود. از این رو، عمق شیار در این مخلوط افزایش یافته است. این نتیجه با تحقیق دیگر پژوهشگران نیز مطابقت دارد (عاصی و همکاران، ۲۰۰۷؛ حنین و همکاران، ۲۰۱۴؛ اسکاف و همکاران، ۲۰۱۷). به طور کلی، شیارشدگی به علت بارهای مکرر همیشه به عنوان یک مسئله مهم از عملکرد آسفالت در نظر گرفته شده است. نرخ شیارشدگی و عمق آن به عوامل خارجی و داخلی بستگی دارد. عوامل خارجی شامل بار و حجم ترافیک، فشار چرخ، دما و روش‌های ساخت و ساز است. عوامل داخلی شامل ضخامت روسازی، قیر، سنگدانه و مشخصات مخلوط است. یکی از



شکل ۹. نتایج آزمایش جابه‌جایی مخلوط‌های میکروسرفیسینگ با چرخ بارگذاری شده

و دیگر موارد به طور کامل وابسته به نوع و جنس سنگدانه است. بنابراین، گاهی برای رسیدن به عملکرد مورد انتظار، مصالح سنگی طبیعی (از نظر ماهیت سنگدانه یا از لحاظ اقتصادی) مناسب نیستند و مصالح سنگی مصنوعی مانند سرباره فولاد می‌توانند جایگزین مناسبی باشند. در

## ۵. نتیجه‌گیری

در سازه‌هایی که سنگدانه‌ها، بخش عمده مصالح را تشکیل می‌دهند، طبعاً کیفیت عملکرد سازه با کیفیت سنگدانه‌ها ارتباط تنگاتنگی دارد. خصوصیات مانند مقاومت برشی، مقاومت سایشی، نفوذپذیری، جذب آب

• با توجه به آزمایش تعیین میزان تغییرشکل جانبی مخلوط‌ها به وسیله چرخ بارگذاری شده، مشخص گردید که مخلوط سیلیسی در قیر بهینه، دارای عملکرد ضعیف‌تری نسبت به مخلوط‌های حاوی سرباره فولاد بوده و مخلوط حاوی ۶۱٪ سرباره دارای عملکردی مناسب در برابر بارگذاری ترافیک است. مخلوط حاوی ۱۰۰٪ سرباره فولاد به دلیل وجود مصالح سرباره ریزدانه در آن، مقدار قیر مورد نیاز آن افزایش پیدا کرده و افزایش قیر باعث بالا رفتن میزان تغییرشکل در این مخلوط شده است. به طور کلی، این پژوهش، جایگزینی بخشی از سنگدانه‌های سیلیسی را با سرباره‌های فولادی در ساخت مخلوط میکروسرفیسینگ به دلیل خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی بسیار مطلوب پیشنهاد می‌نماید. ولی با افزایش درصد سرباره و جایگزینی ۱۰۰٪ سرباره فولاد با مصالح سنگی، وزن مخصوص، مقاومت در برابر رطوبت و مقاومت لغزندگی سطح افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، با افزایش درصد قیر و هزینه‌های حمل ناشی از افزایش وزن مخصوص نمونه‌ها، جایگزینی ۱۰۰٪ درشت‌دانه با سرباره از دیدگاه اقتصادی چندان منطقی به نظر نمی‌رسد.

## ۶. تشکر و قدردانی

به این وسیله مراتب سپاس از تلاش و زحمات ارزشمند شرکت عمارت گستر پیشگامان نوین در زمینه‌ی انجام آزمایش‌های مخلوط‌های میکروسرفیسینگ و پیشبرد اهداف این پژوهش را تقدیم می‌دارد.

این پژوهش، ارزیابی عملکرد آسفالت حفاظتی میکروسرفیسینگ با استفاده از مصالح سرباره فولادی و مقایسه‌ی آن با سنگدانه‌های سیلیسی بررسی شد. با بررسی و تحلیل نتایج آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه، به‌طور خلاصه می‌توان نتایج را به‌صورت زیر جمع‌بندی نمود:

- نتایج آزمایش‌های مصالح سنگی نشان می‌دهد که سرباره فولادی، خصوصیات لازم برای استفاده در مخلوط‌های میکروسرفیسینگ را داراست و در بسیاری از پارامترها مانند سایش لس‌آنجلس، سلامت مصالح و ارزش ماسه‌ای بهتر از سنگدانه‌های سیلیسی است.
- با توجه به نتایج به‌دست آمده از آزمایش چسبندگی مرطوب، مشخص شد که مخلوط‌های حاوی مصالح سرباره فولادی دارای گشتاور پیچشی بیشتری نسبت به مصالح سنگی کوهی بوده و از این‌رو برای میکروسرفیسینگ به‌منظور بازگشایی ترافیک مناسب‌تر می‌باشند.
- با توجه به نتایج آزمایش سایش در شرایط مرطوب، در مدت زمان یک ساعت مشاهده گردید که مخلوط‌های حاوی سرباره فولادی دارای افت وزنی به مراتب کمتری نسبت به مخلوط شاهد می‌باشند. به عبارتی، سرباره فولاد مقاومت مخلوط آسفالتی را در برابر پدیده عریان‌شدگی افزایش می‌دهد. به نحوی که جایگزین کردن بخش درشت‌دانه مصالح سیلیسی با مصالح درشت‌دانه‌ی سرباره‌ی فولادی، تأثیر به‌سزایی در افزایش مقاومت در برابر پدیده عریان‌شدگی داشته است.

## ۷. مراجع

- Asi, I. M., Qasrawi, H. Y. and Shalabi, F. I. 2007. "Use of steel slag aggregate in asphalt concrete mixes". Canadian Journal of Civil Engineering, 34(8), 902-911. <https://doi.org/10.1139/107-025>
- Aziz, M. M. A., Hainin, M. R., Yaacob, H., Ali, Z., Chang, F. L. and Adnan, A. M. 2014. "Characterisation and utilisation of steel slag for the construction of roads and highways". Mater. Res. Innov., 18(S6): S6-255-S6-259. <https://doi.org/10.1179/1432891714Z.000000000967>.
- Broughton, B. and Lee, S. J. 2012. "Microsurfacing in Texas (FHWA/TX-12/0-6668-1)".

- Broughton, B., Lee, S. J. and Kim, Y. J. 2012. "30 years of microsurfacing: A review". ISRN Civ. Eng. <https://doi.org/10.5402/2012/279643>.
- Brown, E. R., Kandhal, P. S., Roberts, F. L., Kim, Y. R., Lee, D. Y. and Kennedy, T. W. 2009. "Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction". NAPA Research and Education Foundation.
- Chen, J. S. and Wei, S. H. 2016. "Engineering properties and performance of asphalt mixtures incorporating steel slag". *Constr. Build. Mater.*, 128: 148-153. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.074>.
- Chen, Z., Xie, J., Xiao, Y., Chen, J. and Wu, S. 2014. "Characteristics of bonding behavior between basic oxygen furnace slag and asphalt binder". *Constr. Build. Mater.*, 64: 60-66. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.074>.
- Fakhri, M. and Ahmadi, A. 2017. "Evaluation of fracture resistance of asphalt mixes involving steel slag and RAP: Susceptibility to aging level and freeze and thaw cycles". *Constr. Build. Mater.*, 157: 748-756. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.116>.
- Golalipour, A., Jamshidi, E., Niazi, Y., Afsharikia, Z. and Khadem, M. 2012. "Effect of aggregate gradation on rutting of asphalt pavements". *Procedia-Soc. Behav. Sci.*, 53: 440-449. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.895>.
- Goli, H., Hesami, S. and Ameri, M. 2017. "Laboratory evaluation of damage behavior of warm mix asphalt containing steel slag aggregates". *J. Mater. Civ. Eng.*, 29(6): 04017009. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001832](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001832).
- Gransberg, D. D. 2010. "NCHRP synthesis 411: Microsurfacing; A synthesis of highway practices". Transport. Res. Board of the Nat. Acad., Washington, DC. <https://doi.org/10.17226/14464>.
- Hainin, M. R., Rusbintardjo, G., Hameed, M. A. S., Hassan, N. A. and Yusoff, N. I. M. 2014. "Utilisation of steel slag as an aggregate replacement in porous asphalt mixtures". *J. Teknol. (Sci. Eng.)*, 69(1): 67-73.
- ISSA A143. 2010. "Recommended performance guideline for micro surfacing". International Slurry Surfacing Association.
- ISSA TB 100. 2017a. "Laboratory test method for wet track abrasion of slurry surfacing systems". Technical Bulletin, International Slurry Surfacing Association.
- ISSA TB 111. 2017b. "Outline guide design procedure for slurry seal". Technical Bulletin, International Slurry Surfacing Association.
- ISSA TB 147. 2017c. "Test method for measurement of stability and resistance to compaction, vertical and lateral displacement of multilayered fine aggregate cold mixes". Technical Bulletin: International Slurry Surfacing Association.
- ISSA TB 139. 2017d. "Test method to classify emulsified asphalt/aggregate mixture systems by modified cohesion tester measurement of set and cure characteristics". Technical Bulletin: International Slurry Surfacing Association.
- Johannes, P. T. 2014. "Development of an improved mixture design framework for slurry seals and micro-surfacing treatments". The University of Wisconsin, Madison.
- Kambole, C., Paige-Green, P., Kupolati, W. K., Ndambuki, J. M. and Adeboje, A. O. 2017. "Basic oxygen furnace slag for road pavements: A review of material characteristics and performance for effective utilisation in southern Africa". *Constr. Build. Mater.*, 148: 618-631. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.036>.
- Kavussi, A. and Hafezzadeh, R. 2016. "The application of microsurfacing in repairing pavement surface rutting". *Exp. Res. Civ. Eng.*, 3(5): 29-39. Retrieved from [http://jerce.sru.ac.ir/article\\_536.html](http://jerce.sru.ac.ir/article_536.html).
- Kucharek, A. S., Keith Davidson, J., Moore, T. and Linton, T. 2010. "Performance review of micro surfacing and slurry seal applications in Canada". CTAA Annual Conference Proceedings, Canadian Technical Asphalt Association.
- Labi, S., Lamptey, G. and Kong, S. H. 2007. "Effectiveness of microsurfacing treatments". *J. Transport. Eng.*, 133(5): 298-307. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2007\)133:5\(298\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2007)133:5(298)).
- Masoudi, S., Abtahi, S. M. and Goli, A. 2017. "Evaluation of electric arc furnace steel slag coarse aggregate in warm mix asphalt subjected to long-term aging". *Constr. Build. Mater.*, 135: 260-266. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.177>.
- Otadi, A. and Tanzadeh, J. 2018. "Testing and evaluating the effect of adding fibers and nanomaterials on improving the performance properties of thin surface asphalt". *J. Test. Eval.*, 47(1). <https://doi.org/10.1520/JTE20170409>.
- Palankar, N., Ravi Shankar, A. U. and Mithun, B. M. 2017. "Investigations on alkali-activated slag/fly ash concrete with steel slag coarse aggregate for pavement structures". *Int. J. Pavement Eng.*, 18(6): 500-512. <https://doi.org/10.1080/10298436.2015.1095902>.
- Peshkin, D. G., Hoerner, T. E. and Zimmerman, K. A. 2004. "Optimal timing of pavement preventive maintenance treatment applications". *Transport. Res. Board*, Vol. 523.

- Poursoltani, M. and Hesami, S. 2018. "Laboratory investigation of the effect of using reclaimed asphalt pavement on micro surfacing mixture properties". *J. Transport. Res.*, 15(2): 237-247. Retrieved from [http://www.trijournal.ir/article\\_68508.html](http://www.trijournal.ir/article_68508.html).
- Prapaitrakul, N., Han, R., Jin, X., Martin, A. E. and Glover, C. J. 2010. "Comparative study on recovered binder properties using three asphalt emulsion recovery methods". *J. Test. Eval.*, 38(6): 653-659. doi:10.1520/JTE102739.
- Robati, M. 2011. "Evaluation of a modification of current micro-surfacing mix design procedures". MSc. in construction engineering, École de Technologie Supérieure, Montreal.
- Robati, M., Carter, A. and Perraton, D. 2015. "Evaluation of a modification of current microsurfacing mix design procedures". *Can. J. Civ. Eng.*, 42(5): 319-328. <https://doi.org/10.1139/cjce-2013-0578>.
- 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.
- Wang, G. C. 2016. "Slag use in asphalt paving". *Utilization of Slag in Civil Infrastructure Construction*, pp. 201-238, Elsevier, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100381-7.00010-0>.
- Wimsatt, A. and Scullion, T. 2003. "Selecting rehabilitation strategies for flexible pavements in Texas". *Transport. Res. Board*, 82<sup>nd</sup> Annual Meeting, Washington DC, USA.
- Wood, T. 2007. "Minnesota experiences with innovative microsurfacing". *Proceedings, Midwest Pavement Preservation Partnership*.
- Xiao, Y. 2013. "Towards a performance evaluation method for durable and sustainable thin surfacings". <https://doi.org/10.4233/uuid:eccb2deb-b329-4c7c-abf09250af716422>.

