

ارزیابی بهبود عملکرد اسلاری سیل با استفاده از پودر فروفسفر به عنوان جایگزین فیلر سنگدانه طبیعی: بررسی عملکرد و اثرات زیست محیطی

مقاله علمی - پژوهشی

حسین فلاحی آبدانوسری، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران

*احمد گلی (نویسنده مسئول)، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

پرهام حیاتی، استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: a.goli@trn.ui.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۲

صفحه ۱۷۰-۱۴۷

چکیده

یکی از شیوه‌های کارآمد در نگهداری پیشگیرانه و حفظ روبه‌های آسفالتی جاده و فرودگاه، استفاده به موقع از آسفالت حفاظتی اسلاری سیل است. با توجه به تشدید دغدغه‌های زیست محیطی و کاهش روزافزون منابع طبیعی، بهره‌گیری از مواد ضایعاتی صنعتی در پروژه‌های راه‌سازی به یک ضرورت تبدیل شده است. در همین راستا، این تحقیق به ارزیابی قابلیت استفاده از پودر فروفسفر به عنوان فیلر در مخلوط‌های اسلاری سیل پرداخته و عملکرد آن در مقایسه با فیلرهای حاصل از سنگدانه‌های طبیعی بررسی گردید. در این خصوص، در مرحله اول ویژگی‌های مصالح سنگی و پودر فروفسفر بررسی گردید. در مرحله بعد، به منظور تحلیل عملکرد مخلوط‌های اسلاری سیل، پنج ترکیب حاوی صفر، ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درصد پودر فروفسفر به عنوان جایگزین فیلر طبیعی تهیه و مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمون‌های چسبندگی، سایش در شرایط مرطوب، چرخ بارگذاری-چسبندگی ماسه و چرخ بارگذاری-جابجایی، به منظور سنجش ویژگی‌های فنی نمونه و بر اساس استاندارد ASTM D3910 انجام شد. پس از آن، تحلیل آماری برای بررسی تأثیر پودر فروفسفر بر عملکرد اسلاری سیل و آزمایش TCLP برای ارزیابی اثرات زیست محیطی مخلوط‌ها صورت گرفت. نتایج نشان داد که در میان نمونه‌های آسفالتی، مخلوط حاوی ۴۵ درصد پودر فروفسفر دارای مناسب‌ترین عملکرد است. این مخلوط نسبت به نمونه شاهد، چسبندگی را تا ۳۰ درصد افزایش داد. همچنین، حساسیت رطوبتی مخلوط به میزان ۳۶ درصد و قیرزدگی آن به میزان ۵۰٫۴ درصد کاهش یافت. علاوه بر این، میزان جابه‌جایی عمودی در برابر بارگذاری ترافیکی نیز ۲۹٫۷ درصد کاهش پیدا کرد. تحلیل آماری نیز تأیید کرد که پودر فروفسفر اثر معناداری بر شاخص‌های عملکرد دارد. به طوری که نتایج P-value نشان‌دهنده اثر مهم بر بهبود چسبندگی و افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل بود. همچنین، نتایج TCLP نشان داد که میزان آبتشویی فلزات سنگین در تمام نمونه‌های حاوی پودر فروفسفر کمتر از حدود مجاز بود که ایمنی زیست محیطی این مخلوط‌ها را از این منظر تأیید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: اسلاری سیل، پودر فروفسفر، بررسی عملکرد، تحلیل آماری، آزمایش TCLP

۱- مقدمه

یکی از رویکردهای اصلی برای این هدف، نگهداری پیشگیرانه است که با تعمیر آسیب‌های سطحی، کاهش نرخ خرابی و به تأخیر انداختن نیاز به تعمیرات پرهزینه، طول عمر روسازی را افزایش می‌دهد. در میان انواع روش‌های نگهداری پیشگیرانه، اسلاری سیل و میکروسرفیسینگ به دلیل مزایای

راه‌ها، فرودگاه‌ها و شبکه‌های حمل و نقل، به عنوان یکی از بزرگ‌ترین دارایی‌های ملی، شریان‌های حیاتی هر کشور برای ارتباط، جابجایی و تجارت هستند که با سرمایه‌گذاری کلان ایجاد شده و نیازمند نگهداری مستمر هستند (Jalalian, Khoshnood et al., 2023; Ziari et al., 2022).

سرباره یا پودر سرامیک ضایعاتی) باشد (Alvarez et al., 2019; Rezaei Lori et al., 2021).

با این حال، استخراج سنگدانه‌های طبیعی علاوه بر افزایش هزینه تولید مصالح، نگرانی‌های زیست‌محیطی جدی مانند جنگل‌زدایی، نابودی چشم‌اندازهای طبیعی و تولید گردوغبار را ایجاد می‌کند (Langer & Arbogast, 2002; Pattanaik, 2023; H. Ziari et al., 2021; et al., 2021). هم‌زمان با رشد جمعیت، توسعه شهری، پروژه‌های بزرگ ساختمانی و صنعتی، میزان پسماندهای جامد افزایش چشمگیری یافته است و ظرفیت مناطق دفن زباله پاسخگوی این حجم از ضایعات نیست (Awed et al., 2022; Voukkali et al., 2024).

در این شرایط، استفاده از مواد بازیافتی به‌عنوان جایگزینی برای مصالح طبیعی، راهکاری مؤثر برای کاهش برداشت منابع غیرقابل تجدید و مدیریت پایدار پسماند بشمار می‌رود (Izadi et al., 2023; Zalnezhad & Hesami, 2020).

پسماندهای جامد معمولاً به چهار گروه اصلی دسته‌بندی می‌شوند: پسماندهای صنعتی (خاکستر بادی و انواع سرباره)، پسماندهای شهری و خانگی (ضایعات پلاستیکی و شیشه)، پسماندهای معدنی (باطله‌های زغال‌سنگ) و پسماندهای تخریب و ساخت‌وساز شامل آسفالت و بتن بازیافتی (Divandari et al., 2024).

فروفسفر محصول جانبی مهمی است که عمدتاً از فرآیند پالایش فسفر یا استخراج آن از سنگ فسفات در کوره‌های قوس الکتریکی به‌دست می‌آید. در این فرایند، فسفر از سنگ‌های حاوی فسفات جدا شده و سیلیس و کربن به‌عنوان مواد کمکی برای حذف ناخالصی‌ها در فرآیند تشکیل سرباره افزوده می‌شوند. آهن موجود در شارژ کوره با فسفر ترکیب شده و فروفسفر ایجاد می‌کند که قابل استخراج است (Chesner et al., 1998; Ma et al., 2019).

این ماده به دلیل پایداری شیمیایی، ساختار مستحکم، بازده تولید بالا و هزینه پایین، به‌عنوان جایگزین بالقوه برای فیلر در مخلوط‌های آسفالتی پیشنهاد شده است و از فسفر، آهن و مقادیر کمی منگنز و تیتانیوم تشکیل می‌شود (Ma et al., 2019). استفاده از مواد بازیافتی در مخلوط‌های اسلاری سیل علاوه بر کاهش برداشت سنگدانه‌های طبیعی، می‌تواند خواص مهندسی مخلوط‌ها را ارتقاء دهد. تحقیقات پیشین نشان داده‌اند که موادی همچون پودر سنگ تراورتن بازیافتی (Nejati et al.,

اقتصادی و زیست‌محیطی، یکی از گزینه‌های مناسب محسوب می‌شوند (Shabani et al., 2024; Zarouk et al., 2024). این روش‌ها علاوه بر جاده‌ها، در نگهداری سطوح روسازی فرودگاه نیز نتایج موفق داشته و کاهش هزینه‌ای معادل ۳۱ درصد نسبت به آسفالت گرم را نشان داده است (Bhargava et al., 2020). ارزیابی‌ها نشان داده‌اند که این روش نگهداری با کسب امتیاز ۶۷۵ از ۷ در فرودگاه‌های عمومی تگزاس، آرکانزاس و لوئیزیانا، به‌عنوان یکی از مناسب‌ترین شیوه‌های نگهداری سطحی مطرح بوده است (Dzwilewski et al., 2022). همچنین در فرودگاه‌های مناطقی با محدودیت منابع مالی، این روش به دلیل هزینه کمتر، اجرای سریع‌تر و اثرات زیست‌محیطی پایین‌تر، گزینه‌ای کارآمد برای بازسازی باند فرودگاه به‌شمار می‌رود (Bhargava et al., 2021; White, 2024). اجرای آن نه تنها موجب ترمیم ترک‌های سطحی و آسیب‌های جزئی می‌شود، بلکه دوام روسازی را افزایش داده، ایمنی هواپیماها را با بهبود اصطکاک سطحی ارتقا بخشیده و خطر هیدروپلینینگ را کاهش می‌دهد (Bhargava et al., 2021; De Rose et al., 2023). به‌عنوان نمونه، از سال ۱۹۹۹ بیش از ۱۲ باند فرودگاه در استرالیا با موفقیت با این روش روکش شده و نتایج عملکردی مطلوبی داشته‌اند (White, 2024).

همچنین، به دلیل کاهش مصرف انرژی، کاهش صدای تماس تایر و سطح، صرفه‌جویی در منابع طبیعی و کاهش گازهای گلخانه‌ای، به‌عنوان یک روش پایدار زیست‌محیطی شناخته می‌شوند. مخلوط‌های اسلاری سیل از مصالح صد درصد شکسته با دانه‌بندی کنترل‌شده، قیر امولسیون کاتیونی، آب، فیلر معدنی و افزودنی‌های شیمیایی برای کنترل زمان شکست تشکیل می‌شوند (Algburi & Hesami, 2025; Aliha et al., 2023; Ziari, Zalnezhad, & Ziari, 2024; Ziari et al., 2025). در این ترکیب، فیلر به‌عنوان یکی از اجزاء کلیدی، نقش مهمی در خواص مکانیکی و عملکردی مخلوط ایفا می‌کند و نوع و مقدار آن می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی بر رفتار مخلوط اثرگذار باشد (Izadi, Zalnezhad, et al., 2022; Mohammadi et al., 2023). فیلر در آسفالت به‌طور کلی به‌عنوان ماده ریزتر از ۰.۰۷۵ میکرومتر (عبوری از الک ۲۰۰) تعریف می‌شود و می‌تواند به‌صورت طبیعی (حاصل از خردایش و سرند کردن سنگدانه) یا مصنوعی و بازیافتی (مانند خاکستر بادی، آهک،

-تحلیل اثر درصد قیر امولسیون کاتیونی بر ویژگی‌هایی نظیر چسبندگی بین قیر و سنگدانه، زمان گیرش و عمل‌آوری، قیرزدگی، مقاومت در برابر سایش و قابلیت تحمل بار ترافیکی -تعیین میزان بهینه قیر امولسیون و پودر فروفسفر در مخلوط اسلاری سیل جهت دستیابی به مقاومت و عملکرد مطلوب - ارزیابی مخاطرات زیست‌محیطی احتمالی ناشی از آبشویی محصولات جانبی نمونه‌های آسفالتی.

۲- مواد و مصالح

۲-۱- مصالح سنگی و پودر فروفسفر

در این پژوهش، از مصالح سنگی کوهستانی (کارخانه چالدران، مازندران، ایران) و PSP (شرکت فولاد مبارکه، اصفهان، ایران) در تهیه مخلوط اسلاری سیل استفاده گردید. طرح اختلاط بر اساس الزامات دانه‌بندی نوع دوم (Type II) مندرج در دستورالعمل ISSA A105 انجام شد. محدوده دانه‌بندی مصالح سنگی بین ۰ تا ۵ میلی‌متر بوده و در جدول ۱ ارائه شده است. برای مخلوط شاهد، از فیلر سنگی به‌عنوان مصالح ریزدانه استفاده شد. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مصالح در جدول ۲ گزارش شده است. نتایج نشان داد که مصالح سنگی مورد استفاده با الزامات استاندارد ISSA A105 مطابقت کامل داشته و از ویژگی‌های فنی مطلوبی برخوردار هستند. این مصالح قابلیت تأمین پایداری مناسب و عملکرد مطلوب آسفالتی را دارا می‌باشند، به‌ویژه در برابر تأثیرات رطوبت و چرخه‌های یخ‌زدگی و ذوب‌شدگی. همچنین، مقاومت سایشی قابل قبولی از خود نشان داده و انتظار می‌رود دوام و کارایی مطلوب خود را در شرایط بهره‌برداری حفظ کنند.

Maleki Toulabi et al., 2024)، پودر بتن بازیافتی (Mohammadi et al., 2023) پودر شیشه ضایعاتی (Ziari, Zalnezhad, 2023)، پودر ضایعات زغال‌سنگ (Nasiri Amiri, et al., 2024) و سرباره کوره آهنگدازی (Shaygan et al., 2022) باعث بهبود مقاومت سایشی، افزایش چسبندگی مرطوب، کاهش قیرزدگی و بهبود مقاومت جابه‌جایی می‌شوند. این یافته‌ها بیانگر آن است که به‌کارگیری پودرهای صنعتی بازیافتی نه تنها اثر منفی بر عملکرد ندارد، بلکه باعث بهبود دوام و پایداری مخلوط‌های آسفالتی می‌شود. تأثیر مواد ضایعاتی متعدد در بتن و مخلوط‌های گرم آسفالتی مورد مطالعه قرار گرفته است اما مطالعات محدودی در مورد تأثیر آن در مخلوط‌های آسفالتی سرد بالأخص اسلاری سیل انجام شده است. بازیافت و استفاده مجدد از ضایعات و محصولات جانبی حاصل از فعالیت‌های صنعتی و بخش ساختمانی در دهه‌های اخیر در کاهش استفاده از مواد اولیه برای راه‌سازی اهمیت زیادی یافته است. لذا هدف این تحقیق ارائه آسفالت حفاظتی است که در مصرف انرژی و در مدیریت تعمیر و نگهداری گزینه‌ای کم‌هزینه محسوب شده و می‌تواند به مدیریت پسماند کمک کند. لذا در این تحقیق با ساخت نمونه‌هایی از مخلوط اسلاری سیل، به بررسی اثر اضافه کردن درصد‌های مختلف پودر فروفسفر بر خواص این نوع از آسفالت، پرداخته شده است. در این راستا، ابتدا مشخصات فیزیکی و شیمیایی مصالح سنگی و پودر فروفسفر ارزیابی قرار گرفته و سپس به‌منظور ارزیابی عملکرد مخلوط اسلاری سیل حاوی پودر فروفسفر، ۵ ترکیب مختلف حاوی صفر، ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درصد پودر فروفسفر جایگزین فیلر تهیه شد. سنجش نمونه‌های آسفالتی به‌واسطه آزمایش‌های چسبندگی، چرخ بارگذاری شده و سایش در شرایط مرطوب مطابق با دستورالعمل ISSA A105 و استاندارد ASTM D3910 انجام شد. اهداف این تحقیق به‌صورت جزئی‌تر در ادامه آمده است.

- بررسی تأثیر پودر فروفسفر به‌عنوان فیلر جایگزین بر عملکرد اسلاری سیل شامل چسبندگی، پتانسیل قیرزدگی، مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی و بارگذاری ترافیکی

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

اندازه الک	محدوده مورد استفاده	محدوده نوع II دستورالعمل
۴/۷۵ میلی‌متر	۱۰۰	۱۰۰-۹۰
۲/۳۶ میلی‌متر	۷۷/۵	۹۰-۶۵
۱/۱۸ میلی‌متر	۵۷/۵	۷۰-۴۵
۶۰۰ میکرون	۴۰	۵۰-۳۰
۳۰۰ میکرون	۲۴	۳۰-۱۸
۱۵۰ میکرون	۱۵/۵	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	ASTM C127	۲/۶۷	۲/۶۹	-
وزن مخصوص ظاهری	ASTM C128	۲/۷۲	۲/۷۴	-
درصد جذب آب	ASTM C127	۱/۲۲	۱/۳۶	-
ارزش ماسه‌ای خاک‌ها و مصالح ریزدانه	ASTM D2419	-	٪۷۴	حداقل ۴۵٪
سلامت مصالح با سولفات سدیم	ASTM C88	-	٪۲	حداکثر ۱۵٪
مقاومت سایشی در ماشین لس‌آنجلس	ASTM C131	٪۱۸	-	حداکثر ۳۵٪

جدول ۳. مشخصات قیر امولسیون 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	۰/۰۱	حداکثر ۰/۱
اندود، ٪	AASHTO T59	۱۰۰	-
بار ذرات	AASHTO T59	مثبت	مثبت
پایداری انبارش و ذخیره قیر امولسیون، ۲۴ ساعت، ٪	ASTM D6930	۰/۱	حداکثر ۱
تقطیر قیر امولسیون، جرم وزنی، ٪	ASTM D7497	۶۰	حداقل ۵۷
آزمون‌ها بر روی باقی‌مانده قیر امولسیون			
درجه نفوذ در ۲۵°C، ۱۰۰ گرم، ۵ ثانیه	ASTM D5	۶۶	۴۰-۹۰
نقطه نرمی قیر با آزمایش حلقه و گلوله، درجه سانتی‌گراد	ASTM D36	۵۵	-

۲-۲- قیر امولسیون

در این پژوهش، در تمامی مخلوط‌ها از قیر امولسیون کاتیونی استفاده شد. این امولسیون با بهره‌گیری از قیر با درجه نفوذ ۶۰-۷۰ (شرکت نفت پاسارگاد، ایران) و امولسیفایر کاتیونی از نوع دیرشکن (شرکت CECA، فرانسه) تهیه گردید. مطابق دستورالعمل ISSA A105، در صد قیر باقیمانده در امولسیون ۶۰ نظر گرفته شد. فرآیند تولید شامل مخلوط کردن قیر در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد با محلول آبی حاوی امولسیفایر و اسید کلریدریک در آسیاب کلونیدی با سرعت ۲۸۴۰ دور بر دقیقه، مطابق استاندارد ASTM D2397 بود. خواص قیر باقی مانده با آزمون تبخیر سرد مطابق ASTM D7497

در این پژوهش، در تمامی مخلوط‌ها از قیر امولسیون کاتیونی استفاده شد. این امولسیون با بهره‌گیری از قیر با درجه نفوذ ۶۰-۷۰ (شرکت نفت پاسارگاد، ایران) و امولسیفایر کاتیونی از نوع دیرشکن (شرکت CECA، فرانسه) تهیه گردید. مطابق دستورالعمل ISSA A105، در صد قیر باقیمانده در امولسیون

میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM)، برناتور-امت-تلر (BET)، فلورسانس پرتو ایکس (XRF) و پراش پرتو ایکس (XRD) انجام شد. سپس، پودر فروفسفر به‌عنوان جایگزین فیلر مصالح سنگی معمولی با درصدهای ۰، ۱، ۵، ۳، ۰، ۴، ۵ و ۶، ۰ بر اساس وزن کل مصالح سنگی به کار گرفته شد. کدگذاری هر یک از مخلوط‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. طراحی اسلاری سیل و آزمایش‌های مربوطه مطابق با استاندارد ASTM D3910 و دستورالعمل ISSA A105 صورت پذیرفت.

در مرحله بعد، به‌منظور ارزیابی عملکرد و دستیابی به طرح اختلاط بهینه، آزمایش‌هایی شامل زمان اختلاط، چسبندگی مرطوب (WCT)، سایش در حالت مرطوب (WTAT)، تعیین حداکثر درصد قیر با استفاده از آزمون چسبندگی ماسه-چرخ بارگذاری شده (LWT) و ارزیابی نرخ جابجایی با LWT انجام گردید. معیارهای پذیرش برای هر آزمایش در جدول ۵ آورده شده است.

تعیین درصد بهینه قیر امولسیون بر اساس نتایج حاصل از آزمون‌های چرخ بارگذاری-چسبندگی ماسه و سایش در حالت مرطوب انجام می‌شود. چنانچه اختلاف بین مقادیر حداکثر و حداقل درصد قیر امولسیون از ۳ درصد فراتر رود، مقدار بهینه قیر در نقطه میانی یک بازه ۳ درصدی از حد بالا تعیین می‌شود. در مقابل، اگر این اختلاف کمتر از ۳ درصد باشد، درصد بهینه قیر امولسیون به‌عنوان مقدار میانه بین حدود بالا و پایین در نظر گرفته می‌شود.

در نهایت، یافته‌ها پس از بررسی، با استفاده از تحلیل واریانس (ANOVA) و با سطح اطمینان ۹۵ درصد مورد تحلیل آماری قرار گرفتند. متعاقباً، آزمون TCLP نیز به‌منظور ارزیابی اثرات زیست‌محیطی از طریق اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین آبشویی شده از نمونه‌های FP0 و FP60 انجام شد.

و سپس آزمون‌های نفوذ و نقطه نرمی ارزیابی شد (Izadi, Mahdi, et al., 2022; Ziari, Zalnezhad, Nasiri, Amiri, et al., 2024; Hassan Ziari et al., 2023).

شایان ذکر است که از آنجا که قیر امولسیونی عمدتاً در مخلوط‌های سرد مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش‌های تبخیر در دمای بالا و بازیابی به روش تقطیر، شرایط واقعی عمل‌آوری در محیط را بازتاب نمی‌دهند و می‌توانند موجب پیرشدگی، تخریب اصلاح‌کننده‌های پلیمری، جدایش پلیمر از قیر و افزایش اکسیداسیون نسبت به شرایط واقعی میدان شوند (Keymanesh et al., 2021). مشخصات قیر امولسیون پس از انجام آزمایش در جدول ۳ ارائه شده است.

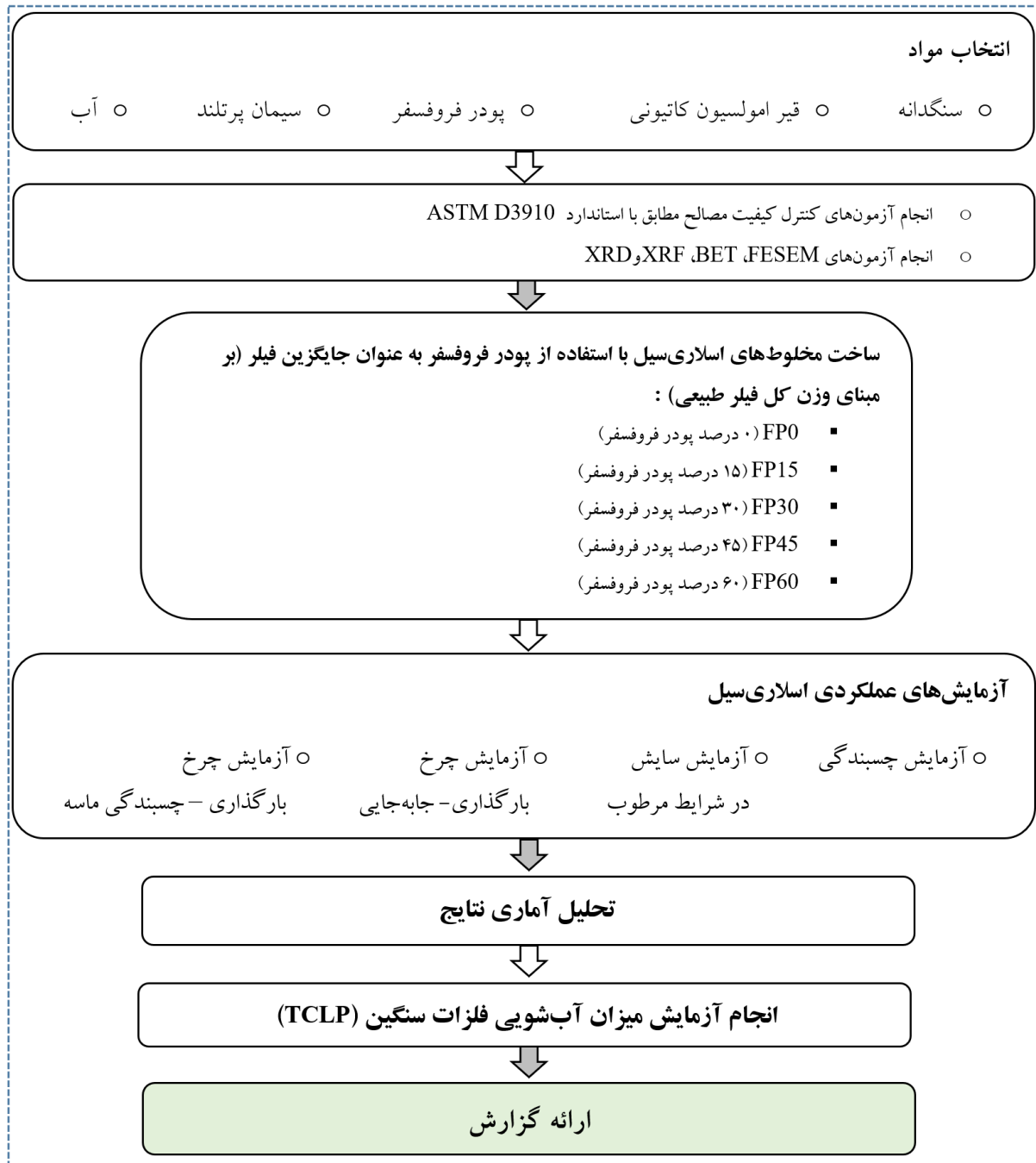
۳-۲- سیمان پرتلند و آب

در این مطالعه، از سیمان پرتلند به میزان ۱ درصد وزنی مصالح سنگی به‌عنوان یک فیلر معدنی فعال در مخلوط اسلاری سیل استفاده شد. هدف از به‌کارگیری آن، تسریع فرایند گیرش و بهبود عمل‌آوری، همراه با افزایش چسبندگی بین ذرات سنگدانه بود. به‌منظور بهبود یکنواختی پوشش قیر بر روی مصالح و ارتقای کارپذیری مخلوط، آب با pH خنثی (۷/۰) به آن افزوده شد؛ با این شرط که فاقد هرگونه مواد زیان‌آور، به‌ویژه سولفات‌ها و نمک‌ها باشد.

۳-۳- روش تحقیق

۳-۱- رویه آزمایش‌ها و طرح اختلاط

روش تحقیق این مطالعه در شکل ۱ تشریح شده است. در فرآیند طراحی مخلوط‌های اسلاری سیل، پس از شناسایی مصالح سنگی مناسب و حصول اطمینان از سازگاری آن‌ها با قیر امولسیونی مطابق با استاندارد ASTM D3910، آزمایش‌هایی نظیر



شکل ۱. فرآیند روند تحقیق مطالعه حال حاضر

جدول ۴. درجه‌بندی مخلوط‌های حاوی درصد‌های مختلف پودر فروفسفر

نوع مخلوط	فیلر پودر فروفسفر جایگزین فیلر مخلوط شاهد، %
FP0	۰
FP15	۱۵
FP30	۳۰
FP45	۴۵
FP60	۶۰

جدول ۵. حدود قابل قبول آزمون‌های اسلاری سیل

شماره استاندارد	حدود قابل قبول	آزمون‌ها
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 مترمربع	تعیین حداکثر قیر به‌وسیله چرخ بارگذاری شده و چسبندگی ماسه
TB 100	حداکثر ۵۳۸ گرم بر مترمربع	افت سایش در شرایط مرطوب ۱ ساعت
TB 147	حداکثر ۱۰ درصد حداکثر ۵ درصد	تغییر مکان عمودی (چرخ بارگذاری شده) تغییر مکان افقی (چرخ بارگذاری شده)

۳-۲- آزمایش‌ها

۳-۲-۱- آزمایش‌های میکروساختاری

به‌منظور تصویربرداری از سطح مصالح در مقیاس میکرو، بررسی بافت سطحی مصالح، آزمون FESEM انجام می‌شود (Jeffry et al., 2022). آزمون سطح ویژه (BET) بر اساس استاندارد BS EN 4359-1 برای تعیین کمی میزان جذب فیلرها مورد استفاده قرار گرفته و نتایج این آزمایش بر حسب متر مکعب بر گرم گزارش می‌شود. سطح ویژه بیشتر، نشان‌دهنده جذب بالاتر پودر است. افزایش سطح ویژه منجر به سطح تماس بیشتر بین فیلر و قیر می‌شود. در این راستا، سطح تماس نقش حیاتی در تسهیل واکنش‌های سطحی بین فیلر و قیر و همچنین تقویت چسبندگی آن‌ها ایفا می‌کند (Ziari et al.). آزمون‌های XRF و XRD از تکنیک‌های تحلیلی پرکاربرد برای مشخصه‌یابی مواد پودری هستند. XRF روشی برای آنالیز عنصری است که قادر به شناسایی عناصر از بریلیم (Be) تا اورانیوم (U) در گستره وسیعی از غلظت‌ها، از مقادیر اصلی تا مقادیر ناچیز (trace)، است.

این روش با اندازه‌گیری پرتوهای ایکس فلورسانس گسیل شده از عناصر نمونه در هنگام برانگیختگی توسط یک منبع پرتو ایکس عمل می‌کند و از این‌رو برای تحلیل ترکیب شیمیایی پودرها ایده‌آل است. در مقابل، آزمون XRD با ارائه اطلاعاتی در مورد ساختار بلوری مواد از طریق تحلیل الگوهای پراش پرتو ایکس، تکمیل‌کننده XRF محسوب می‌شود. این تکنیک اطلاعات دقیقی در خصوص ترکیب فازی و آرایش ساختاری مواد ارائه می‌دهد (Beckhoff et al., 2007).

۳-۲-۲- آزمایش‌های عملکردی

نخستین مرحله در فرآیند طرح اختلاط، انجام آزمون زمان اختلاط بر اساس دستورالعمل ISSA TB113 است که شامل اختلاط امولسیون قیر پلیمری کاتیونیک، آب، فیلرها و مصالح سنگی است (ISSA, 2017e). این آزمون، مدت‌زمان مناسب برای اختلاط مخلوط‌های اسلاری سیل را به‌منظور جلوگیری از شکست زودرس امولسیون قیر مشخص می‌کند. زمان اختلاط به مدت‌زمانی اطلاق می‌شود که طی آن، مخلوط در اثر فرآیند اختلاط دچار شکست می‌شود (ISSA, 2017e). آزمون چسبندگی مرطوب مطابق با دستورالعمل ISSA TB139 به منظور ارزیابی دوره عمل‌آوری مورد نیاز و چسبندگی اولیه مخلوط‌های اسلاری سیل انجام شد (ISSA, 2017d).

این آزمایش شامل اعمال گشتاور به نمونه با استفاده از یک استوانه تحت فشار ۱۹۳ کیلوپاسکال است. با تحلیل نتایج به دست آمده پس از ۳۰ و ۶۰ دقیقه عمل‌آوری در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، نمونه مناسب جهت بازگشایی به روی ترافیک در زمان مطلوب انتخاب شد. فرآیند شکست امولسیون قیر در مدت‌زمان نیم ساعت (۳۰ دقیقه) ارزیابی شد، درحالی‌که سنجش زمان بازگشایی به روی ترافیک به مدت ۶۰ دقیقه به طول انجامید (ISSA, 2017d).

تجهیزات مورد استفاده برای ارزیابی چسبندگی و همچنین نمونه‌های مربوطه در شکل ۲ (الف) نشان داده شده است. آزمون سایش در مرطوب مطابق با دستورالعمل ISSA TB100 به‌منظور تعیین حداقل درصد قیر امولسیونی لازم برای جلوگیری از خرابی ناشی از جداشدگی سنگدانه‌ها انجام

تحت شرایط ترافیک شبیه‌سازی شده ارزیابی می‌کند (ISSA, 2017b). نمونه به مدت ۱۰۰۰ چرخه با استفاده از یک چرخ بارگذاری به وزن ۵۶۷ کیلوگرم متراکم شد. ضخامت و عرض نمونه در نقطه میانی طول آن و در امتداد مسیر چرخ، قبل و بعد از تراکم اندازه‌گیری گردید. شایان ذکر است که جابجایی عمودی نباید از ۱۰ درصد تجاوز کند، درحالی‌که جابجایی جانبی باید در محدوده ۵ درصد باقی بماند (ISSA, 2017b). معادلات (۳) و (۴) برای محاسبه جابجایی‌های مخلوط به کار می‌روند (ISSA, 2017b).

$$VD = \frac{(VD_{ba})}{VD_a} \times 100 \quad (3)$$

$$LD = \frac{(LD_a - LD_b)}{LD_b} \times 100 \quad (4)$$

که در آن VD درصد تغییر شکل عمودی، VD_{ba} عمق جابه‌جایی عمودی (میلی‌متر)، VD_a ضخامت نمونه قبل از ۱۰۰۰ چرخه بارگذاری (میلی‌متر)، LD_b عرض نمونه قبل از بارگذاری (میلی‌متر) و LD_a عرض نمونه پس از ۱۰۰۰ چرخه بارگذاری (میلی‌متر) است. تصویری از مخلوط‌ها و دستگاه چرخ بارگذاری شده در شکل ۲ (ج) نشان داده شده است.

۳-۲-۳- آزمایش تعیین تراوش آلودگی به روش

TCLP

به‌منظور ارزیابی پتانسیل آبشویی فلزات سنگین از مخلوط‌های آسفالتی تحت شرایط محیطی شبیه‌سازی شده، از آزمون تراوش آلودگی عمیق (TCLP) مطابق با روش ارائه شده توسط آژانس حفاظت از محیط‌زیست ایالات‌متحده (USEPA) استفاده شد (EPA, 1992). این روش شامل خرد کردن ۱۰ گرم از نمونه‌ها به‌گونه‌ای بود که از الک ۹/۵ میلی‌متری عبور کنند.

سپس، مواد خرد شده با ۲۰۰ میلی‌لیتر سیال استخراج (اسید استیک با pH معادل 2.88 ± 0.05 و آب دیونیزه) که معادل نسبت مایع به جامد ۲۰ به ۱ (وزنی/وزنی) است، ترکیب گردید. این مخلوط در یک استخراج‌کننده دوار با سرعت ۳۰ دور در دقیقه و دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۸ ساعت هم زده شد. پس از هم

شد (ISSA, 2017c). در این آزمون، نمونه‌ها به مدت حداقل ۱۵ ساعت در آن با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری و سپس وزن آن‌ها ارزیابی گردید. متعاقباً، نمونه‌ها به مدت یک ساعت در آب با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد غوطه‌ور شدند. سپس، نمونه‌ها به مدت ۵ دقیقه با استفاده از یک شلنگ لاستیکی لوله‌ای به‌صورت مکانیکی در زیر آب تحت سایش قرار گرفتند. در نهایت، نمونه‌های ساییده شده در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک و مجدداً توزین شدند تا افت سنگدانه‌ای تعیین گردد (ISSA, 2017c). سایش و افت وزنی مخلوط با استفاده از معادله (۱) محاسبه می‌شود.

$$WTAT = \frac{(m_a - m_b)}{A} \quad (1)$$

که در آن WTAT شاخص سایش (گرم بر متر مکعب)، m_a وزن نمونه قبل از آزمون (g)، m_b وزن نمونه پس از آزمون (g) و A سطح سایش (متر مکعب) است. تصویری از نمونه‌ها و دستگاه آزمایش سایش در شرایط مرطوب در شکل ۲ (ب) نشان داده شده است.

آزمون چسبندگی ماسه با دستگاه بارگذاری چرخ (LWT-sand adhesion test) بر اساس دستورالعمل ISSA TB109، میزان بهینه قیر مورد نیاز برای جلوگیری از قیرزدگی در اسلاری‌سیل را تعیین می‌کند (ISSA, 2017a). در این آزمایش، مخلوط توسط یک چرخ بارگذاری به وزن ۵۶,۷ کیلوگرم به مدت ۱۰۰۰ چرخه متراکم شد. سپس، ماسه اتاوا به‌طور یکنواخت بر روی مخلوط، به‌ویژه در محلی که شیارافتادگی ایجاد شده بود، پخش گردید. در ادامه، مخلوط تحت ۱۰۰ چرخه بارگذاری اضافی قرار گرفت. اختلاف جرم ماسه چسبیده پس از ۱۰۰ چرخه و ۱۰۰۰ چرخه به‌منظور تعیین مقدار ماسه چسبیده محاسبه شد از معادله (۲) می‌توان برای محاسبه پتانسیل قیرزدگی یا چسبندگی ماسه مخلوط استفاده نمود (ISSA, 2017a).

$$SA = \frac{(G_a - G_b)}{A} \quad (2)$$

که در آن SA چسبندگی ماسه (گرم بر متر مکعب)، G_a جرم نمونه پس از ۱۰۰۰ چرخه بارگذاری (g)، G_b جرم نمونه پس از ۱۰۰ چرخه بارگذاری (g) و A سطح تماس غلشی (متر مکعب) است. آزمون بارگذاری چرخ بر اساس دستورالعمل ISSA TB147، جابجایی‌های عمودی و جانبی مخلوط را

پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-OES) تحت آنالیز
عصری قرار گرفت (EPA, 1992).

زدن، شیرابه حاصل از کاغذ صافی واتمن عبور داده شد و
با افزودن اسید نیتریک، pH آن به کمتر از ۲ کاهش یافت.
در نهایت، محلول با استفاده از طیف‌سنجی نشر نوری



شکل ۲. آزمایش‌های عملکردی نمونه‌های اسلاری سیل: الف) آزمایش چسبندگی، ب) آزمایش سایش در شرایط مرطوب
و ج) آزمایش چرخ بارگذاری- جابه‌جایی و چرخ بارگذاری-چسبندگی ماسه

۴- نتایج و بحث

۴-۱- نتایج آزمایش‌های میکروساختاری

مورفولوژی و ویژگی‌های سطحی فیلرها با استفاده از
FESEM بررسی شد. شکل ۳ تصاویر FESEM مربوط
به فیلر طبیعی و پودر فروفسفر را نشان می‌دهد. بر اساس
شکل ۴، ذرات فروفسفر دارای اشکالی زاویه‌دار،
ساختارهای خرد شده و سطوح زبر هستند. در مقابل،
ذرات فیلر طبیعی همان‌گونه که در شکل ۳ نشان داده

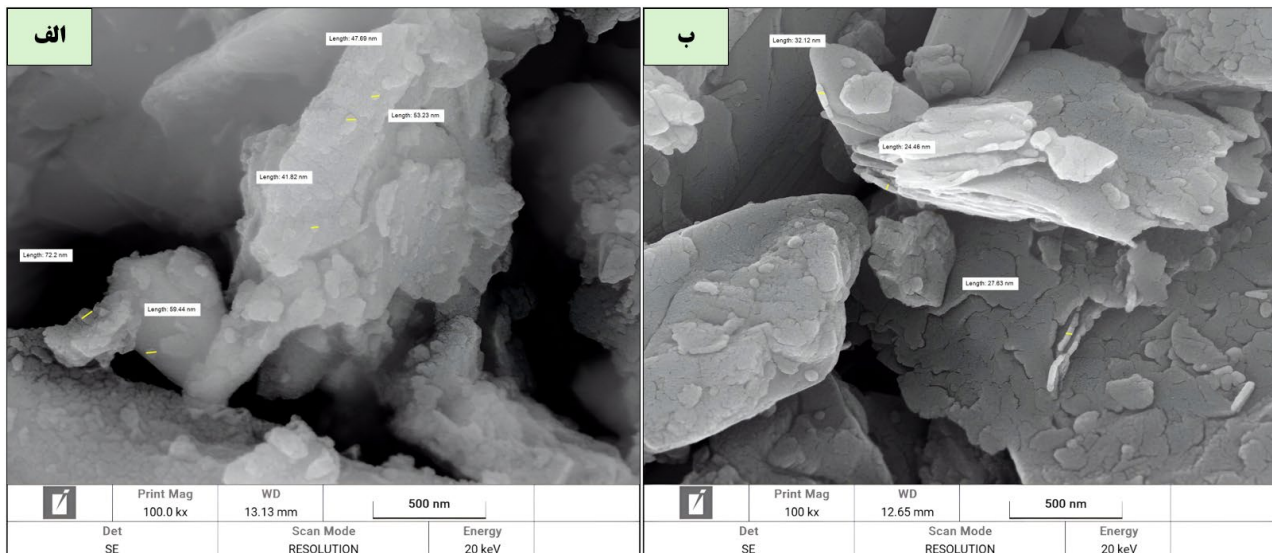
شده‌اند، دارای اشکال فلس‌مانند و نامنظم می‌باشند. علاوه
بر این، مطابق با شکل ۳، پودر فروفسفر زبری بیشتری
نسبت به فیلر طبیعی دارد که می‌تواند موجب بهبود
خاصیت چسبندگی و جذب آن با قیر شود. علاوه بر این،
آزمون BET به منظور تعیین ظرفیت جذب فیلرها انجام شد.
مساحت سطح ویژه پودر فروفسفر و فیلر طبیعی به ترتیب برابر
با ۵/۶ مترمربع بر گرم و ۳/۱ مترمربع بر گرم اندازه‌گیری شد.
هرچه مساحت سطح ویژه بیشتر باشد، ظرفیت جذب پودرها

نتایج XRF شناسایی شده است، کوارتز (SiO_2) است. بنابراین، در این نمونه، کلسیت فاز غالب بوده و کوارتز و دولومیت، دیگر فازهای اصلی هستند. وجود MgO همانطور که در نتایج XRF مشاهده می‌شود، به حضور آن در فاز دولومیت نسبت داده می‌شود. الگوی پراش پرتو X برای نمونه فیلر فروسفری، همراه با نتایج XRF نشان می‌دهد که FeP و Fe_2P اجزای ساختاری اصلی این ماده هستند. این موضوع حضور عناصر فسفر و آهن را در نتایج XRF توجیه می‌کند. بر اساس این یافته‌ها می‌توان نتیجه گرفت که فازهای مختلف فروسفری، اجزای اصلی این ماده را تشکیل می‌دهند. در فیلر PSP، وجود Al_2O_3 که نسبت به قیر تمایل بیشتری از آب دارد، باعث بهبود چسبندگی بین قیر و ذرات سنگدانه می‌شود. این امر منجر به تولید مخلوطی با مقاومت بالاتر در برابر جریان شدگی سنگدانه‌ها می‌گردد (Sherre & Liao, 2022). علاوه بر این، حضور P_2O_5 موجب بهبود مقاومت تغییر شکل آسفالت در شرایط دمایی بالا و افزایش خاصیت بازیابی الاستیک آن می‌شود (Song et al., 2021). همچنین، مطالعات نشان داده‌اند که برخی ترکیبات شیمیایی مانند Fe_2O_3 اثرات مثبتی بر روی چسباننده‌های قیری دارند. این ترکیب باعث افزایش چسبندگی و استحکام ماستیک شده و در نتیجه پوشش‌دهی عالی سنگدانه‌ها را فراهم می‌آورد. نهایتاً، وجود این ترکیب در فیلر و مخلوط، مقاومت در برابر بارگذاری ترافیکی را افزایش داده و حساسیت به رطوبت را کاهش می‌دهد (Choi & Lee, 2012).

بالاتر خواهد بود. بر این اساس، پودر فروفسفر نسبت به فیلر طبیعی جذب بالاتری را نشان می‌دهد. در این زمینه، سطح تماس یک عامل کلیدی در تأثیرگذاری بر برهم‌کنش سطحی بین قیر و فیلر است. این برهم‌کنش به‌طور قابل‌توجهی بر چسبندگی اثر می‌گذارد. با افزایش مساحت سطح ویژه، سطح تماس بین فیلر و آسفالت نیز افزایش می‌یابد که می‌تواند به بهبود برهم‌کنش سطحی بین قیر و فیلر کمک کند (Shishehboran et al., 2021).

با این حال، باید توجه داشت که چسبندگی پدیده‌ای چندوجهی است که نه تنها تحت تأثیر عوامل فیزیکی مانند سطح تماس، بلکه تحت تأثیر برهم‌کنش‌های شیمیایی بین سطحی نیز قرار دارد. به عبارت دیگر بهبود حاصل در چسبندگی، می‌تواند نتیجه اثر همزمان دو مکانیزم فیزیکی و شیمیایی است؛ از یک سو، ویژگی‌های فیزیکی ناشی از افزایش سطح ویژه و زبری ایجاد شده توسط ساختار زاویه‌دار ذرات، موجب تقویت تماس مکانیکی و افزایش ظرفیت جذب قیر می‌شود و از سوی دیگر، حضور ترکیبات فعالی مانند Fe_2O_3 امکان ایجاد پیوندهای شیمیایی با قیر امولسیون کاتیونی را فراهم کرده و در نهایت، موجب افزایش استحکام لایه ماستیک می‌گردد.

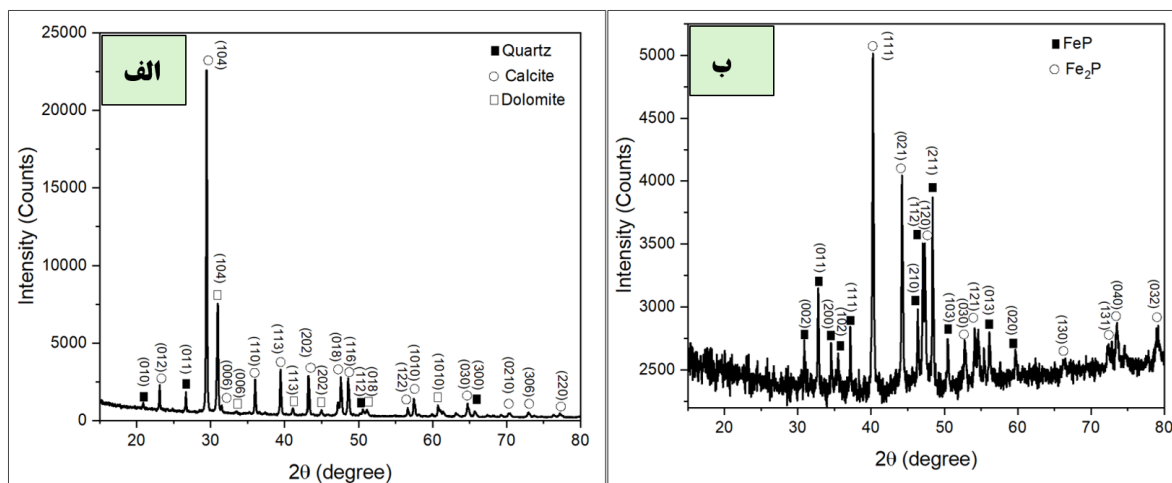
جدول ۶ و شکل ۴ به ترتیب نتایج آزمون‌های XRF و XRD مربوط به فیلرهای طبیعی و فروفسفر را ارائه می‌دهند. بر اساس نتایج XRD برای نمونه فیلر طبیعی، ترکیبات حاوی کلسیم، اجزای اصلی این ماده را تشکیل می‌دهند. این موضوع از الگوهای XRD که پیک‌های بسیار قوی‌تری برای کربنات کلسیم (CaCO_3) و دولومیت ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) در مقایسه با دیگر فازها نشان می‌دهند، کاملاً مشهود است. فاز سوم که در



شکل ۳. آزمایش FESEM: الف) پودر فروفسفر و ب) فیلر طبیعی سنگدانه

جدول ۶. ترکیب شیمیایی سنگدانه و پودر فروفسفر

نوع مواد	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃	MnO	L.O.I
مصالح طبیعی	۰/۰۲	۱/۳	۲/۵	۴۸/۹	۱/۹	۱۳/۹	۰/۰۳	۰/۲	۰/۴	-	۳۰/۲
پودر فروفسفر	۳۳/۲	۴۷/۹	۰/۸	۰/۶	۱۳/۱	۲/۱	۰/۰۴	۰/۹	۰/۱	۰/۸	۰/۱



شکل ۴. نتایج XRD مواد: الف) فیلر طبیعی و ب) پودر فروفسفر

جدول ۷. نتایج آزمون زمان اختلاط نمونه‌های اسلاری سیل

نوع مخلوط	FP60	FP45	FP30	FP15	FP0										
درصد قیر باقی مانده	۹	۸/۵	۸	۹	۸/۵	۸	۹	۸/۵	۸	۹	۸/۵	۸			
درصد آب	۷	۷	۷/۵	۷	۷/۵	۸	۷/۵	۸	۸	۸/۵	۸/۵	۸	۹	۹	
زمان اختلاط بدست آمده	۱۸۳	۱۸۲	۱۸۴	۱۸۴	۱۸۴	۱۸۵	۱۸۳	۱۸۴	۱۸۳	۱۸۲	۱۸۲	۱۸۱	۱۸۵	۱۸۲	۱۸۴

۴-۲- نتایج آزمایش‌های عملکردی

۴-۲-۱- آزمایش زمان اختلاط

در جدول ۷، مقادیر اولیه قیر امولسیون در سه غلظت مختلف و میزان آب افزوده شده به مخلوط‌ها ارائه شده است. زمان اختلاط، بر اساس دستورالعمل ISSA TB113، برای هر مخلوط حاوی درصد‌های متفاوت قیر امولسیونی و پودر فروفسفر، حداقل به مدت ۱۸۰ ثانیه ارزیابی شد. نتایج آزمایش نشان داد که افزایش میزان پودر فروفسفر، به دلیل توانایی کمتر آن در جذب آب، باعث کاهش مقدار آب مورد نیاز برای دستیابی به زمان اختلاط تعیین شده در دستورالعمل ISSA می‌شود. به‌طور مشخص، با افزایش محتوای پودر فروفسفر از ۰ تا ۶۰ درصد (به جای فیلر طبیعی در نمونه‌ها)، میزان مصرف آب از ۹ درصد به ۷ درصد کاهش یافت. این کاهش را می‌توان به ویژگی‌های مورفولوژیکی و ساختاری فیلر نسبت داد که بر خواص کلی مخلوط تأثیر می‌گذارند. فیلر طبیعی به دلیل دارا بودن تخلخل بالا و ساختار متخلخل، سبب کاهش کارپذیری و افزایش مصرف آب در نمونه‌های مختلف آسفالتی می‌شود.

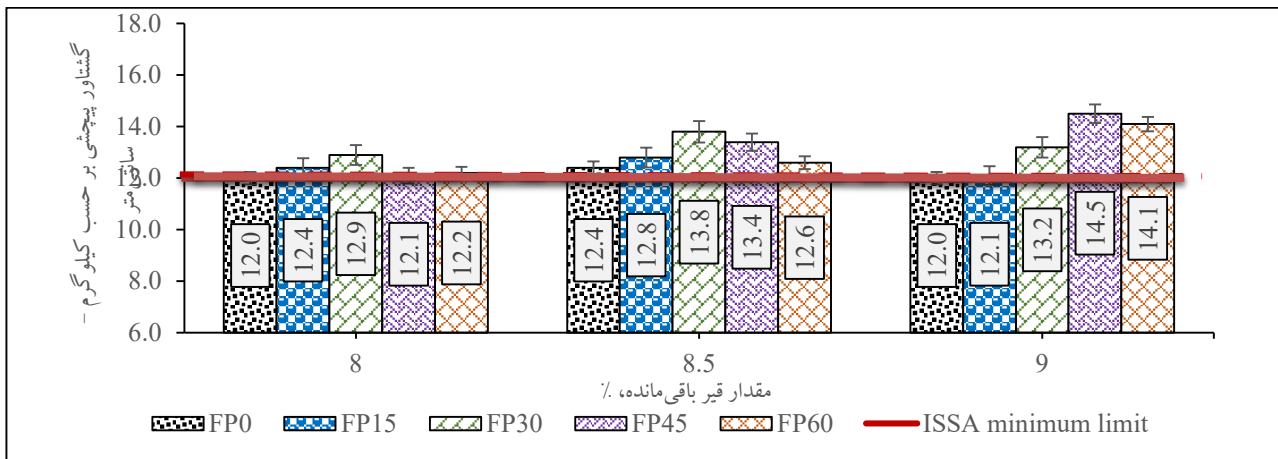
۴-۲-۲- آزمایش چسبندگی مرطوب

شکل‌های ۵ و ۶ نتایج آزمون چسبندگی مرطوب را برای نمونه‌های اسلاری سیل با سه سطح متفاوت قیر امولسیونی باقیمانده، در بازه‌های زمانی ۳۰ و ۶۰ دقیقه، نشان می‌دهند. بر اساس یافته‌ها، تمامی نمونه‌ها در مدت‌های یادشده، معیارهای لازم برای دستیابی به چسبندگی کافی و قابلیت بازگشایی به ترافیک را برآورده کردند. در میان مخلوط‌ها، نمونه FP45 با ۹ درصد قیر امولسیونی باقیمانده، بالاترین گشتاور (نشانگر میزان چسبندگی) را نسبت به سایر نمونه‌ها به ثبت رساند. به‌عنوان نمونه، در قیر باقیمانده ۹ درصد، مخلوط‌های FP15، FP30، FP45 و FP60 به ترتیب افزایش چسبندگی معادل ۰٫۸، ۱٫۰، ۲۰/۸ و ۱۷/۵

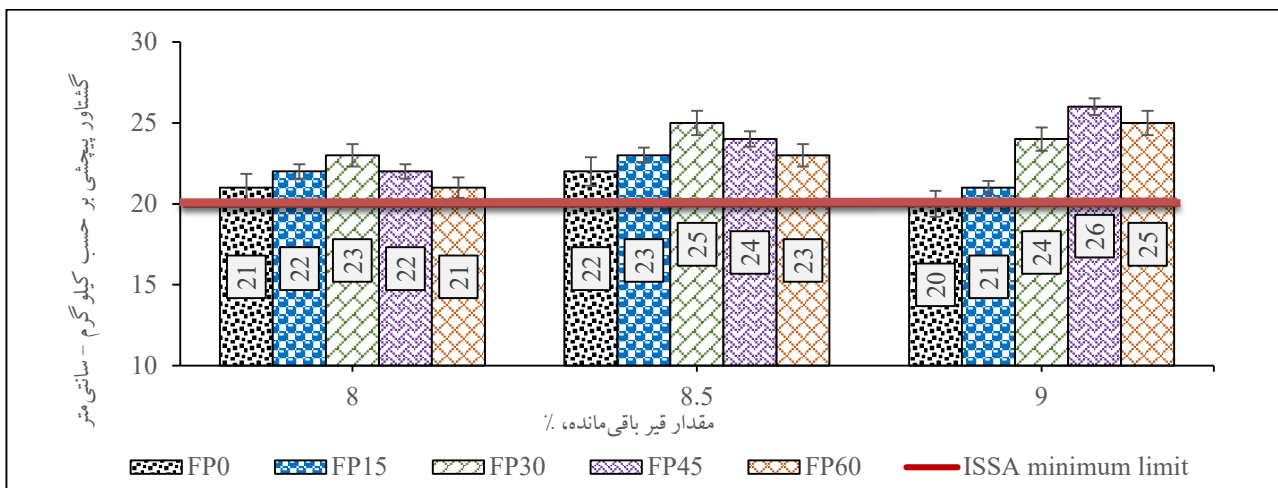
درصد در ۳۰ دقیقه و به ترتیب ۵، ۲۰، ۳۰ و ۲۵ درصد در مدت ۶۰ دقیقه نسبت به FP0 نشان دادند. مطابق نتایج، در نمونه‌های FP0، FP15 و FP30، افزایش درصد قیر باقیمانده از ۸ به ۸/۵ درصد موجب بهبود چسبندگی شد، اما افزایش بیشتر آن به ۹ درصد باعث کاهش چسبندگی گردید. این رفتار را می‌توان به پدیده اشباع سطح ناشی از پوشش بیش‌ازحد با قیر نسبت داد که در حضور فیلر طبیعی با ساختار متخلخل، قفل‌شدگی مکانیکی را کاهش داده و منجر به افت چسبندگی می‌شود. این امر نشان می‌دهد که در مخلوط کنترل، افزایش درصد قیر تا یک آستانه مشخص موجب بهبود چسبندگی می‌شود، اما افزایش بیش‌ازحد قیر امولسیونی و زمان عمل‌آوری منجر به افت این خاصیت خواهد شد. برعکس، در نمونه‌های FP45 و FP60، با افزایش قیر باقیمانده از ۸ به ۹ درصد، چسبندگی به شکل پیوسته افزایش یافت.

در این نمونه‌ها، درصد بالای پودر فروفسفر با ترکیباتی مانند Al_2O_3 و Fe_2O_3 و سطح زبر و زاویه دار خود، حتی در غلظت‌های بالاتر قیر، پیوندهای مکانیکی و شیمیایی قوی با قیر امولسیونی ایجاد کرده و مانع افت چسبندگی می‌شود.

به‌عنوان نمونه، در ترکیب FP45، چسبندگی در مدت ۳۰ دقیقه از ۱۲٫۱ کیلوگرم-سانتی‌متر در ۸ درصد قیر به ۱۳٫۴ کیلوگرم-سانتی‌متر در ۸/۵ درصد قیر و نهایتاً به ۱۴/۵ کیلوگرم-سانتی‌متر در ۹ درصد قیر افزایش یافت. این موضوع بیانگر اثر مثبت افزایش محتوای قیر بر چسبندگی در نمونه‌های FP45 و FP60 است. بر اساس نتایج آنالیز XRF، بخش قابل توجهی از ترکیب شیمیایی پودر فروفسفر را اکسید آهن تشکیل می‌دهد. در نتیجه، هنگام ترکیب پودر فروفسفر با قیر امولسیونی کاتیونی، پیوند قوی بین آن‌ها ایجاد شده و این امر موجب بهبود چسبندگی در مخلوط‌های آسفالتی می‌شود. اثر ایجاد پیوند قوی بین قیر و فیلر نه تنها از نظر شیمیایی به دلیل حضور Al_2O_3 و Fe_2O_3 تقویت می‌شود، بلکه از نظر فیزیکی نیز بافت زبر و سطح ویژه بالاتر ذرات باعث بهبود قفل‌شدگی مکانیکی قیر در سطح فیلر می‌گردد.



شکل ۵. نتایج آزمایش چسبندگی مرطوب در ۳۰ دقیقه



شکل ۶. نتایج آزمایش چسبندگی مرطوب در ۶۰ دقیقه

۴-۲-۳- آزمون سایش در شرایط مرطوب

نتایج آزمون حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها در شکل ۷ ارائه شده است. بر اساس معیارهای مندرج در دستورالعمل ISSA TB100، تمامی مخلوط‌ها در محدوده قابل قبول دستورالعمل قرار دارند. بر مبنای نتایج به دست آمده، دو عامل شامل افزایش مقدار قیر باقیمانده و افزودن پودر فروفسفر، منجر به کاهش افت وزنی و بهبود مقاومت در برابر سایش شده‌اند. به طور مشخص، در قیر باقیمانده ۹ درصد، افت وزنی نمونه‌های FP15، FP30، FP45 و FP60 به ترتیب ۹، ۲۳، ۳۶ و ۲۹ درصد نسبت به FP0 بهبود یافت. در نتیجه، نمونه FP45 با دارا بودن ۴/۵ درصد پودر فروفسفر بر حسب وزن کل سنگدانه، کمترین افت وزنی و عملکرد بهینه را در ۹ درصد قیر باقیمانده نشان داد و پس از آن به ترتیب نمونه‌های FP60 و FP30 قرار گرفتند. از منظر محتوای قیر، افزایش درصد قیر

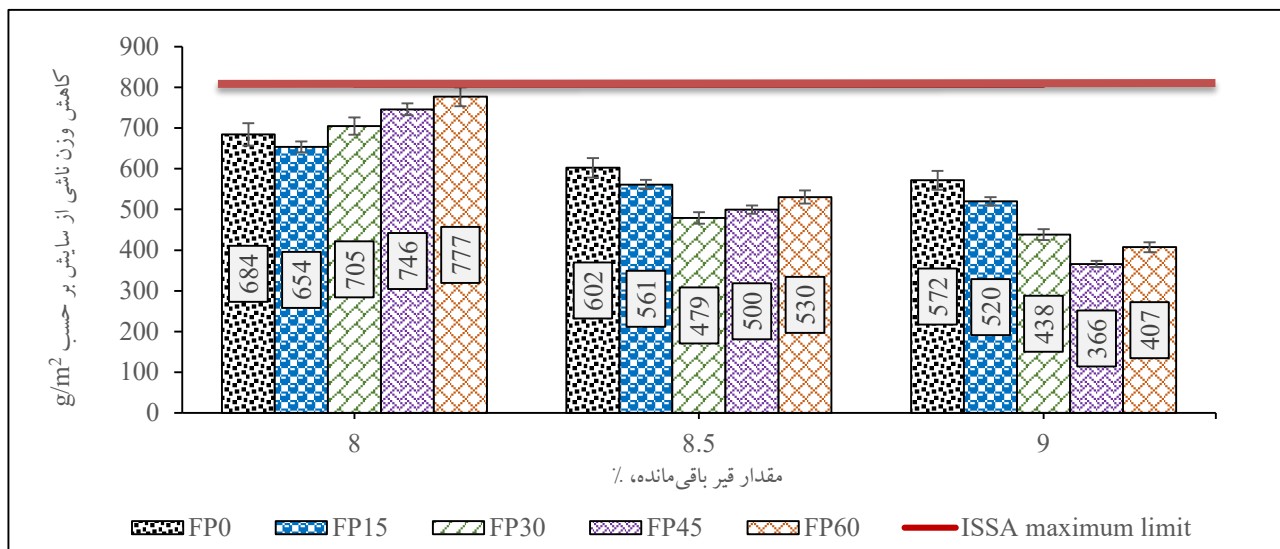
باقیمانده از ۸ به ۹ درصد باعث کاهش قابل توجه افت وزنی در تمامی نمونه‌ها شد. نرخ کاهش افت وزنی در مخلوط‌های FP30، FP45 و FP60 بیشتر از FP0 و FP15 بود. این امر نشان می‌دهد که افزایش قیر باقیمانده، نرخ سایش را در مخلوط‌های حاوی ۴/۵ و ۶ درصد پودر فروفسفر به طور چشمگیری کاهش می‌دهد. برای نمونه‌های FP30، FP45 و FP60 در قیر باقیمانده ۸ درصد، افت سایشی در بازه ۷۰۰ تا ۸۰۰ گرم بر مترمربع قرار داشت که با افزایش قیر به ۹ درصد به ۳۵۰ تا ۴۵۰ گرم بر مترمربع کاهش یافت. با این حال، در نمونه‌های FP0 و FP15 افت سایشی در قیر باقیمانده ۹ درصد بین ۵۲۰-۵۷۰ گرم بر مترمربع و در قیر ۸ درصد بین ۶۵۰-۶۹۰ گرم بر مترمربع متغیر بود. به طور کلی، بهترین مقاومت سایشی در نمونه‌های FP45 و FP60 در قیر باقیمانده ۹ درصد مشاهده شد که نشان‌دهنده اثر مثبت استفاده از پودر

کنترل (FP0) برجسته تر است، به طوری که چسبندگی ماسه از ۳۰۳ به ۴۹۴ (گرم بر مترمکعب) افزایش یافته و شیب تغییرات آن تندتر از سایر نمونه‌ها است. در نتیجه، بهترین عملکرد در نمونه‌های FP45 و FP60 مشاهده شد که مقادیر چسبندگی ماسه نزدیک به هم و با اختلاف حداقلی داشتند. برای مثال، در قیر باقیمانده ۸ درصد، نمونه‌های FP15، FP30، FP45 و FP60 به ترتیب بهبود ۱۲/۶، ۲۵/۲، ۳۷/۸ و ۵۰/۴ درصد در پتانسیل قیرزدگی نسبت به نمونه کنترل ایجاد کردند. شایان ذکر است که تمامی نمونه‌ها در محدوده مجاز دستورالعمل ISSA (کمتر از ۵۳۸ گرم بر مکعب) قرار دارند. علاوه بر این، افزایش نرخ چسبندگی ماسه همراه با بالا رفتن درصد قیر، در نمونه‌های حاوی پودر فروفسفر روندی نسبتاً خطی دارد، در حالی که این روند در نمونه کنترل غیرخطی است. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که استفاده از پودر فروفسفر به طور قابل توجهی پتانسیل قیرزدگی مخلوط‌های آسفالت سرد را بهبود می‌بخشد. این بهبود با نتایج تحلیل FESEM هم‌خوانی دارد که بیان می‌کند ساختار متخلخل، سطح ویژه بالا و بافت نامنظم پودر فروفسفر موجب افزایش جذب قیر در این مخلوط‌ها شده و در نتیجه، میزان قیرزدگی را در هر سه سطح قیر امولسیون، به ویژه در درصدهای بالاتر، کاهش می‌دهد.

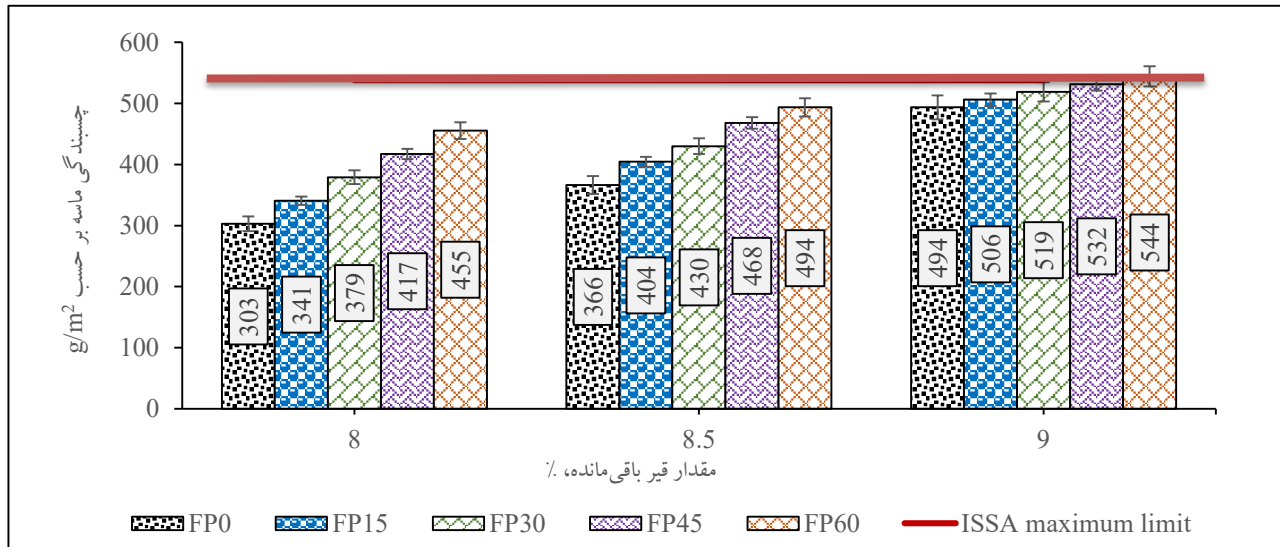
ضایعاتی در بهبود مقاومت رطوبتی مخلوط‌های اسلاری سیل است. در مجموع، نتایج بیانگر آن است که به کارگیری پودر فروفسفر در مخلوط‌های اسلاری سیل منجر به افزایش مقاومت در برابر اثرات مخرب رطوبت و آب می‌شود.

۴-۲-۴- آزمایش چرخ بارگذاری شده- چسبندگی ماسه

نتایج این آزمایش که به ارزیابی نمونه‌های اسلاری سیل حاوی پودر فروفسفر می‌پردازد، در شکل ۸ ارائه شده است. همان‌طور که از نمودارها مشاهده می‌شود، کاهش مقدار قیر باقیمانده یا افزایش درصد پودر فروفسفر منجر به کاهش پتانسیل قیرزدگی در مخلوط‌ها می‌شود. از منظر درصد قیر باقیمانده، نتایج نشان می‌دهد که افزایش مقدار قیر از ۸ به ۹ درصد باعث افزایش چسبندگی ماسه در تمامی مخلوط‌ها می‌شود. به طور مشخص، تمامی نمونه‌ها در ۸ و ۹ درصد قیر باقیمانده به ترتیب کمترین و بیشترین میزان قیرزدگی را نشان دادند. این روند، اثر مستقیم افزایش مقدار قیر بر پتانسیل قیرزدگی را آشکار می‌سازد. از دیدگاه درصد پودر فروفسفر، مشخص است که افزایش میزان پودر فروفسفر تا ۶۰ درصد باعث کاهش چسبندگی ماسه در تمامی سطوح قیر باقیمانده می‌شود. این کاهش در نمونه



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



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

جدول ۸. محدوده مجاز قیر باقی مانده و درصد بهینه آن برای نمونه‌های اسلاری سیل

مقدار بهینه قیر	دامنه قابل قبول قیر امولسیون	حداکثر مقدار قیر بدست آمده از چسبندگی ماسه	حداقل مقدار بدست آمده از آزمایش سایش	نوع مخلوط
۹/۸۰	۱۰/۷۰-۸/۹۰	۱۰/۷۰	۷/۱۰	FP0
۹/۹۶	۱۰/۸۶-۹/۰۶	۱۰/۸۶	۷/۱۵	FP15
۱۰/۲۰	۱۱/۱۰-۹/۳۰	۱۱/۱۰	۷/۶۵	FP30
۱۰/۵۲	۱۱/۴۲-۹/۶۹	۱۱/۴۲	۷/۸۸	FP45
۱۱/۰۷	۱۱/۹۷-۱۰/۱۷	۱۱/۹۷	۷/۹۲	FP60

۴-۲-۶- تعیین میزان تغییر شکل عمودی و جانبی

مخلوط با آزمایش چرخ بارگذاری شده

نتایج ارزیابی عملکرد مخلوط‌ها تحت شرایط بارگذاری در شکل‌های ۹ و ۱۰ ارائه شده است که تأثیر قابل توجه مقدار قیر باقیمانده و میزان پودر فروفسفر را بر جابجایی‌های عمودی و افقی نمونه‌های آسفالت اسلاری سیل نشان می‌دهد. یافته‌ها حاکی از آن است که تمامی نمونه‌های حاوی پودر فروفسفر در محدوده مجاز دستورالعمل‌های ISSA قرار دارند که این امر بیانگر خواص مکانیکی مطلوب پودر فروفسفر در بهبود عملکرد مخلوط‌ها است. این نتایج را می‌توان از دو منظر تحلیل کرد: میزان پودر فروفسفر و درصد قیر باقیمانده. از نظر میزان پودر فروفسفر، نتایج نشان می‌دهد که افزایش درصد پودر فروفسفر تا ۶۰ درصد، هر دو نوع جابجایی عمودی و افقی را در تمامی نمونه‌ها کاهش می‌دهد. این امر نشان می‌دهد که در مخلوط‌هایی که مستعد تغییر شکل هستند، افزایش میزان پودر

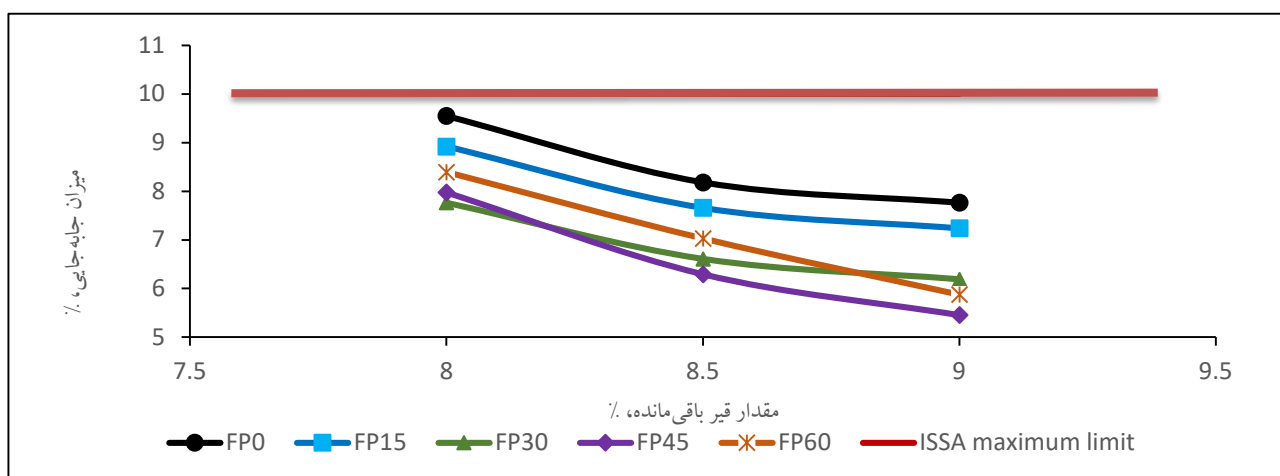
۴-۲-۵- تعیین کردن محدوده مجاز و بهینه قیر

امولسیون

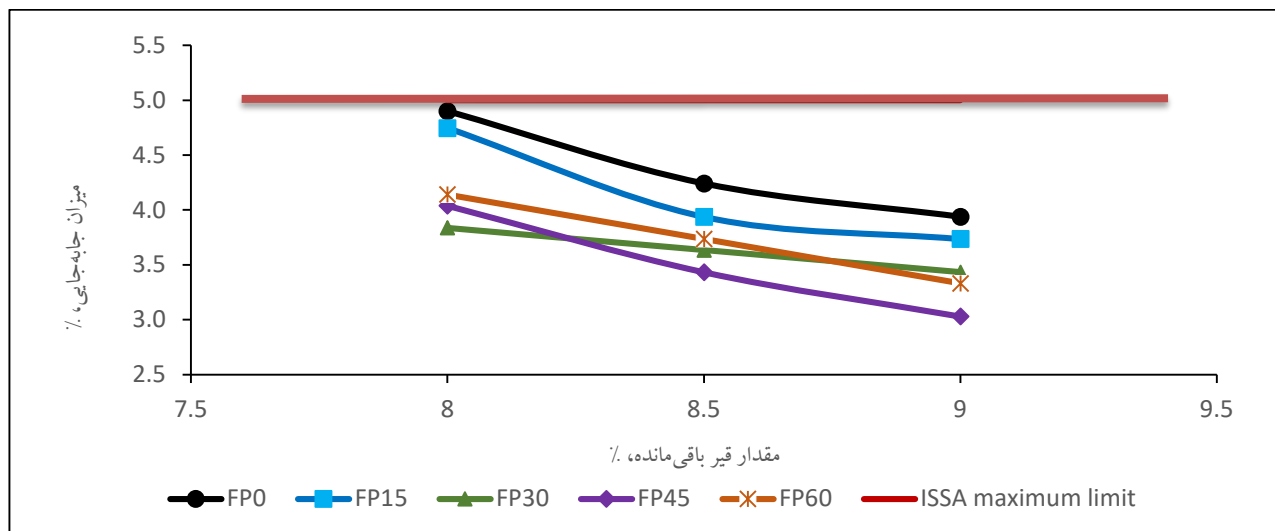
مقدار مجاز قیر و نسبت بهینه آن با تحلیل نتایج آزمون WTAT و آزمون LWT- چسبندگی ماسه و ادغام داده‌های به‌دست‌آمده از هر دو ارزیابی تعیین می‌شود. محدوده مجاز قیر برای تمامی مخلوط‌ها در جدول ۸ ارائه شده است. بر اساس یافته‌ها، مقدار بهینه قیر در مخلوط‌های آسفالتی حاوی پودر فروفسفر نسبت به مخلوط مرجع (FP0) کاهش یافته است. به‌طور خاص، مقدار بهینه قیر در مخلوط‌های FP15، FP30، FP45 و FP60 به ترتیب ۰/۱۶ درصد، ۰/۴۰ درصد، ۰/۷۲ درصد و ۱/۲۷ درصد بیشتر از مقدار بهینه قیر در مخلوط FP0 است. این موضوع را می‌توان به ویژگی‌های فیزیکی پودر فروفسفر نسبت داد؛ به‌گونه‌ای که بافت زبرتر و سطح ویژه بالاتر آن، مقدار قیر مورد نیاز برای پوشش کامل سطوح سنگدانه‌ها را کاهش می‌دهد.

درصدهای بالاتر قیر (۹ درصد)، رفتار روان‌کنندگی قیر باعث تثبیت کاهش تغییر شکل می‌گردد. برعکس، مخلوط‌های با مقدار بیشتر پودر فروفسفر (FP45 و FP60) به دلیل جذب بیشتر قیر توسط ذرات فیلر و ایجاد پیوند قوی‌تر بین سنگدانه‌ها، حتی در درصدهای بالاتر قیر نیز عملکرد بهتری در کاهش تغییر شکل نشان می‌دهند. برای نمونه، در قیر باقیمانده ۹ درصد، مخلوط FP45 کمترین جابجایی عمودی (۵/۵ درصد) و افقی (۳ درصد) را ثبت کرده که به‌طور قابل توجهی کمتر از FP0 است. تغییر شکل مخلوط‌های آسفالتی به‌طور مستقیم تحت تأثیر سفتی قیر قرار دارد. همچنین رابطه مستقیمی بین نوع فیلر و سفتی قیر وجود دارد. فیلر پودر فروفسفر به دلیل خواص فیزیکی ویژه خود، از جمله زاویه‌دار بودن، ظاهر و زبری سطح و ویژگی‌های ساختاری مطلوب، قابلیت قیر را به‌طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد. این ویژگی‌ها منجر به کاهش تغییر شکل در مخلوط‌های حاوی پودر فروفسفر می‌شوند. یافته‌ها نشان می‌دهد که افزودن پودر فروفسفر تا سطح بهینه می‌تواند به‌طور مؤثر مقاومت برشی و پایداری مخلوط‌ها را افزایش دهد. علاوه بر این، کاهش جابجایی‌ها در مخلوط‌های FP45 و FP60 تأثیر مثبت این فیلرها را در کاهش حساسیت به شیارشدگی برجسته می‌کند. در نهایت، نتایج بیانگر آن است که ترکیب بهینه‌ای از پودر فروفسفر و درصد قیر باقیمانده می‌تواند به کاهش جابجایی‌ها و افزایش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر بارگذاری‌های ناشی از ترافیک کمک کند.

فروفسفر می‌تواند احتمال شکست ناشی از تغییر شکل را کاهش دهد. برای مثال، در قیر باقیمانده ۹ درصد، نمونه‌های FP15، FP30، FP45 و FP60 به ترتیب جابجایی عمودی را به میزان ۶/۸ درصد، ۲۰/۳ درصد، ۲۹/۷ درصد و ۲۴/۳ درصد نسبت به نمونه کنترل FP0 کاهش دادند. در میان همه، نمونه FP45 بهترین عملکرد را در کاهش همزمان جابجایی‌های عمودی و افقی تحت بار نشان داد. از منظر درصد قیر باقیمانده، مشخص است که افزایش این میزان از ۸ به ۹ درصد، به‌طور کلی جابجایی‌ها را کاهش داده و عملکرد مخلوط‌ها را بهبود می‌بخشد. این بهبود به چسبندگی بهتر قیر به سنگدانه‌ها و تقویت ساختار مخلوط نسبت داده می‌شود. به‌ویژه در مخلوط‌های حاوی پودر فروفسفر بیشتر (مانند FP45 و FP60) کاهش قابل توجهی در تغییر شکل دیده شد. این مخلوط‌ها در تمامی سطوح قیر باقیمانده، جابجایی‌های عمودی و افقی کمتری نسبت به FP0 داشته‌اند. به‌عنوان نمونه، در مخلوط FP45، افزایش میزان قیر از ۸ به ۹ درصد، جابجایی عمودی را از ۱۷/۶ درصد به ۲۳/۱ درصد و جابجایی افقی را از نشان می‌دهد که حضور پودر فروفسفر، همراه با درصد بهینه قیر، می‌تواند به‌طور مؤثر تغییر شکل ناشی از بارگذاری را محدود کند. تحلیل نمودارها نقش حیاتی درصد قیر باقیمانده در بهبود عملکرد مخلوط‌ها را تأیید می‌کند، هرچند این اثر وابسته به نوع و میزان پودر فروفسفر است. در مخلوط‌های با میزان پودر فروفسفر کمتر (مانند FP0 و FP15)، افزایش درصد قیر در ابتدا منجر به کاهش جابجایی‌ها می‌شود، اما در



شکل ۹. مقدار تغییر شکل عمودی نمونه‌های اسلاری سیل



شکل ۱۰. مقدار تغییر شکل افقی نمونه‌های اسلاری سیل

است. در آزمون چسبندگی در زمان‌های ۳۰ و ۶۰ دقیقه، پودر فروفسفر اثر قوی‌تری نسبت به درصد قیر باقیمانده دارد؛ به طوری که مقادیر η^2 برای پودر فروفسفر به ترتیب برابر ۰/۸۳۶ و ۰/۹۰۷ و برای درصد قیر باقیمانده به ترتیب برابر ۰/۷۵۵ و ۰/۷۸۵ است. همچنین برهم‌کنش بین پودر فروفسفر و قیر نیز معنادار بوده و در رتبه دوم قرار دارد. در آزمون میزان پتانسیل قیرزدگی و WTAT، درصد قیر باقیمانده اثر قوی‌تری نسبت به پودر فروفسفر نشان داد. به‌ویژه در آزمون WTAT، مقادیر η^2 برای قیر و پودر فروفسفر به ترتیب برابر ۰/۹۹۲ و ۰/۹۰۸ بود. برهم‌کنش پودر فروفسفر-قیر نیز در این آزمون‌ها معنادار و قابل توجه بوده است. در آزمون ارزیابی میزان جابه‌جایی، هر دو عامل پودر فروفسفر و درصد قیر باقیمانده اثر قوی و معناداری داشتند. برای جابه‌جایی عمودی، مقادیر η^2 برای پودر فروفسفر و قیر به ترتیب برابر ۰/۸۸۹ و ۰/۸۵۳ است و برای جابه‌جایی جانبی، این مقادیر به ترتیب برابر ۰/۸۲۳ و ۰/۸۰۴ بود. برهم‌کنش این دو عامل در این آزمون نیز معنادار است، هرچند شدت آن کمتر از اثرات مستقل بود. به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که استفاده از پودر فروفسفر موجب بهبود خواص عملکردی مخلوط‌های اسلاری سیل می‌شود. افزایش میزان پودر فروفسفر باعث ارتقاء چسبندگی شده، درحالی‌که درصد قیر باقیمانده نقش مهم‌تری در مقاومت در برابر سایش و کاهش پتانسیل قیرزدگی دارد.

۴-۳- نتایج تحلیل آماری ANOVA

یک آزمون تحلیل واریانس دوطرفه (Two-way ANOVA) در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($\alpha = 0.05$) به منظور بررسی اثر معنادار به‌کارگیری پودر فروفسفر، تغییر سطوح قیر باقیمانده و برهم‌کنش میان این دو عامل بر خواص عملکردی مخلوط‌های آسفالت اسلاری سیل انجام شد. این تحلیل با استفاده از نرم‌افزار SPSS26 صورت گرفت. یافته‌ها که اثر افزودن پودر فروفسفر، درصد قیر باقیمانده و برهم‌کنش بین این متغیرها را بر عملکرد مخلوط‌های آسفالت اسلاری سیل نشان می‌دهند، در جدول ۹ ارائه شده‌اند. عامل نخست شامل سه سطح قیر باقیمانده (۶ در صد، ۷ در صد و ۸ در صد) و عامل دوم شامل پنج نوع مخلوط با مقادیر مختلف PSP است: FP30، FP15، FP0. FP60 و FP45. بر این اساس، فرض صفر (H_0) بر نبود اثر معنادار متغیر مستقل بر متغیر وابسته دلالت دارد. در صورت رد فرض صفر، فرض مقابل (H_1) وجود تأثیر قابل ملاحظه متغیر مستقل بر متغیر وابسته را تأیید می‌کند. این رابطه در معادله (۵) بیان شده است.

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k \quad (5)$$

$$H_1 : \exists i, j \text{ s.t. } u_i \neq u_j \quad (i, j = 1, 2, \dots)$$

تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که تأثیر پودر فروفسفر، در صد قیر باقیمانده و برهم‌کنش این دو عامل بر ویژگی‌های عملکردی نمونه‌های اسلاری سیل به‌طور معناداری ($p < 0.05$) تأیید شده

جدول ۹. نتایج تحلیل آماری آزمایش‌های عملکردی

SV ^a	Type III sum of squares	df ^b	MS ^c	F	P-value	η^2
(a) Cohesion at 30 minutes						
Corrected Model	27.220	14	1.944	29.164	0.000	0.932
Intercept	7411.250	1	7411.250	111168.750	0.000	1.000
bitumen	6.172	2	3.086	46.290	0.000	0.755
blend type	10.220	4	2.555	38.325	0.000	0.836
bitumen × blend type	10.828	8	1.354	20.303	0.000	0.812
Error	2.000	30	0.067			
Total	7440.470	45				
Corrected Total	29.220	44				
(b) Cohesion at 60 minutes						
Corrected Model	127.200	14	9.086	43.681	0.000	0.953
Intercept	23392.800	1	23392.800	112465.385	0.000	1.000
bitumen	22.800	2	11.400	54.808	0.000	0.785
blend type	61.200	4	15.300	73.558	0.000	0.907
bitumen × blend type	43.200	8	5.400	25.962	0.000	0.874
Error	6.240	30	0.208			
Total	23526.240	45				
Corrected Total	133.440	44				
(c) WTAT						
Corrected Model	647853.792	14	46275.271	341.572	0.000	0.994
Intercept	14592469.448	1	14592469.448	107711.520	0.000	1.000
bitumen	505886.309	2	252943.155	1867.051	0.000	0.992
blend type	39975.390	4	9993.847	73.768	0.000	0.908
bitumen × blend type	101992.093	8	12749.012	94.104	0.000	0.962
Error	4064.320	30	135.477			
Total	15244387.560	45				
Corrected Total	651918.112	44				
(d) LWT-Sand adhesion						
Corrected Model	228479.515	14	16319.965	202.014	0.000	0.990
Intercept	8850885.152	1	8850885.152	109559.038	0.000	1.000
bitumen	149473.145	2	74736.573	925.113	0.000	0.984
blend type	68397.444	4	17099.361	211.661	0.000	0.966
bitumen × blend type	10608.926	8	1326.116	16.415	0.000	0.814
Error	2423.593	30	80.786			
Total	9081788.260	45				
Corrected Total	230903.108	44				
(e) LWT-Vertical displacement						
Corrected Model	56.628	14	4.045	30.336	0.000	0.934
Intercept	2468.642	1	2468.642	18514.815	0.000	0.998
bitumen	31.972	2	15.986	119.895	0.000	0.853
blend type	23.232	4	5.808	43.561	0.000	0.889
bitumen × blend type	1.424	8	0.178	1.335	0.265	0.262
Error	4.000	30	0.133			
Total	2529.270	45				
Corrected Total	60.628	44				
(f) LWT-Lateral displacement						

Corrected Model	10.484	14	0.749	19.941	0.000	0.903
Intercept	668.939	1	668.939	17811.982	0.000	0.998
bitumen	5.254	2	2.627	69.947	0.000	0.804
blend type	4.627	4	1.157	30.799	0.000	0.823
bitumen × blend type	0.604	8	0.076	2.010	0.080	0.549
Error	1.127	30	0.038			
Total	680.550	45				
Corrected Total	11.611	44				

^a Source of variation, ^b Degrees of freedom, ^c Mean square

جدول ۱۰. نتایج آزمایش TCLP نمونه‌های اسلاری سیل

فلزات سمی سنگین	غلظت آبشویی نمونه FP0	غلظت آبشویی نمونه FP60	آستانه سمیت (میلی‌گرم بر لیتر)
آرسنیک (As)	۰/۰۲۲	۰/۰۱۸	۵
سرب (Pb)	۰/۰۲۰	۰/۰۲۳	۵
کادمیم (Cd)	شناسایی نشد	شناسایی نشد	۱
کروم (Cr)	۰/۰۲۹	۰/۰۵۳	۵
نیکل (Ni)	۰/۰۳۲	۰/۰۳۷	۲۵
مس (Cu)	۰/۰۱۷	۰/۰۲۴	۲۵
جیوه (Hg)	شناسایی نشد	شناسایی نشد	۰/۲
روی (Zn)	۰/۰۶۴	۰/۰۸۹	۲۵

۴-۴- نتایج آزمایش TCLP

به‌منظور ارزیابی اثرات زیست‌محیطی به‌کارگیری پودر فروفسفر در مخلوط‌های اسلاری سیل، آزمون TCLP انجام شد. جدول ۱۰ غلظت هشت فلز شامل آرسنیک (As)، سرب (Pb)، کادمیم (Cd)، کروم (Cr)، نیکل (Ni)، مس (Cu)، جیوه (Hg) و روی (Zn) را در نمونه‌های FP0 و FP60 که با استفاده از روش TCLP اندازه‌گیری شده‌اند، ارائه می‌دهد. نتایج جدول ۱۰ نشان می‌دهد که میزان آبشویی فلزات در تمامی نمونه‌ها پایین‌تر از حدود مجاز تعیین شده توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده (USEPA) بوده است. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مناسب پودر فروفسفر موجب افزایش چسبندگی آن به قیر شده و در نتیجه عملکرد مخلوط‌های آسفالتی را بهبود می‌دهد. مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که قیر به‌عنوان یک پایدارساز عمل کرده و به‌طور معناداری فرآیند آبشویی این فلزات را کاهش می‌دهد (Modarres & Alinia Bengar, 2019). بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از پودر فروفسفر در مخلوط‌های اسلاری سیل، علاوه بر توانایی بهبود عملکرد

مکانیکی، از نظر زیست‌محیطی پایدار بوده و برای کاربردهای عملی نیز مناسب است. در مجموع، استفاده از پودر فروفسفر به‌عنوان فیلر در مخلوط‌های اسلاری سیل به دلیل ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مطلوب، رویکردی مناسب تلقی می‌شود و با توجه به اهداف فنی و زیست‌محیطی، قابل تنظیم و بهینه‌سازی است. شایان ذکر است که اگرچه آزمون TCLP ایمنی ماده را از نظر آبشویی فلزات سنگین تأیید می‌کند، اما ارزیابی کامل پایداری نیازمند رویکردی جامع‌تر است. تحلیل چرخه عمر (LCA) با بررسی شاخص‌هایی مانند مصرف انرژی و انتشار آلاینده‌ها در فرآیند تولید، قادر است تصویر دقیق‌تری از اثرات زیست‌محیطی این ماده ارائه دهد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر به‌کارگیری پودر فروفسفر به‌عنوان جایگزین فیلر در مخلوط‌های اسلاری سیل ارزیابی شد. پنج ترکیب با مقادیر ۰، ۱/۵، ۳/۰، ۴/۵ و ۷/۰ درصد پودر فروفسفر بر پایه وزن کل سنگدانه‌ها تهیه گردید. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی

درصد کاهش دادند. این بهبود مقاومت سایشی و کاهش قیرزدگی اهمیت ویژه‌ای برای جاده‌ها و به‌خصوص باندهای فرودگاهی دارد که تحت فشار چرخ‌های سنگین هواپیما و شرایط آب‌وهوایی شدید قرار دارند

در آزمون میزان جابه‌جایی همه نمونه‌های حاوی پودر فروفسفر در محدوده مجاز قرار گرفته و با افزایش پودر فروفسفر تا ۶ درصد، جابجایی عمودی و افقی کاهش یافت. به‌عنوان مثال، در قیر ۹ درصد، پودر فروفسفر توانست جابجایی عمودی را تا ۲۹/۷ درصد نسبت به FPO کاهش دهد. این پایداری بالا می‌تواند برای زیر ساخت‌های حمل‌ونقلی با بارگذاری سنگین، به‌ویژه در باندهای فرودگاهی، منجر به افزایش عمر بهره‌برداری و کاهش هزینه‌های تعمیرات شود.

-تحلیل این یافته‌ها نشان داد که بهبود چسبندگی حاصل از پودر فروفسفر ناشی از ترکیب همزمان اثرات فیزیکی (افزایش سطح ویژه، زبری و زاویه‌دار بودن ذرات) و اثرات شیمیایی (برهم‌کنش بین ترکیباتی چون Fe_2O_3 و قیر) است که در کنار هم موجب عملکرد برتر در آزمون‌های چسبندگی و مقاومت به رطوبت می‌شوند.

-نتایج ANOVA نیز تأیید نمود که پودر فروفسفر به‌طور معنادار بر خواص عملکردی مخلوط‌های اسلاری سیل تأثیر می‌گذارد. اثر پودر فروفسفر در آزمون چسبندگی بیشتر از قیر و اثر قیر در WTAT و ارزیابی قیرزدگی برجسته‌تر بود. برهم‌کنش پودر فروفسفر و قیر نیز معنادار بود ولی شدت آن کمتر از اثرات مستقل این دو عامل است. آزمون TCLP نشان داد که غلظت فلزات در مخلوط‌های حاوی پودر فروفسفر کمتر از حدود مجاز آیین‌نامه است و از نظر زیست‌محیطی ایمن هستند. با این وجود، به منظور تکمیل ارزیابی پایداری، انجام تحلیل چرخه عمر در تحقیقات آینده پیشنهاد می‌گردد. این امر باعث می‌شود که چنین مخلوط‌هایی گزینه‌ای مناسب برای پروژه‌های حمل‌ونقل و به‌ویژه توسعه و نگهداری سطوح فرودگاهی باشند.

برای اعتبارسنجی نتایج آزمایشگاهی، پیشنهاد می‌شود تأثیر پودر فروفسفر بر سرعت شکست امولسیون و کارپذیری مخلوط در شرایط میدانی و نیز عملکرد مخلوط‌های اسلاری سیل حاوی این فیلر در دماهای بالا و پایین، شامل مقاومت در برابر تغییر شکل و ترک‌خوردگی حرارتی، ارزیابی شود تا رفتار آنها در شرایط آب‌وهوایی مختلف مشخص گردد. همچنین انجام

م‌صالح و اثرات زیست‌محیطی با آزمایش‌های مربوطه بررسی شد. عملکرد مخلوط‌ها نیز با آزمون‌های WCT، LWT و WTAT (استاندارد ASTM D3910) ارزیابی و با تحلیل واریانس ANOVA اثر درصد پودر فسفر و قیر باقیمانده بر خواص مکانیکی و عملکردی تحلیل شد. خلاصه نتایج این آزمون‌ها در ادامه ارائه شده است.

-نتایج آزمون‌های میکروساختاری نشان داد که پودر فروفسفر در مقایسه با فیلر طبیعی، به علت داشتن شکل ذرات زاویه‌دار، زبری بیشتر در مقیاس ماکرو و سطح ویژه بالاتر (۵/۶ در برابر ۳/۱ مترمربع بر گرم)، چسبندگی بیشتری به قیر ایجاد می‌کند. آزمون‌های XRF و XRD مشخص نمودند که فیلر طبیعی عمدتاً از کلسیت، دولومیت و کوارتز تشکیل شده، درحالی‌که پودر فروفسفر دارای Al_2O_3 و P_2O_5 است که موجب افزایش مقاومت مکانیکی و عملکرد قیر می‌شوند.

-نتایج آزمون زمان اختلاط نشان داد که افزایش درصد پودر فروفسفر به‌جای فیلر طبیعی، مصرف آب را برای رسیدن به زمان اختلاط مطلوب کاهش می‌دهد که ناشی از جذب آب کمتر پودر فروفسفر است. در آزمون چسبندگی، همه نمونه‌ها معیار لازم برای بازگشایی ترافیک در ۳۰ و ۶۰ دقیقه را داشتند و نمونه FP45 با ۹ درصد قیر باقیمانده به ترتیب ۳۰ درصد و ۲۰/۸ درصد نسبت به نمونه کنترل FPO بهبود نشان داد. این ویژگی می‌تواند موجب بازگشایی سریع‌تر مسیرها و باندهای فرودگاهی پس از عملیات نگهداری شود که برای کاهش اختلال در ترافیک هوایی بسیار مهم است.

-در آزمون WTAT، همه مخلوط‌ها در محدوده مجاز دستورالعمل قرار داشتند. افزایش قیر و پودر فروفسفر منجر به کاهش اتلاف وزن و افزایش مقاومت سایشی شد. FP45 با ۴/۵ درصد پودر فروفسفر و ۹ درصد قیر کمترین اتلاف وزن را ثبت کرد و افزایش قیر از ۸ به ۹ درصد کاهش قابل‌توجهی در سایش ایجاد کرد. به‌طور خاص، در نمونه‌های FP30، FP45 و FP60، اتلاف سایش از ۷۰۰-۸۰۰ به ۳۵۰-۴۵۰ گرم بر مترمربع رسید. نتایج آزمایش ارزیابی قیرزدگی نشان داد که همه نمونه‌های پودر فروفسفر در محدوده مجاز بودند. افزایش قیر از ۸ به ۹ درصد تمایل به قیرزدگی را بیشتر کرد، اما افزودن پودر فروفسفر تا ۶ درصد جایگزین فیلر طبیعی این پدیده را به‌طور قابل‌توجهی کاهش داد. بهترین عملکرد مربوط به FP45 و FP60 بود که در قیر ۸ درصد، پتانسیل قیرزدگی را تا ۵۰/۴

-Choi, S. C., & Lee, W. K. (2012). Effect of Fe₂O₃ on the physical property of geopolymer paste. *Advanced Materials Research*, 586, 126-129.

-De Rose, M., Iuele, T., Perri, G., & Vaiana, R. (2023). On the Mix Design Advances in Microsurfacing: A Systematic Surface Performance-Oriented Literature Review. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 1-20.

-Divandari, H., Heidari, M., Zalnezhad, M., & Zalnezhad, A. (2024). 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 Materials and Pavement Design*, 25(5), 967-987.
doi.org/10.1080/14680629.2023.2230299

-Dzwilewski, P.-P., Espinoza, A., Peshkin, D., Trejos, C., Dunn, S. M., & Ashburn, R. (2022). Airport Pavement Surface Treatment: A Literature Review.

-EPA, U. (1992). Method 1311 Toxicity characteristic leaching procedure (TCLP). *Agency EP, editor. Washington DC, USA1992*.

-ISSA. (2017a). Test Method for Measurement of Excess Asphalt in Bituminous Mixtures by Use of a Loaded Wheel Tester and Sand Adhesion. In *Technical Bulletin: International slurry surfacing association*.

-ISSA. (2017b). Test method for measurement of stability and resistance to compaction, vertical and lateral displacement of multilayered fine aggregate cold mixes. In *Technical Bulletin: International Slurry Surfacing Association*.

-ISSA. (2017c). Test Method for Wet Track Abrasion of Slurry Surfacing Systems. In *Technical Bulletin: International Slurry Surfacing Association*.

-ISSA. (2017d). Test method to classify emulsified asphalt/aggregate mixture systems by modified cohesion tester measurement of set and cure characteristics. In *Technical Bulletin: International Slurry Surfacing Association*.

-ISSA. (2017e). Trial mix procedure for slurry seal design. In *Technical Bulletin: International Slurry Surfacing Association*.

-Izadi, A., Mahdi, Z., Pourya, B. M., & Zalnezhad, H. (2022). Mix design and performance evaluation of coloured slurry seal mixture containing natural iron oxide red

ارزیابی چرخه عمر با لحاظ مصرف انرژی، انتشار آلاینده‌ها و مدیریت پسماند، می‌تواند تکمیل‌کننده بررسی‌های زیست‌محیطی و پایداری این مخلوط‌ها باشد.

۶-مراجع

-Algburi, K. T. K., & Hesami, S. (2025). Optimizing slurry seal asphalt with basalt: an analysis of performance and durability. *Innovative Infrastructure Solutions*, 10(1), 23.
doi.org/10.1007/s41062-024-01816-8

-Aliha, M. R. M., Zalnezhad, M., & Jafari Haghghatpour, P. (2023). Fracture toughness of colored slurry seal at low temperatures and different loading Modes: Comparative study with warm and hot mix asphalt materials. *Construction and Building Materials*, 409, 133786.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133786

-Alvarez, A. E., Gomez, K. L., Gomez, D. C., & Reyes-Ortiz, O. J. (2019). Optimising the effect of natural filler on asphalt-aggregate interfaces based on surface free energy measurements. *Road Materials and Pavement Design*, 20(7), 1548-1570.
doi.org/10.1080/14680629.2018.1465451

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

-Beckhoff, B., Kanngießler, B., Langhoff, N., Wedell, R., & Wolff, H. (2007). *Handbook of practical X-ray fluorescence analysis*. Springer Science & Business Media.

-Bhargava, N., Siddagangaiah, A. K., & Rynthiang, T. L. (2020). State of the art review on design and performance of microsurfacing. *Road Materials and Pavement Design*, 21(8), 2091-2125.
doi.org/10.1080/14680629.2019.1607771

-Bhargava, N., Siddagangaiah, A. K., & Rynthiang, T. L. (2021). Sustainable development with microsurfacing: A review. *Journal of Testing and Evaluation*, 49(2), 1284-1306.

-Chesner, W. H., Collins, R. J., & MacKay, M. H. (1998). User guidelines for waste and by-product materials in pavement construction.

- on the performance of thin layer surface treatment: Microsurfacing. *Construction and Building Materials*, 400, 132734. **doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132734**
- Modarres, A., & Alinia Bengar, P. (2019). Investigating the indirect tensile stiffness, toughness and fatigue life of hot mix asphalt containing copper slag powder. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(8), 977-985.
- Mohammadi, M. M., Asadi Azadgoleh, M., Ghodrati, A., Zalnezhad, M., Ayar, P., & Fini, E. (2023). Introducing waste glass powder as a sustainable constituent in microsurfacing. *Construction and Building Materials*, 395, 132271. **doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132271**
- Nejati, A., Mansourian, A., Ravanshadnia, M., & Sadeh, E. (2024). Feasibility of using recycled waste travertine stone powder (RWTSP) as a substitute for mineral filler in microsurfacing surface treatment. *Construction and Building Materials*, 418, 135389. **doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135389**
- Pattanaik, M. L., Choudhary, R., Kumar, B., & Kumar, A. (2021). Mechanical properties of open graded friction course mixtures with different contents of electric arc furnace steel slag as an alternative aggregate from steel industries. *Road Materials and Pavement Design*, 22(2), 268-292. **doi.org/10.1080/14680629.2019.1620120**
- Rezaei Lori, A., Bayat, A., & Azimi, A. (2021). Influence of the replacement of fine copper slag aggregate on physical properties and abrasion resistance of pervious concrete. *Road Materials and Pavement Design*, 22(4), 835-851. **doi.org/10.1080/14680629.2019.1648311**
- Shabani, S., Valizadeh, M., & Khavandi, A. (2024). Evaluation of the sensitivity of the rheology characteristics of bitumen and slurry seal modified with cellulose nanofiber solution. *Construction and Building Materials*, 422, 135318. **doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135318**
- Shaygan, S., Izadi, A., & Zalnezhad, M. (2022). Performance and environmental assessment of microsurfacing mixture using the granulated Blast-Furnace Slag Powder (GBSP) as potential recycled filler. *Construction and Building Materials*, 359, 129502. **doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129502**
- pigments. *Road Materials and Pavement Design*, 23(4), 907-924. **doi.org/10.1080/14680629.2020.1860803**
- Izadi, A., shaygan, s., & Zalnezhad, M. (2023). Investigation of the Effect of Blast-Furnace Slag Powder on Slurry Seal Surface Treatment Performance. *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, 14(3), 2625-2649. **doi.org/10.22119/jte.2021.298212.2550**
- Izadi, A., Zalnezhad, M., Bozorgi Makerani, P., & Zalnezhad, H. (2022). Mix design and performance evaluation of coloured slurry seal mixture containing natural iron oxide red pigments. *Road Materials and Pavement Design*, 23(4), 907-924. **doi.org/10.1080/14680629.2020.1860803**
- Jalalian Khoshnood, A., Kamboozia, N., Ziari, H., & Zalnezhad, M. (2023). Evaluation of performance characteristics of polymer-modified slurry seal (PMSS) by replacing filler with ceramic waste powder. *Road Materials and Pavement Design*, 24(9), 2174-2191. **doi.org/10.1080/14680629.2022.2117639**
- Jeffry, S. N. A., Putra Jaya, R., Abdul Hassan, N., Yaacob, H., Mahmud, M. Z. H., & Al-Saffar, Z. H. (2022). The influence of nano-carbon from coconut shell ash as modifier on the properties of bitumen. *Road Materials and Pavement Design*, 23(4), 770-786. **doi.org/10.1080/14680629.2020.1809502**
- Keymanesh, M. R., Ziari, H., Zalnezhad, H., & Zalnezhad, M. (2021). Mix design and performance evaluation of microsurfacing containing electric arc furnace (EAF) steel slag filler. *Construction and Building Materials*, 269, 121336. **doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121336**
- Langer, W. H., & Arbogast, B. F. (2002). Environmental Impacts Of Mining Natural Aggregate. In A. G. Fabbri, G. Gaál, & R. B. McCammon (Eds.), *Deposit and Geoenvironmental Models for Resource Exploitation and Environmental Security*, Springer Netherlands. 151-169. **doi.org/10.1007/978-94-010-0303-2_8**
- Ma, Y., Shen, W., & Yao, Y. (2019). Preparation of Nanoscale Iron (III) Phosphate by Using Ferro-Phosphorus as Raw Material. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 252(2), 022032. **doi.org/10.1088/1755-1315/252/2/022032**
- Maleki Toulabi, H., Azim Hosseini, S., & Haj Najafi, L. (2023). Investigating the effect of using recycled waste concrete powder (RWCP)

Road Materials and Pavement Design, 1-27.
doi.org/10.1080/14680629.2024.2393377

-Ziari, H., Zalnezhad, M., Ali Ziari, M., & Nasiri Amiri, E. (2022). Substitution of the natural aggregate filler by coal waste powder (CWP) in microsurfacing surface treatment: Mix design and performance evaluation. *Construction and Building Materials*, 354, 129132.

doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129132

-Ziari, H., Zalnezhad, M., Nasiri Amiri, E., & Ziari, M. A. (2024). Functional Analysis of the Use of Coal Waste as a Substitute of Natural Filler in Slurry Seal Surface Treatment. *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, 15(3), 3799-3820.

doi.org/10.22119/jte.2023.365546.2625

-Ziari, H., Zalnezhad, M., & Ziari, M. (2023). Effect of Using Steel Slag Aggregate in Slurry Seal Mixtures Containing Iron Oxide Pigments [Original Research]. *Modares Civil Engineering Journal*, 23(4), 115-130.

doi.org/10.22034/23.4.115

-Ziari, H., Zalnezhad, M., & Ziari, M. A. (2023). Evaluation of Pigmented Slurry Seal Containing Natural Pigments and Bitumen Emulsion: Experimental Assessment of Performance and Colorimetry Characteristics. *Quarterly Journal of Transportation Engineering*.

doi.org/10.22119/jte.2023.401001.2668

-Ziari, H., Zalnezhad, M., & Ziari, M. A. (2024). Performance Evaluation of Colored Slurry Seal Mixture with Steel Slag as a Substituent of Natural Aggregates. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 36(7), 04024192.

doi:10.1061/JMCEE7.MTENG-17172

-Ziari, H., Zalnezhad, M., Zomorodian, Z. S., & Ziari, M. A. (2025). Utilising natural pigments as a filler replacement on the mix design, performance and colorimetric characteristics of the microsurfacing mixture: laboratory evaluation. *Road Materials and Pavement Design*, 26(5), 996-1022.

doi.org/10.1080/14680629.2024.2393377

-Sherre, T. K., & Liao, M.-C. (2022). Characteristics of recycled mineral fillers and their effects on the mechanical properties of hot-mix asphalt when used as limestone filler replacements. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(1), 04021395.

-Shishehboran, M., Ziari, H., Korayem, A. H., & Hajiloo, M. (2021). Environmental and mechanical impacts of waste incinerated acidic sludge ash as filler in hot mix asphalt. *Case Studies in Construction Materials*, 14, e00504.

doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00504

-Song, R., Sha, A., Shi, K., Li, J., Li, X., & Zhang, F. (2021). Polyphosphoric acid and plasticizer modified asphalt: Rheological properties and modification mechanism. *Construction and Building Materials*, 309, 125158.

-Voukkali, I., Papamichael, I., Loizia, P., & Zorpas, A. A. (2024). Urbanization and solid waste production: prospects and challenges. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(12), 17678-17689.

doi.org/10.1007/s11356-023-27670-2

-White, G. (2024). Comparison of bituminous surface options for regional airport runway pavements. In *Bituminous Mixtures and Pavements VIII* (pp. 355-363). CRC Press.

-Zalnezhad, M., & Hesami, E. (2020). Effect of steel slag aggregate and bitumen emulsion types on the performance of microsurfacing mixture. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 7(2), 215-226.

doi.org/10.1016/j.jtte.2018.12.005

-Zarouk, M., Izadi, A., & Zalnezhad, M. (2024). Study of Microsurfacing Mixture Performance Containing Copper Slag Powder as Substitute for Natural Filler: A Laboratory Evaluation. *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, 16(2), 4379-4401.

doi.org/10.22119/jte.2023.397692.2666

-Ziari, H., Mahdi, Z., Sadat, Z. Z., & Ziari, M. A. Utilising natural pigments as a filler replacement on the mix design, performance and colorimetric characteristics of the microsurfacing mixture: laboratory evaluation.

Evaluation of Slurry Seal Performance Enhancement Using Ferrophosphorus Powder as an Alternative to Natural Aggregate Filler: Performance and Environmental Impact Assessment

Hossein Fallahi Abandansari, Ph.D., Student, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Ahmad Goli, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Parham Hayati, Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

E-mail: a.goli@trn.ui.ac.ir

Received: February 2026- Accepted: May 2026

ABSTRACT

Timely application of slurry seal is one of the effective methods for preventive maintenance and preservation of asphalt pavement on roads and airport runways. With growing environmental concerns and the declining availability of natural resources, the utilization of industrial waste materials in road construction projects has become an essential necessity. In this context, the present study evaluates the feasibility of using ferro-phosphorus powder (FPP) as a filler in slurry seal mixtures, comparing its performance with fillers derived from natural aggregates. Initially, the physical and chemical characteristics of the aggregates and FPP were analyzed. Subsequently, five slurry seal mixtures containing 0%, 15%, 30%, 45%, and 60% FPP as a replacement for natural filler were prepared and tested. Wet cohesion test, wet track abrasion test (WTAT), loaded wheel test (LWT)–sand adhesion, and LWT–displacement tests were conducted in accordance with ASTM D3910 to evaluate the technical characteristics of the mixtures. Furthermore, statistical analysis was performed to determine the effect of FPP on slurry seal performance, and the Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) test was applied to assess environmental impacts. The results indicated that the mixture containing 45% FPP exhibited the optimal performance: increasing cohesion by 30%, reducing moisture susceptibility by 36%, reducing bleeding by 50.4%, and decreasing vertical displacement under traffic loading by 29.7% compared to the control sample. The statistical analysis confirmed that FPP had a significant effect on performance indicators, with P-values revealing its strong influence on improving cohesion and resistance to deformation. Moreover, the TCLP test confirmed the environmental safety of all FPP-containing mixtures, as heavy metal leaching levels in all samples were below permissible limits.

Keywords: Slurry Seal, Ferro-Phosphorus Powder, Performance Evaluation, Statistical Analysis, TCLP Test