پژوهش‌های کاربردی در مهندسی زیرساخت‌ها

سال یکم، شماره یکم، پیاپی یکم، بهار و تابستان ۱۴۰۵ (۵۳-۷۲)

«مقاله پژوهشی»

امکان‌سنجی و تأثیر استفاده از پودر سنگ مرمر ضایعاتی جایگزین فیلر طبیعی بر عملکرد آسفالت حفاظتی اسلاری‌سیل

حسن زیاری[۱*]، زهرا خیدان[۲]، مهدی زال‌نژاد[۳]

۱. استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم‌وصنعت ایران، تهران، ایران.
۲. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم‌وصنعت ایران، تهران، ایران.
۳. دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم‌وصنعت ایران، تهران، ایران.

نویسنده مسئول:
حسن زیاری
رایانامه: h.ziari@iust.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۳۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۹

استناد به این مقاله:
زیاری، حسن؛ خیدان، زهرا و زال‌نژاد، مهدی. (۱۴۰۵). امکان‌سنجی و تأثیر استفاده از پودر سنگ مرمر ضایعاتی جایگزین فیلر طبیعی بر عملکرد آسفالت حفاظتی اسلاری‌سیل. *پژوهش‌های کاربردی در مهندسی زیرساخت‌ها*، ۱(۱)، ۵۳-۷۲.

چکیده

یکی از شیوه‌های کارآمد در نگهداری پیشگیرانه و حفظ رویه‌های آسفالتی، استفاده به موقع از آسفالت حفاظتی اسلاری‌سیل است. این مطالعه با هدف امکان‌سنجی و تأثیر استفاده از پودر سنگ مرمر ضایعاتی جایگزین فیلر طبیعی در طرح اختلاط اسلاری‌سیل جهت سنجش عملکرد آن انجام شده است. در این‌خصوص، در مرحله اول ویژگی‌های مصالح سنگی و پودر سنگ مرمر بررسی گردید. در مرحله بعد جهت تحلیل عملکرد مخلوط‌های اسلاری‌سیل، از ۵ ترکیب متفاوت شامل صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد پودر مرمر جایگزین فیلر مخلوط اسلاری‌سیل استفاده گردید. ارزیابی و مقایسه نمونه‌های آسفالتی با آزمایش‌های چسبندگی مرطوب (در زمان‌های ۳۰ و ۶۰ دقیقه)، سایش در شرایط مرطوب (در مدت‌زمان یک ساعت) و چرخ بارگذاری شده-چسبندگی ماسه و چرخ بارگذاری شده-میزان جابه‌جایی مطابق با آیین‌نامه ASTM D3910 صورت گرفت. نتایج نشان داد که نمونه‌های حاوی پودر سنگ مرمر ضایعاتی، سبب ارتقاء عملکرد اسلاری‌سیل می‌شوند. همچنین در میان نمونه‌های آسفالتی، مخلوط حاوی ۱۰۰ درصد پودر مرمر در درصد قیر ۹، دارای مناسب‌ترین عملکرد بوده به‌طوری که نسبت به نمونه اصلاح نشده (شاهد) سبب افزایش چسبندگی در مدت‌زمان ۳۰ و ۶۰ دقیقه به‌ترتیب به‌میزان ۲۸/۱ و ۳۳/۳ درصد و کاهش افت وزنی مخلوط به‌میزان ۴۸ درصد و کاهش میزان جابه‌جایی عمودی در برابر بارگذاری ترافیکی به‌میزان ۳۱/۹ درصد گردید.

واژه‌های کلیدی

آزمایش چسبندگی مرطوب، پودر سنگ مرمر ضایعاتی، حساسیت رطوبتی، مقاومت در برابر تغییر شکل، اسلاری‌سیل.

حق انتشار این مستند، متعلق به نویسندگان آن است. ۱۴۰۴ ©. ناشر این مقاله، دانشگاه پیام نور است.
این مقاله تحت گواهی زیر منتشرشده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است.
Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

۱. مقدمه

درپی توسعه شهرنشینی و افزایش ساخت‌وساز در سالیان اخیر، استخراج سنگ‌دانه‌های طبیعی افزایش چشمگیری داشته است که آثار مخرب متعددی مانند تخلیه گسترده معادن و کمبود سنگ‌دانه‌های باکیفیت، تغییر مسیر رودخانه، آلودگی آب‌های زیرزمینی، جنگل‌زدایی، تخریب گیاهان و جانوران و افزایش هزینه‌های ساخت را برجای گذاشته است[٤-١]. از طرفی مدیریت دفن زباله‌ها و پسماندهای صنایع؛ هزینه‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی زیادی را به‌همراه دارد [٥]. افزایش تولید زباله های صنعتی و ساختمانی علاوه‌بر تحمیل هزینه‌های اضافی جمع‌آوری و دفن، فضای وسیعی از زمین را برای دفن اشغال می کند، نفوذپذیری و تخلخل خاک را کاهش می‌دهد و سبب آلودگی محیط‌زیست می‌شود [٧،٦]. بنابراین طراحی استراتژی‌های مدیریت پسماند، نیازمند سرمایه‌گذاری در روش‌ها و ابتکارات بازیافت و استفاده مجدد است. به‌کارگیری این پسماندها در صنعت ساخت به‌عنوان یکی از راه‌های مؤثر برای استفاده از حجم بالایی از این زباله‌ها شناخته‌شده است [٨، ٩]. در همین راستا، برخی از مواد ضایعاتی و قابل بازیافت مانند خاکستر بادی، خاکستر پوسته برنج، ضایعات فلزی، سرباره کوره‌ها، پودر آجر، آسفالت بازیافتی، بتن بازیافتی، ضایعات پودری زغال‌سنگ و گردوغبار کوره سیمان برای تولید محصولات غیرمضر برای محیط‌زیست مجدداً مورد استفاده قرار می‌گیرند [١٣-١٠].

افزایش تقاضا برای سنگ‌های مرمر در صنعت ساختمان‌سازی منجر به تخلیه گسترده معادن و ازدیاد تولید ضایعات سنگ‌مرمر شده است [١٤،١٥]. ایران، چین، هند، ایتالیا، ترکیه، مصر، اسپانیا، سوئد، فرانسه، الجزایر و برزیل تولیدکنندگان اصلی سنگ مرمر محسوب می‌شوند [١٦]. درطی مراحل مختلف فرایندهای استخراج و فرآوری سنگ، مقدار زیادی ضایعات سنگ‌مرمر به‌صورت سنگ و پودر مرمر تولید می‌شود که عموماً به زمین‌های بایر و توده‌های آبی ریخته می‌شود و باعث نگرانی زیست‌محیطی می‌شود [١٧]. روشن است بازیافت ضایعات پودر مرمر تأثیر مهمی در کمک به اقتصاد و اکولوژی کشور دارد؛ از این‌رو تحقیقات زیادی برای یافتن روش‌های بازیافت ضایعات پودر سنگ‌مرمر در صنعت ساخت انجام‌شده است [١٤،١٦،١٧]. پودر سنگ‌مرمر حاوی بیش از ۵۰ درصد اکسیدکلسیم است و به‌دلیل شباهت با پودر سنگ‌آهک ازنظر ترکیب شیمیایی، به‌عنوان جایگزین مناسبی در پروژه‌های عمرانی قابل‌استفاده است [١٨]. بخش قابل‌توجهی از ضایعات پودری سنگ مرمر قابلیت استفاده در پروژه‌های راه و ساختمان‌سازی دارند. استفاده از پسماندها به‌عنوان جایگزین بخشی از سنگ‌دانه در صنعت راه‌سازی نه‌تنها تأثیرات محیطی را کاهش می‌دهد، بلکه موجب صرفه‌جویی در منابع طبیعی، بهبود خواص مخلوط آسفالتی یا بتنی و کاهش هزینه کلی پروژه می شود و درنهایت ارزش اقتصادی را برای مواد زائد به ارمغان می آورد.

یکی از راه‌های بازیافت پودر سنگ‌مرمر، استفاده از آن در آسفالت حفاظتی اسلاری‌سیل است. اسلاری‌سیل به‌عنوان یک تکنیک نگهداری و تعمیر پیشگیرانه روسازی تأثیر بسزایی در به تأخیرانداختن وقوع خرابی‌های سطح راه، حفظ و ارتقای شاخص خدمت‌دهی سطح روسازی دارد [١٩،٢٠]. استفاده از اسلاری‌سیل در مقایسه با سایر روش‌ها، ضمن صرف هزینه‌های اجرایی پایین‌تر و زمان عمل‌آوری کوتاه‌تر، سبب اصلاح شیارشدگی سطح راه، ترمیم خرابی‌های با شدت کم، بهبود بافت سطحی و درنهایت افزایش عمر سرویس‌دهی روسازی می‌گردد [٢١]. همچنین در این روش، به‌دلیل ضخامت کم آن پس از اجرا، ضرورت ترمیم شانه‌ها و یا تعویض جداول حاشیه خیابان وجود ندارد. اسلاری‌سیل مخلوطی است متشکل از: سنگدانه خوب دانه‌بندی شده، قیر امولسیون، فیلر معدنی و آب که با نسبت وزنی مشخص تعیین شده [٢٢] و بر روی سطح آماده پخش و به‌صورت تک‌لایه اجرا می‌گردد [١٩]. افزایش ترافیک سال‌های اخیر در اکثر کشور ها، حفاظت از سرمایه‌های موجود را با توجه به محدودیت بودجه در کشورهای درحال توسعه ضروری می‌سازد [٢٣]. بنابراین نیاز به توسعه ابزارهای کم‌هزینه و کارآمدتر و روش‌های حفاظت از آسفالت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از این‌رو پیشرفت‌های آتی در روکش‌های حفاظتی به‌ویژه فناوری اسلاری‌سیل می‌تواند بر استفاده از ضایعات صنعتی و محصولات جانبی صنایع به‌منظور حفظ منابع محیط‌زیست، کاهش هزینه و بهبود خواص متمرکز باشد. پودر سنگ مرمر ضایعاتی نیز یکی از مواد قابل‌بررسی برای جایگزینی فیلر طبیعی است؛ امکان استفاده از آن به‌عنوان فیلر در مخلوط‌های آسفالتی گرم در پژوهش‌های پیشین بررسی شده است [١٨]. خان و همکاران (٢٠٢٣)، در پژوهشی استفاده از گردوغبار سنگ مرمر (MD) را به‌عنوان جایگزین پرکننده معدنی در مخلوط آسفالت گرم (HMA) بررسی کردند. نتایج نشان داد

که افزودن MD تا ۴ درصد وزن سنگدانه‌ها باعث افزایش پایداری مخلوط می‌شود، اما در مقادیر بالاتر کاهش می‌یابد. همچنین، MD عملکرد مخلوط را در دماهای بالا و مقاومت در برابر شیارشدگی بهبود می‌بخشد، به‌طوری‌که نمونه‌های حاوی ۶ درصد MD بهترین مقاومت را نشان دادند [۲٤]. عیسی و همکاران (۲۰۲۲)، در تحقیقی با هدف بررسی عملکرد HMA با استفاده از ضایعات پودر سنگ مرمر به‌عنوان جایگزین پرکننده معدنی، پنج نوع مخلوط آسفالتی را براساس روش مقاومت مارشال با استفاده از صفر درصد (مخلوط شاهد)، ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ تهیه نمودند. بهبود پایداری مارشال، افزایش در چگالی ظاهری با افزایش نسبت ضایعات پودر مرمر از ۲۵ درصد تا ۱۰۰ درصد مشاهده شد. به‌طور کلی، نتایج نشان داد که تمام مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با نسبت‌های مختلف ضایعات پودر سنگ‌مرمر به مقادیر قابل‌قبولی برای تمام خواص حجمی و مکانیکی دست یافتند [۲۵]. سانگ و همکاران امکان استفاده از پودر سنگ‌مرمر ضایعاتی به‌عنوان جایگزین بخشی از فیلر در مخلوط آسفالت گرم (HMA) را بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزودن این پودر باعث افزایش پایداری مارشال و مقاومت کششی غیرمستقیم می‌شود. بهترین ترکیب، استفاده از ۳ درصد حجمی پودر سنگ‌مرمر ضایعاتی همراه با ۴٫۵ درصد بایندر است که برای روسازی جاده‌ها مناسب‌ترین عملکرد را ارائه می‌دهد [۱۸]. رضا و خان (۲۰۲۱)، در مطالعه‌ای تأثیر جایگزینی گردوغبار سنگ‌آهک با گردوغبار مرمر در مخلوط آسفالتی را بررسی کردند. محتوای چسب بهینه ۵٫۵ درصد تعیین شد و گردوغبار مرمر در مقادیر صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد جایگزین گردید. نتایج نشان داد که جایگزینی گردوغبار مرمر تا ۵۰ درصد باعث بهبود پایداری، روانی مارشال و خواص حجمی مخلوط می‌شود [۲٦]. عود و همکاران (۲۰۲۲)، در مطالعه‌ای عملکرد پرکننده‌های مختلف در مخلوط‌های آسفالتی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که پودر سنگ‌مرمر ضایعاتی به‌عنوان پرکننده، نسبت به آهک معمولی، آهک هیدراته، گرانیت و سرباره فولادی عملکرد بهتری دارد. این پرکننده موجب بهبود مدول دینامیکی در دماهای بالا، کاهش تغییر شکل محوری تحت بارگذاری‌های متناوب، و افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی شد. همچنین، نمونه‌های حاوی پودر سنگ‌مرمر ضایعاتی حساسیت رطوبتی کمتری داشتند و مقاومت رطوبتی آن‌ها بیش از ۸۰ درصد ارزیابی شد [۲۷].

در مطالعات اخیر، تأثیر فیلر پودر سنگ‌مرمر ضایعاتی در بتن و آسفالت گرم مورد بررسی قرار گرفته است اما مطالعات محدودی در زمینه‌ی اثربخشی این ماده ضایعاتی در مخلوط‌های آسفالتی سرد به‌ویژه اسلاری‌سیل انجام شده است. یکی از اهداف این پژوهش ارائه آسفالت حفاظتی است که در مدیریت نگهداری و تعمیر و مصرف انرژی، مقرون‌به‌صرفه باشد و به مدیریت پسماند کمک کند. لذا در این تحقیق اثر افزودن درصدهای مختلف فیلر پودر سنگ‌مرمر ضایعاتی بر خواص اسلاری‌سیل مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا، ابتدا خواص شیمیایی و فیزیکی مصالح سنگی و فیلر ضایعاتی ارزیابی شد؛ سپس به‌منظور ارزیابی عملکرد مخلوط اسلاری‌سیل حاوی ضایعات پودر سنگ‌مرمر، ۵ ترکیب مختلف حاوی صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد پودرمرمر تهیه شد. تهیه نمونه‌ها به‌واسطه سایش در شرایط مرطوب، چسبندگی و چرخ بارگذاری شده مطابق با دستورالعمل ISSA A105 [۲۸] انجام شد.

۲. مواد و مصالح

۲-۱ مصالح سنگی

در این تحقیق سنگدانه‌های کوهی (کارخانه چالدران، مازندران) در اندازه ۰-۵ میلی‌متر و پودر سنگ‌مرمر ضایعاتی (کارخانه ایران مرمر، تهران) به‌عنوان جایگزین بخشی از فیلر استفاده گردید. ازلحاظ دانه‌بندی، دانه‌بندی نوع II مورد استفاده واقع شده و حدود آن در جدول ۱ مشخص است. استفاده از این نوع دانه‌بندی به‌دلیل داشتن ریزدانه قابل‌توجه در مقایسه با نوع III و تولید صدای کمتری، در مکان‌های مسکونی و شهری مناسب است[۲۹]. مشخصات مصالح سنگی در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین ترکیب شیمیایی و تصاویر میکرو ساختاری سنگدانه و پودر مرمر پس از انجام آزمایش به‌ترتیب در جدول ۳ و شکل ۱ ارائه شده است. مطابق شکل ۱، شکل ذرات و آنالیز سطح فیلرهای طبیعی و پودر مرمر با میکروسکوپ الکترونی روبشی (FESEM) مورد سنجش واقع شد. براساس شکل ۱-(a-b)، ذرات پودر مرمر دارای اشکال زاویه‌ای، ساختار خردشده و سطح زبر می‌باشند. این درحالی است که ذرات فیلر طبیعی (شکل ۱-(c-d))، دارای شکلی لایه‌ای و نامنظم می‌باشند. اگرچه مورفولوژی ذرات یکی از عوامل مؤثر بر عملکرد فیلر است، اما برهم‌کنش‌های شیمیایی نقش تعیین‌کننده‌ای، به‌ویژه در حضور قیر امولسیونی، ایفا می‌کنند. همان‌طور که از نتایج جدول ۳

مشخص است، فیلر سنگ طبیعی و پودر سنگ‌مرمر ضایعاتی دارای مقدار قابل‌توجهی از CaO به‌ترتیب به‌میزان ۴۲/۵ درصد و ۷۴/۱ درصد می‌باشند. این تفاوت چشمگیر در محتوای اکسیدکلسیم، می‌تواند تفاوت عملکرد مشاهده‌شده را به خوبی توضیح دهد.

به‌طور کلی، عملکرد فیلرها در مخلوط‌های آسفالتی با قیر امولسیونی تحت تأثیر سه عامل اصلی است: هندسه ذرات، پرکنندگی حجمی و برهمکنش‌های فیزیکوشیمیایی. در حالی که مورفولوژی زاویه‌ای و سطح زبر پودر مرمر (شکل ۱–a,b) به بهبود قفل‌شدگی مکانیکی و افزایش سطح تماس با قیر کمک می‌کند، نقش برهمکنش‌های شیمیایی که به ترکیب اکسیدی فیلرها وابسته است، نمی‌تواند نادیده گرفته شود. اکسیدکلسیم (CaO) به‌دلیل خاصیت قلیایی خود، می‌تواند با اجزای اسیدی موجود در قیر واکنش داده و ترکیباتی شبیه به صابون‌های کلسیمی ایجاد کند که به‌عنوان بهبوددهنده چسبندگی عمل می‌کنند. همچنین، این ترکیب می‌تواند pH سطح سنگدانه‌ها را افزایش داده و شرایط را برای جذب بهتر قیرهای امولسیونی کاتیونی فراهم سازد. افزون‌بر این، CaO ممکن است در فرآیند هیدراتاسیون شرکت کرده و با تسریع شکست قیر امولسیونی، به کسب مقاومت اولیه سریع‌تر در مخلوط کمک نماید. بنابراین، عملکرد مناسب مخلوط‌های حاوی پودرمرمر، نه‌تنها حاصل مورفولوژی مطلوب آن، بلکه به میزان قابل‌توجهی ناشی از درصد بالاتر CaO و برهم کنش‌های شیمیایی فعال‌تر آن با قیر است.

جدول ۱. حدود دانه‌بندی سنگدانه‌های مخلوط‌های اسلاری‌سیل مطابق با دستورالعمل ISSA A105

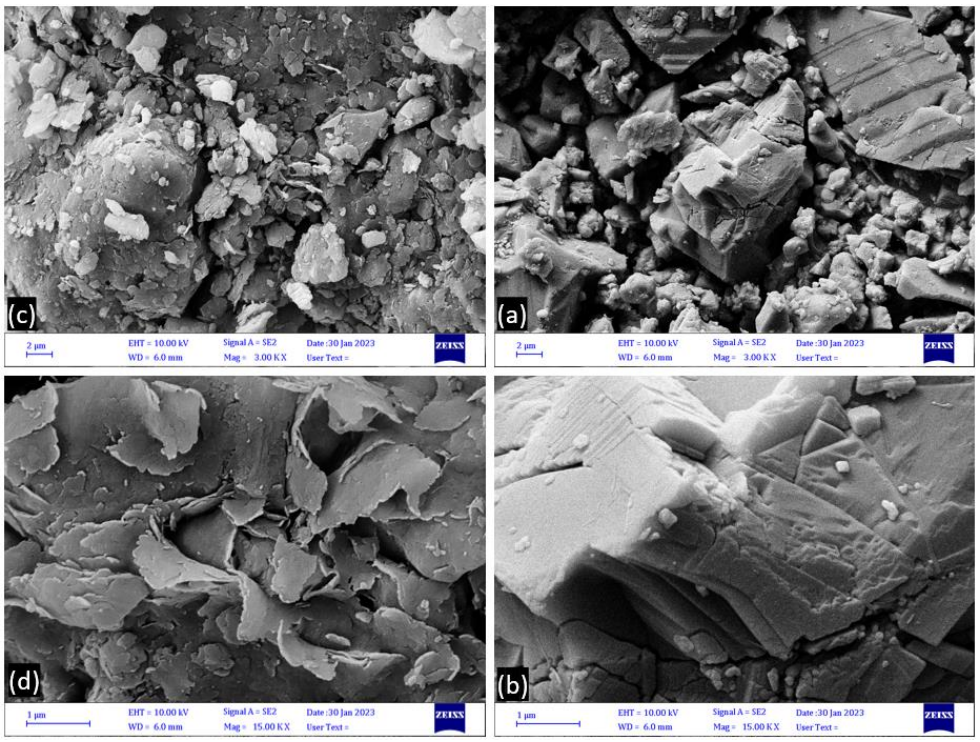
اندازه الک	درصد عبوری از الک	
	محدوده مورد استفاده	محدوده نوع II دستورالعمل
۴/۷۵ میلی‌متر	۱۰۰	۱۰۰–۹۰
۲/۳۶ میلی‌متر	۷۲	۹۰–۶۵
۱/۱۸ میلی‌متر	۴۶	۷۰–۴۵
۶۰۰ میکرون	۳۰	۵۰–۳۰
۳۰۰ میکرون	۲۱	۳۰–۱۸
۱۵۰ میکرون	۱۶	۲۱–۱۰
۷۵ میکرون	۱۰	۱۵–۵

جدول ۲. ویژگی‌های مصالح سنگی

آزمون‌ها	شماره استاندارد	سنگدانه درشت‌دانه	سنگدانه ریزدانه	ویژگی‌ها بر اساس ISSA A105
وزن مخصوص حقیقی (gr/cm^3)	ASTM C127	۲/۶۳	۲/۶۴	–
وزن مخصوص ظاهری (gr/cm^3)	ASTM C128	۲/۷۱	۲/۷۳	–
درصد جذب آب	ASTM C127	۱/۱۱	۱/۳۷	–
ارزش ماسه‌ای خاک‌ها و مصالح ریزدانه	ASTM D2419	۶۷٪		حداقل ۴۵٪
سلامت مصالح با سولفات سدیم	ASTM C88	۲٪		حداکثر ۱۵٪
مقاومت سایشی در ماشین لس‌آنجلس	ASTM C131	۲۶٪		حداکثر ٪۳۵

جدول ۳. ترکیب شیمیایی سنگدانه و پودر سنگ مرمر ضایعاتی

نوع مواد	P_2O_5	Fe_2O_3	MgO	CaO	Al_2O_3	SiO_2	K_2O	TiO_2	Na_2O	L.O.I
مصالح کوهی	۰/۰۱	۱/۸۲	۳/۷۹	۴۲/۵	۲/۶۹	۷/۹۷	۰/۳۶	۰/۲۹	۰/۰۹	۳۹/۸۴
پودر مرمر	–	۰/۲۷	۰/۵۹	۷۴/۱	۰/۴۹	۱/۵۶	۰/۱۷	۰/۲۶	۰/۰۸	۲۲/۱۰



شکل ۱. تصاویر میکروسکوپی: a–b. پودر سنگ مرمر ضایعاتی و c–d. پودر مصالح طبیعی

جدول ٤. مشخصات قیر امولسیونی کاتیونی

آزمون‌ها	استاندارد آزمون	نتیجه	حدود مورد پذیرش
کندروانی سی بولت–فیورل در دمای ۲۵°c، ثانیه	AASHTO T59	۲۳	۲۰–۱۰۰
الک، ٪	ASTM D244	۰/۰۲	حداکثر ۰/۱
اندود، ٪	AASHTO T59	۹۹	–
بار ذرات	AASHTO T59	مثبت	مثبت
پایداری انبارش و ذخیره قیر امولسیون، ۲۴ ساعت، ٪	ASTM D6930	۰/۴	حداکثر ۱
تقطیر قیر امولسیون، جرم وزنی ٪	ASTM D7497	۶۲	حداقل ۵۷
آزمون‌ها بر روی باقی‌مانده قیر امولسیون			
درجه نفوذ در ۲۵°c، ۱۰۰ گرم، ۵ ثانیه	ASTM D5	۶۴	۴۰–۹۰
نقطه نرمی قیر با آزمایش حلقه و گلوله، درجه سانتی‌گراد	ASTM D36	۵۷	–

۲–۲ قیر امولسیونی

جهت ساخت نمونه‌های اسلاری‌سیل، قیر امولسیون کاتیونی براساس استاندارد ASTM D3910 مورد استفاده قرار گرفت. جهت تولید قیر امولسیون کاتیونی، ۳۸ درصد محلول سوپ حاوی اسید HCL، آب و امولسیفایر دیرشکن (با نام تجاری QP، اسپانیا) با قیر با رده نفوذ ۶۰/۷۰ به‌میزان ۶۲ درصد مطابق با الزام ISSA A105 [28] در دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد، در دستگاه امولسیون ساز آزمایشگاهی با سرعت ۲۸۴۰ دور بر دقیقه مخلوط شدند. ساخت قیر امولسیون کاتیونی براساس استاندارد ASTM D2397 و پژوهش‌های صورت گرفته توسط دیگر پژوهشگران صورت گرفت [۳۰–۳۲] همچنین خصوصیات قیر امولسیون کاتیونی تولیدی در جدول ۴ ارائه شده است.

۲–۳ سیمان پرتلند و آب

آهک هیدراته، میکروسیلیس، سیمان پرتلند و خاکستر بادی از فیلرهای معدنی فعال قابل استفاده در مخلوط اسلاری‌سیل می باشند. همچنین، این مواد باعث به حداقل رساندن جدایی مصالح سنگی از یکدیگر شده و منجر به افزایش چسبندگی مخلوط می شود. این موضوع به این دلیل است که یون‌های هیدروکسل فیلرهای معدنی فعال با یون‌های قیر امولسیون وارد واکنش می شوند. سپس قیر امولسیون سریع‌تر شکسته شده و عمل‌آوری مخلوط اسلاری‌سیل سریع‌تر انجام خواهد شد [۳۳]. در این مطالعه، سیمان پرتلند به مقدار ۱ درصد برای ارتقاء ویژگی‌های مخلوط به‌عنوان فیلر فعال معدنی در اسلاری‌سیل مورد استفاده واقع شد. منظور از آب، آبی است که به هنگام هم‌زدن به مخلوط اضافه‌گردیده و موجب بهبود کارایی و پوشش بهتر مصالح می‌شود [۳۳]. آب مورداستفاده بایستی عاری از مواد مضر مانند سولفات‌ها و نمک‌ها باشد. آب استفاده شده در تمامی نمونه‌ها، آب شرب است.

۳. طرح اختلاط و آزمایش‌ها

۳-۱ طرح اختلاط

در این تحقیق پودر سنگ مرمر ضایعاتی عبوری از الک ۰/۰۷۵ میلی‌متر به‌عنوان جایگزین فیلر در درصدهای ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ در نمونه‌های اسلاری‌سیل استفاده گردید. حدود مجاز هریک از آزمون‌ها و درجه‌بندی هریک از مخلوط‌های اسلاری‌سیل به‌ترتیب در جداول ۵ و ۶ آورده شده است. طراحی اسلاری‌سیل و آزمون‌های مرتبط با آن در آیین‌نامه ASTM D3910 ارائه‌شده است. در طراحی مخلوط اسلاری‌سیل بعد از انتخاب قیر امولسیونی و سنگدانه‌های مناسب، آزمون‌ها براساس استاندارد ASTM D3910 بر روی مصالح صورت‌گرفته و حدود مجاز مشخصات موردبررسی واقع می‌شوند. پس از برآورده‌شدن الزامات مصالح، طرح اختلاط و سنجش عملکرد نمونه‌ها با آزمایش‌های زمان اختلاط، چسبندگی مرطوب، سایش در شرایط مرطوب، تعیین حداکثر قیر به‌وسیله چرخ بارگذاری شده- چسبندگی ماسه و ارزیابی میزان تغییر عمودی و جانبی با چرخ بارگذاری شده انجام می‌شود [۲].

در مشخص‌نمودن میزان بهینه قیر امولسیون و تعیین حداقل و حداکثر آن به‌ترتیب از نتایج آزمایش‌های سایش در شرایط مرطوب و آزمایش چرخ بارگذاری شده-چسبندگی ماسه استفاده می‌شود. براساس دستورالعمل ISSA A105 [28]، اگر مقدار حداکثر و حداقل قیر کمتر از ۳٪ باشد، مقدار بهینه قیر امولسیون متوسط مقدار حداکثر و حداقل است. اگر اختلاف بین حداکثر و حداقل قیر بیشتر از ۳ درصد باشد، مقدار بهینه قیر امولسیون در وسط دامنه ۳ درصدی از حداکثر حدود تعیین شده برای قیر است [۳].

جدول ۵. حدود قابل‌قبول آزمون‌های اسلاری‌سیل

آزمون‌ها	حدود قابل قبول	شماره استاندارد
زمان اختلاط	حداقل ۱۸۰ ثانیه	TB 113
چسبندگی مرطوب در ۳۰ دقیقه	حداقل ۱۲ کیلوگرم- سانتی‌متر	TB 139
چسبندگی مرطوب در ۶۰ دقیقه	حداقل ۲۰ کیلوگرم- سانتی‌متر	
تعیین حداکثر قیر به‌وسیله چرخ بارگذاری شده و چسبندگی ماسه	حداکثر ۵۳۸ گرم بر مترمربع	TB 109
افت سایش در شرایط مرطوب ۱ ساعت	حداکثر ۸۰۷ گرم بر مترمربع	TB 100
تغییر مکان عمودی (چرخ بارگذاری شده)	حداکثر ۱۰ درصد	TB 147
تغییر مکان افقی (چرخ بارگذاری شده)	حداکثر ۵ درصد	

جدول ٦. درجه‌بندی مخلوط‌های حاوی درصدهای مختلف فیلر پودر سنگ مرمر ضایعاتی

نوع مخلوط	فیلر پودر سنگ مرمر ضایعاتی جایگزین فیلر مخلوط شاهد، ٪
MP0	۰
MP2.5	۲۵
MP5	۵۰
MP7.5	۷۵
MP10	۱۰۰

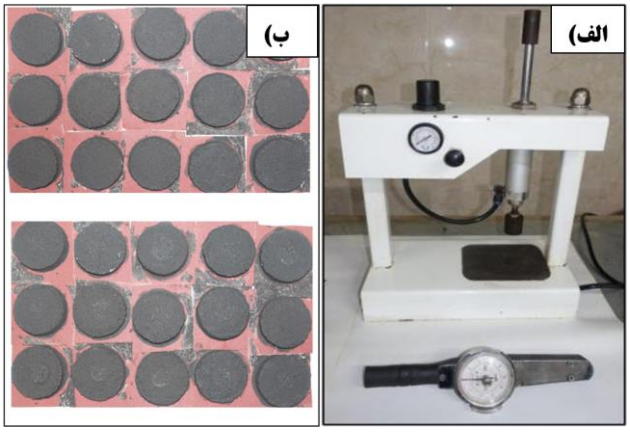
۳-۲ آزمایش زمان اختلاط

آزمایش زمان اختلاط اولین مرحله در طراحی مخلوط و شامل اختلاط مصالح سنگدانه، فیلر، آب و قیر امولسیون کاتیونی است [۳٤]. در آسفالت حفاظتی اسلاری‌سیل ضروری است زمان اختلاط کافی و مناسب تعیین شده تا از شکست زودهنگام قیر امولسیونی جلوگیری شود. هنگام ساخت آسفالت سرد حفاظتی باید زمان کافی جهت پخش کردن توسط دستگاه وجود داشته و مخلوط بلافاصله پس از آن نشکند [۳۵]. همچنین این آزمون علاوه‌بر آنکه زمان لازم برای اختلاط را مشخص می‌کند، سازگاری مواد را با یکدیگر کنترل و تأیید می‌نماید. این آزمون مطابق با ISSA TB113 [36] انجام می‌شود. خلاصه روند آزمایش به این صورت است که ابتدا سنگدانه را تا رسیدن به رطوبت زیر ۱ درصد خشک کرده و سپس درصدی از فیلر فعال، آب و قیر امولسیون به آن اضافه می‌شود. مدت‌زمان شکستن نمونه در اثر اختلاط به‌عنوان زمان اختلاط معرفی شده که بایستی حداقل ۱۸۰ ثانیه باشد. به‌صورت جامع‌تر در بیش از این زمان، مخلوط دیگر نمی‌تواند به‌صورت همگن مخلوط شود [۳٦].

۳-۳ آزمایش چسبندگی مرطوب

آزمایش چسبندگی مرطوب مخلوط‌ها، جهت تعیین چسبندگی اولیه و عمل‌آوری، با اندازه‌گیری در زمان‌های مختلف برای تعیین حداقل زمان مناسب بازگشایی ترافیک، بر روی مخلوط‌های اسلاری‌سیل انجام می‌شود [۳۷،۳۸]. مخلوط آسفالتی مناسب جهت قرارگیری در ترافیک عبوری، مطابق نتایج حاصله در مدت زمان ۳۰ و ۶۰ دقیقه، انتخاب می‌گردد. حداقل میزان چسبندگی جهت بررسی خواص شکنندگی قیر امولسیون در مدت‌زمان ۳۰ دقیقه، ۱۲ کیلوگرم- سانتی‌متر بوده و برای قرارگیری زیر ترافیک عبوری در مدت‌زمان ۶۰ دقیقه، ۲۰ کیلوگرم- سانتی‌متر است.

به‌طور خلاصه برای ساخت، مخلوط‌ها در قالب دایره‌ای متناسب با دانه‌بندی نوع II ریخته و پرداخت شده و سپس در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرند. زمانی‌که مخلوط‌ها به اندازه مناسب سفت شدند، قالب دور آن‌ها برداشته می‌شود. پس از حاصل شدن گیرش در نمونه‌ها، در دستگاه چسبندگی قرار داده می‌شوند. سپس از طریق سیلندر دستگاه با فشاری معادل ۱۹۳ کیلوپاسکال تحت پیچش قرار می‌گیرد. بدین‌صورت میزان پیچش به‌دست‌آمده در فواصل زمانی مناسب که در ارتباط با چسبندگی مخلوط تعریف‌شده، قرائت می‌شود [۳۹]. از نتایج حاصل از این آزمایش برای تعیین زمان مناسب جهت بازگشایی ترافیک عبوری بر روی نمونه‌های اسلاری‌سیل استفاده می‌شود [۳۷]. تصویری از نمونه‌ها و دستگاه ارزیابی چسبندگی در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲. آزمایش چسبندگی؛ الف- نمایی از دستگاه آزمایش چسبندگی ب- نمونه‌ها قبل و بعد از انجام آزمون



شکل ۳. آزمایش سایش در شرایط مرطوب؛ الف) نمایی از دستگاه آزمایش WTAT و ب) نمونه‌های ساخته‌شده این آزمایش

۳-٤ آزمون تعیین افت وزنی مخلوط‌ها بواسط سایش در شرایط مرطوب

در این آزمون برای جلوگیری از وقوع خرابی شن‌زدگی، حداقل میزان قیر امولسیون، تعیین شده و مقدار افت وزنی هریک از نمونه‌ها (ازدست‌رفتن سنگدانه نمونه‌های ساخته شده)، بعد از سایش با لوله لاستیکی، معین می‌شود. به‌طور خلاصه در طی این آزمایش نمونه‌های اسلاری‌سیل عمل‌آوری شده در گرمخانه به

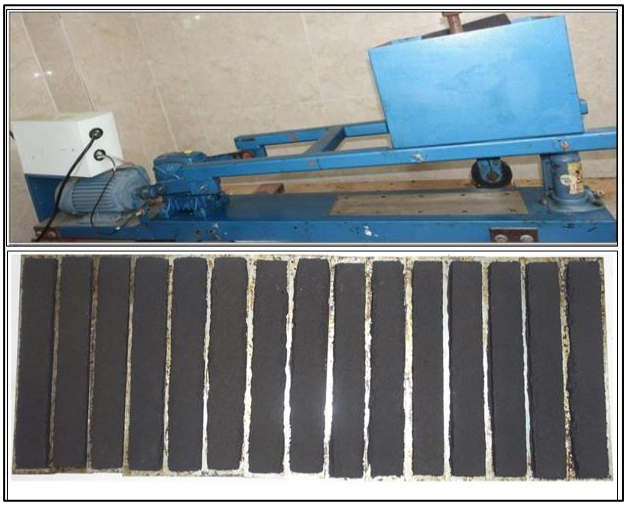
مدت حداقل ۱۵ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد، وزن شده و سپس در آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد به مدت‌زمان ۱ ساعت غوطه‌ور می‌شود. سپس نمونه‌ها در شرایط غوطه‌وری در آب به مدت ۵ دقیقه با یک نوار لاستیکی به روش چرخشی تحت عمل سایش قرار می‌گیرند. در پایان نمونه سایش یافته در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک و سپس توزین شده تا میزان افت وزنی معین شود [۴۰]. تصویری از نمونه‌ها و دستگاه آزمایش سایش در شرایط مرطوب در شکل ۳ نشان داده شده است.

۳-۵ آزمون چرخ بارگذاری شده- چسبندگی ماسه

این آزمون جهت اندازه‌گیری حداکثر قیر برای جلوگیری از خرابی قیرزدگی مخلوط‌های اسلاری‌سیل است. در این آزمایش مخلوط‌ها طی ۱۰۰۰ سیکل با چرخ بارگذاری ۵۶/۷ کیلوگرمی متراکم شده و سپس مخلوط توزین می‌شود. در مرحله بعد، ماسه اتاوا با دمای ۸۲ درجه سانتی‌گراد بر روی نمونه در محل شیار ایجاد شده به‌صورت یکنواخت، پخش می‌گردد. در این حالت مشابه حالت قبل جهت تراکم نمونه ۱۰۰ سیکل بارگذاری انجام می‌شود. سپس نمونه پس از بارگذاری مجدداً توزین می‌شود. اختلاف بین وزن‌های اندازه‌گیری شده، به‌عنوان مقدار ماسه‌ای که چسبیده است، گزارش می‌شود. بدین‌صورت در هریک از مخلوط‌ها حداکثر مقدار مجاز قیر مشخص می‌گردد [۴۱].

۳-۶ آزمایش سنجش تغییر شکل عمودی و جانبی مخلوط اسلاری‌سیل تحت چرخ بارگذاری شده

آزمایش ارزیابی میزان تغییر مکان عمودی و جانبی با چرخ بارگذاری شده، ویژگی‌های تغییر شکل مخلوط را تحت بار ترافیک شبیه‌سازی‌شده نشان می‌دهد. در این پژوهش مخلوط با استفاده از چرخ ۵۶/۷ کیلوگرم طی ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری متراکم می‌شود. متعاقباً ضخامت و عرض نمونه، قبل و بعد از تراکم، در مسیر چرخ و در وسط طول نمونه ارزیابی می‌شود. تغییر شکل های جانبی و عمودی نمونه‌ها نبایستی به‌ترتیب از ۵ و ۱۰ درصد بیشتر شود [۴۲]. تصویری از مخلوط‌ها و دستگاه چرخ بارگذاری شده در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ٤. دستگاه چرخ بارگذاری و نمونه‌های ساخته شده

٤. نتایج و بحث

٤-١ آزمایش زمان اختلاط

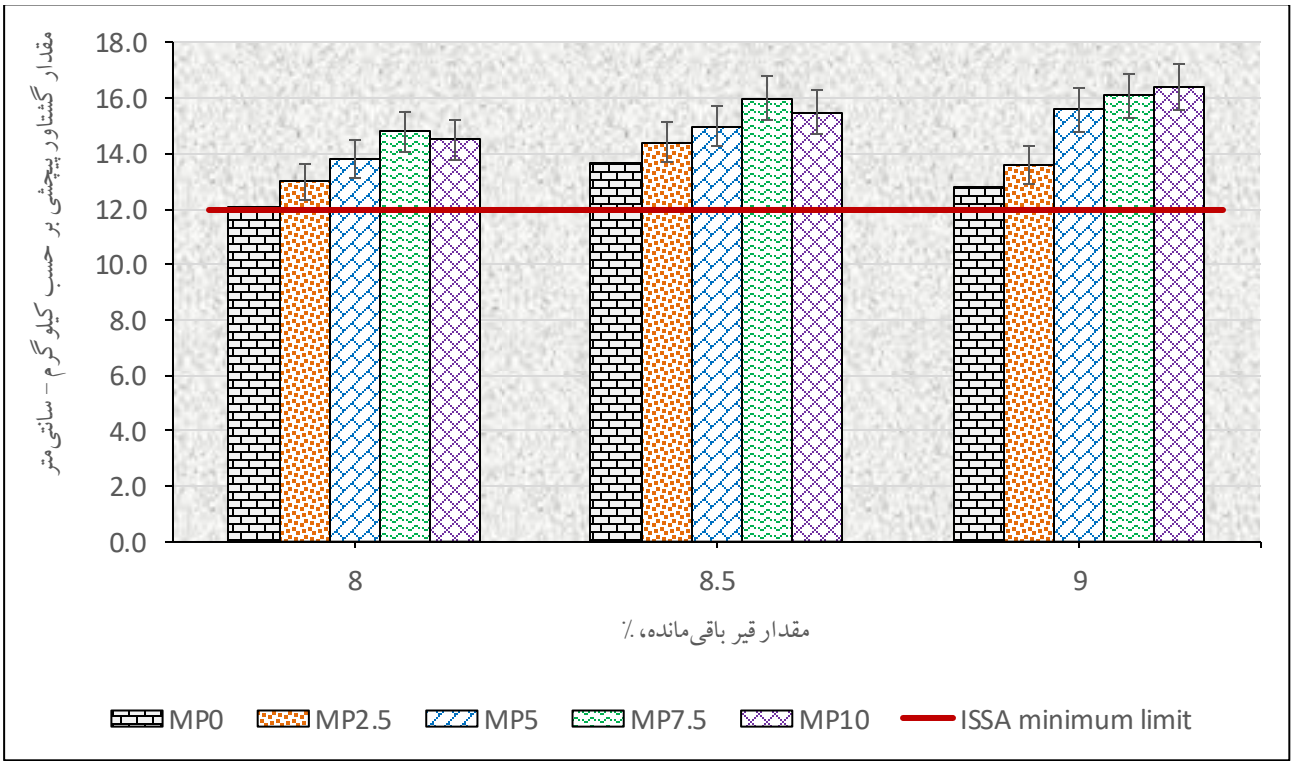
در جدول ۷ مقادیر اولیه قیر امولسیون در سه سطح، مقادیر مناسب سیمان و آب اضافه شده به مخلوط، تعیین شده است. زمان اختلاط حداقل ۱۸۰ ثانیه مطابق ISSA TB113 [36] برای هریک از نمونه‌های حاوی درصدهای مختلف از پودر مرمر و قیر امولسیون، موردبررسی واقع شد. نتایج این آزمایش نشان داد با افزایش درصد پودر مرمر، مقدار آب جهت دستیابی به زمان اختلاط تا حدود مجاز دستورالعمل ISSA افزایش یافت. جذب آب بالای پودر مرمر نسبت به فیلر طبیعی به‌دلیل خصوصیات فیزیکی مانند شکل ظاهری فیلر بوده که بر خصوصیات مخلوط تأثیرگذار بوده و فیلر پودر مرمر به‌دلیل ساختار متخلخل و منافذ بالا باعث کاهش کارایی و مصرف بیشتر آب در انواع مخلوط‌های آسفالتی می‌شود.

جدول ۷. نتایج آزمون زمان اختلاط نمونه‌های اسلاری‌سیل

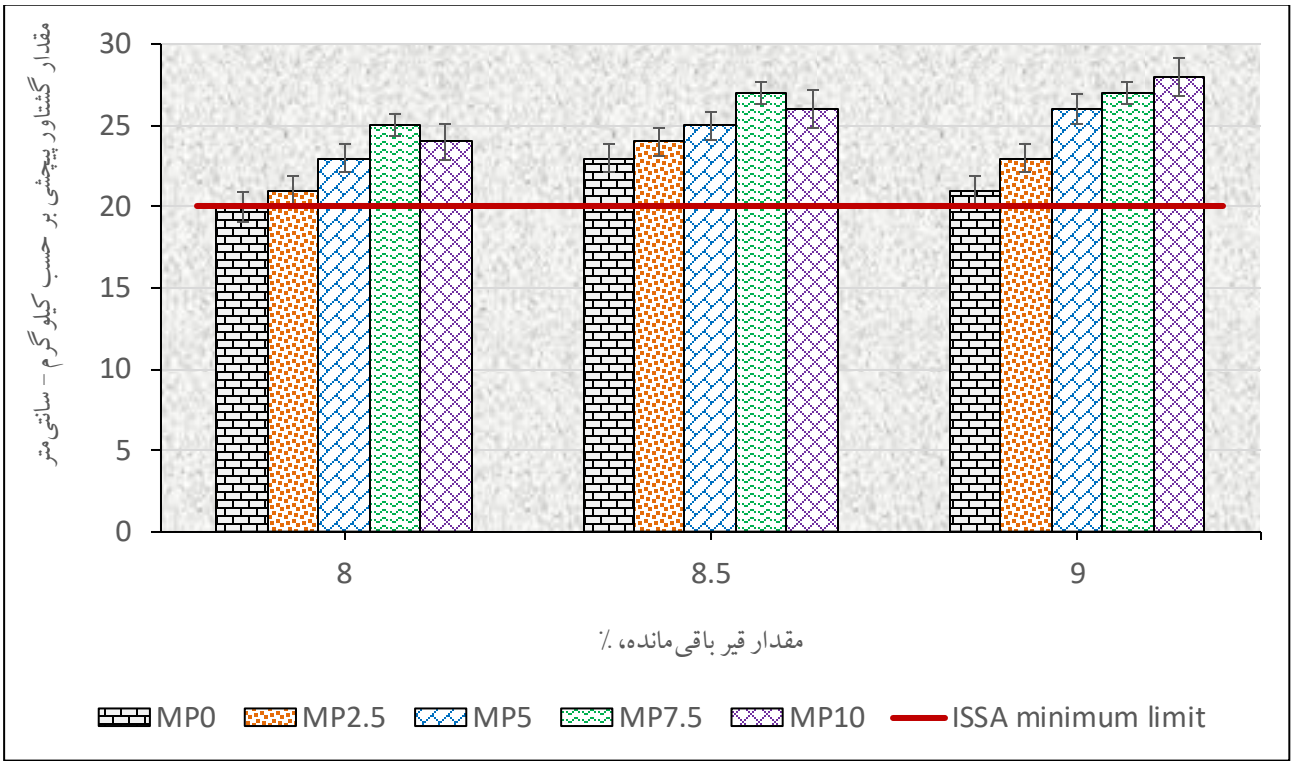
نوع مخلوط	MP0			MP2.5			MP5			MP7.5			MP10		
درصد قیر باقی‌مانده	۸	۸/۵	۹	۸/۵	۸	۹	۸/۵	۸	۹	۸/۵	۸	۹	۸/۵	۸	۹
درصد آب	۸	۸	۸	۹	۹	۸	۹/۵	۹	۸	۹/۵	۹/۵	۹	۱۰	۱۰	۹
زمان اختلاط به‌دست‌آمده	۱۸۷	۱۸۴	۱۸۲	۱۸۶	۱۸۶	۱۸۳	۱۸۵	۱۸۴	۱۸۴	۱۸۶	۱۸۳	۱۸۵	۱۸۲	۱۸۴	۱۸۴

٤-۲ آزمایش چسبندگی مرطوب

در این بخش، گراف‌های ۵ و ۶ نشان‌دهنده نتایج آزمایش چسبندگی مرطوب در زمان‌های ۳۰ و ۶۰ دقیقه نمونه‌های اسلاری‌سیل است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، تمامی نمونه‌ها در مدت‌زمان ۳۰ و ۶۰ دقیقه به‌ترتیب گیرش و مقاومت لازم برای بازگشایی ترافیک را به‌دست‌آورده‌اند و نمونه MP10 در میزان قیر باقی‌مانده ۹ درصد، نسبت به سایر نمونه‌ها، دارای بیشترین مقدار گشتاور پیچشی (متناظر با چسبندگی) است. در مجموع نتایج نشان‌دهنده‌ی آن است که نمونه‌های حاوی پودر مرمر، بیشترین مقدار چسبندگی را در درصد قیر ۸/۵ و ۹ به‌دست آورده‌اند. به‌نحوی که نمونه‌های MP7.5 و MP10 در میزان قیر باقی‌مانده ۸/۵ تا ۹ درصد، دارای بیشترین میزان چسبندگی نسبت به دیگر نمونه‌ها هستند. به‌عنوان نمونه در قیر باقی‌مانده ۹ درصد، مخلوط‌های MP2.5، MP5، MP7.5 و MP10 نسبت به نمونه شاهد (MP0) به‌ترتیب موجب افزایش چسبندگی به قیر در مدت‌زمان ۳۰ دقیقه به‌میزان ۶/۳، ۲۱/۹، ۲۵/۸ و ۲۸/۱ درصد و در مدت‌زمان ۱ ساعت به‌میزان ۹/۵، ۲۳/۸، ۲۸/۶ و ۳۳/۳ درصد شده است. در مخلوط MP0 و MP2.5 در مدت‌زمان ۱ ساعت با رشد میزان قیر از ۸ به ۸/۵ درصد، چسبندگی به حداکثر میزان رسیده و آنگاه با افزایش مجدد مقدار قیر به ۹ درصد، میزان چسبندگی کاهش می‌یابد. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش درصد قیر تا میزان مشخص، چسبندگی در مخلوط‌های MP0 و MP2.5 افزایش‌یافته و سپس با افزایش بیشتر مقدار قیر امولسیون و به‌تبع آن افزایش زمان عمل‌آوری، میزان چسبندگی کاهش خواهد یافت. این در حالی است که افزایش همزمان میزان پودر مرمر و مقدار قیر در مخلوط‌های حاوی پودر مرمر، باعث افزایش چسبندگی مخلوط‌ها شده است. بر اساس تصاویر FESEM، تیز گوشه بودن پودر مرمر و زاویه اصطکاک بالای این مواد نسبت به فیلر طبیعی، منجر به قفل و بست خوب سنگدانه‌ها نسبت به یکدیگر شده و باعث استحکام بیشتر و چسبندگی بهتر سنگدانه‌ها و قیر با یکدیگر می‌شود.



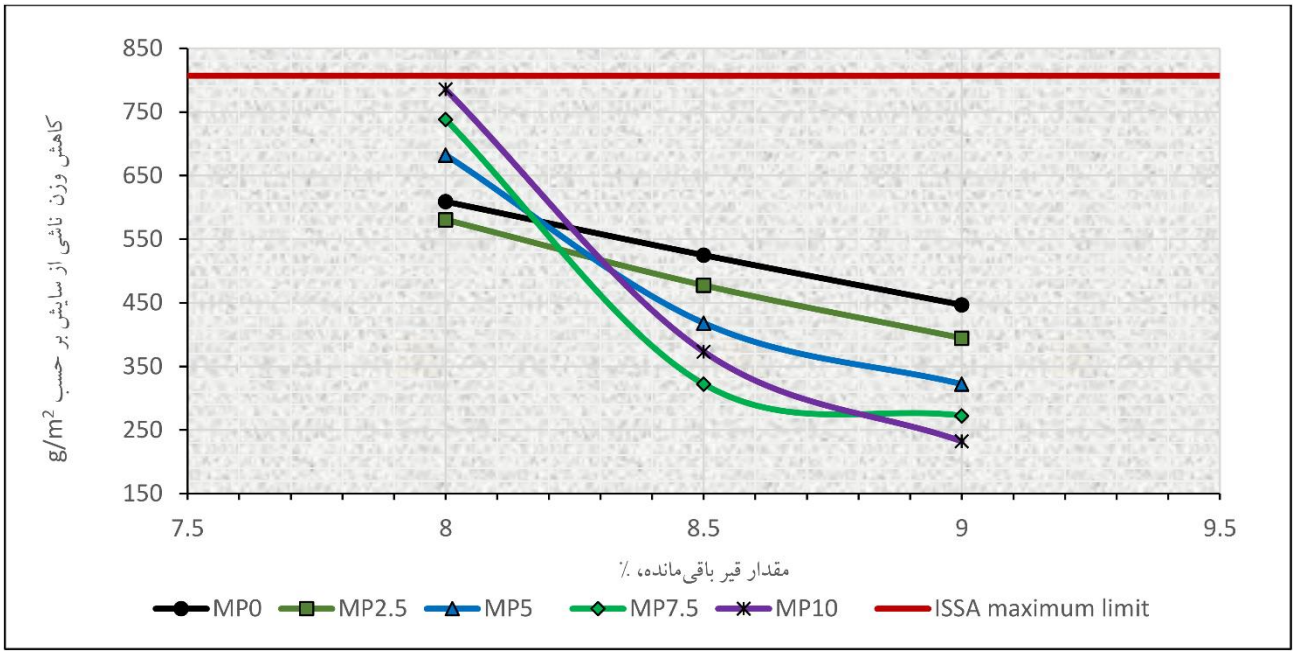
شکل ۵. نتایج آزمایش چسبندگی مرطوب در ۳۰ دقیقه



شکل ٦. نتایج آزمایش چسبندگی مرطوب در ۶۰ دقیقه

٤-٣ آزمون سایش در شرایط مرطوب

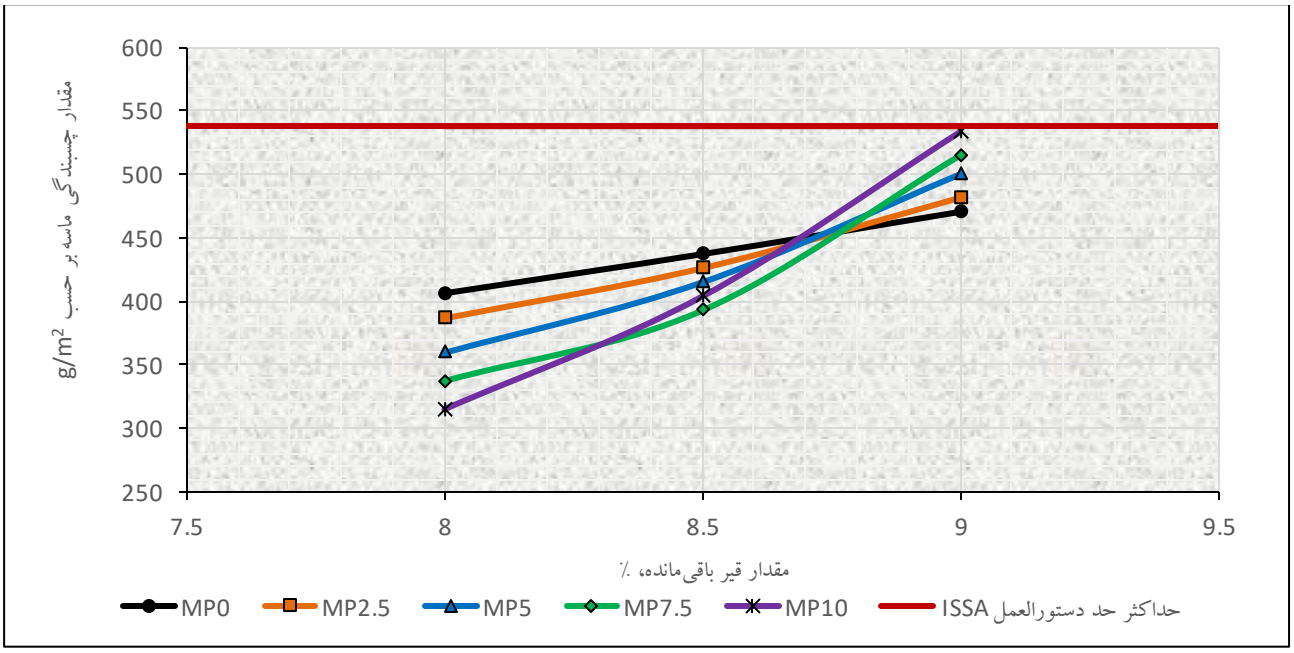
نتایج آزمایش افت وزنی نمونه‌های اسلاری‌سیل در مدت‌زمان ۱ ساعت غوطه‌وری در آب در نمودار ۷ نشان داده شده است. مطابق با محدوده مشخص شده در ISSA TB100 مبنی بر حداکثر سایش ۸۰۷ گرم بر مترمربعی، همه مخلوط‌ها در محدوده مجاز دستورالعمل قرار دارند. با توجه به شکل ۷، افزایش درصد قیر باقیمانده از ۸ به ۹ درصد، افت سایشی تمام مخلوط‌ها را کاهش داده است. بااین‌حال، تأثیر افزایش پودر مرمر به درصد قیر باقیمانده وابسته است؛ به‌طوری‌که در قیر ۹ درصد، مخلوط MP10 کمترین افت سایشی را نشان داده است. برای مثال، در قیر باقیمانده ۹ درصد، افت سایشی مخلوط‌های MP2.5، MP5، MP7.5 و MP10 نسبت به نمونه شاهد (MP0)، به‌ترتیب حدود ۱۱/۷، ۲۷/۹، ۳۹/۰ و ۴۸/۰ درصد کاهش یافته است. به‌طوری که کمترین مقدار افت وزنی در نمونه‌ها در ۹ درصد قیر باقی‌مانده متعلق به نمونه MP10 با عدد ۲۳۲ گرم بر مترمربع است و پس از آن نمونه‌های MP7.5، MP5 و MP2.5 با مقدار سایش به‌ترتیب ۲۷۲، ۳۲۲ و ۳۹۵ گرم بر مترمربع در رتبه‌های بعدی قرار دارند. از این‌رو می‌توان این‌طور استنباط کرد که جایگزینی پودر سنگ مرمر ضایعاتی، باعث ارتقاء عملکرد حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها می‌شود. البته باید جهت به حداقل رساندن خرابی عریان‌شدگی، قیر متناسب با آن مشخص شود. موضوع دیگر که در نمودار قابل مشاهده است نرخ رشد مقاومت در برابر سایش (مقاومت در برابر خرابی رطوبتی) بوده که در درصدهای متفاوت از قیر مخلوط‌های اسلاری‌سیل ثابت نیست. برای نمونه، در مخلوط‌های MP0 و MP2.5 با افزایش درصد قیر از ۸ به ۹ درصد کاهش وزن در برابر سایش، با نرخ تقریباً ثابتی کاهش می‌یابد. در مخلوط‌های MP5، MP7.5 و MP10، کاهش افت سایشی در بازه افزایش قیر باقیمانده از ۸ به ۸/۵ درصد، بیشتر از کاهش مشاهده‌شده در بازه ۸/۵ به ۹ درصد بوده است. درنتیجه می‌توان با انتخاب درصد مناسب از پودر مرمر و قیر باقی‌مانده، پدیده عریان‌شدگی را به حداقل رساند. ازآنجاکه عریان‌شدگی به‌دلیل پیوند ضعیف بین مصالح سنگی و قیر است، درصورتی‌که مصالح سنگی و قیر بتوانند پیوند قوی‌تری باهم ایجاد کنند، احتمالاً وقوع پدیده عریان‌شدگی کاهش می‌یابد. ازآنجاکه پودر مرمر دارای سطحی زبر، سخت و گوشه‌دارتر است قفل و بست بهتری بین سنگدانه‌ها ایجاد می‌نماید و باعث به‌وجودآمدن ترکیبی پایدارتر می‌گردد. این موضوع باعث شده تا مقاومت در برابر سایش نمونه‌های اصلاح شده، بیشتر شود.



شکل ۷. نتایج مقدار افت وزنی نمونه‌های آزمایش سایش در شرایط مرطوب

٤-٤ آزمایش چرخ بارگذاری شده- چسبندگی ماسه

نتایج آزمایش بارگذاری چرخ-چسبندگی ماسه (ارزیابی پتانسیل قیرزدگی) برای مخلوط‌های آسفالتی اسلاری‌سیل در گراف ۸ ارائه شده است. مطابق نتایج، همان‌طور که انتظار می‌رود، افزایش درصد قیر منجر به افزایش قیرزدگی (جذب ماسه) در تمامی مخلوط‌ها می‌شود. اما بررسی دقیق‌تر نمودار نشان می‌دهد که تأثیر افزودن پودر مرمر بر این پدیده یکنواخت نبوده و به درصد قیر باقی‌مانده بستگی دارد؛ موضوعی که رفتار پیچیده‌تر این مخلوط‌ها را آشکار می‌سازد. به‌طور مشخص، در قیر باقی‌مانده ۸ درصد حضور پودر مرمر عملکرد مثبتی داشته است. چنان‌که در این محدوده، مقدار جذب ماسه در نمونه‌های MP2.5، MP5، MP7.5 و MP10 نسبت به نمونه شاهد (MP0) به‌ترتیب ۴/۹، ۱۱/۵، ۱۷/۰ و ۲۲/۵ درصد کاهش‌یافته و مقاومت در برابر قیرزدگی بهبود یافته است. در مقابل، در درصد قیر باقی‌مانده بالا یعنی ۹ درصد، این روند معکوس می‌شود. در این محدوده، نمونه‌های حاوی پودر مرمر حساسیت بیشتری به قیر اضافی نشان داده و جذب ماسه آن‌ها از نمونه شاهد فراتر می‌رود (برای مثال، جذب ماسه در نمونه MP10 حدود ۱۳,۴ درصد بیشتر از نمونه شاهد است). این رفتار نشان می‌دهد که با افزایش هم‌زمان پودر مرمر و درصد قیر، پتانسیل قیرزدگی تشدید می‌گردد، به‌طوری که نرخ این افزایش در نمونه‌های MP7.5 و MP10 نسبت به سایرین بیشتر بوده است. این رفتار دوگانه به وضوح نشان می‌دهد که مخلوط‌های حاوی پودر مرمر در محدوده قیر بهینه و پایین‌تر، مقاومت بهتری در برابر قیرزدگی دارند اما درصورت استفاده از قیر اضافی (بیش از حد بهینه)، مستعد قیرزدگی شدیدتری نسبت به نمونه شاهد هستند. بهبود عملکرد در شرایط پایین‌تر قیر و تضعیف آن در شرایط بالاتر قیر، بیانگر حساسیت بالای نتیجه به برهم‌کنش در سیستم قیر–فیلر است. این یافته درواقع دو جنبه از رفتار مخلوط را توصیف می‌کند: پودر مرمر در محدوده قیر پایین، مقاومت به قیرزدگی را بهبود می‌بخشد، اما در محدوده قیر بالا، این پدیده را تشدید می‌کند. بنابراین، نتیجه‌گیری کلیدی آن است که برای بهره‌مندی از مزایای پودر مرمر و هم‌زمان جلوگیری از خرابی قیرزدگی، کنترل دقیق درصد قیر امری ضروری است. این موضوع به‌ویژه در مناطق گرم و خشک که خطر قیرزدگی بیشتر است، اهمیت می‌یابد و پیشنهاد می‌شود در این شرایط، محدوده مناسب قیر برای مخلوط‌های حاوی پودر مرمر انتخاب گردد. شایان ذکر است که علی‌رغم این حساسیت در قیر بالا، مقدار قیرزدگی تمامی مخلوط‌های اصلاح شده با پودر مرمر از حدود مجاز مشخص شده در دستورالعمل ISSA تجاوز نکرده است.



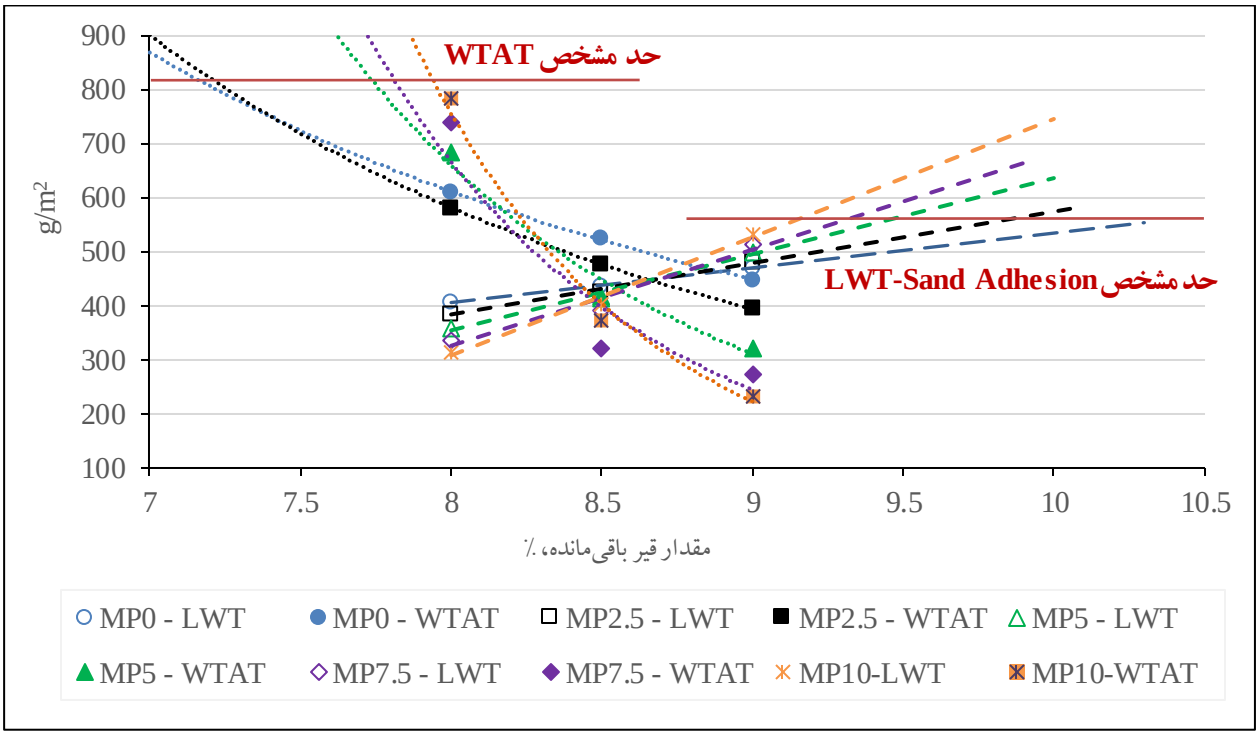
شکل ۸. چسبندگی ماسه (پتانسیل قیر زدگی) مخلوط‌های اسلاری‌سیل در آزمایش چرخ بارگذاری- چسبندگی ماسه

٤-٥ تعیین‌کردن محدوده مجاز و بهینه قیر امولسیون

نتایج دو آزمایش سایش در شرایط مرطوب و چرخ بارگذاری- چسبندگی ماسه، یک مبادله عملکردی کلیدی را آشکار می‌سازد: افزایش درصد قیر، مقاومت در برابر سایش ناشی از رطوبت را بهبود می‌بخشد، اما هم‌زمان پتانسیل خرابی ناشی از قیرزدگی را افزایش می‌دهد. بنابراین، انتخاب درصد قیر مناسب نمی‌تواند صرفاً براساس به حداکثر رساندن یک پارامتر باشد. بلکه باید نقطه‌ای بهینه یافت که در آن یک مصالحه قابل قبول بین این دو نوع خرابی متضاد برقرار گردد. برای یافتن این نقطه بهینه، محدوده مجاز قیر امولسیون و مقدار بهینه آن از طریق تلفیق نمودارهای آزمون سایش در شرایط مرطوب و چرخ بارگذاری شده – چسبندگی ماسه مشخص می‌شود. در این روش، نتایج آزمایش سایش مرطوب به‌صورت نمودارهای توابع توانی و نتایج آزمایش چسبندگی ماسه به‌صورت یک نمودار خطی ارائه می‌شوند [۲،۳،۳٦]. محدوده مجاز قیر امولسیون برای تمامی مخلوط‌ها در جدول ۸ ارائه‌شده است و در شکل ۹ نمودارهای تلفیقی برای هریک از مخلوط‌ها ترسیم شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، مقدار بهینه قیر امولسیون نمونه‌های آسفالتی حاوی پودر مرمر در مقایسه با نمونه شاهد کاهش یافته است. به‌طوری که درصد قیر امولسیون بهینه نمونه‌های MP2.5، MP5، MP7.5 و MP10 به‌ترتیب به مقدار ۰,۷۰، ۰,۹۷، ۱,۰۰ و ۱,۰۱ واحد درصد نسبت به مخلوط شاهد کمتر بوده است. این کاهش در قیر بهینه، یافته‌ای بسیار مهم است؛ زیرا نشان می‌دهد که مخلوط‌های اصلاح‌شده با پودر مرمر برای رسیدن به بهترین تعادل عملکردی (مقاومت سایشی مناسب و قیرزدگی کنترل‌شده)، به قیر کمتری نیاز دارند. دلیل این موضوع آن است که فیلر طبیعی دارای سطح مخصوص بالاتری است که این امر باعث افزایش قابل‌توجه میزان قیر بهینه جهت پوشش سطح سنگدانه‌ها خواهد شد [٤٣،٤٦]. بنابراین، با انتخاب این درصد قیر بهینه، می‌توان از مزایای پودر مرمر در بهبود مقاومت سایشی بهره‌مند شد، بدون آنکه ریسک خرابی ناشی از قیرزدگی را به شکل نامطلوبی افزایش داد.

جدول ۸. محدوده مجاز قیر امولسیون و درصد بهینه آن برای نمونه‌های اسلاری‌سیل

نوع مخلوط	حداقل مقدار قیر امولسیون به‌دست‌آمده از آزمایش سایش	حداکثر مقدار قیر امولسیون به‌دست‌آمده از چسبندگی ماسه	دامنه قابل‌قبول قیر امولسیون	مقدار بهینه قیر امولسیون
MP0	۱۱/۶۱	۱۶/۲۲	۱۶/۲۲–۱۱/۶۱	۱۴/۷۲
MP2.5	۱۱/۶۷	۱۵/۵۲	۱۵/۵۲–۱۱/۶۷	۱۴/۰۲
MP5	۱۲/۵۰	۱۵/۰۱	۱۵/۰۱–۱۲/۵۰	۱۳/۷۵
MP7.5	۱۲/۶۲	۱۴/۸۳	۱۴/۸۳–۱۲/۶۲	۱۳/۷۲
MP10	۱۲/۸۲	۱۴/۶۰	۱۴/۶۰–۱۲/۸۲	۱۳/۷۱



شکل ۹. ترکیب نتایج آزمون‌های سایش در شرایط مرطوب و چرخ بارگذاری شده–چسبندگی ماسه

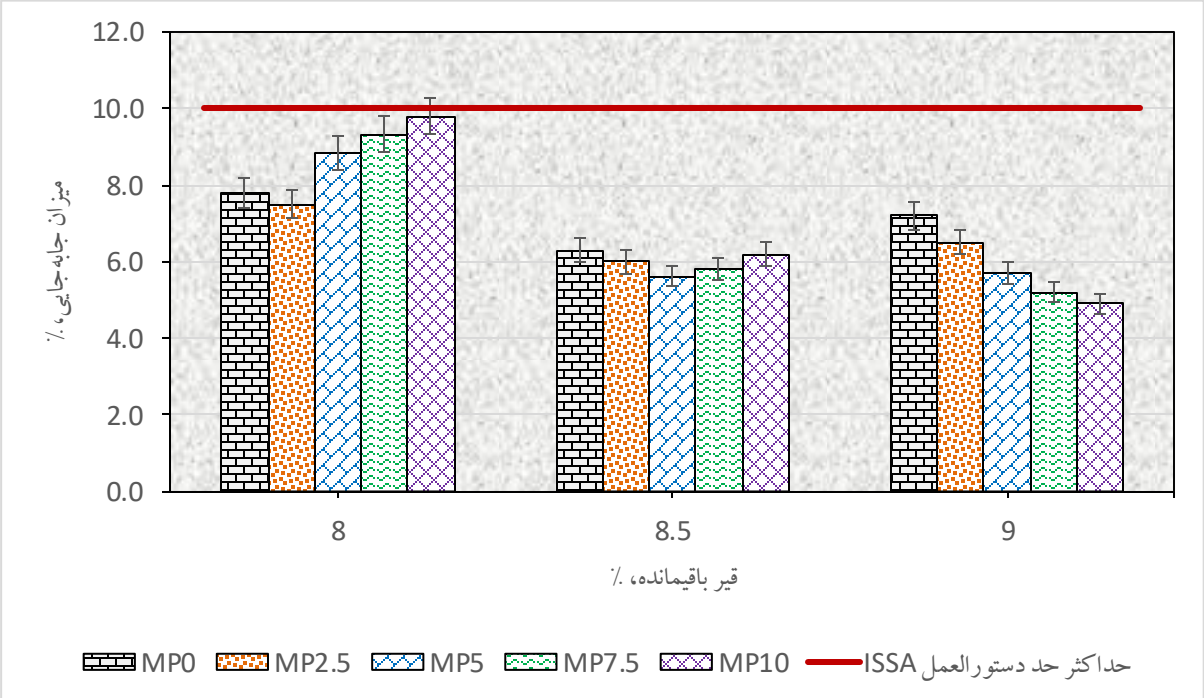
٤-٦ تعیین میزان تغییر شکل عمودی و جانبی مخلوط با آزمایش چرخ بارگذاری شده

نتایج این آزمایش از دو منظر مقدار قیر باقیمانده و مقدار درصد پودر مرمر جایگزین در مخلوط‌ها قابل‌بررسی است که در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است. مطابق نتایج حاصل شده، مقدار قیر باقی‌مانده و پودر مرمر بر عملکرد جابه‌جایی مخلوط‌ها مؤثر است. از منظر قیر باقی‌مانده، در مخلوط‌های MP0 و MP2.5، افزایش قیر باقیمانده از ۸ به ۸/۵ درصد، ابتدا باعث کاهش جابه‌جایی عمودی و افقی شده و سپس با افزایش میزان قیر از ۸/۵ به ۹ درصد باعث افزایش جابه‌جایی می‌شود. این درحالی است که در نمونه‌های MP5، MP7.5 و MP10 با افزایش قیر از ۸ به ۹ درصد، میزان جابه‌جایی‌ها نسبت به نمونه های MP0 و MP2.5 سیر کاهش داشته و افزایش قیر باعث بهبود عملکرد می‌شود. این بدان معنا است که مشخص‌شدن مقدار مناسب از قیر جهت کاهش میزان جابه‌جایی‌ها برای هرنوع مخلوط امری لازم است.

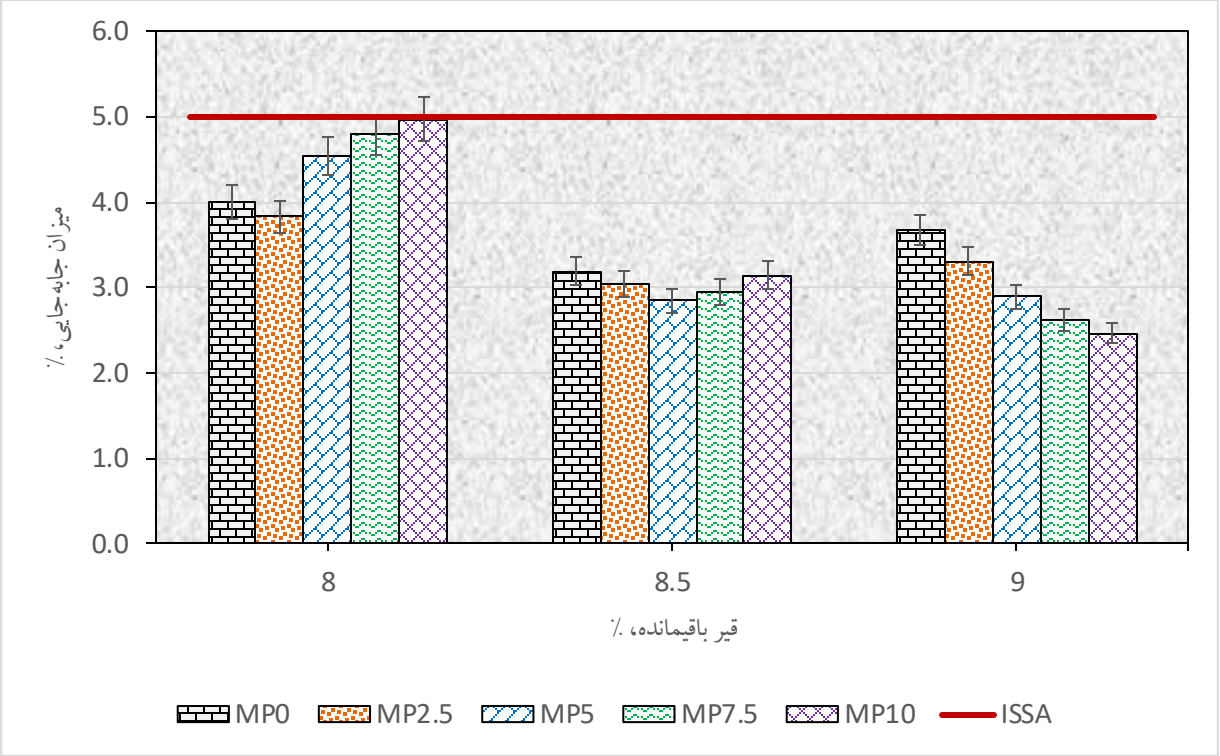
از منظر میزان فیلر، نمونه‌های حاوی پودر مرمر در درصدهای قیر ۸/۵ و ۹ درصد، عملکرد بهتری از نمونه شاهد در جابه‌جایی‌های افقی و عمودی داشته‌اند. به‌طوری که با افزایش میزان پودر مرمر، جابه‌جایی عمودی و جانبی کاهش‌یافته و کمترین میزان جابه‌جایی مربوط به نمونه‌های MP7.5 و MP10 است. با توجه به نتایج حاصله در درصد قیر باقی‌مانده ۸/۵ و ۹ درصد، مخلوط‌های حاوی ۰ و ۲۵ درصد فیلر تفاوت محسوسی در عمق شیار باهم نداشته‌اند ولی با افزایش پودر

مرمر تا ۵۰ درصد جابه‌جایی عمودی و جانبی کاسته شده است که تا ۱۰۰ درصد با افزایش هم‌زمان قیر این روند بهبود پیدا کرده است. به‌طور خلاصه این نتایج نشان داد که مخلوط‌های MP7.5 و MP10 به‌ترتیب بهترین عملکرد را در میزان جابه جایی عمودی و افقی ناشی از شیار داشته‌اند. اگرچه فاصله مقادیر تغییر شکل این مخلوط‌ها (MP7.5 و MP10) قابل‌توجه نیست. به‌طور مثال در قیر ۹ درصد، مطابق نمودار جابه‌جایی افقی نمونه‌های MP2.5، MP5، MP7.5 و MP10 نسبت به نمونه MP0 به‌اندازه ۱۰، ۲۱/۲، ۲۸/۶ و ۳۲/۹ درصد کاهش داشته است. از سوی دیگر، مطابق نمودار افزایش فیلر پودر مرمر در مخلوط‌های MP2.5، MP5، MP7.5 و MP10، در درصد قیر باقی‌مانده ۹ درصد، در مقایسه با نمونه شاهد به‌ترتیب موجب کاهش جابه‌جایی عمودی به مقدار ۹/۷، ۲۰/۶، ۲۷/۸ و ۳۱/۹ درصد شده است. درنهایت این نتایج گواه آن است که افزایش فیلر پودر مرمر، سبب بهبود عملکرد آسفالت حفاظتی در برابر بارگذاری ترافیکی می‌شود. در حالت کلی با افزایش درصد قیر در مخلوط‌ها، قیر اضافی در فضای بین دانه‌ای به‌عنوان روان‌کننده عمل‌کرده و درنتیجه عمق شیار افزایش می‌یابد.

درحالی‌که فیلرها با تخلخل بالاتر می‌توانند قیرهای آزاد را در مخلوط به‌دلیل پرشدن حفرات با قیر به قیر سازه‌ای تبدیل‌کرده و باعث ساخت مخلوطی با ساختاری مستحکم‌تر و درنهایت مقاوم‌تر در برابر خرابی‌های شیارشدگی شوند [۴۷،۴۸]. شکل ظاهری فیلرها نیز بر روی عمق شیارشدگی و تغییر شکل‌های دائمی نیز تأثیر می‌گذارند [۴۹]. پودر مرمر به‌دلیل ساختار نامنظم و تیز گوشه بودن و زاویه اصطکاک داخلی بالا و قفل و بست بهتر سنگدانه‌ها باهم که از دلایل اصلی مقاومت در برابر شیارشدگی در مخلوط‌های آسفالتی با ضخامت کم است، باعث افزایش مقاومت برشی مخلوط و کاهش عمق شیار می‌شود [۵۰]. به‌طور خلاصه در مخلوط‌هایی که مستعد خرابی شیارشدگی هستند، می‌توان پس از تأمین قیر کافی، احتمال وقوع خرابی شیارشدگی را با افزودن پودر سنگ مرمر ضایعاتی به مقدار حدوداً ۳۰ درصد، به‌میزان مؤثری کاهش داد که این موضوع به‌دلیل شکل‌گیری ماستیک قوی‌تر و قفل و بست بهتر مصالح سنگی است.



شکل ۱۰. مقدار تغییرشکل عمودی نمونه‌های اسلاری‌سیل



شکل ۱۱. مقدار تغییرشکل افقی نمونه‌های اسلاری‌سیل

٤-۷ تحلیل آماری

نتایج به‌دست‌آمده از خصوصیات عملکردی آسفالت حفاظتی اسلاری‌سیل شامل چسبندگی مرطوب، سایش در شرایط مرطوب، چرخ بارگذاری شده–چسبندگی ماسه و چرخ بارگذاری شده–جابه‌جایی با استفاده از آنالیز واریانس (ANOVA) مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. نتایج ANOVA با استفاده از تجزیه و تحلیل دو عاملی در سطح اطمینان ۹۵٪ به منظور بررسی اهمیت اثرات افزودن پودر مرمر و درصد قیر باقی‌مانده بر خصوصیات عملکردی مخلوط‌های اسلاری‌سیل با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شده است. نتایج میزان تأثیرگذاری نوع مخلوط و درصد قیر باقی‌مانده بر عملکرد مخلوط آسفالتی اسلاری‌سیل در جدول ۹ قابل مشاهده است. فاکتور اول شامل سه سطح قیر باقیمانده، یعنی ۸، ۸٫۵ و ۹ درصد، و فاکتور دوم شامل پنج مخلوط MP0، MP2.5، MP5، MP7.5 و MP10 است. بر این اساس فرض H0 به معنی عدم وجود اثر معنادار متغیر عامل (مستقل) بر متغیر پاسخ بوده و در صورت رد آن، فرض H1 به معنی وجود اثر معنادار متغیر عامل بر متغیر پاسخ تأیید می‌شود. این موضوع در رابطه ۱ ارائه شده است.

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = ... = \mu_k$$
$$H_1 : \exists i, j \; s.t \; u_i \neq u_j \; (i, j = 1, 2, ...)$$ (رابطه ۱)

مطابق نتایج حاصل از تحلیل واریانس در خصوص تأثیر درصد قیر باقی‌مانده و پودر مرمر بر خصوصیات اسلاری‌سیل، مقدار p مخلوط‌ها کمتر از ۰/۰۵ بود که نشان‌دهنده آن است که قیر باقی مانده و نوع مخلوط، تأثیر قابل‌توجهی بر تمام آزمایش‌های انجام شده از قبیل چسبندگی مرطوب، سایش در شرایط مرطوب، چرخ بارگذاری شده–چسبندگی ماسه و چرخ بارگذاری–جابه‌جایی دارند. نوع مخلوط (تأثیر پودر مرمر) در آزمایش چسبندگی ۳۰ و ۶۰ دقیقه عامل تأثیرگذارتری به‌ترتیب نسبت به درصد قیر باقی‌مانده و برهم‌کنش قیر– نوع مخلوط بوده است. این موضوع از پارامتر Partial eta squared در تحلیل واریانس در آزمایش چسبندگی ۳۰ و ۶۰ دقیقه قابل مشاهده است که به‌ترتیب مقادیر ۷۶/۴ و ۹۵/۹ درصد را به‌دلیل مقدار پودر مرمر در مخلوط کسب کردند. بنابراین در این آزمایش‌ها، بهبود نوع مخلوط با استفاده از پودر مرمر، منجر به نتایج بهتری نسبت به تغییر مقدار قیر باقی‌مانده خواهد شد. این درحالی است که اثر درصد قیر باقی‌مانده و برهمکنش قیر– نوع مخلوط در آزمایش‌های WTAT و LWT-Sand (پتانسیل قیرزدگی) عامل تأثیرگذارتری نسبت به نوع مخلوط بوده است. در آزمایش بارگذاری

چرخ-جابه‌جایی با توجه به پارامترPartial eta squared مشخص گردید که دو عامل نوع مخلوط و برهمکنش قیر- نوع مخلوط با نتایج نزدیک به‌هم و با مقدار واریانس بالای ۹۰ درصد اثر قابل توجهی بر میزان جابه‌جایی مخلوط اسلاری‌سیل خواهند داشت.

جدول ۹. تحلیل آماری عوامل تأثیرگذار بر عملکرد مخلوط اسلاری‌سیل اصلاح شده

Source of variation	Type III sum of squares	df	Mean square	F	P-value	Partial eta squared
(a) Cohesion at 30 minutes						
Corrected Model	71.263a	14	5.090	9.731	<0.001	0.820
Intercept	9449.654	1	9449.654	18064.333	<0.001	0.998
bitumen	16.050	2	8.025	15.341	<0.001	0.506
blend type	50.932	4	12.733	24.341	<0.001	0.764
bitumen * blend type	4.281	8	0.535	7.023	0.027	0.314
Error	15.693	30	0.523			
Total	9536.610	45				
Corrected Total	86.956	44				
(b) Cohesion at 60 minutes						
Corrected Model	241.200	14	17.229	71.986	<0.001	0.971
Intercept	26353.800	1	26353.800	110113.370	<0.001	1.000
bitumen	57.600	2	28.800	120.334	<0.001	0.889
blend type	167.200	4	41.800	174.652	<0.001	0.959
bitumen * blend type	16.400	8	2.050	8.565	<0.001	0.696
Error	7.180	30	0.239			
Total	26602.180	45				
Corrected Total	248.380	44				
(c) WTAT						
Corrected Model	1222504.819	14	87321.773	852.385	<0.001	0.997
Intercept	10308278.251	1	10308278.251	100623.543	<0.001	1.000
bitumen	964282.167	2	482141.084	4706.387	<0.001	0.997
blend type	33980.050	4	8495.013	82.923	<0.001	0.917
bitumen * blend type	224242.602	8	28030.325	273.616	<0.001	0.986
Error	3073.320	30	102.444			
Total	11533856.390	45				
Corrected Total	1225578.139	44				
(d) LWT-Sand adhesion						
Corrected Model	175407.563	14	12529.112	169.651	<0.001	0.988
Intercept	8139689.110	1	8139689.110	110215.900	<0.001	1.000
bitumen	147855.243	2	73927.622	1001.021	<0.001	0.985
blend type	3313.892	4	828.473	11.218	<0.001	0.599
bitumen * blend type	24238.428	8	3029.804	41.025	<0.001	0.916
Error	2215.567	30	73.852			
Total	8317312.240	45				
Corrected Total	177623.130	44				
(e) LWT-Vertical displacement						
Corrected Model	97.039	14	6.931	389.887	<0.001	0.995
Intercept	2109.458	1	2109.458	118657.013	<0.001	1.000
bitumen	74.032	2	37.016	2082.150	<0.001	0.685
blend type	1.161	4	0.290	16.325	<0.001	0.993
bitumen * blend type	21.846	8	2.731	153.603	<0.001	0.976
Error	0.533	30	0.018			
Total	2207.030	45				
Corrected Total	97.572	44				
(f) LWT-Lateral displacement						
Corrected Model	26.252	14	1.875	290.975	<0.001	0.993
Intercept	545.664	1	545.664	84672.034	<0.001	1.000
bitumen	20.078	2	10.039	1557.759	<0.001	0.631
blend type	0.330	4	0.083	12.810	<0.001	0.990
bitumen * blend type	5.844	8	0.731	113.362	<0.001	0.968
Error	0.193	30	0.006			
Total	572.110	45				
Corrected Total	26.446	44				

۵. نتیجه‌گیری

نتایج آزمایش‌های انجام‌شده در این مطالعه به‌طور خلاصه در ادامه ارائه شده است:

- در آزمایش چسبندگی مرطوب تمامی نمونه‌ها، در زمان‌های ۳۰ و ۶۰ دقیقه، مقاومت لازم جهت عبور بار ترافیک را کسب نمودند. به‌طور خلاصه با افزایش میزان پودر مرمر و مقدار قیر، مقدار چسبندگی مخلوط‌ها افزایش یافته است.
- در آزمایش سایش در شرایط مرطوب، افزایش درصد قیر باقیمانده از ۸ به ۹ درصد موجب کاهش افت سایشی تمام مخلوط‌ها شد. تأثیر جایگزینی پودر مرمر به درصد قیر وابسته بود؛ در قیر ۸/۵

درصد، مخلوط MP7.5 و در قیر ۹ درصد، مخلوط MP10 کمترین افت سایشی را داشتند. بنابراین، بهبود مقاومت سایشی مستلزم انتخاب هم‌زمان مقدار مناسب پودر مرمر و درصد قیر باقیمانده است.

- در آزمایش تعیین حداکثر قیر به‌وسیله چرخ بارگذاری–چسبندگی ماسه معلوم گردید که پتانسیل قیرزدگی مخلوط‌ها با افزایش درصد قیر امولسیون در مخلوط‌های آسفالتی افزایش خواهد یافت. همچنین با افزایش درصد فیلر پودر مرمر از ۰ تا ۱۰۰ درصد پتانسیل قیرزدگی مخلوط‌ها هم‌زمان افزایش یافت. اما در درصد قیر پایین‌تر (۸ درصد) بهبود عملکرد در برابر قیرزدگی مشاهده شده است. بهترین عملکرد در این شرایط مربوط به مخلوط‌های MP7.5 و MP10 بوده است.

نتایج آزمون‌های سایش مرطوب و چسبندگی ماسه نشان داد که انتخاب درصد قیر باید با درنظرگرفتن هم‌زمان مقاومت سایشی و کنترل پتانسیل قیرزدگی انجام شود. با تلفیق منحنی‌های برازش‌شده و اجرای روش انتخاب بازهٔ توضیح‌داده‌شده در این پژوهش، مقدار برآوردی قیر امولسیون بهینه برای مخلوط‌های MP7.5 و MP10 به‌ترتیب ۱۳,۷۲ و ۱۳,۷۱ درصد، معادل حدود ۸,۵۱ و ۸,۵۰ درصد قیر باقیمانده، محاسبه شد.

- یافته کلیدی این تحقیق آن است که با افزایش درصد پودر مرمر، درصد قیر بهینه کاهش می‌یابد، به این معنا که مخلوط‌های اصلاح‌شده برای دستیابی به بهترین تعادل عملکردی به قیر کمتری نیاز دارند که از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی مطلوب است. اگرچه نمونه MP10 در قیر ۹ درصد بهترین مقاومت سایشی را دارد، اما به‌دلیل ریسک بالای قیرزدگی، این ترکیب در عمل به‌عنوان طرح بهینه توصیه نمی‌شود. در مقابل، در محدوده قیر بهینه تعیین‌شده، مخلوط‌های MP7.5 و MP10 عملکرد کلی برتر نسبت به نمونه شاهد ارائه کردند.
- در تعیین میزان تغییر شکل عمودی و جانبی مخلوط با آزمایش چرخ بارگذاری شده، افزایش فیلر پودر مرمر، سبب بهبود عملکرد آسفالت حفاظتی در برابر بارگذاری ترافیکی می‌شود. به‌طوری که کمترین میزان جابه‌جایی مربوط به نمونه‌های MP7.5 و MP10 با نتایج نزدیک به‌هم بوده است. افزایش درصد قیر در مخلوط های حاوی درصد بالای پودر مرمر، در افزایش میزان جابه‌جایی نسبت به مخلوط شاهد تأثیر کمتری داشته است. لذا برای کاهش مقدار جابه‌جایی‌ها، مشخص‌نمودن میزان قیر مناسب امری لازم است.
- بنابراین، برای کاربردهای عملی توصیه می‌شود از ۷۵ تا ۱۰۰ درصد پودر مرمر به عنوان جایگزین فیلر، همراه با کنترل دقیق درصد قیر در محدوده بهینه استفاده شود تا ضمن بهره‌مندی از مزایای بهبود دوام و مقاومت سایشی، ریسک قیرزدگی نیز مدیریت شود. به‌ویژه در مناطق گرم و خشک که خطر قیرزدگی بالاتر است، استفاده از درصد قیر پایین‌تر در محدوده بهینه و در مناطق پر بارش حفظ درصد قیر در حد بهینه برای کنترل حساسیت رطوبتی توصیه می‌شود.
- مطابق نتایج حاصل از تحلیل واریانس درخصوص تأثیر درصد قیر باقی‌مانده و پودر مرمر بر خصوصیات اسلاری‌سیل، مقدار p مخلوط‌ها کمتر از ۰/۰۵ بود که نشان‌دهنده آن است که قیر باقی مانده و نوع مخلوط، تأثیر قابل‌توجهی بر تمام آزمایش‌های انجام شده دارند.

References

[1] Pattanaik ML, Choudhary R, Kumar B, Kumar A. 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 Des. 2021;22(2):268-292. https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1620120

[2] Keymanesh MR, Ziari H, Zalnezhad H, Zalnezhad M. Mix design and performance evaluation of microsurfacing containing electric arc furnace (EAF) steel slag filler. Constr Build Mater. 2021;269:121336. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121336

[3] Zalnezhad M, Hesami E. Effect of steel slag aggregate and bitumen emulsion types on the performance of microsurfacing mixture. J Traffic Transp Eng Engl Ed. 2020;7(2):215-226. https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.12.005

[4] Ziari H, Zalnezhad M, Ziari MA, Zalnezhad H. Performance analysis of coloured microsurfacing with electric arc furnace steel slag as an aggregate replacement: A laboratory evaluation. Int J Pavement Eng. 2023;24(2):2276173. https://doi.org/10.1080/10298436.2023.2276173

[5] Kirthika SK, Singh SK, Chourasia A. Alternative fine aggregates in production of sustainable concrete—A review. J Clean Prod. 2020;268:122089. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122089

[6] Das O, Babu K, Shanmugam V, Sykam K, Tebyetekerwa M, Neisiany RE, Försth M, Sas G, Gonzalez-Libreros J, Capezza AJ, Hedenqvist MS, Berto F, Ramakrishna S. Natural and industrial wastes for sustainable and renewable polymer composites. Renew Sustain Energy Rev. 2022;158:112054. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112054

[7] Divandari H, Heidari M, Zalnezhad M, Zalnezhad A. The study of the feasibility and manufacture of slurry seal surface treatment with steel slag industry wastes: Use of basic oxygen furnace (BOF) slag filler as raw material replacement. Road Mater Pavement Des. 2024;25(5):967-987. https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2230299

[8] Marvila MT, Azevedo ARG, Cecchin D, Costa JM, Xavier GC, de Fátima do Carmo D, Monteiro SN. Durability of coating mortars containing açaí fibers. Case Stud Constr Mater. 2020;13:e00406. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00406

[9] Ziari H, Zalnezhad M, Ziari MA. Performance evaluation of colored slurry seal mixture with steel slag as a substituent of natural aggregates. J Mater Civ Eng. 2024;36(7):04024192. https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-17172

[10] Ghodrati A, Asadi Azadgoleh M, Zalnezhad M, Mohammadi MM, Ayar P, Vahidi E. Performance improvement of slurry seal by glass powder: Mechanical evaluation and life cycle assessment. Road Mater Pavement Des. 2025;26(10):2513-2535. https://doi.org/10.1080/14680629.2024.2449097

[11] Mohammadi MM, Asadi Azadgoleh M, Ghodrati A, Zalnezhad M, Ayar P, Fini E. Introducing waste glass powder as a sustainable constituent in microsurfacing. Constr Build Mater. 2023;395:132271. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132271

[12] Shaygan S, Izadi A, Zalnezhad M. Performance and environmental assessment of microsurfacing mixture using the granulated blast-furnace slag powder (GBSP) as potential recycled filler. Constr Build Mater. 2022;359:129502. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129502

[13] Jalalian Khoshnood A, Kamboozia N, Ziari H, Zalnezhad M. Evaluation of performance characteristics of polymer-modified slurry seal (PMSS) by replacing filler with ceramic waste powder. Road Mater Pavement Des. 2023;24(9):2174-2191. https://doi.org/10.1080/14680629.2022.2117639

[14] Khan AJ, Ali Qureshi L, Khan MNA, Gul A, Umar M, Manan A, Badrashi YI, Abbas A, Javed U, Farooq R. Axial compressive behavior of reinforced concrete (RC) columns incorporating multi-walled carbon nanotubes and marble powder. Crystals. 2021;11(3):247. https://doi.org/10.3390/cryst11030247

[15] Alyamac KE, Ghafari E, Ince R. Development of eco-efficient self-compacting concrete with waste marble powder using the response surface method. J Clean Prod. 2017;144:192-202. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.156

[16] Khan K, Ahmad W, Amin MN, Ahmad A, Nazar S, Alabdullah AA, Arab AMA. Exploring the use of waste marble powder in concrete and predicting its strength with different advanced algorithms. Materials. 2022;15(12):4108. https://doi.org/10.3390/ma15124108

[17] Baby B, Baby BT, Xavier JP, Hafis M, Vipinan D. Effect of coir fiber on stone matrix asphalt (SMA) with marble waste as filler. Int Res J Eng Technol. 2018;5(2):1899-1902.

[18] Sang L, Idowu T, Okumu V. Evaluation of the performance of waste marble dust as a mineral filler in hot-mix asphalt concrete. J Civ Eng Sci Technol. 2021;12(1):1-14. https://doi.org/10.33736/jcest.3337.2021

[19] Izadi A, Shaygan S, Zalnezhad M. Investigation of the effect of blast-furnace slag powder on slurry seal surface treatment performance. Q J Transp Eng. 2023;14(3):2625-2649. (in Persian). https://doi.org/10.22119/jte.2021.298212.2550

[20] Aliha MRM, Zalnezhad M, Jafari Haghighatpour P. Fracture toughness of colored slurry seal at low temperatures and different loading modes: Comparative study with warm and hot mix asphalt materials. Constr Build Mater. 2023;409:133786. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133786

[21] Ziari H, Zalnezhad M, Ziari MA, Nasiri Amiri E. Substitution of the natural aggregate filler by coal waste powder (CWP) in microsurfacing surface treatment: Mix design and performance evaluation. Constr Build Mater. 2022;354:129132. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129132

[22] Maleki Toulabi H, Hosseini SA, Haj Najafi L. Investigating the effect of using recycled waste concrete powder on the performance of thin layer surface treatment (slurry seal). J Transp Infrastruct Eng. 2023;9(1):77-106. (in Persian). https://doi.org/10.22075/jtie.2023.29724.1630

[23] Shabani S, Valizadeh M, Khavandi A. Evaluation of the sensitivity of the rheology characteristics of bitumen and slurry seal modified with cellulose nanofiber solution. Constr Build Mater. 2024;422:135318. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135318

[24] Khan D, Khan R, Khan MT, Alam M, Hassan T. Performance of hot-mix asphalt using polymer-modified bitumen and marble dust as a filler. J Traffic Transp Eng Engl Ed. 2023;10(3):385-398. https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.12.002

[25] Eissa M, Shalaby B, Mashaly O, Abdeldayem A, Mosa GS. Stability and volumetric properties of hot-mixes asphalt (HMA) using marble powder waste. J Int Soc Sci Eng. 2022;4(2):40-48. https://doi.org/10.21608/jisse.2022.138055.1057

[26] Raza M, Khan R. Influence of marble dust filler on Marshal properties of hot mix asphalt. Int J Res Appl Sci Eng Technol. 2021;9(9):640-647. https://doi.org/10.22214/ijraset.2021.37984

[27] Awed AM, Tarbay EW, El-Badawy SM, Azam AM. Performance characteristics of asphalt mixtures with industrial waste/by-product materials as mineral fillers under static and cyclic loading. Road Mater Pavement Des. 2022;23(2):335-357. https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1826347

[28] International Slurry Surfacing Association. Recommended performance guideline for emulsified asphalt slurry seal. ISSA; 2010. ISSA A105.

[29] Ziari H, Zalnezhad M, Zomorodian ZS, Ziari MA. Utilising natural pigments as a filler replacement on the mix design, performance and colorimetric characteristics of the microsurfacing mixture: Laboratory evaluation. Road Mater Pavement Des. 2025;26(5):996-1022. https://doi.org/10.1080/14680629.2024.2393377
[30] Ziari H, Mahdizadeh MJ, Zalnejad M. Experimental performance evaluation of microsurfacing surface treatment containing polypropylene fibers. Q J Transp Eng. 2023;14(4):2937-2958. (in Persian). https://doi.org/10.22119/jte.2021.298308.2551
[31] Izadi A, Zalnezhad M, Bozorgi Makerani P, Zalnezhad H. Mix design and performance evaluation of coloured slurry seal mixture containing natural iron oxide red pigments. Road Mater Pavement Des. 2022;23(4):907-924. https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1860803
[32] Keymanesh MR, Ziari H, Zalnezhad H, Zalnezhad M. Effects of lead time and manufacturing methods applied for polymer-modified bitumen emulsion (PMBE) on microsurfacing performance. Road Mater Pavement Des. 2022;23(10):2271-2292. https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1963818
[33] Wang A, Shen S, Li X, Song B. Micro-surfacing mixtures with reclaimed asphalt pavement: Mix design and performance evaluation. Constr Build Mater. 2019;201:303-313. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.164
[34] de Matos PR, Oliveira JCP, Medina TM, Magalhães DC, Gleize PJP, Schankoski RA, Pilar R. Use of air-cooled blast furnace slag as supplementary cementitious material for self-compacting concrete production. Constr Build Mater. 2020;262:120102. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120102
[35] Esfahani MA, Khatayi A. Effect of type and quantity of emulsifier in bitumen polymer emulsion on microsurfacing performance. Int J Pavement Eng. 2022;23(4):957-971. https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1784416
[36] International Slurry Surfacing Association. Trial mix procedure for slurry seal design. ISSA; 2017. ISSA TB113.
[37] International Slurry Surfacing Association. Test method to classify emulsified asphalt/aggregate mixture systems by modified cohesion tester measurement of set and cure characteristics. ISSA; 2017. ISSA TB139.
[38] Apaza Apaza FR, Rodrigues Guimarães AC, Marcos Vivoni A, Schroder R. Evaluation of the performance of iron ore waste as potential recycled aggregate for micro-surfacing type cold asphalt mixtures. Constr Build Mater. 2021;266:121020. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121020
[39] Bhargava N, Siddagangaiah AK, Ryntathiang TL. Reliability of microsurfacing mix subjected to variation in aggregate gradation. Transp Res Rec. 2020;2674(11):720-730. https://doi.org/10.1177/0361198120948855
[40] International Slurry Surfacing Association. Test method for wet track abrasion of slurry surfacing systems. ISSA; 2017. ISSA TB100.
[41] International Slurry Surfacing Association. Test method for measurement of excess asphalt in bituminous mixtures by use of a loaded wheel tester and sand adhesion. ISSA; 2017. ISSA TB109.
[42] International Slurry Surfacing Association. Test method for measurement of stability and resistance to compaction, vertical and lateral displacement of multilayered fine aggregate cold mixes. ISSA; 2017. ISSA TB147.
[43] Chen M, Lin J, Wu S. Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture. Constr Build Mater. 2011;25(10):3909-3914. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.022
[44] Taylor RE. Surface interactions between bitumen and mineral fillers and their effects on the rheology of bitumen-filler mastics [Doctoral dissertation]. University of Nottingham; 2007.
[45] Liao MC. Small and large strain rheological and fatigue characterisation of bitumen-filler mastics [Doctoral dissertation]. University of Nottingham; 2007.
[46] Zulkati A, Wong YD, Sun DD. Effects of fillers on properties of asphalt-concrete mixture. J Transp Eng. 2012;138(7):902-910. https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000395
[47] Mogawer WS, Stuart KD. Effects of mineral fillers on properties of stone matrix asphalt mixtures. Transp Res Rec. 1996;1530(1):86-94. https://doi.org/10.1177/036119819615300011
[48] Wang H, Al-Qadi IL, Faheem AF, Bahia HU, Yang SH, Reinke GH. Effect of mineral filler characteristics on asphalt mastic and mixture rutting potential. Transp Res Rec. 2011;2208(1):33-39. https://doi.org/10.3141/2208-05
[49] Melotti R, Santagata E, Bassani M, Salvo M, Rizzo S. A preliminary investigation into the physical and chemical properties of biomass ashes used as aggregate fillers for bituminous mixtures. Waste Manag. 2013;33(9):1906-1917. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.05.015
[50] Rondón-Quintana HA, Ruge-Cárdenas JC, Farias MM. Behavior of hot-mix asphalt containing blast furnace slag as aggregate: Evaluation by mass and volume substitution. J Mater Civ Eng. 2019;31(2):04018364. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002574

Applied Research in Infrastructure Engineering Open Access

Spring & Summer (2026) 53-72

ORIGINAL ARTICLE

Feasibility and Effect of Using Waste Marble Powder as a Substitute for Natural Filler on the Performance of Slurry Seal Surface Treatment

Hassan Ziari[1*], Zahra Kheydan[2], Mahdi Zalnezhad[3]

1. Prof., Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.
2. Master's Degree, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran
3. Ph.D., Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.

Correspondence:
Hassan Ziari
Email: h.ziari@iust.ac.ir

Received: 21 May 2025
Accepted: 10 Nov 2025

How to cite:
Ziari, H, Kheydan, Z. & Zalnezhad, M. (2026). Feasibility and Effect of Using Waste Marble Powder as a Substitute for Natural Filler on the Performance of Slurry Seal Surface Treatment. *Applied Research in Infrastructure Engineering*, 1(1), 53-72. (DOI:)

ABSTRACT

One of the effective methods for preventive maintenance and preservation of asphalt pavements is the timely application of slurry seal surface treatment. This study aims to evaluate the feasibility and impact of replacing natural filler with waste marble powder in the slurry seal mix design to assess its performance. Initially, the properties of aggregate materials and marble powder were examined. Subsequently, the performance of slurry seal mixtures was analyzed using five different compositions containing 0%, 25%, 50%, 75%, and 100% marble powder as filler replacement. The evaluation and comparison of asphalt samples were conducted through wet cohesion tests (at 30 and 60 minutes), wet abrasion resistance tests (over one hour), and wheel tracking tests measuring sand adhesion and vertical displacement according to ASTM D3910 standards. The results indicated that the inclusion of waste marble powder enhanced the performance of the slurry seal. Among the asphalt samples, the mixture containing 100% marble powder at 9% bitumen content exhibited the best performance. Compared to the unmodified control sample, it showed a 28.1% and 33.3% increase in adhesion at 30 and 60 minutes respectively, a 48% reduction in wet-track abrasion mass loss, and a 31.9% decrease in vertical displacement under traffic loading.

KEYWORDS

Slurry seal, Waste marble powder, Wet cohesion test, Moisture susceptibility, Resistance to deformation.

Copyright © 2026 The Authors. Published by Payame Noor University.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.