

مشخصات عملکردی مخلوط میکروسرفیسینگ حاوی پودر سرباره فولاد کوره اکسیژنی به‌عنوان جایگزین فیلر طبیعی

حسن دیوانداری*، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نوشهر

محمد حیدری، دانشجوی کارشناسی ارشد گرایش راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه
شمال، آمل

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

صنعت ایران، تهران

Email: h.divandari@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۰۳ - پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۲۸

چکیده

با توجه به اهمیت راه‌ها در ایجاد ارتباط بین نواحی مختلف، همواره مسئله تعمیر و نگهداری راه‌ها امری حیاتی برای سازمان‌های راهداری یا حمل‌ونقل جاده‌ای محسوب می‌شود. یکی از اثربخش‌ترین شیوه‌های نگهداری پیشگیرانه و تعمیر راه‌ها آسفالت حفاظتی میکروسرفیسینگ است. هدف این پژوهش، بررسی به‌کارگیری فیلر سرباره فولاد کوره اکسیژن-بازی در طرح اختلاط میکروسرفیسینگ جهت سنجش عملکرد آن است. برای این منظور، ابتدا ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی مصالح سنگی و فیلر سرباره فولاد مورد تحقیق و مطالعه واقع شده و سپس جهت بررسی عملکرد مخلوط‌ها، از پنج ترکیب مختلف حاوی صفر، ۲/۵، ۵/۰، ۷/۵ و ۱۰/۰ درصد فیلر سرباره فولاد بر حسب وزن کل سنگدانه استفاده گردید. ارزیابی نمونه‌ها به‌واسطه آزمایش‌های سایش در شرایط مرطوب، چرخ بارگذاری شده- جابه‌جایی، چرخ بارگذاری شده- چسبندگی ماسه و آزمایش‌های چسبندگی مرطوب در ۳۰ و ۶۰ دقیقه، مطابق با دستورالعمل ASTM D6372 و ISSA A143 انجام شد. نتایج طراحی نشان داد که مخلوط‌های حاوی فیلر سرباره فولاد، موجب بهبود عملکرد میکروسرفیسینگ می‌شوند. همچنین، در میان مخلوط‌ها، مخلوط حاوی ۷/۵ درصد فیلر سرباره فولاد نسبت به نمونه شاهد موجب افزایش چسبندگی در مدت زمان ۳۰ و ۶۰ دقیقه به ترتیب به میزان ۲۸ و ۴۵ درصد، بهبود مقاومت در برابر سایش به میزان ۴۸/۳ درصد، کاهش قیر زدگی مخلوط به میزان ۲۹/۳ درصد و افزایش مقاومت در برابر جابه‌جایی عمودی و جانبی به ترتیب به میزان ۴۷/۶ و ۴۰/۰ درصد گردید. این مخلوط نسبت به نمونه شاهد دارای ۱ درصد قیر امولسیون بیشتر به‌منظور دستیابی به چسبندگی مناسب در زمان مشخص است.

واژه‌های کلیدی: آسفالت حفاظتی، نگهداری پیشگیرانه، پودر سرباره فولاد، میکروسرفیسینگ

۱. مقدمه

در طول سال‌های اخیر، برنامه نگهداری پیشگیرانه راه‌ها توسط ادارات حمل‌ونقل به‌عنوان روشی مؤثر و کم‌هزینه برای حفظ ظرفیت سازه‌ای روسازی راه‌ها، افزایش عمر استفاده از روسازی و ارائه خدمات مناسب در هنگام روبه‌رو شدن با محدودیت‌های بودجه‌ای، معرفی گردیده است (گرانسبرگ، ۲۰۱۰؛ یوهانس، ۲۰۱۴). میکروسرفیسینگ، از میان شیوه‌های گوناگون نگهداری پیشگیرانه، در صورت استفاده صحیح، به‌عنوان روشی شناخته می‌شود که دارای مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی است (پیتنجر و گرانسبرگ، ۲۰۲۰؛ باس و کلیپول، ۲۰۲۱). این مخلوط شامل قیر امولسیون کاتیونی اصلاح شده با پلیمر، سنگدانه با دانه‌بندی تعیین شده، فیلرهای معدنی فعال (اغلب سیمان) و آب است (تاکامورا و جیمز، ۲۰۱۵؛ دونگ و همکاران، ۲۰۱۸). در این بین، فیلر به‌عنوان جزئی از مخلوط آسفالتی، نقش مهمی در خواص عملکردی آسفالت دارد. تغییرات در نوع و مقدار فیلر بر خواص مخلوط آسفالت اثرگذار است (چودری و همکاران، ۲۰۲۱؛ آود و همکاران، ۲۰۲۲). فیلر در آسفالت به‌طور کلی به‌عنوان ماده ریزتر از ۰/۰۷۵ میکرومتر (عبوری از الک ۲۰۰) تعریف می‌شود و شامل فیلر تولید شده مانند خاکستر بادی، آهک، سرباره، پودر آهن ضایعاتی و فیلر طبیعی که بیشتر از خرد کردن و غربال‌سازی سنگدانه‌ها به‌دست می‌آید، است (رضایی لری و همکاران، ۲۰۲۱). استخراج سنگدانه‌های طبیعی جهت استفاده در ساخت‌وسازهای عمرانی نگرانی‌های شدید زیست‌محیطی مانند جنگل‌زدایی، از بین رفتن چشم‌انداز طبیعی و تولید گردوغبار را ایجاد می‌کند. در بسیاری از مناطق، سنگ‌دانه‌های طبیعی با کیفیت خوب در دسترس نیستند و حتی معادن سنگدانه‌های طبیعی نیز محدود شده است که باعث کمبود سنگدانه‌ها و افزایش کلی هزینه پروژه‌های بزرگراهی شده است (پاتانیک و همکاران، ۲۰۲۱). از سوی دیگر، با افزایش پروژه‌های

ساختمانی، فعالیت‌های صنعتی، رشد جمعیت، شهرنشینی، فعالیت‌های توسعه‌ای و تغییر در سبک زندگی، مقادیر مواد زائد افزایش یافته است. به‌منظور به حداقل رساندن تأثیرات زیست‌محیطی ساخت و نگهداری راه‌ها، لازم است که صرفه‌جویی در مصرف انرژی و منابع انجام گیرد. با توجه به افزایش هزینه مواد اولیه و کاهش منابع طبیعی، بسیاری از محققان در ارزیابی امکان بازیافت ضایعات صنعتی به‌عنوان مواد مخلوط آسفالتی فعالیت می‌کنند (جورجیو و لوئیزوس، ۲۰۲۱؛ آود و همکاران، ۲۰۲۲). بیشتر این مطالعات بر اساس استفاده از مواد زائد است که نه تنها مشکل دفع زیاده را برطرف می‌کند، بلکه باعث صرفه‌جویی و حفظ مواد طبیعی و غیرقابل تجدید نیز می‌شود (استلیک و همکاران، ۲۰۱۵؛ باریسیچ و همکاران، ۲۰۱۷). بازیافت محصولات جانبی کارخانه‌های فولادسازی، از جمله سرباره فولاد، یکی از این اقدامات برای کاهش مصرف منابع تجدیدناپذیر است (بلانکندال و همکاران، ۲۰۱۴؛ مسعودی و همکاران، ۲۰۱۷). سرباره فولاد، محصول جانبی فرآیند تولید فولاد است که با توجه به خصوصیات آن، می‌توان آن را جایگزین بخشی از سنگدانه‌های مخلوط‌های آسفالتی نمود (کاووسی و قاضی‌زاده، ۲۰۱۴). به ازای تولید هر یک تن فولاد حدود ۳۰۰ کیلوگرم سرباره تولید و در محوطه کارخانه‌های فولادسازی دپو می‌شود (شن و همکاران، ۲۰۰۹). دپو شدن این محصول نه تنها فضای بسیار وسیعی از محوطه کارخانه‌های فولاد و آهن را اشغال کرده، بلکه آب-شستگی سرباره فولاد به علت وجود بعضی فلزات سنگین در ترکیبات این محصول، می‌تواند برای منابع آب زیرزمینی خطرناک باشد (فخری و همکاران، ۱۳۹۶؛ کاووسی و همکاران، ۱۳۹۴).

میزان بهینه استفاده از مواد پسماند به‌عنوان بخشی از سنگدانه علاوه بر آنکه برای محیط‌زیست سودمند است، می‌تواند در عملکرد مخلوط‌های آسفالتی و بتنی نیز مفید

جایگزین فیلر سنگ آهک معمول در مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی با دانه‌بندی متراکم توسط سیمون و همکاران (۲۰۱۹) مورد بررسی قرار گرفت. خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالت حاوی فیلر پودر شیشه از نظر مدول سختی کششی غیرمستقیم، مقاومت کششی غیرمستقیم و ویژگی‌های خزش بررسی شد. با توجه به نتایج به دست آمده، فیلر پودر شیشه می‌تواند عملکرد مخلوط‌ها را از نظر ظرفیت تحمل و مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی بهبود بخشد. در مطالعه‌ای از کی‌منش و همکاران (۲۰۲۱) طرح اختلاط و عملکرد میکروسرفیسینگ حاوی فیلر سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی (EAF) مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق، مخلوط‌های میکروسرفیسینگ با پنج ترکیب مختلف حاوی صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد فیلر سرباره فولاد کوره قوس الکتریک جایگزین سنگدانه‌های عبوری از الک ۰/۰۷۵ میلی‌متر ساخته شد. ارزیابی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از آزمایش‌های چرخ بارگذاری شده، چسبندگی و سایش در شرایط مرطوب صورت گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که مخلوط حاوی ۵۰٪ فیلر سرباره فولاد دارای بهترین عملکرد در میان مخلوط‌ها بوده و موجب ارتقاء خصوصیات عملکردی میکروسرفیسینگ شامل افزایش چسبندگی در مدت زمان ۳۰ و ۶۰ دقیقه به ترتیب به میزان ۴۱/۶ و ۲۱/۷ درصد، افزایش مقاومت در برابر سایش به میزان ۲۷/۹۲ درصد و کاهش جابه‌جایی عمودی به میزان ۵۲/۵ درصد خواهد شد.

تأثیر مهم مواد بازیافتی در بتن و مخلوط‌های گرم آسفالتی مورد مطالعه قرار گرفته است. اما مطالعات محدودی در اثربخشی آن در مخلوط‌های آسفالتی سرد، مخصوصاً میکروسرفیسینگ، انجام شده است. استفاده از آسفالت‌های حفاظتی به‌عنوان یک عمل پیشگیرانه در نگهداری و تعمیر رویه‌های آسفالتی، با افزایش قیمت روسازی‌های آسفالتی، رواج یافته است. با بازیافت سرباره فولاد در آسفالت حفاظتی میکروسرفیسینگ

واقع شود (چودری و همکاران، ۲۰۲۰). در این خصوص، مطالعاتی توسط پژوهشگران در استفاده از مواد ضایعاتی به عنوان مواد جایگزین فیلر در مخلوط‌های آسفالتی انجام شده است. عربانی و همکاران (۲۰۱۷) به ارزیابی تأثیر مواد ضایعاتی به عنوان فیلر در آسفالت داغ پرداختند. مخلوط‌ها حاوی پودر شیشه ضایعاتی، پودر آجر ضایعاتی، خاکستر پوسته برنج و پودر سنگ (مخلوط شاهد) ساخته شده و درصد بهینه چسباننده قیری برای هر مخلوط تعیین شد. خواص مخلوط آسفالتی توسط مارشال، مدول سفتی کششی غیرمستقیم و آزمون خستگی کششی غیرمستقیم بررسی شد. نتایج نشان داد که مخلوط‌های حاوی پودر شیشه ضایعاتی و پودر آجر ضایعاتی عمر خستگی طولانی‌تر و عملکرد بهتری نسبت به سایر مخلوط‌ها داشت. در دیگر پژوهش، چودری و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی مخلوط‌های آسفالت حاوی غبار آجر، غبار بتن بازیافتی، غبار سنگ آهک، خاکستر برنج، پودر شیشه، آهک کاربید و باطله مس پرداختند. عملکرد مخلوط‌های آسفالت حاوی مواد زائد مختلف در برابر شیارشدگی، ترک‌خوردگی و حساسیت به رطوبت ارزیابی شده و مقایسه آن‌ها با مخلوط معمولی حاوی پودر سنگ انجام شد. نتایج نشان داد که غبار سنگ آهک و خاکستر پوسته برنج به عنوان مواد جایگزین فیلر به ترتیب دارای بهترین و بدترین عملکرد می‌باشند. در مطالعه‌ای توسط میستری و همکاران (۲۰۱۹)، ارزیابی آزمایشگاهی خاکستر پوسته برنج و خاکستر بادی به عنوان فیلرهای جایگزین در آسفالت داغ انجام شد. عملکرد مخلوط‌ها توسط مقاومت کششی غیرمستقیم، مقاومت مارشال و نسبت مقاومت کششی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بررسی نشان داد که عملکرد آسفالت با افزودن خاکستر پوسته برنج و خاکستر بادی بهبود می‌یابد. مضاف بر اینکه درصد قیر بهینه در مخلوط‌های حاوی فیلر ضایعاتی نسبت به نمونه شاهد کاهش یافت. کاربرد آزمایشگاهی پودر شیشه ضایعاتی به عنوان فیلر

۲-۱. سنگدانه و پودر سرباره

در این پژوهش، از مصالح سنگی سیلیسی (استان مازندران) و سرباره فولاد کارخانه ذوب‌آهن اصفهان (استان اصفهان) به همراه دانه‌بندی نوع II مطابق با دستورالعمل ISSA A143 در مخلوط میکروسرفیسینگ استفاده شد. محدوده‌ی دانه‌بندی در اندازه صفر تا ۵ میلی‌متر بوده که در جدول ۱ قابل مشاهده است. ویژگی سنگدانه‌های مخلوط پس از آزمایش در این پژوهش در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین، ترکیب شیمیایی سنگدانه و پودر سرباره فولاد کارخانه ذوب‌آهن اصفهان پس از انجام آزمایش‌های آنالیز شیمیایی XRF به شرح جدول ۳ است. همان‌طور که از نتایج جدول ۳ مشخص است، مصالح سنگی مورد استفاده در این پژوهش از نوع سیلیسی بوده و پودر سرباره نیز دارای مقدار قابل توجهی اکسید کلسیم به میزان ۵۷/۹۲ درصد نسبت به مصالح معدنی است. چسبندگی سنگدانه‌ها به قیر با خصوصیت قلیایی آن یعنی نرخ CaO/SiO_2 سنگدانه بررسی می‌شود. لذا، نسبت زیاد CaO/SiO_2 برای سرباره فولاد نشان‌دهنده قلیایی‌تر بودن این نوع مصالح بوده و عاملی برای چسبندگی بهتر به قیر است. بنابراین، سرباره‌های فولاد استفاده شده در این تحقیق خاصیت بازی داشته که در تقابل با قیری با خاصیت اسیدی بیشتر، پیوند قوی را تشکیل خواهند داد.

۲-۲. قیر امولسیون پلیمری

در این تحقیق، برای تهیه قیر امولسیون پلیمری، از قیر با رده نفوذ ۶۰-۷۰ تهیه شده از شرکت نفت پاسارگاد و امولسیفایر کاتیونی کندشکن با نام تجاری CECA ساخت کشور فرانسه استفاده گردید. در ادامه، جهت اصلاح قیر امولسیون از پلیمر لاتکس استایرن بوتادین رابر (SBR) با نام اختصاری Polylatex C ساخت کشور اسپانیا، با چگالی ۰/۹۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب، استفاده گردید.

مخلوطی دوست‌دار محیط‌زیست و اقتصادی حاصل شده که می‌توان انتظار داشت خصوصیات عملکردی حداقل برابر با مخلوط‌های رایج داشته باشد. در ایران، استفاده از سرباره به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان رایج بوده، اما هنوز به‌کارگیری سرباره فولاد به‌عنوان سنگدانه چندان متداول نیست. همچنین، حجم زیادی از این نوع سرباره در کارخانه‌های ذوب‌آهن کشور وجود دارد که آن‌ها را در انبار کردن دچار مشکل کرده است. لذا، در این تحقیق، با ساخت نمونه‌هایی از مخلوط میکروسرفیسینگ، به بررسی اثر افزودن درصد‌های مختلف پودر سرباره فولاد کوره اکسیژن-بازی بر خواص این نوع از آسفالت حفاظتی پرداخته شده است. در این راستا، ابتدا مشخصات فیزیکی و شیمیایی مصالح سنگی و پودر سرباره مورد ارزیابی قرار گرفته و سپس به‌منظور ارزیابی عملکرد مخلوط حاوی پودر سرباره، پنج ترکیب مختلف حاوی صفر، ۲/۵، ۵/۰، ۷/۵ و ۱۰/۰ درصد پودر سرباره جایگزین فیلر بر اساس وزن کل سنگدانه تهیه شد. به‌منظور بررسی و مقایسه خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی، از آزمایش‌های چسبندگی، سایش در شرایط مرطوب و چرخ بارگذاری شده (جهت تعیین میزان قیرزدگی و جابه‌جایی مخلوط‌ها) مطابق با دستورالعمل ISSA A143 و استاندارد ASTM D6372 انجام شد.

۲. مواد و مصالح

مخلوط میکروسرفیسینگ شامل قیر امولسیون کاتیونی اصلاح شده با پلیمر، مصالح ۱۰۰ درصد شکسته با دانه‌بندی مشخص، فیلر فعال معدنی، آب و افزودنی‌های شیمیایی برای کنترل زمان شکست است. هر کدام از مواد بایستی دارای الزامات مشخص مطابق با ISSA A143 و ASTM D6372 بوده که در ادامه به توضیح هر یک از آن‌ها پرداخته می‌شود (ISSA, 2015; ASTM D6372, 2015). (A143, 2010).

جدول ۱. دانه بندی مصالح سنگی میکروسرفیسینگ

درصد عبور کرده از الک	درصد حدود رواداری		اندازه الک
	نسبت به دانه بندی کارگاهی	نوع II محدوده آیین نامه ISSA	
۱۰۰	±۵	۱۰۰-۹۰	۴/۷۵ میلی متر (شماره ۴)
۷۲	±۵	۹۰-۶۵	۲/۳۶ میلی متر (شماره ۸)
۴۶	±۵	۷۰-۴۵	۱/۱۸ میلی متر (شماره ۱۶)
۳۰	±۵	۵۰-۳۰	۶۰۰ میکرون (شماره ۳۰)
۲۱	±۵	۳۰-۱۸	۳۰۰ میکرون (شماره ۵۰)
۱۶	±۴	۲۱-۱۰	۱۵۰ میکرون (شماره ۱۰۰)
۱۰	±۳	۱۵-۵	۷۵ میکرون (شماره ۲۰۰)

جدول ۲. خصوصیات مصالح مورد استفاده در مخلوط میکروسرفیسینگ مطابق با ISSA A143

آزمایش ها	استاندارد	نتیجه		مشخصه ISSA A143
		ریزدانه	درشت دانه	
وزن مخصوص حقیقی (gr/cm^3)	ASTM C127 & C128	۲/۶۹	۲/۶۷	-
وزن مخصوص ظاهری (gr/cm^3)	ASTM C127	۲/۷۵	۲/۷۳	-
درصد جذب آب درشت دانه	ASTM C127	۱/۵۳	۱/۳۳	-
ارزش ماسه ای مصالح ریزدانه و خاک ها	ASTM D2419	٪۷۴	-	حداقل ٪۶۵
سلامت مصالح با سولفات سدیم	ASTM C88	٪۳	-	حداکثر ٪۱۵
مقاومت سایشی در ماشین لس آنجلس	ASTM C131	-	٪۱۴	حداکثر ٪۳۰

جدول ۳. ترکیب شیمیایی مواد مورد استفاده در این پژوهش

نوع مواد	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	CaO	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	MgO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	SrO	L.O.I*
سرباره	۰/۳۸	۱۵/۶	۶/۳	۱/۲	۰/۵۲	۵۷/۹	۰/۲	۰/۶	۰/۰۲	-	۳/۷	-	-	۰/۰۲	۱۲/۳
مصالح کوهی	۱/۱	۵/۳	۵۳/۶	-	-	۲۵/۶	۰/۴	-	-	۱/۱	-	۴/۲	۳/۱	-	۳/۹

به طوری که در این روش، پلیمر مایع 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

جهت تهیه قیر امولسیون پلیمری از یک آسیاب کلوئیدی با سرعت چرخشی ۲۸۴۰ دور در دقیقه استفاده گردید. جهت اصلاح قیرهای امولسیون با پلیمر از فرمولاسیون ثابت و روش پیش اختلاط استفاده شد.

روی قیر باقیمانده حاصل از روش تبخیر در دمای کم انجام می‌شود. در حقیقت، به دلیل استفاده از قیر امولسیون در مخلوط‌های سرد، فرآیند تبخیر و تقطیر در دماهای زیاد برای بازیابی قیر باقی‌مانده نمی‌تواند عمل‌آوری میدانی را شبیه‌سازی کند و باعث پیرشدگی، آسیب رساندن به اصلاح‌کننده‌های پلیمری، جدایی پلیمر از قیر و اکسیداسیون بیشتر از نمونه‌های واقعی میدانی می‌گردد (پراپیتراکول و همکاران، ۲۰۱۰؛ زال نژاد و حسامی، ۲۰۲۰).

اضافه شده و مورد اختلاط و امولسیون‌سازی قرار گرفت. روش تولید قیر امولسیون مطابق استاندارد ASTM D2397 و مطالعات دیگر پژوهشگران انجام شد (ایزدی و همکاران، ۱۳۹۹؛ کی‌منش و همکاران، ۱۴۰۰). مشخصات قیر امولسیون تولیدی در جدول ۴ ارائه شده است. بیان این موضوع ضروری است که آزمایش تبخیر سرد قیر امولسیون اصلاح شده با پلیمر مطابق با ASTM D7497 (۲۰۲۱) روی قیرهای امولسیونی انجام گرفته است. سپس، آزمایش‌های نقطه نرمی قیر و درجه نفوذ

جدول ۴. مشخصات قیر امولسیونی اصلاح شده با پلیمر

رواداری قابل پذیرش	نتیجه‌ی آزمایش	روش آزمایش	آزمایش
۲۰-۱۰۰	۲۴	AASHTO T59	کندروانی سی بولت- فیورل در دمای ۲۵°C، ثانیه نشست (پایداری) در انبار کردن قیر امولسیون، ۲۴ ساعت، %
حداکثر ۱	۰/۵	ASTM D6930	تقطیر قیر امولسیون، جرم وزنی %
حداقل ۶۲	۶۲	ASTM D7497	الک، %
حداکثر ۰/۱	۰/۰۲	ASTM D244	اندود، %
-	۹۸	AASHTO T59	بار ذرات
مثبت	مثبت	AASHTO T59	
آزمایش‌های روی قیر باقی‌مانده از تقطیر قیر امولسیون			
۵۷	۶۴	ASTM D36	نقطه نرمی قیر با آزمایش حلقه و گلوله، °C
۴۰-۹۰	۶۲	ASTM D5	درجه نفوذ در ۲۵°C، ۱۰۰ گرم، ۵ ثانیه

شکست قیر امولسیون است. در این پژوهش، از سیمان پرتلند نوع II به میزان ۱ درصد برای بهبود خصوصیات مخلوط میکروسرفیسینگ استفاده شد. آب استفاده شده در نمونه‌های آسفالتی، آبی است که در هنگام هم زدن مخلوط اضافه شده و علاوه بر آبی است که در قیر امولسیونی وجود دارد. آب اضافه شده هیدراسیون سیمان را تسریع کرده و باعث پوشش بهتر مصالح و بهبود کارایی مخلوط می‌شود (کومار و رینتاتیانگ، ۲۰۱۶؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۹). آب مورد استفاده باید تمیز و عاری از مواد مضر مانند نمک‌ها و سولفات‌ها باشد چرا که ممکن است باعث ایجاد واکنش‌های شیمیایی

۲-۳. فیلر فعال (سیمان) و آب

از جمله فیلرهای فعال معدنی که می‌توان در مخلوط میکروسرفیسینگ استفاده کرد، سیمان پرتلند، آهک هیدراته و خاکستر بادی است. این مواد، چسبندگی مخلوط را نیز افزایش داده و جدایی مصالح سنگی را به حداقل می‌رسانند. در واقع یون‌های قیر امولسیون با یون‌های هیدروکسیل موجود در فیلرهای فعال معدنی واکنش داده و موجب می‌شوند تا قیر امولسیون سریع‌تر شکسته شده و عمل‌آوری مخلوط میکروسرفیسینگ سریع‌تر انجام شود (وانگ و همکاران، ۲۰۱۹). استفاده از سیمان به میزان مناسب، به‌عنوان کنترل‌کننده‌ای برای زمان

مصالح، طرح اختلاط و ارزیابی عملکرد مخلوط‌ها با آزمایش‌های زمان اختلاط، چسبندگی مرطوب، سایش در شرایط مرطوب، تعیین حداکثر قیر به‌وسیله چرخ بارگذاری شده- چسبندگی ماسه و ارزیابی میزان جابه‌جایی عمودی با چرخ بارگذاری شده انجام می‌شود (یوهانس، ۲۰۱۴؛ کی‌منش و همکاران، ۲۰۲۱). در تعیین مقدار بهینه قیر امولسیون، به‌منظور به‌دست آوردن محدوده مجاز قیر امولسیون و تعیین حداقل و حداکثر آن، به ترتیب نتایج آزمایش‌های سایش در شرایط مرطوب و آزمایش چرخ بارگذاری شده- چسبندگی ماسه مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به الزامات دستورالعمل ISSA A143، اگر اختلاف بین حداقل و حداکثر قیر بیشتر از ۳ درصد باشد، مقدار بهینه قیر امولسیون در وسط دامنه ۳ درصدی از بیشترین مقدار تعیین شده برای قیر باقی‌مانده است. همچنین، اگر مقدار حداقل و حداکثر قیر باقی‌مانده کمتر از ۳ درصد باشد، مقدار بهینه قیر امولسیون با توجه به الزام‌های حداقل و حداکثر قیر، وسط دامنه مورد نظر انتخاب می‌گردد (ایزدی و همکاران، ۲۰۲۰؛ کی‌منش و همکاران، ۲۰۲۱).

ناخواسته در مخلوط شود (بیستا، ۲۰۲۰؛ لی و همکاران، ۲۰۲۱). آب مورد استفاده در این تحقیق برای رسیدن به کارایی مناسب، آب شرب با درجه قلیایی/اسیدی ۷ بود که در تمامی مخلوط‌های میکروسرفیسینگ پلیمری استفاده گردید.

۳. برنامه آزمایشگاهی

در این تحقیق، پودر سرباره کوره اکسیژن- بازی به‌عنوان جایگزین فیلر در مقادیر صفر، ۲/۵، ۵/۰، ۷/۵ و ۱۰/۰ درصد بر اساس وزن کل سنگدانه در مخلوط‌های میکروسرفیسینگ مورد استفاده واقع شد. درجه‌بندی 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. در طراحی مخلوط‌های میکروسرفیسینگ، پس از انتخاب مصالح سنگی و قیر امولسیونی مناسب سازگار با سنگدانه، آزمایش‌های لازم مطابق با استاندارد ASTM D6372 روی مصالح انجام گرفته و الزامات مربوط به آن مورد بررسی قرار می‌گیرند. پس از برآورده شدن الزامات

جدول ۵. درجه‌بندی سنگدانه‌ها برای هر یک از مخلوط‌های آسفالتی

نوع مخلوط	فیلر سرباره کوره اکسیژن- بازی جایگزین فیلر مخلوط شاهد بر حسب وزن کل سنگدانه، %
S0.0	۰
S2.5	۲/۵
S5.0	۵/۰
S7.5	۷/۵
S10.0	۱۰/۰

۳-۱. آزمایش های طرح اختلاط و بررسی عملکرد

مخلوط های 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 هر کدام از آن ها در ادامه شرح داده شده است.

آزمایش زمان اختلاط مخلوط میکروسرفیسینگ یکی از فرآیندهای مهم در جهت طراحی و تعیین مقادیر اولیه مخلوط میکروسرفیسینگ است. آزمایش زمان اختلاط شامل اختلاط نسبت هایی از قیر امولسیون، سنگدانه، آب و فیلر فعال است (ISSA, 2017e). در این آزمایش ۲۰۰ گرم از سنگدانه به همراه فیلر فعال معدنی، آب و قیر امولسیون طی مدت ۳۰ ثانیه در دمای ۲۵ درجه سلسیوس مخلوط می گردد. اختلاط تا زمانی که مخلوط آسفالت سفت گردیده و قیر امولسیون بشکند ادامه می یابد. مدت زمان شکستن مخلوط در اثر هم زدن و اختلاط به عنوان زمان اختلاط گزارش می شود.

آزمایش چسبندگی مرطوب برای مشخص نمودن زمان عمل آوری، مقاومت در برابر ترافیک و چسبندگی اولیه مخلوط مطابق با دستورالعمل ISSA TB 139 انجام می شود (ISSA, 2017d). از دستگاه آزمایش چسبندگی جهت اندازه گیری و تعیین زمان عمل آوری استفاده می شود. به بیان دیگر، یک مخلوط مناسب مطابق با نتایج حاصل شده بعد از ۳۰ و ۶۰ دقیقه عمل آوری در دمای ۲۵ درجه سلسوس در نظر گرفته می شود. حداقل مقادیر برای این آزمایش شامل عدد چسبندگی ۱۲ کیلوگرم- سانتی متر برای ۳۰ دقیقه و ۲۰ کیلوگرم- سانتی متر برای ۶۰ دقیقه است. مقدار متناظر با ۳۰ دقیقه جهت سنجش خاصیت شکنندگی قیر امولسیون و ۶۰ دقیقه جهت سنجش زمان ترافیک برای بازگشایی آن استفاده می شود.

نمایی از دستگاه و نمونه های آزمایش چسبندگی در شکل ۱- الف نشان داده است.

جهت مشخص نمودن حداقل مقدار قیر امولسیون مورد نیاز برای جلوگیری از بروز خرابی شن زدگی و ارزیابی مقاومت در برابر شن زدگی میکروسرفیسینگ، آزمایش سایش در شرایط مرطوب مورد استفاده قرار می گیرد. نمایی از آزمایش سایش در شرایط مرطوب در شکل ۱- ب ارائه شده است. در این آزمایش، ضمن آن که پدیده عریان شدگی سنگدانه ها در شرایط ترمزگیری، چرخش ترافیک روی سطح روسازی در حضور آب و چگونگی سایش و انحراف خودرو شبیه سازی شده، مقدار هدرروی سنگدانه مخلوط های ساخته شده، بعد از سایش با لوله لاستیکی نیز تعیین می شود. در این آزمایش، یک مخلوط عمل آوری شده از میکروسرفیسینگ با ضخامت ۶ و قطر ۲۸۰ میلی متر برای مدت زمان مشخص ۱ ساعت در آب ۲۵ درجه سلسیوس قرار می گیرد. سپس با یک نوار لاستیکی طی مدت زمان ۵ دقیقه در شرایط غوطه وری در آب به روش چرخشی تحت عمل سایش قرار می گیرد. در نهایت، نمونه سایش یافته در دمای ۶۰ خشک و سپس وزن می شود (ISSA, 2017a).

با توجه به این که میکروسرفیسینگ برای پر نمودن محل شیار در روسازی به کار گرفته می شود، بنابراین باید مقاومت کافی در مقابل تغییر شکل جانبی و عمودی را دارا باشد. ویژگی های تغییر شکل مخلوط تحت بار ترافیک غلتشی شبیه سازی شده با آزمایش ارزیابی میزان جابه جایی با چرخ بارگذاری شده تعیین می شود. نمایی از دستگاه چرخ بارگذاری و نمونه های این آزمایش در شکل ۱- ج نمایش داده شده است. در این تحقیق، با استفاده از ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری چرخ ۵۶/۷ کیلوگرمی، نمونه ها متراکم می شوند. عرض نمونه، قبل و بعد از تراکم با ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری، در مسیر چرخ و در وسط طول نمونه اندازه گیری می گردد (ISSA, 2017c).

گرفته و سپس ماسه داغ به صورت یکنواخت روی نمونه پخش می‌شود. در این حالت، بارگذاری به مدت ۱۰۰ سیکل مشابه حالت قبل برای تراکم نمونه انجام می‌گردد. در ادامه، نمونه از جای مورد نظر خارج شده و سپس ماسه‌هایی که به سطح نمونه نچسبیده‌اند با ضرباتی آرام جدا می‌شود. نمونه دوباره وزن شده و ثبت می‌گردد. اختلاف بین دو وزن اندازه‌گیری شده به عنوان مقدار ماسه‌ای که چسبیده است گزارش می‌گردد. بدین ترتیب در این شیوه مقدار قیر موجود در مخلوط به صورت غیرمستقیم اندازه‌گیری می‌شود (ISSA, 2017b).

آزمایش چرخ بارگذاری شده- چسبندگی ماسه، جهت تعیین حداکثر قیر و میزان مقاومت مخلوط در مقابل خرابی قیرزدگی تحت بار ترافیک سنگین به کار می‌رود. به عبارتی، با استفاده از این آزمایش، مقدار قیر کافی جهت جلوگیری از خرابی قیرزدگی مشخص می‌گردد. در این آزمایش، نمونه‌ها تحت ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری چرخ ۵۶/۷ کیلوگرمی، متراکم می‌گردند. سپس نمونه وزن شده و وزن اندازه‌گیری شده ثبت می‌گردد. مقداری تعیین شده از ماسه اتاوا با دانه‌بندی مشخص و نوار فلزی به میزان ۸۲ درجه سلسیوس در گرمخانه قرار



شکل ۱. آزمایش‌های بررسی عملکرد مخلوط میکروسرفیسینگ

مورد بررسی واقع شده است. همان‌طور که در این جدول مشخص شده است، با افزایش درصد سرباره، به دلیل جذب آب بیشتر توسط آن، میزان آب برای رساندن زمان اختلاط به حد مشخص شده ۱۲۰ ثانیه افزایش یافت. به عبارت دیگر، با افزودن سرباره، کارایی تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

۴. نتایج و بحث

۴-۱. آزمایش زمان اختلاط

در جدول ۶، مقادیر مناسب آب، سیمان و مقادیر اولیه قیر امولسیون در سه سطح مشخص گردیده است. در این آزمایش، برای هر یک از مخلوط‌ها حاوی درصد‌های مختلف از قیر امولسیون، حداقل زمان اختلاط ۱۲۰ ثانیه

جدول ۶. نتایج آزمایش زمان اختلاط مخلوط‌های میکروسرفیسینگ

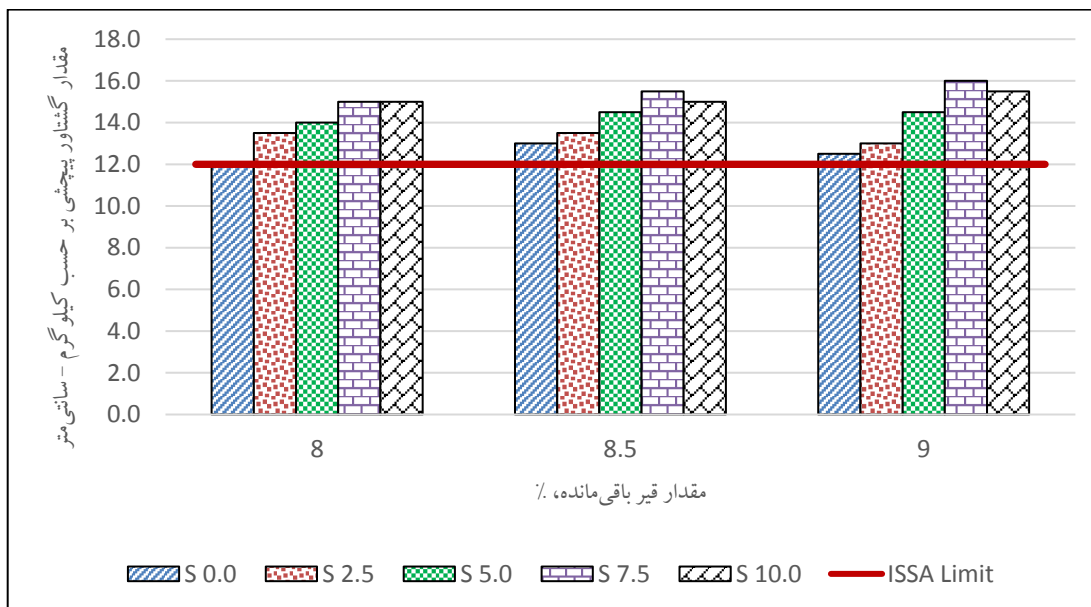
S10.0			S7.5			S5.0			S2.5			S0.0			نوع مخلوط
۹	۸/۵	۸	۹	۸/۵	۸	۹	۸/۵	۸	۹	۸/۵	۸	۹	۸/۵	۸	درصد قیر
															باقی‌مانده
۱۱	۱۱	۱۱	۱۰	۱۱	۱۱	۱۰	۱۰	۱۰	۸	۹	۹	۸	۸	۹	درصد آب
۱۲۴	۱۲۵	۱۲۳	۱۲۳	۱۲۴	۱۲۵	۱۲۶	۱۲۷	۱۲۶	۱۲۵	۱۲۸	۱۲۷	۱۲۴	۱۲۳	۱۲۵	زمان اختلاط به‌دست آمده

۴-۲. آزمایش چسبندگی مرطوب

نتایج آزمایش چسبندگی مرطوب در سه سطح از قیر باقی‌مانده برای نمونه‌های میکروسرفیسینگ در زمان‌های ۳۰ و ۶۰ دقیقه، در ادامه به شرح شکل‌های ۲ و ۳ است. با توجه به نتایج حاصله، تمامی نمونه‌ها مقاومت و گیرش لازم جهت بازگشایی ترافیک به ترتیب طی مدت زمان ۳۰ و ۶۰ دقیقه را به‌دست آورده و مخلوط S7.5 در مقدار قیر باقی‌مانده ۸ تا ۹ درصد، دارای بیشترین مقدار گشتاور پیچشی (متناظر با چسبندگی) نسبت به سایر مخلوط‌ها است. به‌طور کلی، نمونه‌های حاوی پودر سرباره بیشترین مقدار چسبندگی را در درصد قیر ۸/۵ و ۹ کسب کرده‌اند. به‌عنوان نمونه، در قیر باقی‌مانده ۹ درصد، مخلوط‌های S2.5، S5.0، S7.5 و S10.0 نسبت به نمونه شاهد (S0.0) به ترتیب موجب افزایش چسبندگی به قیر در مدت ۳۰ دقیقه به میزان ۴، ۱۶، ۲۸ و ۲۴ درصد و در مدت ۱ ساعت به میزان ۱۰، ۲۵، ۴۵ و ۳۵ درصد شده است. در مدت ۱ ساعت در مخلوط S0.0 با افزایش مقدار قیر باقی‌مانده از ۸ به ۸/۵ درصد، مقدار چسبندگی افزایش یافته و سپس با افزایش قیر به ۹ درصد، مقدار چسبندگی کاهش می‌یابد. بنابراین، می‌توان این‌طور استنباط کرد که با افزایش درصد قیر تا اندازه مشخصی، چسبندگی در نمونه شاهد بیشتر شده و سپس با افزایش بیشتر مقدار قیر امولسیون و به‌دنبال آن افزایش زمان عمل‌آوری، مقدار چسبندگی کاهش خواهد یافت. این در حالی است که در نمونه‌های S5.0، S7.5 و S10.0 با افزایش میزان پودر

سرباره و مقدار قیر، مقدار چسبندگی مخلوط‌ها افزایش یافته است. پودر سرباره به دلیل افزایش قفل شدن سنگدانه‌ها به یکدیگر سبب بهبود چسبندگی می‌شود. بنابراین، برای افزایش عمر مفید جاده‌های ایمن اهمیت زیادی دارد. این موضوع، با تحقیق دیگر پژوهشگران نیز مطابقت دارد.

بررسی چگونگی اثر سرباره بر رفتار نمونه‌های آسفالتی نیازمند شناخت اندرکنش میان مصالح سنگی و قیر است. اساساً، مصالح راه‌سازی از منظر الکتریکی خنثی نیستند. به‌طور مثال، شن و ماسه از جنس سیلیس (دارای بارهای منفی)، تمایل به بارهای مثبت خواهند داشت. از سوی دیگر، قیر که شامل هیدروکربن‌های طویل است، حالت قطبی ضعیفی داشته و تمایل به بارهای منفی دارد. بنابراین، می‌توان اظهار داشت که اتصال قیر- مصالح سیلیسی از نوع الکترواستاتیک است که در آن نیروهای جاذبه، ضعیف هستند. در صورتی که سرباره فولاد دارای خاصیت بازی بوده و از این جهت با قیر که به‌صورت نسبی خاصیت اسیدی دارد، پیوند محکم و ترکیب مقاوم‌تری ایجاد خواهد کرد. خاصیت بازی سرباره فولاد به علت حضور ترکیبات CaO و SiO₂ در سرباره است که بخش عمده آن را تشکیل می‌دهند. هرچه نسبت CaO/SiO_2 بیشتر باشد، چسبندگی بهتر مصالح سنگی و قیر را باعث خواهد شد (عزیز و همکاران، ۲۰۱۴). نتایج چسبندگی مناسب سرباره فولاد با قیر، با تحقیق شن و همکاران (۲۰۰۹) مطابقت دارد.



شکل ۲. نتایج آزمایش چسبندگی در ۳۰ دقیقه برای هر یک از مخلوط‌های میکروسرفیسینگ



شکل ۳. نتایج آزمایش چسبندگی در ۶۰ دقیقه برای هر یک از مخلوط‌های میکروسرفیسینگ

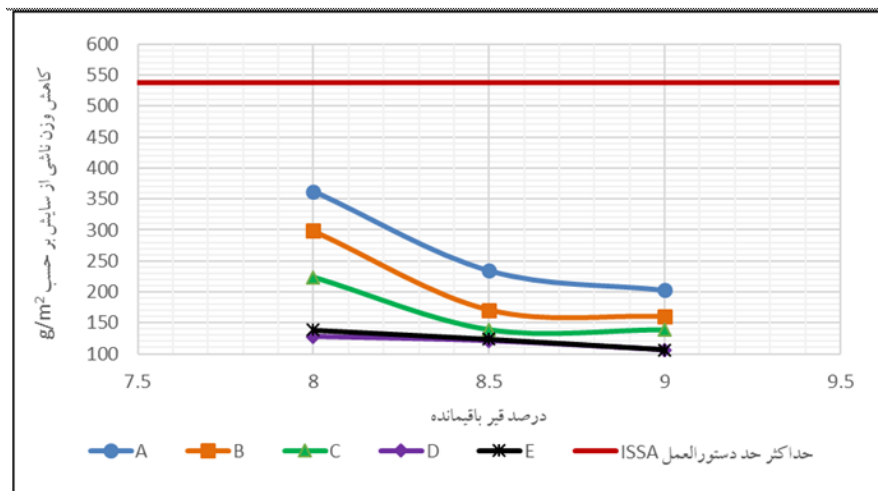
۳-۴. آزمایش سایش در شرایط مرطوب

نتایج این آزمایش در مدت زمان یک ساعت غوطه‌وری همه مخلوط‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، دو فاکتور افزایش درصد قیر و افزایش سرباره توأمأ سبب کاهش افت وزنی شده و سبب بهبود عملکرد در برابر سایش می‌گردد. اگرچه، اختلاف مقدار کاهش افت وزنی نمونه‌ها در مقادیر ۸/۵ و ۹ درصد

چشمگیر نیست. این شکل نشان می‌دهد که افزایش سرباره به مقدار ۲/۵، ۵/۰، ۷/۵ و ۱۰/۰ درصد در ۸/۵ درصد قیر باقی مانده نسبت به نمونه شاهد به ترتیب به مقدار ۲۷/۳، ۴۰/۹، ۴۸/۳ و ۴۷/۳ درصد عملکرد سایش را بهبود داده است. در نتیجه، نمونه S7.5 با نسبت ۷/۵ فیلر سرباره نسبت به وزن کل سنگدانه کمترین مقدار افت وزنی و بهترین عملکرد را در همه درصدهای قیر

آب در این سیستم، با مصالح سیلیسی پیوند الکترواستاتیک قوی‌تری تشکیل داده و عریان‌شدگی به-وقوع می‌پیوندد. معمولاً زمانی که چسبندگی مناسب بین مصالح و قیر ایجاد شود، این پیوند به آسانی از بین نمی‌رود. علت پدیده عریان‌شدگی، پیوند ضعیف بین مصالح سنگی و قیر 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 چسبندگی و اتصال مناسبی با قیر برخوردار بوده و این امر موجب قفل و بست شدن و درگیری ذرات به یکدیگر شده و باعث شده تا ذرات در شرایط مرطوب در برابر عریان‌شدگی و سایش مقاومت مطلوبی ارائه دهند.

داشته است و پس از آن نمونه‌های S2.5، S5.0، S10.0 در رتبه‌های بعدی قرار داشته‌اند. کمترین مقدار افت وزنی در نمونه‌ها (۷۸/۹ گرم بر سانتی متر مربع) متعلق به نمونه S7.5 در ۹ درصد قیر باقی‌مانده است. در شکل ۴، این نکته قابل توجه است که با افزایش قیر از ۸ تا ۹ درصد، نرخ کاهش افت وزنی در مخلوط‌های S0، S2.5 و S5.0 بیشتر از مخلوط‌های S7.5 و S10.0 است. به عبارتی، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش قیر در افزایش نرخ سایش مخلوط‌های حاوی ۷/۵ و ۱۰/۰ درصد سرباره (مخلوط‌های S7.5 و S10.0) تأثیر چندانی ندارد. 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



شکل ۴. نتایج آزمایش سایش در شرایط مرطوب در یک ساعت برای هر یک از مخلوط‌های میکروسرفیسینگ

به‌طوری که همه نمونه‌ها در قیر ۸ و ۹ درصد به ترتیب دارای کمترین و بیشترین مقدار قیرزدگی است. این شکل نشان می‌دهد که مقادیر قیرزدگی نمونه‌های S2.5، S0.0 و S5.0 فاصله چندانی با یکدیگر نداشته ولی با افزایش سرباره تا ۷/۵ و ۱۰/۰ درصد، مقدار قیرزدگی به‌طور چشمگیری در همه درصد‌های قیر باقیمانده کاهش

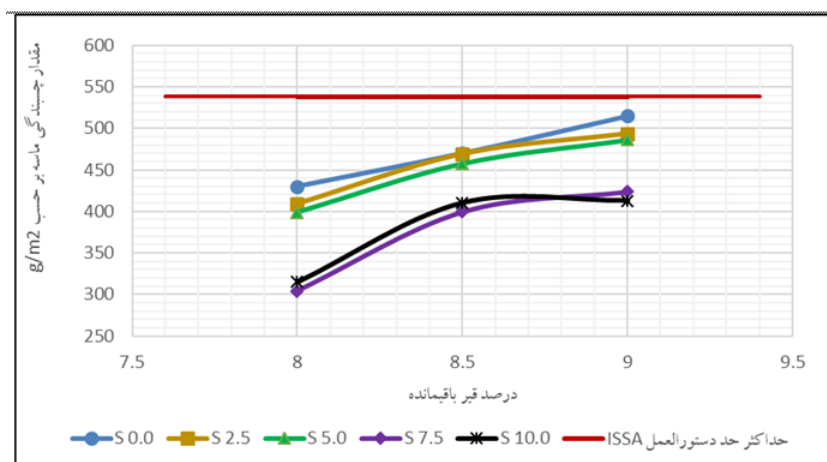
۴-۴. آزمایش تعیین حداکثر قیر به‌وسیله چرخ

بارگذاری شده و چسبندگی ماسه

نتایج این آزمایش برای نمونه‌های میکروسرفیسینگ حاوی سرباره فولاد در ادامه به شرح شکل ۵ است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با کاهش قیر و یا افزایش درصد سرباره، قیرزدگی مخلوط‌ها کاهش پیدا می‌کند.

در حالی است که در دیگر مخلوط‌ها نرخ قیرزدگی به صورت خطی افزایش یافته است. در مخلوط‌های S0.0، S2.5 و S5.0 با افزایش درصد قیر از ۸ به ۹، نرخ چسبندگی ماسه (قیرزدگی) افزایش پیدا کرده است. در حالی که در مخلوط‌های S7.5 و S10.0، نرخ چسبندگی ماسه از ۸/۵ به ۹ درصد نسب به ۸ به ۸/۵ درصد با شیب کمتری رشد کرده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که نرخ قیرزدگی با افزایش قیر بعد از ۸/۵ درصد در مخلوط‌های S7.5 و S10.0 تقریباً ثابت مانده و تأثیر کمتری بر افزایش پتانسیل قیرزدگی این مخلوط‌ها دارد. این در حالی است که در دیگر مخلوط‌ها، نرخ قیرزدگی به صورت خطی افزایش یافته است.

می‌یابد. از این جهت، بهترین عملکرد را مخلوط‌های با مقدار سرباره ۷/۵ و ۱۰/۰ درصد (S7.5 و S10.0) با مقدار چسبندگی ماسه نزدیک به هم و اختلاف ناچیز، ارائه داده‌اند. به‌طور مثال، در قیر ۸ درصد، نمونه‌های S2.5، S5.0، S7.5 و S10.0 عملکرد قیرزدگی را نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۴/۹، ۷/۳، ۲۹/۳ و ۲۶/۸ درصد بهبود داده‌اند. لذا، استفاده از پودر سرباره ضایعاتی جایگزین فیلر در مخلوط‌ها، باعث بهبود قابل‌توجه عملکرد قیرزدگی مخلوط‌های آسفالت سرد می‌گردد. نکته دیگری که از نمودارها دریافت می‌شود این است که نرخ قیرزدگی با افزایش قیر بعد از ۸/۵ درصد در مخلوط‌های S7.5 و S10.0 تقریباً ثابت مانده است. این



شکل ۵. میزان قیر حداکثر در نمونه‌های میکروسرفیسینگ به وسیله آزمایش چرخ بارگذاری - چسبندگی ماسه

تمامی مخلوط‌ها شامل S0.0، S2.5، S5.0، S7.5 و S10.0 در جدول ۷ و شکل ۶ ارائه شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، درصد قیر امولسیون بهینه مخلوط‌های آسفالتی حاوی پودر سرباره فولاد ضایعاتی نسبت به مخلوط شاهد افزایش داشته است. به‌طوری که مقدار بهینه قیر امولسیون مخلوط‌های S2.5، S5.0، S7.5 و S10.0 به ترتیب به مقدار ۰/۲۶، ۰/۴۲، ۱/۰۰ و ۱/۴۹ درصد نسبت به مخلوط S0.0 (مخلوط شاهد) بیشتر بوده است.

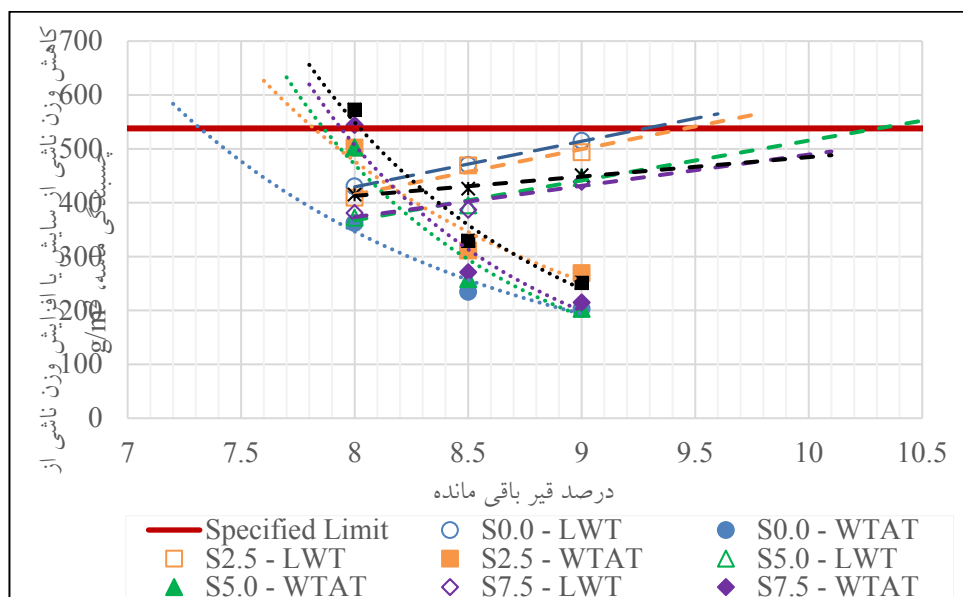
۴-۵. مشخص نمودن مقدار قیر امولسیون بهینه

مخلوط‌های میکروسرفیسینگ

محدوده مجاز قیر امولسیون و مقدار بهینه آن از طریق رسم نتایج آزمایش‌های چرخ بارگذاری شده - چسبندگی ماسه و سایش در شرایط مرطوب و تلفیق شکل‌های این دو آزمایش به دست می‌آید. در تلفیق دو شکل، نتایج آزمایش ماسه چسبیده به صورت یک نمودار خطی و نتایج آزمایش سایش مرطوب به صورت نمودارهای توابع توانی نشان داده می‌شوند (کی‌منش و همکاران، ۲۰۲۱). محدوده مجاز قیر امولسیون برای

جدول ۷. دامنه مجاز و مقدار بهینه قیر امولسیون پلیمری

نوع مخلوط	دامنه مجاز و قابل قبول قیر	مقدار بهینه قیر
S0.0	۷,۵۴٪ - ۹,۲۵٪ (۱۳,۲۳٪ - ۱۶,۲۳٪ قیر امولسیون)	۸,۴۰٪ (۱۴,۷۴٪ قیر امولسیون)
S2.5	۷,۷٪ - ۹,۴٪ (۱۳,۴۹٪ - ۱۶,۴۹٪ قیر امولسیون)	۸,۵۵٪ (۱۵,۰۰٪ قیر امولسیون)
S5.0	۷,۸٪ - ۹,۴۸٪ (۱۳,۶۳٪ - ۱۶,۶۳٪ قیر امولسیون)	۸,۶۴٪ (۱۵,۱۶٪ قیر امولسیون)
S7.5	۸,۱۱٪ - ۹,۸۲٪ (۱۴,۲۳٪ - ۱۷,۲۳٪ قیر امولسیون)	۸,۹۷٪ (۱۵,۷۴٪ قیر امولسیون)
S10.0	۸,۴٪ - ۱۰,۱۱٪ (۱۴,۷۴٪ - ۱۷,۷۴٪ قیر امولسیون)	۹,۲۵٪ (۱۶,۲۳٪ قیر امولسیون)



شکل ۶. ترکیب نتایج آزمایش سایش در شرایط مرطوب و آزمایش چرخ بارگذاری شده - چسبندگی ماسه جهت تعیین قیر بهینه

۶-۴. تعیین میزان جابه‌جایی مخلوط با آزمایش

چرخ بارگذاری شده

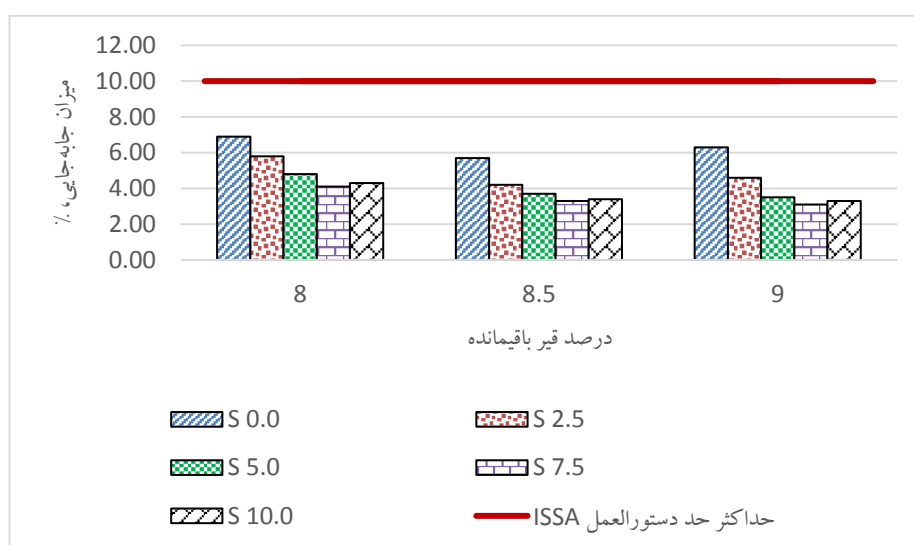
به منظور ارزیابی عملکرد مخلوط‌ها در برابر بارگذاری ترافیک، آزمایش چرخ بارگذاری شده انجام شده و نتایج به دست آمده از آن برای نمونه‌های میکروسرفیسینگ در شکل‌های ۷ و ۸ ارائه شده است. نتایج این آزمایش از دو دیدگاه مقدار فیلر و قیر امولسیون در مخلوط‌ها قابل بررسی است. از منظر قیر امولسیون، همان‌طور که مشاهده می‌شود، در مخلوط S0.0 و S2.5، با افزایش قیر باقی‌مانده، ابتدا میزان جابه‌جایی در قیر باقی‌مانده ۸ به

۸/۵ درصد کاهش و سپس از قیر باقی‌مانده ۸/۵ به ۹ درصد افزایش یافته است. این بدان معنا است که در مخلوط‌های S0.0 و S2.5 افزایش قیر تا حدودی مشخص در ابتدا باعث حفظ سنگدانه‌ها در مخلوط و چسبندگی مناسب شده و سپس با افزایش میزان قیر کافی و افزایش بیشتر سطح پوشش سنگدانه، باعث ازدیاد مقدار تغییر شکل در برابر بارگذاری شده است. این در حالی است که با افزایش درصد قیر باقی‌مانده از ۸ به ۹ درصد در مخلوط‌های S5.0، S7.5 و S10.0 میزان جابه‌جایی با شیب تقریباً ثابتی کاهش می‌یابد. لذا، مشخص نمودن مقدار قیر مناسب برای کاهش میزان

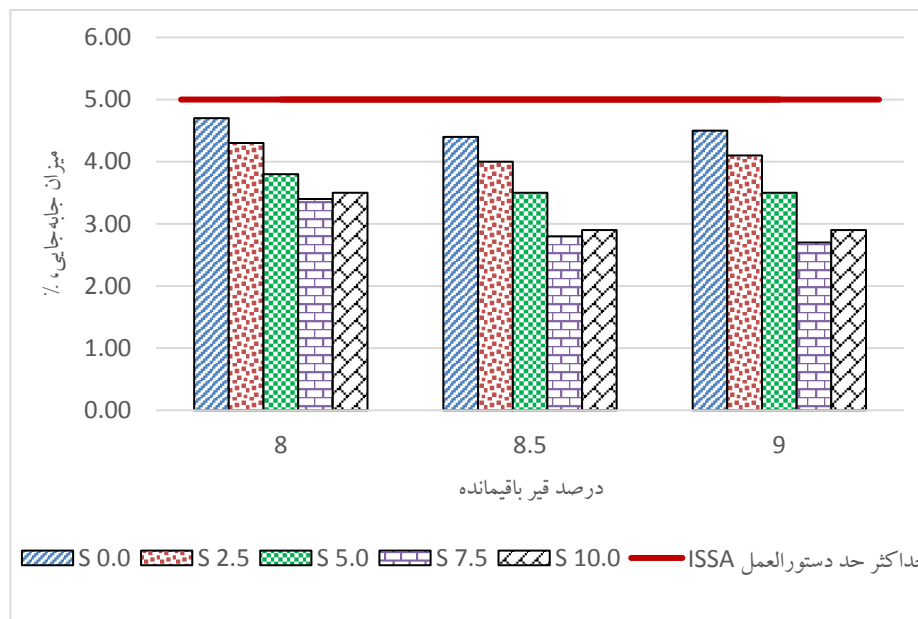
نرخ کاهش مقدار جابه‌جایی‌ها با افزایش درصد وزنی سرباره تا ۵۰ درصد به‌طور محسوسی افزایش می‌یابد. پس از آن، افزایش سرباره تغییر چندانی در نرخ کاهش و یا افزایش جابه‌جایی‌ها نداشته است. این شکل نشان می‌دهد که مقادیر جابه‌جایی‌ها در نمونه‌های S5.0، S7.5 و S10.0 بسیار نزدیک است. افزایش جابه‌جایی در مخلوط A نسبت به مخلوط‌های حاوی سرباره فولاد مرتبط با مقدار قیر مصرفی در این مخلوط است. به‌طوری که 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 مخلوط A بیشتر از سایر مخلوط‌ها است. در واقع، این موضوع نشان‌دهنده آن است که هرچه درصد ذرات فیلر سرباره در مخلوط بیشتر باشد، این ذرات میزان جذب قیر بیشتری خواهند داشت. در نتیجه، این موضوع منجر به ایجاد چسبندگی قوی بین قیر و سنگدانه‌ها شده و به تبع آن مقاومت مخلوط آسفالت سرد در برابر ترافیک عبوری افزایش می‌یابد. این نتیجه با تحقیق دیگر محققان نیز همخوانی دارد (عاصی، ۲۰۰۷؛ هاینین و همکاران، ۲۰۱۴؛ اسکاف و همکاران، ۲۰۱۷).

جابه‌جایی‌ها امری ضروری و لازم است. از دیدگاه مقدار فیلر، با توجه به نتایج به‌دست آمده در تمامی نمونه‌ها در قیر باقی‌مانده ۸ تا ۹ درصد، با افزایش میزان درصد فیلر سرباره تا ۱۰ درصد وزن کل سنگدانه، از جابه‌جایی عمودی و جانبی کاسته شده است. به‌طوری که تمامی جابه‌جایی‌ها از مخلوط شاهد در تمامی درصدهای قیر امولسیون کمتر بوده است. این بدان معنا است که در مخلوط‌هایی که مستعد شیارشدگی هستند، می‌توان پس از تأمین قیر کافی، با افزایش فیلر احتمال رخداد خرابی شیارشدگی را کاهش داد. به عنوان نمونه در قیر باقی‌مانده ۹ درصد مخلوط‌های S0.0، S2.5، S5.0، S7.5 و S10.0 نسبت به نمونه شاهد موجب کاهش جابه‌جایی عمودی به ترتیب به میزان ۲۷/۰، ۴۴/۴، ۵۰/۸ و ۴۷/۶ درصد و موجب کاهش جابه‌جایی جانبی به میزان ۸/۹، ۲۲/۲، ۴۰/۰ و ۳۵/۶ درصد شده است.

به‌طور کلی، با توجه به نتایج به‌دست آمده، افزایش درصد قیر باقیمانده و افزایش سرباره اثر محسوسی در کاهش مقدار جابه‌جایی‌ها افقی و عمودی دارند. اگرچه در نمونه شاهد و نمونه S2.5، مقدار جابه‌جایی عمودی با افزایش درصد قیر از ۸ به ۸/۵ و ۸/۵ به ۹ درصد به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. بر طبق نمودار این شکل،



شکل ۷. میزان جابه‌جایی عمودی مخلوط‌ها در درصدهای مختلف قیر



شکل ۸. میزان جابه‌جایی افقی مخلوط‌ها در درصد‌های مختلف قیر

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به بررسی به‌کارگیری پودر سرباره فولاد ضایعاتی در طرح اختلاط میکروسرفیسینگ جایگزین فیلر سنگدانه کوهی جهت ارزیابی عملکرد آن پرداخته شد. در این راستا، ابتدا مشخصات اجزای مخلوط اعم از سنگدانه و قیر امولسیون مورد بررسی قرار گرفته و سپس به منظور ارزیابی عملکرد مخلوط، از پنج ترکیب مختلف حاوی صفر، ۲/۵، ۵/۰، ۷/۵ و ۱۰ درصد سرباره بر اساس وزن کل سنگدانه به صورت جایگزین با فیلر مخلوط‌ها استفاده گردید. ارزیابی نمونه‌های آسفالتی به‌واسطه آزمایش‌های چسبندگی مرطوب، چرخ بارگذاری شده و سایش در شرایط مرطوب مطابق با استاندارد ASTM D6372 و دستورالعمل ISSA A143 انجام شد. نتایج آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق به‌طور خلاصه در ادامه ارائه شده است:

برآورده ساختن الزامات دستورالعمل و افزایش زمان

اختلاط احتیاج است.

- در آزمایش چسبندگی مرطوب در زمان‌های ۳۰ و ۶۰ دقیقه، تمامی مخلوط‌ها مقاومت لازم جهت عبور بار ترافیک را کسب کردند. به‌طور کلی، نمونه‌های حاوی سرباره، بیشترین مقدار چسبندگی را در مقدار قیر ۸/۵ و ۹ درصد کسب کرده‌اند. در میان نمونه‌ها، مخلوط حاوی ۷/۵ درصد سرباره در مقدار قیر باقی‌مانده ۸ تا ۹ درصد، دارای بیشترین مقدار گشتاور پیچشی (متناظر با چسبندگی) نسبت به سایر مخلوط‌ها است. همچنین، در نمونه‌های حاوی سرباره، با افزایش میزان سرباره و مقدار قیر، مقدار چسبندگی مخلوط‌ها افزایش یافته است.
- آزمایش سایش در شرایط مرطوب مشخص گردید که با افزایش توأم سرباره و قیر امولسیون، مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر خرابی عریان‌شدگی بیشتر می‌شود. همچنین، مشخص گردید که مقدار کاهش افت وزنی نمونه‌های حاوی ۵ تا ۱۰ درصد فیلر سرباره در مقادیر ۸/۵ و ۹ درصد چشمگیر نبوده و

- در آزمایش زمان اختلاط معلوم گردید که با افزایش درصد سرباره، آب بیشتری برای رسیدن به کارایی مطلوب نیاز بوده و لذا درصد آب بیشتری برای

۱۰ درصد سرباره تقریباً ثابت مانده است. این در حالی است که در دیگر مخلوط‌ها، نرخ قیرزدگی به صورت خطی افزایش یافته است.

- در تعیین درصد بهینه قیر امولسیون، قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره نسبت به مخلوط شاهد افزایش داشته است. همچنین، مشخص شد که بیشترین درصد قیر امولسیون مرتبط با مخلوط حاوی ۱۰ درصد فیلر سرباره است.
- در آزمایش چرخ بارگذاری جهت معین نمودن مقدار تغییرشکل مخلوط‌ها مشخص شد که در مجموع، افزایش درصد قیر باقیمانده و افزایش سرباره اثر محسوسی در کاهش مقدار جابه‌جایی‌های افقی و عمودی دارند. نرخ کاهش مقدار جابه‌جایی‌ها با افزایش درصد وزنی سرباره تا ۵۰ درصد به‌طور محسوسی افزایش می‌یابد. پس از آن، افزایش سرباره تغییر چندانی در نرخ کاهش و یا افزایش جابه‌جایی‌ها نداشته است. در میان نمونه‌ها، مخلوط حاوی ۱۰ درصد فیلر سرباره مناسب‌ترین عملکرد را در میان مخلوط‌ها داشته است.

افزایش قیر در افزایش نرخ سایش مخلوط‌های حاوی ۷/۵ و ۱۰/۰ درصد سرباره (مخلوط‌های S7.5 و S10.0) تأثیر چندانی ندارد. به‌طور خلاصه، نمونه با نسبت ۷/۵ فیلر سرباره نسبت به وزن کل سنگدانه بیشترین مقدار افت وزنی و در نتیجه بهترین عملکرد را در همه درصد‌های قیر داشته است.

- در آزمایش تعیین حداکثر قیر به‌وسیله چرخ بارگذاری - چسبندگی ماسه معلوم گردید که افزایش درصد قیر و افزایش سرباره به ترتیب باعث افزایش و کاهش مقدار قیر زدگی می‌شود. به‌طوری که با افزایش فیلر سرباره از صفر تا ۵ درصد، مقادیر قیرزدگی نمونه‌ها فاصله چندانی با یکدیگر ندارند. ولی با افزایش سرباره تا ۷/۵ و ۱۰/۰ درصد، مقدار قیرزدگی به‌طور چشمگیری در همه درصد‌های قیر باقیمانده کاهش می‌یابد. در میان نمونه‌ها، بهترین عملکرد را مخلوط‌های با مقدار سرباره ۷/۵ و ۱۰/۰ درصد (S7.5 و S10.0) با مقدار چسبندگی ماسه نزدیک به هم و اختلاف ناچیز داشته‌اند. همچنین، از نتایج این آزمایش دریافت گردید که نرخ قیرزدگی با افزایش قیر از ۸/۵ به ۹ درصد در مخلوط‌های ۷/۵ و

۶. مراجع

ایزدی، ا.، زال نژاد، م.، زال نژاد، ح. و بزرگی، پ. ۱۳۹۹. "ارزیابی آزمایشگاهی عملکرد آسفالت حفاظتی میکروسرفیسینگ رنگی حاوی رنگدانه های قرمز اکسید آهن". مهندسی زیرساخت های حمل و نقل، ۶(۴): ۹۹-۱۲۰. doi:10.22075/jtie.2020.20189.1449.

فخری، م.، احمدی، ا.، علی نسب، ر. و کریمی گوغری، م. ۱۳۹۶. "بررسی آزمایشگاهی رفتار فیزیکی و مکانیکی مخلوط های آسفالتی اصلاح شده با مصالح سنگی سرباره ای". پژوهشنامه حمل و نقل، ۱۴(۲): ۲۲۷-۲۳۸.

کاووسی، ا.، جلیلی قاضی زاده، م.، محمدزاده مقدم، ا. و ضیائی، س.ع. ۱۳۹۴. "بررسی و مقایسه خصوصیات مکانیکی مخلوط های آسفالتی حاوی سرباره های کوره قوس الکتریک و کوره اکسیژنی". مهندسی زیرساخت های حمل و نقل، ۱(۳): ۱۵-۳۱. doi:10.22075/jtie.2015.314.

کی منش، م. ر.، زیاری، ح.، زال نژاد، ح. و زال نژاد، م. ۱۴۰۰. "ارزیابی مشخصات رئولوژی و قیرزدگی باقی مانده قیرهای امولسیون اصلاح شده با پلیمر به روش های مختلف ساخت". مهندسی زیرساخت های حمل و نقل، ۷(۳): ۷۸-۵۹. doi:10.22075/jtie.2020.20509.1459.

Arabani, M., Tahami, S. A. and Taghipoor, M. 2017. "Laboratory investigation of hot mix asphalt containing waste materials". Road Mater. Pavement Design, 18(3): 713-729. doi:10.1080/14680629.2016.1189349

Asi, I. M. 2007. "Evaluating skid resistance of different asphalt concrete mixes". Build. Environ., 42(1): 325-329.

ASTM D6372. 2015. "Standard practice for design, testing, and construction of microsurfacing". West Conshohocken, PA, American Society of Testing and Materials.

ASTM D7497. 2021. "Standard practice for recovering residue from emulsified asphalt using low-temperature evaporative technique". West Conshohocken, PA, American Society of Testing and Materials.

Awed, A. M., Tarbay, E. W., El-Badawy, S. M. and Azam, A. M. 2022. "Performance characteristics of asphalt mixtures with industrial waste/by-product materials as mineral fillers under static and cyclic loading". Road Mater. Pavement Design, 23(2): 335-357. doi:10.1080/14680629.2020.1826347

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): 255-259. doi:10.1179/1432891714Z.000000000967

Barišić, I., Netinger Grubeša, I. and Hackenberger Kutuzović, B. 2017. "Multidisciplinary approach to the environmental impact of steel slag reused in road construction". Road Mater. Pavement Design, 18(4): 897-912. doi:10.1080/14680629.2016.1197143

Bista, S. 2020. "Guidelines for mix design and construction of slurry seal and microsurfacing pavement preservation treatments". University of Nevada, Reno.

Blankendaal, T., Schuur, P. and Voordijk, H. 2014. "Reducing the environmental impact of concrete and asphalt: A scenario approach". J. Clean. Prod., 66: 27-36.

Buss, A. F. and Claypool, B. S. 2021. "Analytical methods to determine effectiveness of slurry seals in wet/freeze climate using pavement management information systems". Road Mater. Pavement Design, 1-19. doi:10.1080/14680629.2020.1868327

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. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117271

Choudhary, J., Kumar, B. and Gupta, A. 2021. "Evaluation of engineering, economic and environmental suitability of waste filler incorporated asphalt mixes and pavements". Road Mater. Pavement Design, 22(S1): 624-640. doi:10.1080/14680629.2021.1905698

Dong, Q., Chen, X., Huang, B. and Gu, X. 2018. "Analysis of the influence of materials and construction practices on slurry seal performance using LTPP data". *J. Transport. Eng., Part B: Pavements*, 144(4): 04018046. doi:10.1061/JPEODX.0000069

Georgiou, P. and Loizos, A. 2021. "Environmental assessment of warm mix asphalt incorporating steel slag and high reclaimed asphalt for wearing courses: A case study". *Road Mater. Pavement Design*, 22(S1): 662-671. doi:10.1080/14680629.2021.1906305

Gransberg, D. D. 2010. "NCHRP Synthesis 411: Microsurfacing; A synthesis of highway practices". Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC. doi: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". *Jurnal Teknologi (Sci. and Eng.)*, 69(1): 67-73.

ISSA. 2017a. "Laboratory test method for wet track abrasion of slurry surfacing systems". Technical Bulletin, International Slurry Surfacing Association.

ISSA. 2017b. "Test method for measurement of excess asphalt in bituminous mixtures by use of a loaded wheel tester and sand adhesion". Technical Bulletin, International Slurry Surfacing Association.

ISSA. 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. 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.

ISSA. 2017e. "Trial mix procedure for slurry seal design". Technical Bulletin, International Slurry Surfacing Association.

ISSA A143. 2010. "Recommended performance guidelines for micro surfacing". International Slurry Surfacing Association.

Izadi, A., Zalnezhad, M., Bozorgi Makerani, P. and Zalnezhad, H. 2020. "Mix design and performance evaluation of coloured slurry seal mixture containing natural iron oxide red pigments". *Road Mater. Pavement Design*, 1-18. doi:10.1080/14680629.2020.1860803

Johannes, P. T. 2014. "Development of an improved mixture design framework for slurry seals and micro-surfacing treatments". The University of Wisconsin.

Kavussi, A. and Qazizadeh, M. J. 2014. "Fatigue characterization of asphalt mixes containing electric arc furnace (EAF) steel slag subjected to long term aging". *Constr. Build. Mater.*, 72: 158-166. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.08.052

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. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121336

Kumar, R. and Rynthathiang, T. L. 2016. "New laboratory mix methodology of microsurfacing and mix design". *Transport. Res. Proc.*, 17: 488-497.

Li, F., Feng, J., Li, Y. and Zhou, S. 2021. "Preventive maintenance technology for asphalt pavement". Springer.

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. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.12.177

Mistry, R., Karmakar, S. and Kumar Roy, T. 2019. "Experimental evaluation of rice husk ash and fly ash as alternative fillers in hot-mix asphalt". *Road Mater. Pavement Design*, 20(4): 979-990. doi:10.1080/14680629.2017.1422791

Pattanaik, M. L., Choudhary, R., Kumar, B. and Kumar, A. 2021. "Mechanical properties of open graded friction course mixtures with different contents of electric arc furnace steel slag as an

alternative aggregate from steel industries”. *Road Mater. Pavement Design*, 22(2): 268-292.

doi:10.1080/14680629.2019.1620120

Pittenger, D. M. and Gransberg, D. D. 2020. “Life cycle cost analysis of Portland cement slurry seal and microsurfacing to correct rutting”. *J. Struct. Integrity Maint.*, 5(1): 1-7.

doi:10.1080/24705314.2019.1692166

Prapaitrakul, N., Han, R., Jin, X., Martin, A. and Glover, C. 2010. “Comparative study on recovered binder properties using three asphalt emulsion recovery methods”. *J. Test. Eval.*, 38(6): 653-659. doi:10.1520/JTE102739

Rezaei Lori, A., Bayat, A. and Azimi, A. (2021). “Influence of the replacement of fine copper slag aggregate on physical properties and abrasion resistance of pervious concrete”. *Road Mater. Pavement Design*, 22(4): 835-851. doi:10.1080/14680629.2019.1648311

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.

Simone, A., Mazzotta, F., Eskandarsefat, S., Sangiorgi, C., Vignali, V., Lantieri, C. and Dondi, G. 2019. “Experimental application of waste glass powder filler in recycled dense-graded asphalt mixtures”. *Road Mater. Pavement Design*, 20(3): 592-607. doi:10.1080/14680629.2017.1407818

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. doi:10.1016/j.resconrec.2016.12.009

Stehlik, D., Dasek, O., Hyzl, P., Coufalik, P., Krcmova, I. and Varaus, M. 2015. “Pavement construction using road waste building material – from a model to reality”. *Road Mater. Pavement Design*, 16(S1): 314-329. doi:10.1080/14680629.2015.1029680

Takamura, K. and James, A. 2015. “Paving with asphalt emulsions”. PP. 393-426. In: S. C. Huang and H. Di Benedetto (Eds.), *Advances in Asphalt Materials*, Oxford, Woodhead Publishing.

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.

Zalnezhad, M. and Hesami, E. 2020. “Effect of steel slag aggregate and bitumen emulsion types on the performance of microsurfacing mixture”. *J. Traffic Transport. Eng., (English Edition)*, 7(2): 215-226.

