

بررسی تأثیر فیلر سرامیکی ضایعاتی بر عملکرد آسفالت میکروسرفیسینگ

ندا کامبوزیا*، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

حسن زیاری، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

مهدی زال‌نژاد، دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و

صنعت ایران، تهران

علیرضا جلالیان خشنود، دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و

صنعت ایران، تهران

Email: nkamboozia@iust.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲۷ - پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۰۴

چکیده

با توجه به اهمیت راه‌ها در ایجاد ارتباط بین نواحی مختلف، مسئله تعمیر و نگهداری راه‌ها همواره امری حیاتی برای سازمان‌های راهداری یا حمل‌ونقل جاده‌ای محسوب می‌شود. یکی از مهم‌ترین روش‌های تعمیر و نگهداری پیشگیرانه راه‌ها، آسفالت حفاظتی میکروسرفیسینگ است. این آسفالت حفاظتی موجب کاهش مصرف انرژی و هزینه‌های تعمیر و نگهداری در بلندمدت می‌شود. هدف این پژوهش بررسی به‌کارگیری فیلر سرامیکی ضایعاتی در طرح اختلاط میکروسرفیسینگ جهت سنجش عملکرد آن است. در این راستا، ابتدا مشخصات فیزیکی و شیمیایی مصالح سنگی و فیلر سرامیکی ضایعاتی مورد بررسی قرار گرفته و سپس به منظور ارزیابی عملکرد مخلوط میکروسرفیسینگ، از پنج ترکیب مختلف حاوی صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد فیلر سرامیکی ضایعاتی استفاده گردید. ارزیابی نمونه‌های میکروسرفیسینگ به واسطه آزمایش‌های چسبندگی مرطوب در ۳۰ و ۶۰ دقیقه، چرخ بارگذاری شده و سایش در شرایط مرطوب مطابق با دستورالعمل ASTM D6372 انجام شد. نتایج نشان داد که مخلوط‌های حاوی فیلر سرامیکی موجب بهبود عملکرد میکروسرفیسینگ می‌شوند. همچنین، مخلوط حاوی ۱۰۰ درصد فیلر سرامیکی نسبت به نمونه شاهد موجب افزایش چسبندگی در مدت زمان ۳۰ و ۶۰ دقیقه به ترتیب به میزان ۳۰/۸ و ۳۳/۳ درصد، ۶۲ درصد بهبود مقاومت در برابر سایش و ۳۱ درصد کاهش قیرزدگی مخلوط گردید. این مخلوط نسبت به نمونه شاهد دارای ۲ درصد قیر امولسیون بیشتر به منظور دستیابی به چسبندگی مناسب در زمان مشخص است.

واژه‌های کلیدی: میکروسرفیسینگ، فیلر سرامیکی ضایعاتی، آزمایش چرخ بارگذاری شده، آزمایش سایش در شرایط مرطوب

۱. مقدمه

مربع در سال بوده که ایران را در رتبه پنجم تولید سرامیک و کاشی در جهان قرار داده است. مقدار ضایعات سرامیک در مراحل مختلف تولید حدود ۳ تا ۷ درصد تولید روزانه است (شمسایی و همکاران، ۲۰۱۹). در فرآیند تولید انواع سرامیک، ناخواسته ضایعاتی نیز به وجود می‌آید. مواد خام پخت نشده به چرخه تولید بازگشته و به همراه مواد اولیه با درصد کم آسیاب و مصرف می‌شوند. ضایعات پخته شده نیز در صورت امکان برش خورده و به‌عنوان حاشیه به فروش می‌رسند. اما سرامیک‌های پخته شده غیرقابل مصرف را نمی‌توان در صنعت سرامیک مجدد آسیاب نمود، چون باعث مصرف انرژی زیاد و سایش آسیاب شده و زیان زیادی به خط تولید وارد می‌کند. به همین دلیل آن‌ها را به‌عنوان ضایعات به طبیعت می‌سپارند. تجزیه‌ی این ضایعات شاید هزاران سال طول بکشد. طبق دستورالعمل گروه ضایعات اروپا در سال ۲۰۰۶، زباله سرامیک‌های بهداشتی به‌عنوان زباله‌های خطرناک طبقه‌بندی نمی‌شوند (کمسیون اروپا، ۲۰۰۶). همچنین، حجم وسیعی از این مواد ضایعاتی را نمی‌توان مجدداً در صنعت سرامیک استفاده کرد. بنابراین، رایج‌ترین روش برای مقابله با این ضایعات، نگه‌داشتن آن در محل‌های دفن زباله‌های صنعتی است. اینکه چرا ضایعات سرامیک در این مکان‌ها نگهداری می‌شود به دلیل عدم وجود یک روش مناسب برای بازیافت آن‌ها است. اگرچه تحقیقاتی برای این منظور انجام شده است، اما مقدار ضایعات بازیافت شده بسیار چشمگیر نیست. با استفاده از این مواد در صنعت ساخت‌وساز، محققین می‌توانند مقادیر زیادی از این ضایعات را برای کاهش مشکلات زیست‌محیطی استفاده کنند (پاچکو-تورگال و جلالی، ۲۰۱۱). به دلایل فوق، بسیاری از مؤسسات تحقیقاتی اقدام به ابداع روش‌های منطقی بازیافت ضایعات سرامیکی کرده‌اند. روند عمده این تحقیقات جهت استفاده از ضایعات سرامیک برای تولید بتن است (هالیکا و همکاران، ۲۰۱۳). برخی از مطالعات ارائه شده

تخریب محیط طبیعی که در سال‌های متمادی مشاهده شده، نتیجه پیشرفت تکنولوژی است که موجب شده حفاظت از محیط‌زیست به یکی از مهم‌ترین موضوعات برای پرداختن در علوم معاصر تبدیل شود. افزایش تولید در صنعت و به دنبال آن تولید مقدار زیادی زباله و مواد ضایعاتی، نگرانی‌ها در حوزه حفاظت از محیط‌زیست را افزایش داده است (دُندی و همکاران، ۲۰۱۶؛ صدیق و کاجیم، ۲۰۱۸). علاوه بر این، استفاده بیش از حد از منابع طبیعی می‌تواند محیط‌زیست را تخریب کند که از جمله آن می‌توان کاهش تراز سطح آب‌های زیرزمینی، تخریب زمین و تخلیه منابع طبیعی را نام برد. بنابراین، استفاده مجدد از پسماندها و حفاظت از منابع طبیعی از اهمیت زیادی برخوردار است (وُزوک و همکاران، ۲۰۱۹). در این راستا، چندین مورد مواد ضایعاتی و قابل بازیافت همچون آسفالت بازیافتی، روغن‌موتور ضایعاتی، ضایعات فلزی، پلی‌اتیلن لوله‌های متصل و خاکستر بادی در تولیدات مختلف برای معرفی محصولاتی پاک و غیر مضر برای محیط‌زیست به‌کار گرفته شده است (معقول و همکاران، ۲۰۱۷؛ شمسایی و همکاران، ۲۰۱۷؛ رن و سنکاکتار، ۲۰۱۹؛ رودریگز-فرناندز و همکاران، ۲۰۱۹؛ وُزوک و همکاران، ۲۰۱۹؛ کامبوزیا و همکاران، ۲۰۲۱؛ ساعد و همکاران، ۲۰۲۱a و ۲۰۲۱b).

مواد سرامیکی در مناطق مختلف جهان به‌وفور تولید می‌شوند. آن‌ها به دلیل دوام و تنوع، به مناطق دیگر نیز صادر شده که باعث می‌شود در طرح‌های بی‌شماری برای استفاده همگان مناسب باشند (رشید و همکاران، ۲۰۱۷). تقریباً ۳۰ درصد از سرامیک‌های صنعتی تولیدی در سطح جهان به‌عنوان ضایعات دور ریخته می‌شوند (حسین و همکاران، ۲۰۱۷). صنعت سرامیک در عین حالی که مواد ضایعات بسیار زیادی تولید کرده، سطح بسیار پایینی از بازیافت ضایعات را به خود اختصاص داده است. ظرفیت تولید کاشی و سرامیک در ایران حدود ۴۰۰ میلیون متر

کوچک و کمتر از ۷۵ میکرون تعریف می‌شود (ASTM، ۲۰۱۹).

هم‌زمان با افزایش خرابی‌ها در سطح روسازی راه‌ها، سازمان‌های حمل‌ونقل جاده‌ای با کسر بودجه و چالش‌های مدیریتی تعمیر و نگهداری راه‌ها مواجه هستند (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۳). بنابراین، وجود استراتژی‌های مناسب و به‌موقع برای مدیریت تعمیر و نگهداری راه‌ها امری بسیار مهم است. در طول سه دهه گذشته، میکروسرفیسینگ به‌عنوان روشی مؤثر برای نگهداری پیشگیرانه راه‌ها مورد پذیرش قرار گرفته است (سیمونس و همکاران، ۲۰۱۷؛ گوجار و واخاریا، ۲۰۱۹). در واقع، میکروسرفیسینگ برای حفاظت و به تأخیر انداختن خرابی روسازی راه، بهبود وضعیت روسازی راه، افزایش مقاومت در برابر لغزندگی، باز کردن سریع راه روی ترافیک، حفظ منابع طبیعی، کاهش مصرف انرژی و سازگاری با محیط‌زیست به‌کار گرفته می‌شود (وانگ و همکاران، ۲۰۱۹). میکروسرفیسینگ ترکیبی از سنگ‌دانه‌های معدنی باکیفیت، قیر امولسیون، فیلر معدنی، آب و مواد افزودنی شیمیایی همچون پلیمر است (سان و همکاران، ۲۰۱۸؛ گوجار و واخاریا، ۲۰۱۹؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ لو و همکاران، ۲۰۱۹؛ کوی و همکاران، ۲۰۲۰). استفاده از مواد ضایعاتی همچون سرباره مس، پوسته برنج و یا خاکستر بادی پتانسیل زیادی در استفاده به‌عنوان مصالح مورد نیاز در میکروسرفیسینگ دارند. تحقیقات نشان می‌دهند که پایداری و خواص مکانیکی میکروسرفیسینگ می‌تواند با استفاده از این فیلرهای معدنی بهبود یابد (سیمونس و همکاران، ۲۰۱۷). در هر سطحی از اختلاط، وجود مصالح باکیفیت خوب برای عملکرد مناسب مخلوط میکروسرفیسینگ بسیار مهم است. با این حال، صرف استفاده از مصالح باکیفیت مناسب نمی‌تواند حصول یک مخلوط میکروسرفیسینگ رضایت‌بخش را تضمین کند چرا که ممکن است این مصالح در زمان اختلاط موجب ناسازگاری مخلوط

روی بتن تولید شده با استفاده از سرامیک سفید انجام شده است (مدینا و همکاران، ۲۰۱۲؛ رشید و همکاران، ۲۰۱۷). با در نظر گرفتن خصوصیات سرامیک، این محصول پتانسیل این را دارد که به‌عنوان یک ماده سیمانی مکمل یا سنگدانه در بتن معمولی کاربرد داشته باشد (سنتاماری و همکاران، ۲۰۱۱؛ مدینا و همکاران، ۲۰۱۲؛ رشید و همکاران، ۲۰۱۷). ضایعات سرامیکی از مواد متخلخل تشکیل شده که به‌عنوان ماده سخت‌کننده مرطوب برای هیدراتاسیون خمیر سیمان عمل کرده و انقباض را کاهش داده و سرانجام مقاومت مکانیکی را افزایش می‌دهند (سوزوکی و همکاران، ۲۰۰۹). کاربرد ضایعات سرامیک به‌عنوان مواد خام در آسفالت می‌تواند یک روش نوین با توجه به مقدار زیاد مواد معدنی مورد نیاز در تولید آسفالت باشد. به‌عنوان مثال، مقدار تولید آسفالت در کشورهای اروپایی و در ایالات متحده به ترتیب به حدود ۲۸۵/۵ و ۳۷۴/۹ میلیون تن در سال ۲۰۱۶ رسید. بنابراین، ساخت رویه آسفالت نیازمند مقادیر زیادی از مواد معدنی خام از جمله فیلر و مصالح سنگی است. استفاده از مواد ضایعاتی به‌عنوان مصالح سنگی یا فیلر در مخلوط آسفالتی می‌تواند یک روش عملی برای تولیدات غیر مضر برای محیط‌زیست باشد (وسزوک و همکاران، ۲۰۱۹). بنابراین، ضایعات سرامیک را می‌توان در مخلوط آسفالت برای بازیافت این مواد مورد استفاده قرار داد. این رویکرد نه تنها مقدار این پسماند را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد، بلکه ممکن است مصرف سنگ‌دانه‌های طبیعی و فیلر را به‌عنوان منابع غیرتجدیدپذیر کاهش دهد (پاتل و باوسار، ۲۰۱۶). فیلر، به‌عنوان جزئی از مخلوط آسفالت، نقش مهمی در خواص عملکردی آسفالت دارد. تغییرات در نوع و مقدار فیلر ممکن است بر خواص مخلوط آسفالت تأثیر بگذارد. فیلر در آسفالت به‌عنوان مصالح ریزدانه معدنی همچون سیمان، آهک، خاکستر بادی، و دیگر مواد مناسب با اندازه

پودر سرامیکی ضایعاتی در واحدهای تولید کاشی و سرامیک حاصل شده و چون دیگر قابلیت فرآوری و استفاده مجدد در فرآیند ساخت کاشی را نداشته، عملاً موادی ضایعاتی محسوب می‌شود. این موضوع باعث ایجاد مشکلات و هزینه فراوانی برای صاحبان این صنایع شده و در نهایت با رهاسازی این مواد در طبیعت، مشکلات زیست‌محیطی فراوانی به وجود می‌آید. بنابراین، یکی از اهداف این تحقیق ارائه آسفالت حفاظتی سردی است که به‌خودی خود در مصرف انرژی و در مدیریت تعمیر و نگهداری گزینه‌ای مقرون به‌صرفه محسوب شده و می‌تواند کمکی به مدیریت پسماند باشد. لذا، در این تحقیق، با ساخت نمونه‌های کوچک‌مقیاس از آسفالت حفاظتی میکروسرفیسینگ، به بررسی اثر افزودن درصد‌های مختلف فیلر سرامیکی ضایعاتی بر خواص آسفالت حفاظتی میکروسرفیسینگ در طرح مخلوط این نوع آسفالت، پرداخته شده است.

۲. مطالعات آزمایشگاهی

۲-۱. مواد و مصالح

آسفالت حفاظتی میکروسرفیسینگ شامل قیر امولسیون کاتیونی اصلاح شده با پلیمر، مصالح ۱۰۰ درصد شکسته، آب، فیلر فعال معدنی و در صورت لزوم افزودنی‌های شیمیایی برای کنترل زمان شکست قیر امولسیون است. هر کدام از مواد مطابق با استاندارد، بایستی دارای ویژگی‌هایی تعیین شده بوده که در ادامه بررسی می‌گردد (JSSA، ۲۰۱۰؛ ASTM D6372، ۲۰۱۸).

۲-۱-۱. قیر امولسیون

در این تحقیق، در تمامی مخلوط‌ها، از قیر امولسیون کاتیونی اصلاح شده با پلیمر استفاده گردید. برای تهیه قیر امولسیون پلیمری، از قیر بارده نفوذ ۶۰-۷۰ تهیه شده

شوند. به همین دلیل است که آزمون‌های طراحی شده در آیین‌نامه‌ها برای ارزیابی میکروسرفیسینگ بسیار مهم هستند. بنابراین، محققین باید با طی یک مسیر پرتکرار، با انتخاب مواد سازگار و مقادیر مناسب برای آن‌ها تا زمانی که خواص مطلوب مخلوط به‌دست آید، گام بردارند. ارزیابی آزمایشگاهی باید با بررسی پنج پارامتر عملکردی در آزمون‌هایی به نام زمان اختلاط، روانی، چسبندگی مرطوب، سایش در شرایط مرطوب و چرخ بارگذاری روی مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر مختلفی از مصالح مورد نظر انجام شود (گوجار و دادیچ، ۲۰۱۹). حسامی و عطالهی (۱۳۹۷) عملکرد آسفالت حفاظتی میکروسرفیسینگ حاوی پودر لاستیک را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش، مقادیر ۰/۵ تا ۳ درصد پودر لاستیک بر اساس وزن سنگدانه‌ها به‌عنوان جایگزین قسمتی از سنگدانه‌های مخلوط مورد استفاده قرار گرفت تا علاوه بر بهبود مشکلات زیست‌محیطی، خصوصیات عملکردی مخلوط میکروسرفیسینگ نیز ارتقاء یابد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که بهترین عملکرد متعلق به نمونه‌های حاوی ۰/۵ درصد پودر لاستیک بوده و مقادیر بیش از این میزان موجب تضعیف عملکرد مخلوط می‌شود. استفاده از مقدار ۰/۵ درصد پودر لاستیک باعث می‌شود که مقدار قیر امولسیون بهینه مخلوط کاهش قابل ملاحظه‌ای پیدا کرده و شیارافتادگی روی نمونه نیز نسبت به نمونه شاهد مشابه کاهش یابد. زال‌نژاد و حسامی (۱۳۹۸) به بررسی عملکرد آسفالت حفاظتی میکروسرفیسینگ حاوی مصالح سرباره فولادی پرداختند. در این پژوهش، از مصالح سرباره فولادی به‌عنوان سنگدانه در مخلوط میکروسرفیسینگ استفاده گردید. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که مصالح سرباره فولاد موجب بهبود عملکرد میکروسرفیسینگ شامل افزایش مقاومت در برابر جابه‌جایی، مقاومت در برابر سایش و افزایش چسبندگی قیر به مصالح سنگی خواهد شد.

دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس با محلول سوپ حاوی آب، اسید HCl، امولسیفایر CQS و ۳ درصد پلیمر SBR در دستگاه امولسیون ساز آزمایشگاهی با سرعت ۲۸۴۰ دور بر دقیقه مورد اختلاط قرار گرفت. این روش تولید قیر امولسیون مطابق استاندارد ASTM D2397 و پژوهش‌های صورت گرفته دیگر محققان انجام شده است (خدیور و کاووسی، ۲۰۱۳؛ ابوطالبی اصفهانی و خطائی، ۲۰۲۲؛ عابدینی و همکاران، ۲۰۲۰). نمایی از مصالح مصرفی و دستگاه امولسیون ساز در شکل ۱ ارائه شده است. همچنین، ویژگی‌های قیر امولسیون تولیدی پس از آزمایش در این تحقیق به ترتیب مطابق با جدول ۱ است.

از شرکت نفت پاسارگاد و امولسیفایر کاتیونی تندشکن^۱ (CQS) با نام تجاری ASFIER N-480L با میزان عدد اسیدی ۴۷۰ برحسب mg KOH/g استفاده گردید. در ادامه، جهت اصلاح قیر امولسیون از پلیمر لاتکس استایرن بوتادین رابر^۲ (SBR) با نام اختصاری Polyatex C با چگالی ۰/۹۸ گرم بر سانتی متر مکعب استفاده شده است. حداقل مقدار قیر باقیمانده و درصد پلیمر جامد استایرن بوتادین رابر بر اساس وزن جامد قیر در قیر امولسیون کاتیونی بر اساس دستورالعمل ISSA A143 به ترتیب ۶۲ و ۳ درصد است. به منظور ساخت قیر امولسیون اصلاح شده با پلیمر، قیر به مقدار ۶۳ درصد در



شکل ۱. مصالح مصرفی جهت تهیه قیر امولسیون پلیمری و دستگاه امولسیون ساز آزمایشگاهی

^۲- Styrene Butadiene Rubber

^۱- Cationic Quick Setting

جدول ۱. مشخصات قیر امولسیون اصلاح شده با پلیمر SBR لاتکس

نتیجه‌ی آزمایش	روش آزمایش	آزمایش
۲۸	AASHTO T59	کندروانی سی بولت- فورل در دمای °C ۲۵، ثانیه
۰/۴	ASTM D6930	نشست (پایداری) در انبار کردن قیر امولسیون، ۲۴ ساعت، %
۶۲	ASTM D7497	تقطیر قیر امولسیون، جرم وزنی %
۰/۰۲	ASTM D244	الک، %
۹۸	AASHTO T59	اندود، %
مثبت	AASHTO T59	بار ذرات
آزمایش‌های روی قیر باقی‌مانده از تقطیر قیر امولسیون		
۶۵*	ASTM D36	نقطه نرمی قیر با آزمایش حلقه و گلوله، درجه سلسیوس
۶۱*	ASTM D5	درجه نفوذ در °C ۲۵، ۱۰۰ گرم، ۵ ثانیه

*قیر پایه‌ی مورد استفاده برای امولسیون‌سازی از نوع ۷۰-۶۰ با نقطه نرمی ۵۴ و درجه نفوذ ۶۳ بوده است.

سنگدانه و فیلر سرامیکی ضایعاتی پس از انجام آزمایش طیف‌سنج فلورسانس اشعه ایکس^۱ (XRF) به شرح جدول ۴ است. همان‌طور که از نتایج جدول ۴ مشخص است، مصالح مورد استفاده در این پژوهش از نوع کلسیتی بوده (تقریباً حاوی ۸۹ درصد CaO) و فیلر ضایعاتی سرامیکی نیز حاوی اکسید سیلیس به میزان تقریبی ۷۰ الی ۸۰ درصد است که با توجه به بار منفی این نوع مصالح، سازگاری مناسبی با قیر امولسیون کاتیونی که دارای بار مثبت هستند، خواهند داشت (براون و همکاران، ۲۰۰۹؛ یوهانس، ۲۰۱۴).

۲-۱-۲. مصالح سنگی

در این پژوهش، مصالح سنگی کوهی کارخانه چالدران واقع در استان مازندران در اندازه ۵-۰ میلی‌متر و فیلر سرامیکی ضایعاتی کارخانه کاشی فیروزه مشهد مورد استفاده واقع شد. از منظر دانه‌بندی، دانه‌بندی نوع II استفاده گردیده و محدوده آن مطابق جدول ۲ حد وسط دانه‌بندی نوع II دستورالعمل ISSA A143 است. ویژگی سنگدانه‌های مخلوط پس از آزمایش در این پژوهش در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین، ترکیب شیمیایی

جدول ۲. دانه‌بندی مصالح سنگی میکروسرفیسینگ

درصد عبور کرده از الک		اندازه الک
محدوده نوع II دستورالعمل ISSA A143	حد وسط دانه‌بندی نوع II دستورالعمل ISSA A143	
۱۰۰-۹۰	۱۰۰	۴/۷۵ میلی‌متر (شماره ۴)
۹۰-۶۵	۷۷/۵	۲/۳۶ میلی‌متر (شماره ۸)
۷۰-۴۵	۵۷/۵	۱/۱۸ میلی‌متر (شماره ۱۶)
۵۰-۳۰	۴۰	۶۰۰ میکرون (شماره ۳۰)
۳۰-۱۸	۲۴	۳۰۰ میکرون (شماره ۵۰)
۲۱-۱۰	۱۵/۵	۱۵۰ میکرون (شماره ۱۰۰)
۱۵-۵	۱۰	۷۵ میکرون (شماره ۲۰۰)

^۱- X-ray fluorescence

جدول ۳. خصوصیات مصالح معدنی

محدودیت بر اساس دستورالعمل ISSA A143	نتیجه	استاندارد	آزمایش‌ها
-	۲/۶۳	ASTM C127	وزن مخصوص حقیقی درشت‌دانه (gr/cm^3)
-	۲/۶۴	ASTM C128	وزن مخصوص حقیقی ریزدانه (gr/cm^3)
-	۲/۷۱	ASTM C127	وزن مخصوص ظاهری درشت‌دانه (gr/cm^3)
-	۲/۷۳	ASTM C128	وزن مخصوص ظاهری ریزدانه (gr/cm^3)
-	۱/۱۱	ASTM C127	درصد جذب آب درشت‌دانه
-	۱/۳۷	ASTM C128	درصد جذب آب ریزدانه
حداقل ۶۵٪	۶۷٪	ASTM D2419	ارزش ماسه‌ای مصالح ریزدانه و خاک‌ها
حداکثر ۱۵٪	۲٪	ASTM C88	سلامت مصالح با سولفات سدیم
حداکثر ۳۰٪	۲۶٪	ASTM C131	مقاومت سایشی در ماشین لس‌آنجلس

جدول ۴. ترکیب شیمیایی سنگدانه و فیلر ضایعاتی سرامیکی

نوع مواد	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	MnO	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	TiO ₂	SrO
مصالح کوهی	۰/۲۷	۱/۰۳	۱/۱۲	۸۹/۹	۰/۸۶	۳۰۰ppm	۴/۹۷	-	۸۰۰ppm	۰/۱۷	۰/۲۲
فیلر سرامیکی	۰/۰۳۸	۱/۱۲۶	۰/۸۳۵	۱/۸۲۸	۱۴/۴۹۶	۱/۰۳۱	۷۴/۱۲۴	۰/۲۳۹	۲/۷۰۵	۰/۲۸۸	-

در سه سطح مختلف از قیر امولسیون در مخلوط‌های میکروسرفیسینگ استفاده گردید. درجه‌بندی هر یک از مخلوط‌های آسفالتی در جدول ۵ 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 بایستی الزامات مربوط به آنها برآورده شوند. سپس، برای دستیابی به طرح اختلاط مناسب و ارزیابی عملکرد مخلوط میکروسرفیسینگ، 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، ۲۰۲۰؛ زال نژاد و حسامی، ۲۰۲۰؛ ایزدی و همکاران، ۲۰۲۲). لازم به ذکر است که مقدار بهینه قیر امولسیونی

۲-۱-۳. فیلر فعال معدنی (سیمان) و آب

در این پژوهش، از سیمان پرتلند به‌عنوان فیلر معدنی فعال برای تسریع زمان گیرش و عمل‌آوری و بالا بردن چسبندگی بین مصالح سنگی در مخلوط‌های میکروسرفیسینگ به میزان ۱ درصد استفاده شد. هدف از اضافه کردن آب، بهبود اندود، پوشش و کارایی مخلوط است و همچنین بایستی فاقد هرگونه مواد و املاح مضر نظیر سولفات‌ها و نمک‌ها باشد (یوهانس، ۲۰۱۴؛ کی‌منش و همکاران، ۲۰۲۰). آب مورد استفاده در این تحقیق برای رسیدن به کارایی مناسب، آب شرب با درجه اسیدی/قلیایی ۷ بوده که در تمامی مخلوط‌های میکروسرفیسینگ استفاده گردید.

۲-۲. طرح اختلاط و آزمایش‌ها

۲-۲-۱. طرح اختلاط

در این مطالعه، فیلر سرامیکی ضایعاتی به‌عنوان جایگزین فیلر در مقادیر صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد، هر کدام

امولسیون در وسط دامنه ۳ درصدی از بیشترین مقدار محدودیت است. همچنین، اگر مقدار حداقل و حداکثر قیر کمتر از ۳ درصد باشد، مقدار بهینه قیر امولسیون با توجه به محدودیت حداقل و حداکثر قیر، وسط دامنه مذکور انتخاب می‌گردد (کی منش و همکاران، ۲۰۲۰؛ زال‌نژاد و حسامی، ۲۰۲۰؛ ایزدی و همکاران، ۲۰۲۲). مقادیر مجاز هر یک از آزمایش‌ها مطابق با جدول ۵ است.

توسط نتایج آزمایش سایش در شرایط مرطوب^۱ و آزمایش تعیین حداکثر قیر با چرخ بارگذاری شده-چسبندگی ماسه^۲ مشخص می‌شود (ISSA, 2010, 2017a)؛ کی-منش و همکاران، ۲۰۲۰؛ زال‌نژاد و حسامی، ۲۰۲۰؛ ایزدی و همکاران، ۲۰۲۲). با توجه به محدودیت‌های مشخص شده برای حداقل و حداکثر قیر، اگر اختلاف بین حداقل و حداکثر قیر بیشتر از ۳ درصد باشد، مقدار بهینه قیر

جدول ۵. درجه‌بندی مخلوط‌های میکروسرفیسینگ حاوی درصد‌های مختلف رنگدانه قرمز طبیعی

نوع مخلوط	فیلر سرامیکی ضایعاتی جایگزین فیلر مخلوط شاهد، %
A	۰
B	۲۵
C	۵۰
D	۷۵
E	۱۰۰

جدول ۶. مقادیر مجاز آزمایش‌های میکروسرفیسینگ (ISSA, 2010)

شماره استاندارد	مقدار مجاز	آزمایش
TB 113	حداقل ۱۲۰ ثانیه	زمان اختلاط
TB 139	حداقل ۱۲ کیلوگرم - سانتی‌متر حداقل ۲۰ کیلوگرم - سانتی‌متر	چسبندگی مرطوب در ۳۰ دقیقه چسبندگی مرطوب در ۶۰ دقیقه
TB 109	حداکثر ۵۳۸ گرم بر متر مربع	تعیین حداکثر قیر به وسیله چرخ بارگذاری شده و چسبندگی ماسه
TB 100	حداکثر ۵۳۸ گرم بر متر مربع	افت سایش در شرایط مرطوب یک ساعت
TB 147	حداکثر ۱۰ درصد حداکثر ۵ درصد	تغییر مکان عمودی (چرخ بارگذاری شده) تغییر مکان افقی (چرخ بارگذاری شده)

آزمایش، مدت زمان شکستن مخلوط در اثر اختلاط به‌عنوان زمان اختلاط معرفی می‌شود. همچنین، مخلوط پخش‌شده روی کاغذ به‌صورت دوره‌ای با انگشت تحت تماس قرار می‌گیرد تا زمانی که مخلوط میکروسرفیسینگ سفت شده و دیگر تغییر شکل ندهد. مدت زمانی که به طول می‌انجامد، زمان گیرش نامیده می‌شود (ISSA, 2017f).

۲-۲-۱. آزمایش زمان اختلاط

آزمایش زمان اختلاط شامل اختلاط نسبت‌هایی از سنگدانه، فیلر، آب و امولسیون است. حدود مواد تشکیل‌دهنده میکروسرفیسینگ در جدول ۷ نشان داده شده است (ISSA, 2017f)؛ زال‌نژاد و حسامی، ۱۳۹۸، ۲۰۲۰؛ کی منش و همکاران، ۲۰۲۰؛ پورسلطانی و حسامی، ۲۰۲۰؛ ایزدی و همکاران، ۲۰۲۲). در این

adhesion

1- Wet track abrasion test

2- Excess asphalt by loaded wheel test sand

جدول ۷. حدود مواد تشکیل دهنده میکروسرفیسینگ (ISSA, 2010)

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

مخلوطها در قالب حلقه‌ای متناسب با دانه‌بندی نوع II ریخته شده و مرکز به مرکز یک پوشش نمدی 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. نتیجه این آزمایش منجر به شناسایی زمان مناسب جهت بازگشایی ترافیک روی مخلوط‌های میکروسرفیسینگ می‌شود (ISSA, 2010). نمایی از دستگاه ارزیابی چسبندگی و نمونه‌ها قبل و بعد از آزمایش در شکل ۲ ارائه شده است.

۲-۲-۲. آزمایش چسبندگی مرطوب
 آزمایش چسبندگی مرطوب جهت تعیین زمان عمل‌آوری و چسبندگی اولیه مخلوط انجام می‌شود (ISSA, 2010). از دستگاه آزمایش چسبندگی برای اندازه‌گیری زمان عمل‌آوری استفاده می‌شود. اساس نتایج به دست آمده پس از ۳۰ و ۶۰ دقیقه عمل‌آوری در دمای اتاق (۲۵ درجه سلسیوس) مخلوط مناسب جهت بازگشایی ترافیک روی آن انتخاب می‌شود. حداقل مقادیر برای این آزمایش عبارتند از: ۱۲ کیلوگرم- سانتی‌متر برای ۳۰ دقیقه (به منظور ارزیابی خاصیت شکنندگی قیر امولسیون) و ۲۰ کیلوگرم- سانتی‌متر برای ۶۰ دقیقه (برای ارزیابی زمان ترافیک جهت بازگشایی). برای انجام این آزمایش،



شکل ۲. الف- نمایی از دستگاه آزمایش چسبندگی، ب- نمونه‌ها بعد از عمل‌آوری و قبل از آزمایش و ج- نمونه‌ها بعد از آزمایش چسبندگی

۲-۲-۳. آزمایش سایش در شرایط مرطوب

این آزمایش به منظور اندازه‌گیری کیفیت پوشش مخلوط میکروسرفیسینگ تحت شرایط سایشی مرطوب و تعیین حداقل مقدار قیر امولسیون مورد نیاز، جهت جلوگیری از بروز خرابی شن‌زدگی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. به صورت کلی‌تر، در این آزمایش، مقدار از دست رفتن سنگدانه نمونه‌های ساخته شده به واسطه بعد از سایش با لوله لاستیکی (شبه‌سازی چرخش ترافیک روی سطح روسازی در حضور آب و پدیده عریان‌شدگی سنگدانه‌ها در شرایط ترمزگیری) مشخص می‌شود. در این آزمایش، یک نمونه عمل‌آوری شده از نمونه میکروسرفیسینگ

برای مدت زمان یک ساعت در آب ۲۵ درجه سلسیوس غوطه‌ور می‌گردد. سپس با یک نوار لاستیکی در شرایط غوطه‌وری در آب به روش چرخشی به مدت ۵ دقیقه تحت عمل سایش قرار می‌گیرد. در نهایت، نمونه سایش یافته در دمای ۶۰ درجه سلسیوس خشک و سپس وزن شده تا مقدار هدرروی سنگدانه‌ها مشخص گردد (ISSA, ۲۰۱۷d). دستگاه آزمایش سایش در شرایط مرطوب و نمونه‌های آن، به ترتیب در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. برای مخلوط‌های میکروسرفیسینگ، دستورالعمل ISSA A143، حداکثر افت وزنی ناشی از سایش را در یک ساعت به ۵۳۸ گرم بر متر مربع محدود می‌کند.



شکل ۳. نمایی از دستگاه آزمایش WTAT و نمونه‌های ساخته شده این آزمایش

۲-۲-۴. آزمایش تعیین حداکثر قیر به وسیله چرخ

بارگذاری شده و چسبندگی ماسه

حداکثر قیر جهت جلوگیری از خرابی قیرزدگی میکروسرفیسینگ در آزمایش تعیین حداکثر قیر به وسیله چرخ بارگذاری شده - چسبندگی ماسه، اندازه‌گیری می‌گردد. در این آزمایش، مخلوط میکروسرفیسینگ با چرخ بارگذاری ۵۶/۷ کیلوگرمی طی ۱۰۰۰ سیکل تراکم می‌گردد. سپس مخلوط وزن شده و وزن اندازه‌گیری شده ثبت می‌گردد. سپس، مطابق دستورالعمل ISSA A143 ۲۰۰ گرم ماسه اتاوا در آن ۸۲ درجه سلسیوس قرار گرفته و سپس به صورت یکنواخت روی نمونه در محل

شیار ایجاد شده، پخش می‌شود. در این حالت، بارگذاری به مدت ۱۰۰ سیکل مشابه حالت قبل جهت تراکم نمونه انجام می‌گردد. در ادامه، نمونه از جای مورد نظر خارج شده و نمونه دوباره وزن می‌شود. اختلاف بین وزن اندازه‌گیری شده و وزن اولیه پس از ۱۰۰۰ سیکل تراکم به عنوان مقدار ماسه‌ای که چسبیده است، گزارش می‌گردد. بدین ترتیب، مقدار مجاز قیر باقی‌مانده در هر یک از مخلوط‌ها تعیین می‌شود (ISSA, ۲۰۱۷b). نمایی از دستگاه این آزمایش و نمونه‌های آن به ترتیب در شکل ۴ نشان داده شده‌اند.



شکل ۴. دستگاه چرخ بارگذاری و نمونه‌های این آزمایش بعد از اعمال بارگذاری

آزمایش، برای هر یک از مخلوط‌های حاوی درصد‌های مختلف از قیر امولسیون، حداقل زمان اختلاط ۱۲۰ ثانیه مورد بررسی واقع شده است. همان‌طور که در این جدول مشخص شده است، با افزایش درصد فیلر سرامیکی برای رعایت شدن محدودیت آیین‌نامه‌ای و افزایش زمان اختلاط، درصد آب افزایش یافت. دلیل این امر آن است که سرامیک‌های ضایعاتی مورد استفاده در این پژوهش مطابق با استانداردهای بین‌المللی و مشخصاتی که کارخانه تولیدکننده در اختیار قرار داده است جذب آب بالایی دارند (بین ۳ الی ۱۰ درصد) و مطابق با مشاهدات آزمایشگاه، مصالح حاوی پودر سرامیکی ضایعاتی نسبت به نمونه شاهد سریع‌تر خشک می‌شوند (دوبریتو و همکاران، ۲۰۰۵؛ ISO 13006، ۲۰۱۸).

۲-۲-۵. آزمایش ارزیابی جابه‌جایی با استفاده از چرخ بارگذاری شده

آزمایش ارزیابی میزان جابه‌جایی عمودی با چرخ بارگذاری شده، ویژگی‌های تغییرشکل مخلوط را تحت بار ترافیک شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد. در این پژوهش، مخلوط با استفاده از ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری چرخ ۵۶۷ کیلوگرم متراکم شده و سپس عرض و ضخامت 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 درصد تجاوز نماید (ISSA، ۲۰۱۷c).

۳. نتایج و بحث

۳-۱. آزمایش زمان اختلاط

در جدول ۸، مقادیر مناسب آب، سیمان و مقادیر اولیه قیر امولسیون در سه سطح مشخص گردیده است. در این

جدول ۸. آزمایش زمان اختلاط برای مخلوط‌های میکروسرفیسینگ

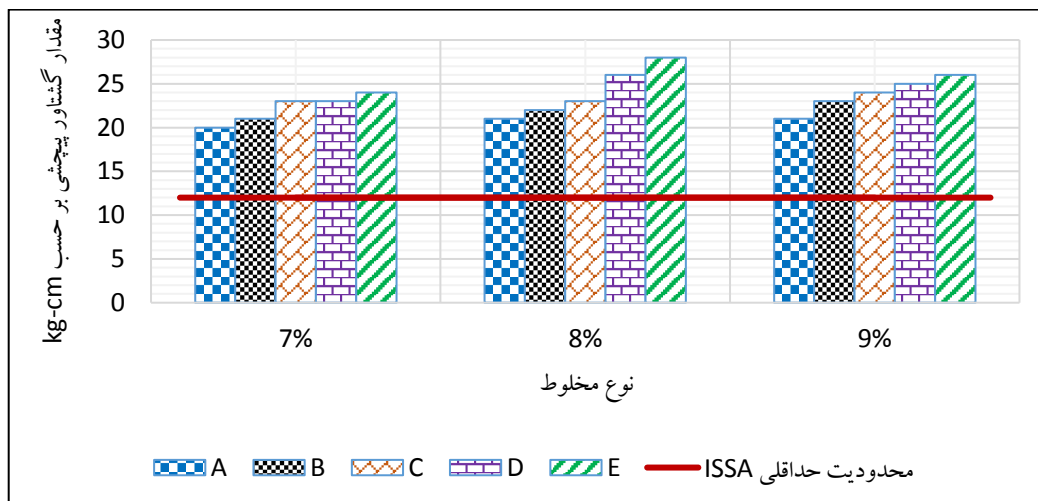
E			D			C			B			A			نوع مخلوط
۱۰۰			۷۵			۵۰			۲۵			۰			درصد فیلر سرامیکی جایگزین فیلر مخلوط شاهد
۹	۸	۷	۹	۸	۷	۹	۸	۷	۹	۸	۷	۹	۸	۷	درصد قیر باقی مانده
۱۰	۱۱	۱۲	۱۰	۱۱	۱۱	۱۰	۱۰	۱۰	۸	۹	۹	۸	۸	۹	درصد آب
۱۲۲	۱۲۴	۱۲۲	۱۲۳	۱۲۳	۱۲۲	۱۲۵	۱۲۷	۱۲۷	۱۲۵	۱۲۹	۱۲۶	۱۲۴	۱۲۶	۱۲۵	زمان اختلاط به دست آمده

مخلوط‌ها رسیده و سپس با افزایش قیر به ۹ درصد، مقدار چسبندگی کاهش می‌یابد.

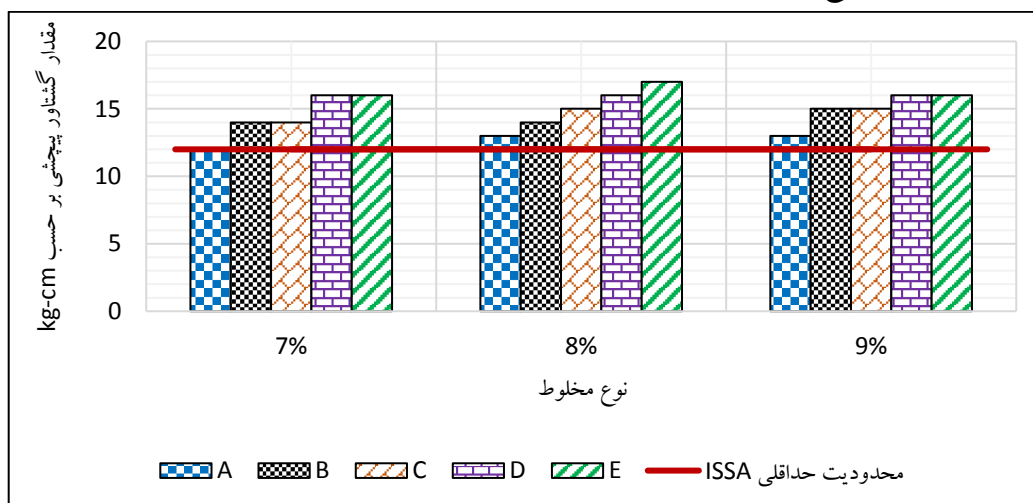
بنابراین، می‌توان این‌طور استنباط کرد که با افزایش درصد قیر تا مقداری معین، چسبندگی در نمونه‌های حاوی پودر سرامیکی ضایعاتی افزایش یافته و سپس با افزایش بیشتر مقدار قیر امولسیون و به تبع آن افزایش زمان عمل‌آوری، مقدار چسبندگی کاهش خواهد یافت. در نمونه شاهد (مخلوط A) در مدت زمان یک ساعت، افزایش درصد قیر تأثیری در افزایش میزان چسبندگی نداشته است. بر اساس آنالیز شیمیایی پودر سرامیکی ضایعاتی، عمده ترکیب شیمیایی آن را اکسید سیلیس تشکیل داده است، بار سطحی این مصالح سیلیسی نیز منفی است و از آنجایی که قیر امولسیون کاتیونی نیز دارای بار سطحی مثبت است می‌توان نتیجه گرفت که پس از ترکیب و اختلاط فیلر سرامیکی با قیر امولسیون کاتیونی پیوند خوبی بین آن‌ها شکل بگیرد و موجب افزایش چسبندگی در مخلوط آسفالتی شود (ژو و همکاران، ۱۹۹۹؛ براون و همکاران، ۲۰۰۹).

۳-۲. آزمایش چسبندگی مرطوب

برای مخلوط‌های آسفالتی، نتایج آزمایش چسبندگی مرطوب در زمان‌های ۳۰ و ۶۰ دقیقه در سه سطح از قیر باقی مانده، مطابق شکل‌های ۵ و ۶ است. با توجه به این شکل‌ها، تمامی مخلوط‌ها با توجه به دستورالعمل ISSA A143 گیرش و مقاومت لازم برای بازگشایی ترافیک به ترتیب در مدت زمان ۳۰ دقیقه و یک ساعت را کسب کرده و مخلوط E دارای بیشترین مقدار چسبندگی نسبت به سایر مخلوط‌ها است. به عنوان نمونه، در قیر باقی مانده ۸ درصد، مخلوط‌های B، C، D و E نسبت به نمونه شاهد A به ترتیب موجب افزایش چسبندگی به قیر در مدت زمان ۳۰ دقیقه به میزان ۷/۷، ۱۵/۴، ۲۳/۱ و ۳۰/۸ درصد و در مدت زمان یک ساعت به میزان ۴/۸، ۹/۵، ۲۳/۸ و ۳۳/۳ درصد شده است. در مدت زمان یک ساعت در مخلوط‌های D و E با افزایش مقدار قیر باقی مانده از ۷ به ۸ درصد، چسبندگی به بیشترین مقدار در مقایسه با دیگر



شکل ۵. نتایج آزمایش چسبندگی در ۳۰ دقیقه برای هر یک از مخلوط‌های میکروسرفیسینگ



شکل ۶. نتایج آزمایش چسبندگی در ۶۰ دقیقه برای هر یک از مخلوط‌های میکروسرفیسینگ

۳-۳. آزمایش سایش در شرایط مرطوب

نتایج آزمایش سایش در شرایط مرطوب در زمان یک ساعت برای مخلوط‌های آسفالتی در شکل ۷ ارائه شده است. با توجه به این شکل، افزایش درصد قیر در همه نمونه‌ها سبب بهبود عملکرد در برابر سایش می‌گردد. این شکل نشان می‌دهد که مخلوط‌های حاوی فیلر سرامیکی شامل ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد در قیر باقی‌مانده ۹ درصد نسبت به نمونه شاهد به ترتیب به مقدار ۹، ۱۵، ۴۹ و ۶۲ درصد عملکرد سایش را بهبود داده‌اند. همچنین، کمترین مقدار افت وزنی (۸۳ گرم بر متر مربع) نمونه‌ها متعلق به نمونه E در ۹ درصد قیر باقی‌مانده است. از

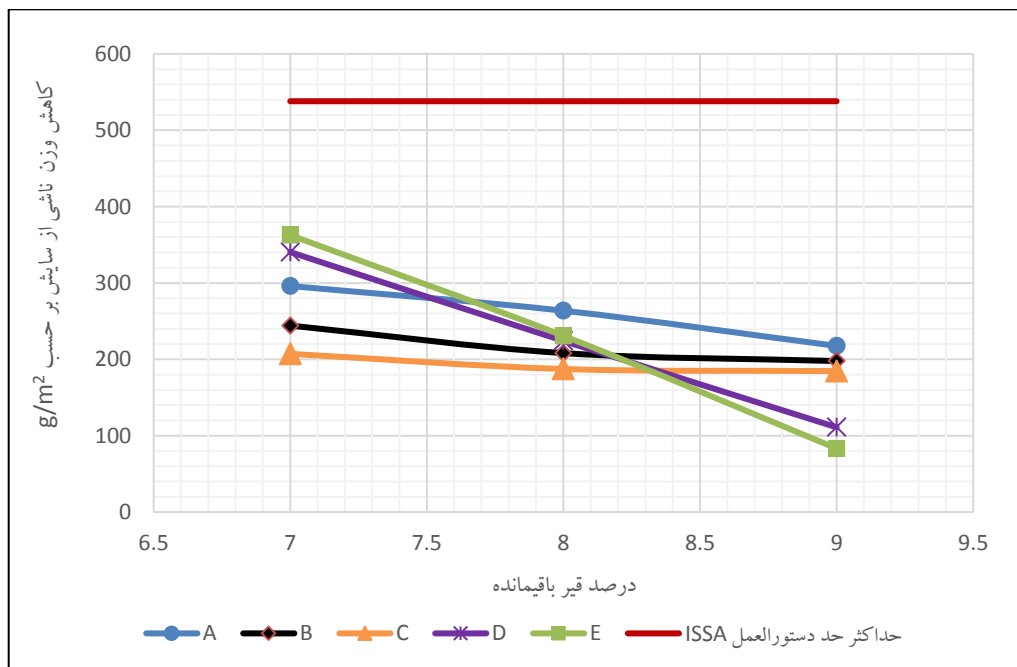
سوی دیگر، با توجه به شکل ۷، از آنجایی که کاهش افت وزنی نشان‌دهنده عملکرد بهتر است، با افزایش قیر از ۷ تا ۹ درصد، نرخ کاهش افت وزنی در مخلوط‌های D و E بیشتر از مخلوط‌های A، B و C بوده است. به عبارتی، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش قیر در افزایش نرخ سایش مخلوط‌های حاوی ۲۵ و ۵۰ درصد فیلر سرامیکی (مخلوط‌های B و C) تأثیر چندانی ندارد.

نکته‌ای که در شکل حائز اهمیت است این موضوع است که در قیر باقی‌مانده ۷ درصد، با افزایش فیلر سرامیکی تا ۵۰ درصد (مخلوط‌های B و C)، سایش کاهش پیدا می‌کند. ولی پس از آن، با افزایش مقدار فیلر

این‌طور برآورد کرد که با افزایش حضور پودر سرامیکی ضایعاتی به‌عنوان فیلر و نقش مهم آن در مخلوط و ترکیب آن با مقدار قیر مناسب، قیر امولسیون پس از شکستن و تبخیر آب به‌خوبی در اجزای مخلوط پخش می‌شود و سطوح و حفرات آن‌ها را می‌پوشاند (ون و همکاران، ۲۰۱۶). از طرفی، در بسیاری از تحقیقات گزارش شده که پدیده عریان‌شدگی ارتباط زیادی با سازگاری قیر و مصالح سنگی دارد. لذا ترکیب یونی با بار منفی که روی سطح سنگدانه باقی مانده، یک پیوند با آسفالت امولسیونی کاتیونی باقی‌مانده تشکیل می‌دهد و موجب افزایش مقاومت در برابر پدیده عریان‌شدگی می‌شود (یوهانس، ۲۰۱۴).

سرامیکی تا ۱۰۰٪ (مخلوط‌های D و E)، سایش افزایش پیدا می‌کند. این در حالی است که با افزایش قیر به ۹ درصد، با افزایش فیلر سرامیکی تا ۱۰۰٪، عملکرد مخلوط‌ها در برابر سایش بهبود پیدا می‌کند؛ یا به عبارت دیگر، روند هدرروی سنگدانه‌ها کاهش پیدا می‌کند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که در صورت جایگزینی فیلر سرامیکی تا ۷۵ و ۱۰۰ درصد، باید قیر متناسب با آن به‌منظور به حداقل رساندن پدیده عریان‌شدگی تعیین و تأمین شود.

بر اساس بررسی‌های محققین، پودر سرامیکی ضایعاتی سطح ویژه بالایی داشته و از آنجا که سطح ویژه یکی از عوامل مهم در تعیین کیفیت یک پودر، قابلیت جذب و خواص مکانیکی و شیمیایی آن است، می‌توان



شکل ۷. نتایج آزمایش سایش در شرایط مرطوب در یک ساعت برای هر یک از مخلوط‌های میکروسرفیسینگ

قیرزدگی مخلوط‌ها کاهش پیدا می‌کند. به‌طوری که همه نمونه‌ها در قیر ۷ و ۹ درصد به ترتیب دارای کمترین و بیشترین مقدار قیرزدگی هستند. این شکل نشان می‌دهد که مقادیر قیرزدگی نمونه‌های A و B فاصله چندانی با یکدیگر ندارند؛ ولی با افزایش فیلر سرامیکی به ۷۵ و

۳-۴. آزمایش تعیین حداکثر قیر به‌وسیله چرخ

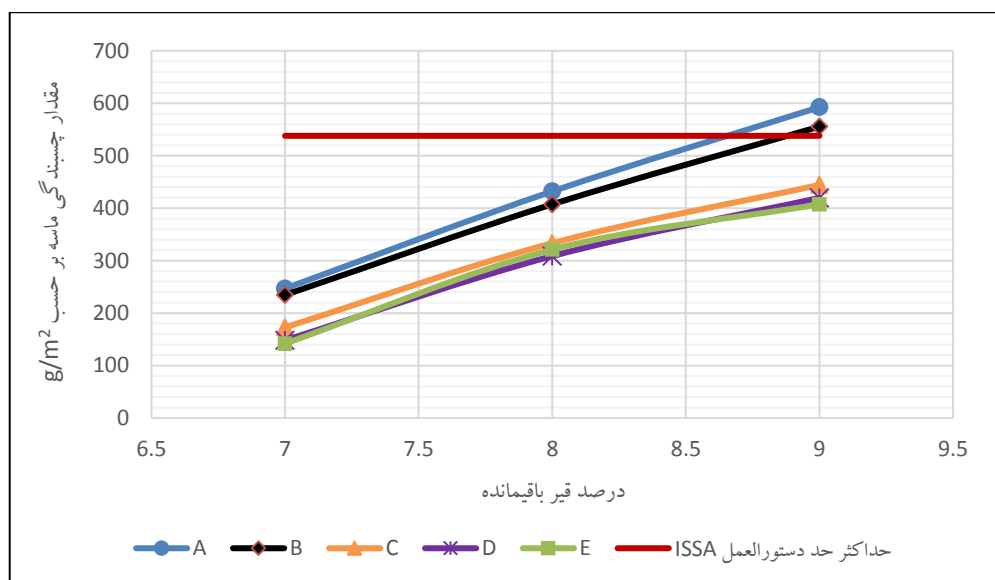
بارگذاری شده و چسبندگی ماسه

نتایج این آزمایش برای مخلوط‌های آسفالتی به شرح شکل ۸ است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با کاهش قیر و یا افزایش درصد فیلر سرامیکی،

قیرزدگی از ۸ به ۹ به ۷ به ۹ درصد با شیب کمتری رشد کرده است.

با بررسی شکل‌های ۷ و ۸ مربوط به آزمایش سایش و چسبندگی ماسه می‌توان برداشت کرد که نمونه‌های D و E که حاوی ۷۵ و ۱۰۰ درصد فیلر سرامیکی هستند، در هر دو آزمایش نتایج نزدیک و مشابهی با یکدیگر دارند. در واقع این موضوع مؤید آن است که با حضور هر چه بیشتر پودر سرامیکی ضایعاتی، نتایج نسبت به نمونه شاهد و نمونه‌های با درصد کمتر پودر سرامیکی بهبود پیدا کرده و نشان از سازگاری خوب بین این مصالح و قیر امولسیون کاتیونیک دارد.

۱۰۰ درصد، مقدار قیرزدگی به‌طور چشمگیری در همه درصد‌های قیر باقی‌مانده کاهش می‌یابد. به‌عنوان نمونه، مخلوط‌های A، B، C، D و E در قیر باقی‌مانده ۹ درصد نسبت به نمونه A (مخلوط شاهد) به ترتیب به مقدار ۶، ۲۵، ۲۹ و ۳۱ درصد مقاومت در برابر قیرزدگی را افزایش داده‌اند. در نهایت، نمونه‌های D و E با مقدار چسبندگی ماسه نزدیک به هم دارای بهترین عملکرد در مقابل قیرزدگی هستند. نکته دیگری که از شکل ۸ دریافت می‌شود این است که در مخلوط‌های A و B، با افزایش درصد قیر، نرخ افزایش چسبندگی ماسه افزایش پیدا کرده، ولی در مخلوط‌های C، D و E، نرخ افزایش



شکل ۸. حداکثر قیر در مخلوط‌های میکروسرفیسینگ به وسیله آزمایش چرخ بارگذاری و چسبندگی ماسه

سایش مرطوب به‌صورت نمودارهای توابع توانی نشان داده می‌شوند (ISSA, ۲۰۱۷f؛ کی‌منش و همکاران، ۲۰۲۰، زال‌نژاد و حسامی، ۱۳۹۸، ۲۰۲۰؛ ایزدی و همکاران، ۲۰۲۲). درصد بهینه قیر امولسیون اصلاح شده با پلیمر برای تمامی مخلوط‌ها در جدول ۹ و شکل ۹ ارائه شده است. در شکل ۹، برای هر یک از مخلوط‌های A، B، C، D و E اندیس‌های ۱ و ۲ به ترتیب نشان‌دهنده نتایج و نمودار آزمایش چرخ بارگذاری- چسبندگی ماسه و آزمایش سایش در شرایط مرطوب است.

۳-۵. تعیین مقدار بهینه قیر امولسیون مخلوط‌های میکروسرفیسینگ

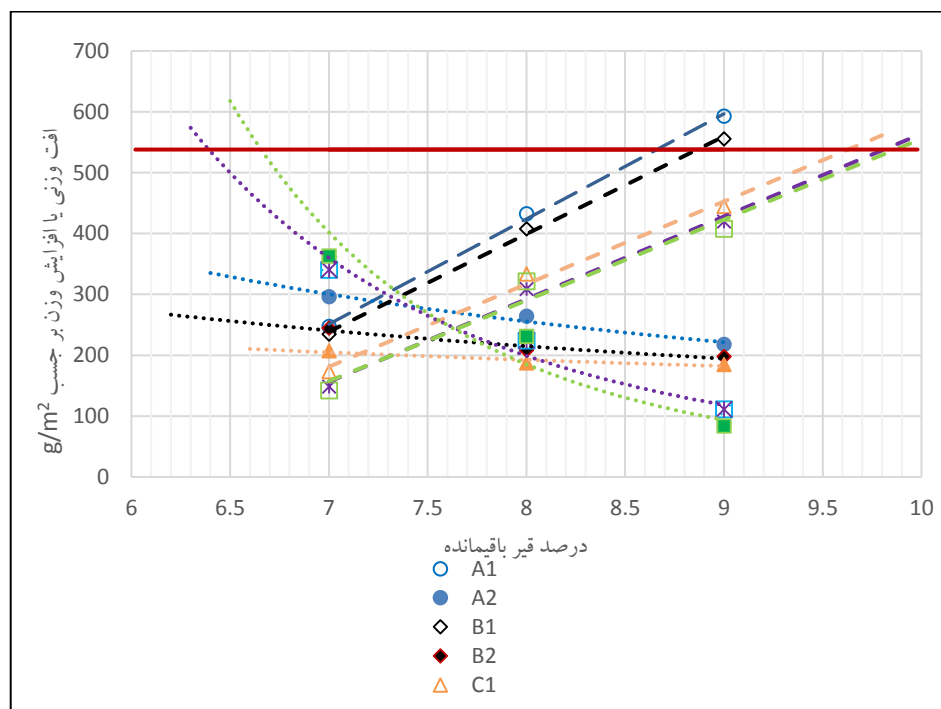
مقدار بهینه و مجاز قیر امولسیون از طریق رسم نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها و مقدار حداکثر قیر به‌وسیله چرخ بارگذاری شده- چسبندگی ماسه و سایش در شرایط مرطوب و تلفیق شکل‌های این دو آزمایش به‌دست می‌آید. در تلفیق دو شکل، نتایج آزمایش ماسه چسبیده به‌صورت یک نمودار خطی و نتایج آزمایش

با شیب کمتر افزایش می‌یابد. طبق نتایج، درصد بهینه قیر امولسیون مخلوط‌های آسفالتی حاوی فیلر سرامیکی ضایعاتی نسبت به مخلوط شاهد افزایش داشته است. به‌طوری که مقدار بهینه قیر امولسیون مخلوط‌های A, B, C, D و E به ترتیب به مقدار ۰/۲۸، ۱/۱، ۱/۸۶ و ۲/۰۲ درصد نسبت به مخلوط A (مخلوط شاهد) بیشتر بوده است.

با توجه نتایج به‌دست آمده، با افزایش فیلر سرامیکی، مقدار حداقل و حداکثر قیر باقی‌مانده افزایش می‌یابد. در این راستا، حداقل مقدار قیر بهینه ناشی از آزمایش سایش با شیب بیشتری افزایش می‌یابد زیرا همان‌طور که قبلاً گفته شد، نرخ کاهش وزن ناشی از سایش با افزایش درصد قیر باقی‌مانده همراه با افزایش درصد فیلر روندی افزایشی داشته است. در مقابل نیز حداکثر قیر باقی‌مانده ناشی از آزمایش چرخ بارگذاری شده و چسبندگی ماسه

جدول ۹. محدوده مجاز قیر باقی‌مانده و درصد بهینه آن برای مخلوط‌هایی با قیر امولسیونی CSS

نوع مخلوط	حداقل مقدار قیر امولسیون به‌دست آمده از آزمایش سایش (%)	حداکثر مقدار قیر امولسیون به‌دست آمده از چسبندگی ماسه (%)	دامنه قابل قبول قیر امولسیون (%)	مقدار بهینه قیر امولسیون (%)
A	۸/۹	۱۳/۹۵	۹/۱۱ - ۱۳/۹۵	۱۱/۵۳
B	۸/۹	۱۴/۲۳	۹/۳۴ - ۱۴/۲۳	۱۱/۸۱
C	۸/۹	۱۵/۰۴	۱۰/۲ - ۱۵/۰۴	۱۲/۶۳
D	۱۰/۳۲	۱۵/۸۱	۱۰/۹۶ - ۱۵/۸۱	۱۳/۳۹
E	۱۰/۸۱	۱۵/۹۷	۱۱/۱۳ - ۱۵/۹۷	۱۳/۵۵



شکل ۹. ترکیب نتایج آزمایش سایش در شرایط مرطوب در مدت زمان یک ساعت و آزمایش چرخ بارگذاری شده- چسبندگی ماسه

۳-۶. تعیین میزان جابه‌جایی مخلوط با آزمایش

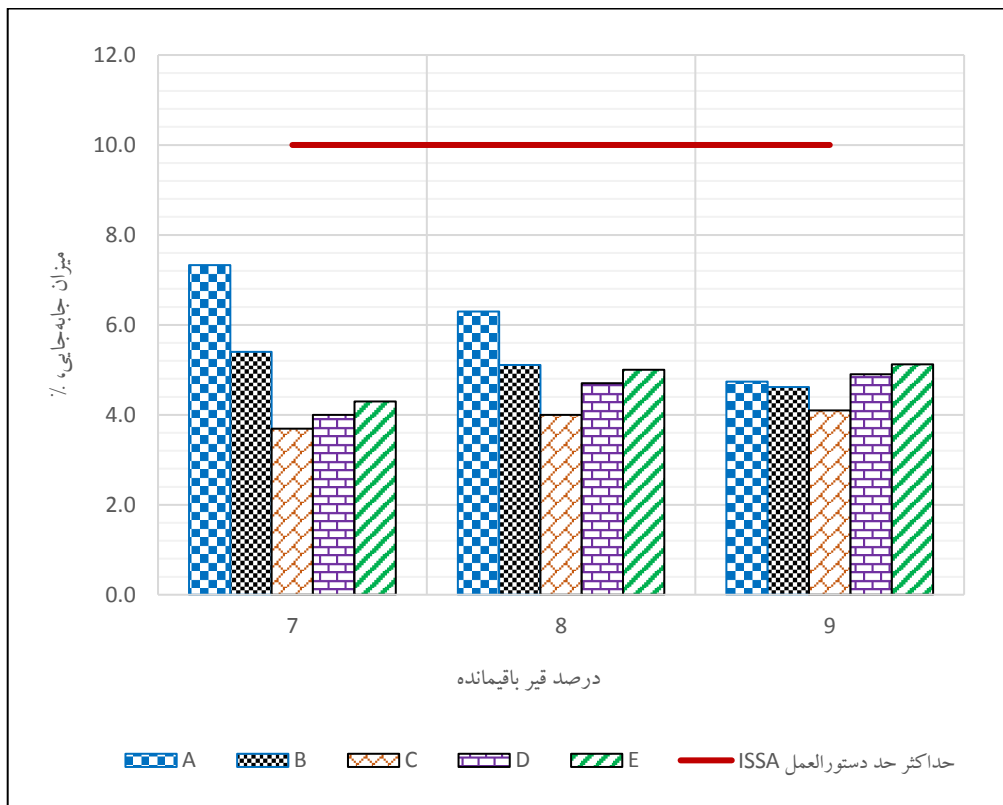
چرخ بارگذاری شده

نتایج حاصل از این آزمایش برای مخلوط‌های میکروسرفیسینگ در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب برای ارزیابی تغییر شکل‌های عمودی و جانبی نشان داده شده است. نتایج این آزمایش از دو منظر مقدار قیر امولسیون و فیلر در مخلوط‌ها قابل بررسی است:

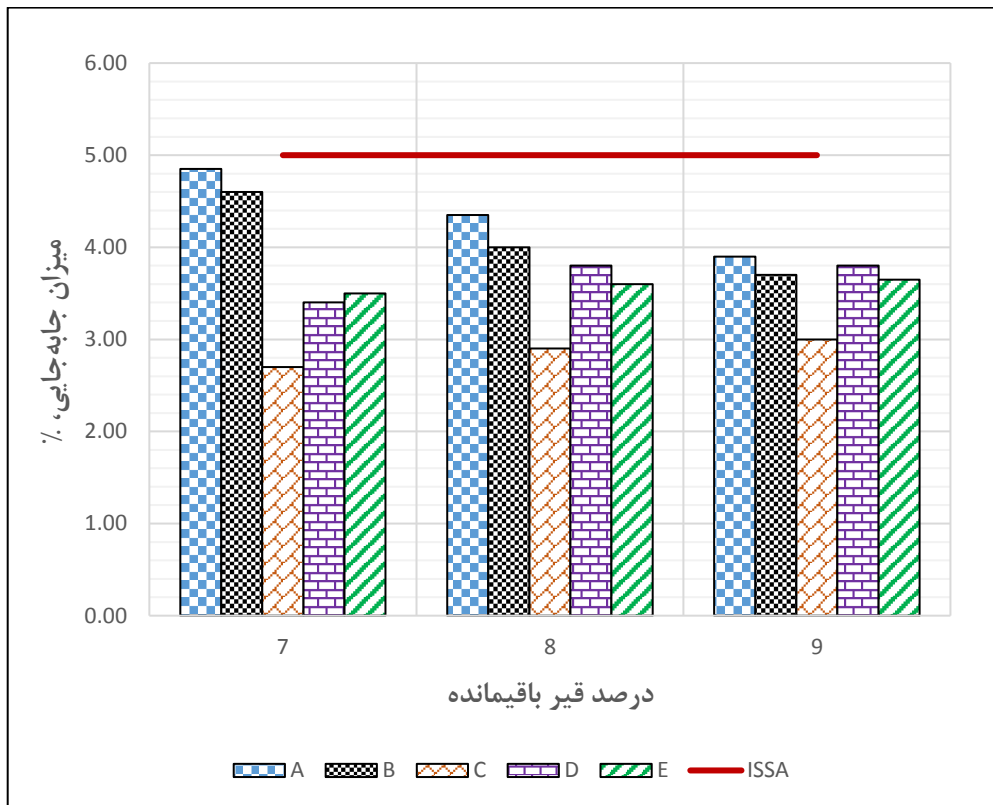
از منظر میزان فیلر: با افزایش میزان فیلر، از تغییر شکل‌های جانبی و عمودی کاسته شده و کمترین میزان جابه‌جایی مربوط به نمونه C است. بدین معنا که در مخلوط‌هایی که مستعد شیارشدگی هستند می‌توان پس از تأمین قیر کافی، احتمال وقوع خرابی شیارشدگی را با افزایش فیلر سیلیسی کاهش داد. به‌عنوان مثال، در قیر باقی‌مانده ۷ درصد مخلوط‌های B، C، D و E نسبت به مخلوط شاهد به ترتیب موجب کاهش تغییر شکل

عمودی به میزان ۲۶/۳، ۴۹/۷، ۴۵/۴ و ۴۱/۳ درصد شده است. همچنین، بر طبق این شکل، با افزایش درصد قیر باقی‌مانده، نرخ کاهش مقدار جابه‌جایی‌ها با افزایش فیلر سیلیسی تا ۵۰٪ به‌طور محسوسی افزایش می‌یابد. پس از آن، افزایش سرپاره تغییر چندانی در نرخ کاهش و یا افزایش جابه‌جایی‌ها نداشته است.

از منظر قیر باقی‌مانده در مخلوط‌های A و B، با افزایش مقدار قیر باقی‌مانده، مقدار تغییر شکل‌ها کمتر شده، ولی در مخلوط‌های C، D و E همان‌طور که مشاهده می‌شود ابتدا میزان جابه‌جایی در قیر باقی‌مانده ۷ به ۸ درصد افزایش و سپس از قیر باقی‌مانده ۸ به ۹ درصد، به‌طور تقریبی روند میزان جابه‌جایی ثابت می‌شود. این بدان معنا است که در هر یک از مخلوط‌ها برای کاهش میزان تغییر شکل‌ها، تعیین میزان قیر مناسب امری لازم است.



شکل ۱۰. میزان جابه‌جایی عمودی مخلوط‌ها در درصدهای مختلف قیر



مشکل ۱۱. میزان جابه‌جایی افقی مخلوط‌ها در درصدهای مختلف قیر

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به بررسی به‌کارگیری پودر سرامیکی ضایعاتی در طرح اختلاط میکروسرفیسینگ جهت سنجش عملکرد آن پرداخته شد. در این راستا، ابتدا مشخصات اجزای مخلوط مورد بررسی قرار گرفته و سپس به منظور ارزیابی عملکرد مخلوط، از پنج ترکیب مختلف حاوی صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد پودر سرامیکی ضایعاتی جایگزین فیلر بر اساس وزن کل سنگدانه استفاده گردید. ارزیابی نمونه‌های آسفالتی به‌واسطه آزمایش‌های چسبندگی مرطوب، چرخ بارگذاری شده و سایش در شرایط مرطوب مطابق با دستورالعمل ASTM D6372 انجام شد. نتایج آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق به‌طور خلاصه در ادامه ارائه شده است:

عبور بار ترافیک را به‌دست آوردند. نمونه‌های حاوی فیلر سرامیکی ضایعاتی نسبت به مخلوط شاهد دارای مقدار چسبندگی بیشتری بوده و در تمامی نمونه‌ها با افزایش درصد قیر باقی‌مانده تا مقداری مشخص، میزان چسبندگی در آن‌ها افزایش یافته و سپس با افزایش بیشتر مقدار قیر امولسیون و به‌تبع آن افزایش زمان عمل‌آوری، مقدار چسبندگی کاهش یافت.

- در آزمایش سایش در شرایط مرطوب مشخص گردید که با افزایش توأم فیلر سرامیکی و قیر امولسیون، مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر خرابی عریان‌شدگی بیشتر می‌شود. به‌طور خلاصه، افزایش فیلر سرامیکی تا مقدار ۵۰٪ سبب افزایش مقاومت نمونه‌ها در برابر سایش شده، ولی با افزایش بیشتر مقدار آن‌ها از ۵۰ به ۱۰۰ درصد جایگزینی، باید مقدار قیر امولسیون نیز متناسب با آن افزایش یابد.

- در آزمایش چسبندگی مرطوب در زمان‌های ۳۰ و ۶۰ دقیقه، تمامی مخلوط‌ها مقاومت لازم جهت

داشتند. در قیر باقی مانده ۷ درصد، مخلوط‌های حاوی ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد پودر سرامیکی ضایعاتی نسبت به نمونه شاهد، موجب بهبود عملکرد جابه‌جایی عمودی به میزان ۲۶/۳، ۴۹/۷، ۴۵/۴ و ۴۱/۳ درصد شده‌اند. کمترین میزان جابه‌جایی مربوط به نمونه حاوی ۵۰ درصد پودر سرامیکی ضایعاتی است. بدین معنا که در مخلوط‌هایی که مستعد شیارشدگی هستند، می‌توان پس از تأمین قیر کافی، احتمال وقوع خرابی شیارشدگی را با افزودن ۵۰ درصد پودر سرامیک، به میزان مؤثری کاهش داد.

۵. تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله مراتب سپاس خود را از تلاش و زحمات ارزشمند شرکت عمارت گستر پیشگامان نوین در زمینه انجام آزمایش‌های مخلوط‌های میکروسرفیسینگ و پیشبرد اهداف مقاله تقدیم می‌داریم.

• در آزمایش تعیین حداکثر قیر به‌وسیله چرخ بارگذاری- چسبندگی ماسه معلوم گردید که با افزایش درصد قیر امولسیون در مخلوط‌های آسفالتی میزان چسبندگی ماسه و به تبع آن پتانسیل قیرزدگی مخلوط‌ها افزایش خواهد یافت. همچنین، با افزایش درصد فیلر از صفر به ۱۰۰ درصد، پتانسیل قیرزدگی مخلوط‌ها کاهش یافت.

• در تعیین درصد بهینه قیر امولسیون، مخلوط‌های حاوی فیلر سرامیکی دارای افزایش درصد بهینه قیر امولسیون بیشتری نسبت به نمونه شاهد بودند. همچنین، مشخص شد که بیشترین درصد قیر امولسیون مرتبط با مخلوط حاوی ۱۰۰ درصد فیلر سرامیکی ضایعاتی است.

• با توجه به آزمایش تعیین میزان جابه‌جایی مخلوط با چرخ بارگذاری شده، نمونه‌های حاوی پودر سرامیکی ضایعاتی عملکرد مناسب‌تری نسبت به نمونه شاهد در جابه‌جایی‌های افقی و عمودی

۶. مراجع

زال نژاد، م. و حسامی، ا. ۱۳۹۸. "ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر استفاده از سرباره فولاد بر مشخصات آسفالت حفاظتی میکروسرفیسینگ". مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۱(۵): ۳۵-۱۶.

عطالهی، ا. و حسامی، س. ۱۳۹۷. "بررسی عملکرد آسفالت حفاظتی میکروسرفیسینگ حاوی پودر لاستیک". پایان‌نامه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل.

Abedini, M., Hassani, A., Kaymanesh, M. R., Yousefi, A. A. and Abedini, H. 2020. "Multiple stress creep and recovery behavior of SBR-modified bitumen emulsions". J. Test. Eval., 48(4).

Aboutalebi Esfahani, M. and Khatayi, A. 2022. "Effect of type and quantity of emulsifier in bitumen polymer emulsion on microsurfacing performance". Int. J. Pavement Eng., 23: 957-971.

ASTM D7497. 2016. "Standard practice for recovering residue from emulsified asphalt using low temperature evaporative technique". ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D6372. 2018. "Standard practice for design, testing, and construction of microsurfacing". American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

ASTM D242. 2019. "Standard specification for mineral filler for asphalt mixtures". ASTM International, West Conshohocken, PA.

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". Third Edition, National Asphalt Pavement Association.

Commission, E. 2006. "Regulation (EC) No 1013/2006 of the European Parliament and of the Council of 14 June (2006) on shipments of waste".

- 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. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117870>
- de Brito, J., Pereira, A. S. and Correia, J. R. 2005. "Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates". *Cement Concrete Compos.*, 27(4): 429-433. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.07.005>
- Dondi, M., Cappelletti, P., D'Amore, M., de Gennaro, R., Graziano, S. F., Langella, A., . . . and Zanelli, C. 2016. "Lightweight aggregates from waste materials: Reappraisal of expansion behavior and prediction schemes for bloating". *Constr. Build. Mater.*, 127: 394-409. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.111>
- Gujar, R. and Dadhich, G. 2019. "Modelling efficiency of industrial waste utilised for microsurfacing using artificial neural networks". *Int. J. Environ. Waste Manag.*, 23(2): 113-122.
- Gujar, R. and Vakharia, V. 2019. "Prediction and validation of alternative fillers used in micro surfacing mix-design using machine learning techniques". *Constr. Build. Mater.*, 207: 519-527. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.136>
- Halicka, A., Ogrodnik, P. and Zegardlo, B. 2013. "Using ceramic sanitary ware waste as concrete aggregate". *Constr. Build. Mater.*, 48: 295-305. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.063>
- Hussein, A. A., Jaya, R. P., Abdul Hassan, N., Yaacob, H., Huseien, G. F. and Ibrahim, M. H. W. 2017. "Performance of nanoceramic powder on the chemical and physical properties of bitumen". *Constr. Build. Mater.*, 156: 496-505. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.014>
- ISO 13006. 2018. "Ceramic tiles- Definitions, classification, characteristics and marking". International Organization for Standardization (ISO), Geneva.
- ISSA. 2010. "A143-Recommended performance guideline for micro surfacing". International Slurry Surfacing Association.
- ISSA. 2017a. "Outline guide design procedure for slurry seal". Technical Bulletin 111, 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 109, 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 147, International Slurry Surfacing Association.
- ISSA. 2017d. "Test method for wet track abrasion of slurry surfacing systems". Technical Bulletin 100, International Slurry Surfacing Association.
- ISSA. 2017e. "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. 2017f. "Trial mix procedure for slurry seal design". Technical Bulletin 113, International Slurry Surfacing Association.
- Izadi, A., Zalnezhad, M., Bozorgi Makerani, P. and Zalnezhad, H. 2022. "Mix design and performance evaluation of coloured slurry seal mixture containing natural iron oxide red pigments". *Road Mater. Pavement Design*, 23: 907-924.
- Jin, T., Warid, M., Idham, M., Hainin, M., Yaacob, H., Hassan, N., . . . and Afiqah, R. 2019. "Modification of emulsified bitumen using styrene-butadiene rubber (SBR)". IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Johannes, P. T. 2014. "Development of an improved mixture design framework for slurry seals and micro-surfacing treatments". The University of Wisconsin, Madison.
- Kamboozia, N., Saed, S. A. and Rad, S. M. 2021. "Rheological behavior of asphalt binders and fatigue resistance of SMA mixtures modified with nano-silica containing RAP materials under the effect of mixture conditioning". *Constr. Build. Mater.*, 303: 124433.
- Keymanesh, M. R., Ziari, H., Zalnezhad, H. and Zalnezhad, M. 2020. "Mix design and performance evaluation of microsurfacing containing electric arc furnace (EAF) steel slag filler". *Constr. Build. Mater.*, 269: 121336.
- Khadivar, A. and Kavussi, A. 2013. "Rheological characteristics of SBR and NR polymer modified bitumen emulsions at average pavement temperatures". *Constr. Build. Mater.*, 47: 1099-1105.
- Luo, Y., Zhang, K., Xie, X. and Yao, X. 2019. "Performance evaluation and material optimization of Micro-surfacing based on cracking and rutting resistance". *Constr. Build. Mater.*, 206: 193-200. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.066>

- Maghool, F., Arulrajah, A., Du, Y.-J., Horpibulsuk, S. and Chinkulkijniwat, A. 2017. "Environmental impacts of utilizing waste steel slag aggregates as recycled road construction materials". *Clean Technol. Environ. Policy*, 19(4): 949-958. doi:10.1007/s10098-016-1289-6
- Medina, C., Frías, M. and Sánchez de Rojas, M. I. 2012. "Microstructure and properties of recycled concretes using ceramic sanitary ware industry waste as coarse aggregate". *Constr. Build. Mater.*, 31: 112-118. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.075
- Pacheco-Torgal, F. and Jalali, S. 2011. "Compressive strength and durability properties of ceramic wastes based concrete". *Mater. Struct.*, 44(1): 155-167. doi:10.1617/s11527-010-9616-6
- Patel, C. P. and Bhavsar, J. K. 2016. "Enhancement of concrete properties by replacing cement and fine aggregate with ceramic powder". *J. Civ. Eng. Environ. Technol.*, 3(3): 232-236.
- Poursoltani, M. and Hesami, S. 2020. "Performance evaluation of microsurfacing mixture containing reclaimed asphalt pavement". *Int. J. Pavement Eng.*, 21(12): 1491-1504.
- Rashid, K., Razzaq, A., Ahmad, M., Rashid, T. and Tariq, S. 2017. "Experimental and analytical selection of sustainable recycled concrete with ceramic waste aggregate". *Constr. Build. Mater.*, 154: 829-840. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.219
- Ren, X. and Sancaktar, E. 2019. "Use of fly ash as eco-friendly filler in synthetic rubber for tire applications". *J. Clean. Prod.*, 206: 374-382. doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.202
- Rodríguez-Fernández, I., Lastra-González, P., Indacochea-Vega, I. and Castro-Fresno, D. 2019. "Recyclability potential of asphalt mixes containing reclaimed asphalt pavement and industrial by-products". *Constr. Build. Mater.*, 195: 148-155. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.069
- Saed, S. A., Kamboozia, N. and Mousavi Rad, S. 2021. "Performance evaluation of stone matrix asphalt mixtures and low-temperature properties of asphalt binders containing reclaimed asphalt pavement materials modified with nanosilica". *J. Mater. Civ. Eng.*, 34(1): 04021380.
- Saed, S. A., Kamboozia, N., Ziari, H. and Hofko, B. 2021. "Experimental assessment and modeling of fracture and fatigue resistance of aged stone matrix asphalt (SMA) mixtures containing RAP materials and warm-mix additive using ANFIS method". *Mater. Struct.*, 54(6): 1-19.
- Senthamarai, R. M., Manoharan, P. D. and Gobinath, D. 2011. "Concrete made from ceramic industry waste: Durability properties". *Constr. Build. Mater.*, 25(5): 2413-2419. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.049
- Shamsaei, M., Aghayan, I. and Kazemi, K. A. 2017. "Experimental investigation of using cross-linked polyethylene waste as aggregate in roller compacted concrete pavement". *J. Clean. Prod.*, 165: 290-297. doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.109
- Shamsaei, M., Khafajeh, R. and Aghayan, I. 2019. "Laboratory evaluation of the mechanical properties of roller compacted concrete pavement containing ceramic and coal waste powders". *Clean Technol. Environ. Policy*, 21(3): 707-716. doi:10.1007/s10098-018-1657-5
- Siddique, R. and Cachim, P. 2018. "Waste and supplementary cementitious materials in concrete: characterisation, properties and applications". Woodhead Publishing.
- Simões, D., Almeida-Costa, A. and Benta, A. 2017. "Preventive maintenance of road pavement with microsurfacing- an economic and sustainable strategy". *Int. J. Sustain. Transport.*, 11(9): 670-680. doi:10.1080/15568318.2017.1302023
- Sun, X., Qin, X., Li, S., Zou, C., Wang, C. and Wang, X. 2018. "Characterization of thermal insulating microsurfacing modified by inorganic insulating material". *Constr. Build. Mater.*, 175: 296-306. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.170
- Suzuki, M., Seddik Meddah, M. and Sato, R. 2009. "Use of porous ceramic waste aggregates for internal curing of high-performance concrete". *Cement Concrete Res.*, 39(5): 373-381. doi:https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.01.007
- Wan, J., Wu, S., Xiao, Y., Liu, Q. and Schlangen, E. 2016. "Characteristics of ceramic fiber modified asphalt mortar". *Mater. (Basel, Switzerland)*, 9(9): 788. doi:10.3390/ma9090788
- 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. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.164
- Wozzuk, A., Bandura, L. and Franus, W. 2019. "Fly ash as low cost and environmentally friendly filler and its effect on the properties of mix asphalt". *J. Clean. Prod.*, 235: 493-502. doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.353
- Wozzuk, A., Wróbel, M. and Franus, W. 2019. "Influence of waste engine oil addition on the properties of zeolite-foamed asphalt". *Mater. (Basel, Switzerland)*, 12(14): 2265. doi:10.3390/ma12142265

- 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. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.12.005>
- Zhang, H., Keoleian, G. A. and Lepech, M. D. 2013. "Network-level pavement asset management system integrated with life-cycle analysis and life-cycle optimization". *J. Infrastruct. Syst.*, 19(1): 99-107.
- Zhou, Z., Xu, Z., Masliyah, J. H. and Czarnecki, J. 1999. "Coagulation of bitumen with fine silica in model systems". *Colloid Surface A: Physicochem. Eng. Aspects*, 148(3): 199-211.