

## تحلیل عملکردی استفاده از ضایعات زغال سنگ جایگزین فیلر طبیعی در

### آسفالت حفاظتی اسلاری سیل

حسن زیاری (مسئول مکاتبات)، پروفیسور، گروه مهندسی راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

**E-mail: H.Ziari@iust.ac.ir**

مهدی زال‌نژاد، دانشجوی دکتری، گروه مهندسی راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، ایران

الهه نصیری امیری، دانشجوی دکتری، گروه مهندسی راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، ایران

محمد علی زیاری، دانشجوی دکتری، گروه مهندسی راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، ایران

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۹

دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۱

#### چکیده

یکی از شیوه‌های کارآمد در نگهداری پیشگیرانه رویه‌های آسفالتی، استفاده از اسلاری سیل است. این مطالعه باهدف امکان‌سنجی و تأثیر استفاده از پودر ضایعات زغال سنگ جایگزین فیلر طبیعی در طرح اختلاط اسلاری سیل جهت سنجش عملکرد آن انجام شد. در این خصوص، در مرحله اول ویژگی‌های مصالح سنگی و ضایعات زغال سنگ بررسی گردید. در مرحله بعد جهت تحلیل عملکرد مخلوط‌های اسلاری سیل، از ۵ ترکیب متفاوت شامل صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد ضایعات زغال سنگ جایگزین فیلر مخلوط اسلاری سیل بر اساس وزن فیلر استفاده گردید. ارزیابی نمونه‌های آسفالتی با آزمایش‌های چسبندگی مرطوب، سایش در شرایط مرطوب، 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 ضایعات زغال سنگ، سبب ارتقاء عملکرد اسلاری سیل می‌شوند. در آزمایش سایش در شرایط مرطوب، کمترین میزان افت وزنی در نمونه‌ها مرتبط با مخلوط‌های حاوی ۵۰ و ۷۵ درصد پودر زغال سنگ به ترتیب با عدد ۱۷۶ و ۲۰۲ گرم بر متر مربع است. در آزمایش چرخ بارگذاری شده-میزان جابه‌جایی مشخص شد با افزایش میزان درصد پودر زغال سنگ تا ۷۵ درصد وزن کل فیلر، از جابه‌جایی‌ها کاسته شده است. در میان نمونه‌ها، مخلوط حاوی ۵۰ درصد پودر ضایعاتی دارای مناسب‌ترین عملکرد بوده به طوری که نسبت به نمونه شاهد سبب رشد چسبندگی در مدت زمان ۳۰ دقیقه و ۱ ساعت به ترتیب به مقدار ۱۲/۱ و ۱۴/۲۹ درصد و کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط به میزان ۲۷/۶ درصد و کاهش میزان جابه‌جایی عمودی در برابر بارگذاری ترافیکی به میزان ۳۲ درصد گردید.

واژه‌های کلیدی: آزمایش چسبندگی مرطوب، اسلاری سیل، پودر ضایعات زغال سنگ، مقاومت در برابر سایش، مقاومت در برابر تغییر

شکل

## ۱. مقدمه

ذرات، تخلخل، شکل و بافت سطح) و خواص شیمیایی (کانی-شناسی، میزان رس فعال و ترکیبات شیمیایی) فیلر بر عملکرد مخلوط آسفالتی در مقابل خرابی‌ها تأثیر می‌گذارد؛ بنابراین انتخاب بهترین نوع فیلر برای اطمینان از ایجاد عملکرد بهینه مخلوط آسفالتی ضروری است (Arabani, Tahami, & Taghipoor, 2017). فیلر در آسفالت به‌طور کلی به‌عنوان ماده ریزتر از ۰/۰۷۵ میکرومتر (عبوری از الک نمره ۲۰۰) تعریف می‌شود و شامل فیلر طبیعی (بدست آمده از خرد کردن و غربال سازی سنگدانه‌ها)، فیلر تولید شده مانند پودر سرباره خاکستر بادی و پودر زغال‌سنگ است (Alvarez, Gomez, Gomez, & Reyes-Ortiz, 2019; Rezaei Lori, Bayat, & Azimi, 2021).

نگرانی‌های زیست‌محیطی مانند تولید گردوغبار، از بین رفتن مناظر طبیعی و جنگل‌زدایی بواسطه استخراج مصالح طبیعی ایجاد خواهد شد. مصالح طبیعی با مشخصات و کیفیت مناسب، در مناطق متعددی، در دسترس نبوده و حتی معادن سنگدانه‌های طبیعی نیز محدود شده است. این موضوع سبب کمبود مصالح و متعاقباً رشد هزینه طرح‌های راه‌سازی شده است (Pattanaik, Choudhary, Kumar, & Kumar, 2021). از دیگر سو با افزایش جمعیت و تغییر در سبک زندگی، رشد فعالیت‌های صنعتی، شهرنشینی و پروژه‌های عمرانی میزان مواد دور ریز و ضایعاتی افزایش یافته است. به‌علاوه، برای اهداف دفع زیاله، فضای تخلیه موجود کافی نیست (Awed, Tarbay, El-Badawy, & Azam, 2020). صنعت روسازی جاده‌ای یکی از مصرف‌کننده‌های اصلی مصالح سنگی استخراج شده است (López, González, Thenoux, Sandoval, & Marcobal, 2019). یکی از راه‌های کاهش مواد خام و معدنی، استفاده از مواد زائد به‌عنوان بخشی از سنگدانه‌های موجود در آسفالت است. با توجه به تقلیل منابع طبیعی و افزایش قیمت مواد اولیه، بسیاری از پژوهشگران در حال بررسی امکان بازیافت مواد زائد صنعتی به‌عنوان مواد مخلوط آسفالتی هستند (Awed et al., 2020; Georgiou & Loizos, 2021; )

به دلیل ایجاد سطح یکنواخت و هموار، رانندگی راحت، کاهش آلودگی صوتی و افزایش مقاومت، بیش از ۹۰ درصد از کل راه‌ها و بزرگراه‌ها را بتن آسفالتی تشکیل می‌دهد (Zhang, Ma, Ling, & Huang, 2019; Zhou, Gu, Jiang, Ni, & Jiang, 2019). آب‌وهوای طبیعی و بارهای ترافیکی موجب خرابی‌های زیادی از جمله شن‌زدگی، ترک و شیارشدگی در طول عمر سرویس‌دهی روسازی می‌گردد. این خرابی‌ها عملکرد سرویس‌دهی و ایمنی رانندگی را تضعیف نموده و نیاز به نگهداری را محسوس می‌سازد (Lin, Hong, & Xiao, 2018; Rith, Kim, & Lee, 2018). پیشنهاد می‌گردد که از نگهداری پیشگیرانه روسازی به‌جای بازسازی استفاده گردد. این موضوع موجب کاهش خرابی روسازی با هزینه کمتری می‌گردد (Vakharia, Gupta, & Kankar, 2017). یکی از انتخاب‌ها استفاده از آسفالت اسلاری سیل است که هدف آن ارتقای عملکرد روسازی و در نهایت افزایش طول عمر است (Morian, 2011). اسلاری سیل به دلیل زمان عمل‌آوری کوتاه و انعطاف‌پذیری، منجر به ترمیم خرابی‌های با شدت کم، بهبود بافت سطحی، اصلاح شیارشدگی و در نهایت افزایش عمر سرویس‌دهی روسازی می‌گردد (Robati, 2012; Son et al., 2014). اجزای اسلاری سیل شامل مخلوط سنگدانه‌ای با دانه‌بندی مشخص، قیر امولسیون (حدود ۷/۵ تا ۱۳/۵ درصد وزنی)، آب (تا میزانی که مخلوط مناسب یکنواخت ایجاد گردد) و فیلرهای فعال معدنی (معمولاً سیمان) است (Jalalian Khoshnood, Kamboozia, Ziari, & Zalnezhad, 2022). در این میان فیلر، به‌عنوان بخشی از مخلوط آسفالتی، نقش قابل‌توجهی در ویژگی‌های عملکردی مخلوط آسفالتی دارد. تغییرات در نوع و مقدار فیلر بر خواص مخلوط آسفالت اثرگذار است (Choudhary, Kumar, & Gupta, 2021; Keymanesh, Ziari, Zalnezhad, & Zalnezhad, 2021; Rochlani et al., 2020). طبق تحقیقات خواص فیزیکی (وزن مخصوص، اندازه

## تحلیل عملکردی استفاده از ضایعات زغال‌سنگ جایگزین فیلر طبیعی در آسفالت حفاظتی اسلاری سیل

درصد در حالت کرنش ۴۰۰ و ۱۰۷، ۷۲ و ۷،۱ درصد در حالت کرنش ۶۰۰ بهبود بخشند. این مطالعه استفاده از پودر زغال‌سنگ ضایعاتی را به‌عنوان محصولی توصیه کرد که نه تنها می‌تواند با عمر خستگی مخلوط آسفالت مقابله کند، بلکه مشکلات زیست‌محیطی ناشی از رسوبات زباله زغال‌سنگ را نیز برطرف می‌کند (Shafabakhsh, Rahmani, & Sadeghnejad, 2022). مدرس و همکاران (۲۰۱۵) اثرات پودر زغال‌سنگ ضایعاتی را در HMA با فیلر معمولی مقایسه کردند. هدف اصلی تحقیق آن‌ها این بود که دریابند آیا پودر زغال‌سنگ ضایعاتی و خاکستر حاصل از آن به‌عنوان پرکننده در HMA در مقایسه با پرکننده‌های معمولی قابل‌استفاده هستند یا خیر. این تحقیق بر روی کاربرد پرکننده‌های معمولی مختلف مانند پودرهای سنگ‌آهک و زئولیت و همچنین سیمان پرتلند معمولی متمرکز بود. آزمایش‌هایی برای بررسی ویژگی‌های مکانیکی HMA در حضور فیلرهای مختلف انجام شد. از این‌رو، محققان آزمایش‌های مختلفی از جمله پایداری مارشال، استحکام کششی غیرمستقیم، حساسیت به رطوبت، مدول ارتجاعی و آزمون‌های خستگی را انجام دادند. همان‌طور که در آزمایش‌ها روی ویژگی‌های مکانیکی نشان داده شد، کاربرد پودر زغال‌سنگ ضایعاتی و به‌ویژه خاکستر آن، خواص عملکردی HMA را در مقایسه با سنگ‌آهک و زئولیت افزایش داد. علاوه بر این، مشخصات مکانیکی تقریباً یکسانی با سیمان پرتلند معمولی با استفاده از خاکستر زباله زغال‌سنگ بدست آمد (Modarres, Xu, Rahmanzadeh, & Ayar, 2015). مطالعه‌ای توسط Xu و همکاران (۲۰۱۹) اثرات ضایعات زغال‌سنگ به‌عنوان فیلر را بر ویژگی‌های عملکردی ماستیک‌ها و مخلوط‌های آسفالتی بررسی کرد. این مطالعه اثرات ضایعات زغال‌سنگ را بر روی ماستیک‌ها و مخلوط‌های آسفالتی با در نظر گرفتن نسبت‌های مختلف وزنی (۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد) جایگزین فیلر پودر سنگ‌آهک بررسی کرد. بر این اساس، ماستیک‌هایی که حاوی مقادیر مختلف ضایعات زغال‌سنگ بودند، نفوذ کمتر، نقطه نرم

(Simone et al., 2019). بیشتر این پژوهش‌ها بر اساس استفاده از زباله‌های صنعتی است که نه تنها موضوع دفع زباله را حل می‌کند بلکه موجب حفظ مواد غیرقابل تجدید و طبیعی و صرفه‌جویی نیز می‌شود (Awed et al., 2020; Barišić, Netinger Grubeša, & Hackenberger Kutuzović, 2017). استفاده بهینه از مواد زائد به‌عنوان بخشی از مصالح سنگی علاوه بر سودمندی برای محیط‌زیست، می‌تواند بر مشخصات عملکردی مخلوط‌های آسفالتی نیز مفید و مؤثر واقع شود (Choudhary, Kumar, & Gupta, 2020).

در میان انواع مواد بازیافتی، پودر زغال‌سنگ ضایعاتی پسماند تولید شده در طی فرآیندهای استخراج و شستشوی زغال‌سنگ است (Choudhary et al., 2020; Feng, Chen, & Li, 2020). سالانه نزدیک به ۵،۵ میلیارد تن زغال‌سنگ در سراسر جهان تولید می‌شود، اما تقریباً نیمی از زغال‌سنگ استخراج شده به‌صورت مواد زائد دفع می‌شود (Karimaei, Dabbaghi, Sadeghi-Nik, & Dehestani, 2020). پودر زغال‌سنگ ضایعاتی با نرخ بهره‌برداری کم (زیر ۲۰ درصد) استفاده می‌شود (Feng et al., 2020). با این حال، مواد زائد را می‌توان در صنایع ساختمانی، از جمله ساخت روسازی، برای رفع چالش‌های زیست‌محیطی ناشی از دفع بیش از حد زباله مصرف کرد. پودر زغال‌سنگ ضایعاتی غنی از سیلیس و آلومینا با خواص پوزولانی می‌تواند عملکرد مخلوط آسفالت را بهبود بخشد (Modarres & Nosoudy, 2015). از این‌رو، مطالعات متعددی در مورد کاربرد پودر زغال‌سنگ ضایعاتی به‌عنوان یک جایگزین پرکننده در مخلوط‌های آسفالتی انجام شده است. شفاپخش و همکاران (۲۰۲۲) رفتار خستگی مخلوط آسفالت را با در نظر گرفتن آزمایش‌های تیر خمشی چهار نقطه‌ای با روش کرنش ثابت بر روی نمونه‌های شاهد و اصلاح شده حاوی سیمان، ضایعات زغال‌سنگ و آهک به‌عنوان فیلر مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. ارزیابی رفتار خستگی در ۲ حالت کرنش ۴۰۰ و ۶۰۰ انجام شد و نتایج نشان داد که سه فیلر می‌توانند عمر خستگی را بیش از نمونه شاهد تا ۷۵، ۵۵ و ۸/۲

## ۲. مواد و مصالح

### ۲-۱ مصالح سنگی

تعیین مصالح سنگی باکیفیت به دلیل قرارگیری مستقیم در شرایط آب‌وهوایی و در معرض بار ترافیک، یکی از قسمت‌های با اهمیت در طرح اختلاط مخلوط اسلاری سیل است ( Apaza, Guimarães, Vivoni, & Schroder, 2021; Esfahani & Khatayi, 2020). برای رسیدن به مخلوطی با عملکرد مناسب و مقاومت بالا، از مصالح سنگی شکسته، مرغوب و خوب دانه‌بندی شده استفاده می‌شود ( Zulu & Mukendi, 2018). در این تحقیق سنگدانه‌های کوهی (کارخانه چالدران، مازندران) در اندازه ۰-۵ میلی‌متر و پودر ضایعات زغال‌سنگ (کارخانه البرز مرکزی) به‌عنوان جایگزین بخشی از فیلر استفاده گردید. از لحاظ دانه‌بندی، دانه‌بندی نوع II مورد استفاده واقع شده و حدود آن در جدول ۱ مشخص است. استفاده از این نوع دانه‌بندی به دلیل داشتن ریزدانه قابل توجه در مقایسه با نوع III و تولید صدای کمتری، در مکان‌های مسکونی و شهری مناسب است ( Esfahani & Khatayi, 2020; Zulu & Mukendi, 2018). مشخصات مصالح سنگی در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین تصاویر میکرو ساختاری و ترکیب شیمیایی سنگدانه و پودر زغال‌سنگ پس از انجام آزمایش به ترتیب در شکل ۱ و جدول ۳ ارائه شده است. مطابق شکل ۱، شکل ذرات و آنالیز سطح فیلرهای طبیعی و پودر زغال‌سنگ با میکروسکوپ الکترونی روبشی (FESEM) مورد سنجش واقع شد. بر اساس شکل ۱-ب)، ذرات پودر زغال‌سنگ دارای اشکال زاویه‌ای، ساختار خرد شده و سطح زیر می‌باشند. این در حالی است که ذرات فیلر طبیعی (شکل ۱-ا)، دارای شکلی لایه‌ای و نامنظم می‌باشند. این موضوع بیانگر آن است که پودر زغال‌سنگ می‌تواند چسبندگی بهتری را با قیر به همراه داشته باشد. همان‌طور که از نتایج جدول ۳ مشخص است، مصالح مورد استفاده در این پژوهش از نوع کلسیمی بوده (حاوی ۳۷/۷۱ درصد CaO) و پودر ضایعات زغال‌سنگ نیز دارای مقدار

شدن بالاتر و پایداری دمایی بیشتر در چگالی کمتر نشان دادند (Xu et al., 2019). مدرس و رحمان زاده (۲۰۱۴) به بررسی کاربرد پودر ضایعاتی زغال‌سنگ به‌عنوان فیلر در مخلوط آسفالتی گرم (HMA) پرداختند. تحقیقات آزمایشگاهی در درجه اول بر روی پایداری مارشال، استحکام کششی غیرمستقیم و مدول ارتجاعی که در شرایط خشک و اشباع انجام شد، متمرکز بود. نتایج مقایسه با مخلوط مرجع (از جمله پودر سنگ‌آهک) پایداری و مدول انعطاف‌پذیری بالاتری را برای ضایعات زغال‌سنگ و خاکستر آن نشان داد. علاوه بر این، یک مخلوط بهینه با مقاومت قابل توجهی در برابر آب با نسبت مساوی از ضایعات زغال‌سنگ و پودرهای سنگ‌آهک به دست آمد (Modarres & Rahmanzadeh, 2014).

تأثیر مهم پودر زغال‌سنگ ضایعاتی در مخلوط‌های HMA مورد تحقیق و پژوهش واقع شده است اما تحقیقات محدودی در مورد تأثیر آن در مخلوط‌های سرد آسفالتی به‌خصوص اسلاری سیل، انجام شده است. یکی از هدف‌های این پژوهش ساخت و تولید آسفالت حفاظتی است که از نظر مدیریت تعمیر و نگهداری و صرف انرژی گزینه‌ای مقرون‌به‌صرفه در نظر گرفته شده و می‌تواند راه حلی مناسب برای مدیریت پسماند باشد. از این‌رو در این مطالعه به بررسی اثر افزودن درصد‌های متفاوت پودر زغال‌سنگ بر ویژگی‌های این نوع از آسفالت، با ساخت نمونه‌هایی از مخلوط اسلاری سیل، پرداخته شد. در این راستا، ابتدا خواص فیزیکی و شیمیایی پودر زغال‌سنگ و مصالح سنگی مورد تحقیق و سنجش واقع شد. سپس جهت تعیین مشخصات عملکردی مخلوط‌های اسلاری سیل حاوی پودر زغال‌سنگ، ۵ ترکیب متفاوت شامل صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد پودر زغال‌سنگ جایگزین فیلر تهیه شد. مقایسه نمونه‌ها با آزمون‌های چسبندگی، سایش در شرایط مرطوب و چرخ بارگذاری شده مطابق با دستورالعمل ASTM A105 و استاندارد ASTM D3910 انجام شد.

## تحلیل عملکردی استفاده از ضایعات زغال‌سنگ جایگزین فیلر طبیعی در آسفالت حفاظتی اسلاری سیل

مکانیکی شده و  $Al_2O_3$  با میل ترکیبی بیشتر به قیر نسبت به آب، می‌تواند چسبندگی بین ذرات سنگدانه و قیر را بهبود بخشد (Sherre & Liao, 2022).

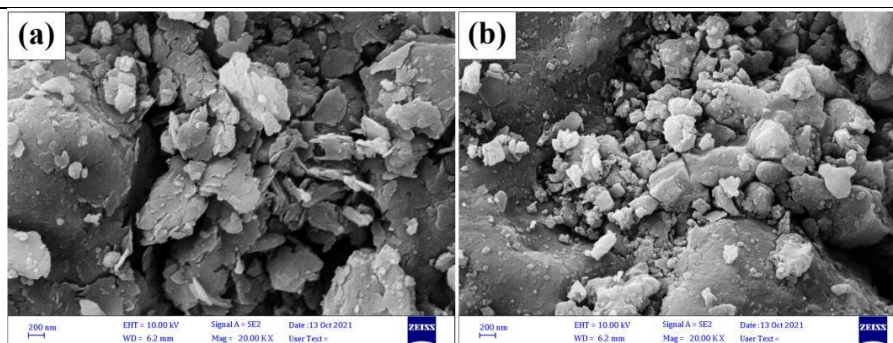
قابل توجهی از  $SiO_2$  و  $Al_2O_3$  به ترتیب به میزان ۳۸/۳۹ و ۱۳/۹۵ درصد نسبت به مصالح معدنی است که بار سطحی منفی سیلیس عاملی برای سازگاری مناسب با قیرهای امولسیون کاتیونی است. علاوه بر این،  $SiO_2$  موجب سختی و استحکام

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 ( $gr/cm^3$ )	ASTM C127	۲/۶۵	۲/۶۷	-
وزن مخصوص ظاهری ( $gr/cm^3$ )	ASTM C128	۲/۷۰	۲/۷۲	-
درصد جذب آب	ASTM C127	۱/۱۵	۱/۴۲	-
ارزش ماسه‌ای خاک‌ها و مصالح ریزدانه	ASTM D2419	٪۷۳	حداقل ٪۴۵	
سلامت مصالح با سولفات سدیم	C88 ASTM	٪۲	حداکثر ٪۱۵	
مقاومت سایشی در ماشین لس‌آنجلس	C131 ASTM	٪۱۳	حداکثر ٪۳۵	



شکل ۱. تصاویر میکروسکوپی: a. پودر مصالح طبیعی و b. پودر ضایعات زغال‌سنگ

جدول ۳. ترکیب شیمیایی سنگدانه و پودر ضایعات زغال‌سنگ

نوع مواد	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	L.O.I
مصالح کوهی	-	۲/۸۱	۵/۱۱	۱۳/۹۵	۰/۴۶	۳۷/۷۱	۰/۵۷	۳/۲	۲/۹۶	۳۲/۶۳
پودر زغال‌سنگ	۰/۲۹	۱/۱۴	۱۳/۱۵	۳۸/۳۹	۱/۸۸	۲/۴۱	۰/۸۴	۳/۴۵	۰/۴۰	۳۷/۴۵

جدول ۴. مشخصات قیر امولسیون کاتیونی

حدود مورد پذیرش	نتیجه	استاندارد آزمون	آزمون‌ها
۱۰۰-۲۰	۲۲	AASHTO T59	کندروانی سی بولت- فیورل در دمای ۲۵°C، ثانیه
حداکثر ۰/۱	۰/۰۱	ASTM D244	الک، %
-	۹۹	AASHTO T59	اندود، %
مثبت	مثبت	AASHTO T59	بار ذرات
حداکثر ۱	۰/۲	ASTM D6930	پایداری انبارش و ذخیره قیر امولسیون، ۲۴ ساعت، %
حداقل ۵۷	۵۸	ASTM D7497	تقطیر قیر امولسیون، جرم وزنی %
<b>آزمون‌ها بر روی باقی‌مانده قیر امولسیون</b>			
۹۰-۴۰	۶۵*	ASTM D5	درجه نفوذ در ۲۵°C، ۱۰۰ گرم، ۵ ثانیه
-	۵۶*	ASTM D36	نقطه نرمی قیر با آزمایش حلقه و گلوله، درجه سانتی‌گراد

\* قیر پایه استفاده شده جهت تولید امولسیون از نوع ۶۰/۷۰ با درجه نفوذ ۶۶ و نقطه نرمی ۵۵ بوده است.

### ۳-۲ سیمان پرتلند و آب

آهک هیدراته، میکرو سیلیس، سیمان پرتلند و خاکستر بادی از فیلرهای معدنی فعال قابل‌استفاده در مخلوط اسلاری سیل 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 اسلاری سیل سریع‌تر انجام خواهد شد (Wang, Shen, Li, & Song, 2019). در این مطالعه، سیمان پرتلند به مقدار ۱ درصد برای ارتقاء ویژگی‌های مخلوط به‌عنوان فیلر فعال معدنی در اسلاری سیل مورد استفاده واقع شد. منظور از آب، آبی است که به هنگام هم زدن به مخلوط اضافه گردیده و موجب بهبود کارایی و پوشش بهتر مصالح می‌شود (Wang et al., 2019). آب مورد استفاده بایستی عاری از مواد مضر مانند

### ۲-۲ قیر امولسیونی

جهت ساخت نمونه‌های اسلاری سیل، قیر امولسیون کاتیونی دیرشکن بر اساس استاندارد ASTM D3910 مورد استفاده قرار گرفت. جهت تولید قیر امولسیون کاتیونی اصلاح شده، ۴۲ درصد محلول سوپ حاوی اسید HCL، آب و امولسیفایر دیر شکن (با نام تجاری سکا، فرانسه) با قیر با رده نفوذ ۶۰/۷۰ به میزان ۵۸ درصد (مطابق با ISSA A105) در دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد، در دستگاه امولسیون ساز آزمایشگاهی با سرعت ۲۸۴۰ دور بر دقیقه مخلوط شدند. روش ساخت قیر امولسیون کاتیونی مطابق با مطالعات صورت گرفته دیگر پژوهشگران و استاندارد ASTM D2397 صورت گرفت (Izadi, shaygan, & Zalnezhad, 2022; Ziari, Mahdizadeh, & Zalnejad, 2021; Ziari, Mahdizadeh, & Zalnezhad, 2021). همچنین خصوصیات قیر امولسیون کاتیونی تولیدی در جدول ۴ ارائه شده است.

### تحلیل عملکردی استفاده از ضایعات زغالسنگ جایگزین فیلر طبیعی در آسفالت حفاظتی اسلاری سیل

الزامها ارزیابی می‌شود. پس از برآورده شدن حدود استاندارد، طرح اختلاط و ارزیابی عملکرد نمونه‌ها با آزمون‌های 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 (Keymanesh, Ziari, Zalnezhad, & Zalnezhad, 2020). در بدست آوردن مقدار بهینه قیر امولسیون و تعیین حداقل و حداکثر آن به ترتیب از نتایج آزمایش‌های سایش در شرایط مرطوب و آزمایش چرخ بارگذاری شده-چسبندگی ماسه استفاده می‌شود. بر اساس دستورالعمل *ISSA A105*، اگر میزان حداکثر و حداقل قیر کمتر از ۳ درصد 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 (Zalnezhad & Hesami, 2020).

سولفات‌ها و نمک‌ها باشد. این موضوع بدان جهت است که ممکن است واکنش‌های شیمیایی ناخواسته در مخلوط ایجاد شود. آب استفاده شده در تمامی نمونه‌ها، آب شرب است.

### ۳. طرح اختلاط و آزمایش‌ها

#### ۳-۱ طرح اختلاط

در این تحقیق پودر ضایعات زغالسنگ عبوری از الک ۰/۰۷۵ میلی‌متر به‌عنوان جایگزین فیلر در درصد‌های ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ بر حسب وزن کل فیلر در نمونه‌های اسلاری سیل استفاده گردید. حدود مجاز هریک از آزمون‌ها و درجه‌بندی هریک از مخلوط‌های اسلاری سیل به ترتیب در جداول ۵ و ۶ آورده شده است. طراحی اسلاری سیل و آزمون‌های مرتبط با آن در آیین‌نامه *ASTM D3910* ارائه شده است. در طرح اختلاط مخلوط اسلاری سیل بعد از انتخاب سنگدانه‌های با کیفیت و قیر امولسیون سازگار با سنگدانه، آزمون‌ها بر اساس استاندارد *ASTM D3910* بر روی مصالح صورت گرفته و حدود مجاز

جدول ۵. حدود قابل قبول آزمون‌های اسلاری سیل (*ISSA A105, 2020*)

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

جدول ۶. درجه‌بندی مخلوط‌های حاوی درصد‌های مختلف فیلر پودر ضایعات زغال‌سنگ

نوع مخلوط	فیلر پودر ضایعات زغال‌سنگ جایگزین فیلر مخلوط شاهد، %
CP0	۰
CP25	۲۵
CP50	۵۰
CP75	۷۵
CP100	۱۰۰

### ۲-۳ آزمایش زمان اختلاط

آزمایش زمان اختلاط اولین مرحله در طراحی مخلوط و شامل اختلاط مصالح سنگدانه، فیلر، آب و قیر امولسیون کاتیونی است (de Matos et al., 2020). در آسفالت حفاظتی اسلاری سیل 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 (Esfahani & Khatayi, 2020). همچنین این آزمون علاوه بر آنکه زمان لازم برای اختلاط را مشخص می‌کند، سازگاری مواد را با یکدیگر کنترل و تأیید می‌نماید. این آزمون مطابق با ISSA TB 113 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 (ISSA, 2017f).

### 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 اسلاری سیل انجام می‌شود (Apaza et al., 2021; ISSA, 2017d). 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. زمانی که 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 کیلو پاسکال تحت پیچش قرار می‌گیرد. بدین صورت میزان پیچش بدست آمده در فواصل زمانی مناسب که در ارتباط با چسبندگی مخلوط تعریف شده، قرائت می‌شود (Bhargava, Siddagangaiyah, & Ryntathieng, 2020). از نتایج حاصله این آزمایش برای تعیین زمان مناسب جهت بازگشایی ترافیک عبوری بر روی نمونه‌های اسلاری سیل استفاده می‌شود (ISSA, 2017d). تصویری از نمونه‌ها و دستگاه ارزیابی چسبندگی در شکل ۲-۲ ارائه شده است.

### ۴-۳ آزمون 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 (از دست رفتن سنگدانه نمونه‌های ساخته شده)، بعد از سایش با لوله لاستیکی، معین می‌شود. به‌طور خلاصه در طی این فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال پانزدهم / شماره سوم (۶۰) / بهار ۱۴۰۳

## تحلیل عملکردی استفاده از ضایعات زغال‌سنگ جایگزین فیلر طبیعی در آسفالت حفاظتی اسلاری سیل

می‌شود. سپس نمونه پس از بارگذاری مجدداً توزین می‌شود. اختلاف بین وزن‌های اندازه‌گیری شده، به‌عنوان مقدار ماسه‌ای که چسبیده است، گزارش می‌شود. بدین صورت در هر یک از مخلوط‌ها حداکثر مقدار مجاز قیر مشخص می‌گردد (ISSA, 2017a).

### ۳-۶ آزمایش سنجش تغییر شکل عمودی و جانبی

#### مخلوط اسلاری سیل تحت چرخ بارگذاری شده

آزمایش ارزیابی میزان تغییر مکان عمودی و جانبی با چرخ بارگذاری شده، ویژگی‌های تغییر شکل مخلوط را تحت بار ترافیک شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد. در این پژوهش مخلوط با استفاده از چرخ ۵۶۷ 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 شکل‌های جانبی و عمودی نمونه‌ها نیابتی به ترتیب از ۵ و ۱۰ درصد بیشتر شود (ISSA, 2017b). تصویری از مخلوط‌ها و دستگاه چرخ بارگذاری شده در شکل ۲-۵ نشان داده شده است.

آزمایش نمونه‌های اسلاری سیل عمل‌آوری شده در گرمخانه به مدت حداقل ۱۵ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد، وزن شده و سپس در آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد به مدت زمان 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 (ISSA, 2017c). تصویری از نمونه‌ها و دستگاه آزمایش سایش در شرایط مرطوب در شکل ۲-۵b نشان داده شده است.

### ۳-۵ آزمون چرخ بارگذاری شده - چسبندگی ماسه

این آزمون جهت اندازه‌گیری حداکثر قیر برای جلوگیری از خرابی قیر زدگی مخلوط‌های اسلاری سیل است. در این آزمایش مخلوط‌ها طی ۱۰۰۰ سیکل با چرخ بارگذاری ۵۶۷ 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



شکل ۲. دستگاه‌ها و نمونه‌های مخلوط‌های اسلاری سیل

جدول ۷. نتایج آزمون زمان اختلاط نمونه‌های اسلاری سیل

CP100		CP75		CP50		CP25		CP0		نوع مخلوط					
۹	۸/۵	۸	۹	۸/۵	۸	۹	۸/۵	۸	۹	۸/۵	۸	درصد قیر باقی مانده			
۹	۱۰	۱۰	۹	۹/۵	۹/۵	۸	۸/۵	۹	۸	۸	۸	درصد آب			
۱۸۴	۱۸۲	۱۸۲	۱۸۳	۱۸۳	۱۸۲	۱۸۵	۱۸۶	۱۸۶	۱۸۵	۱۸۷	۱۸۶	۱۸۳	۱۸۴	۱۸۷	زمان اختلاط بدست آمده

#### ۴. نتایج و بحث

##### ۴-۱ آزمایش زمان اختلاط

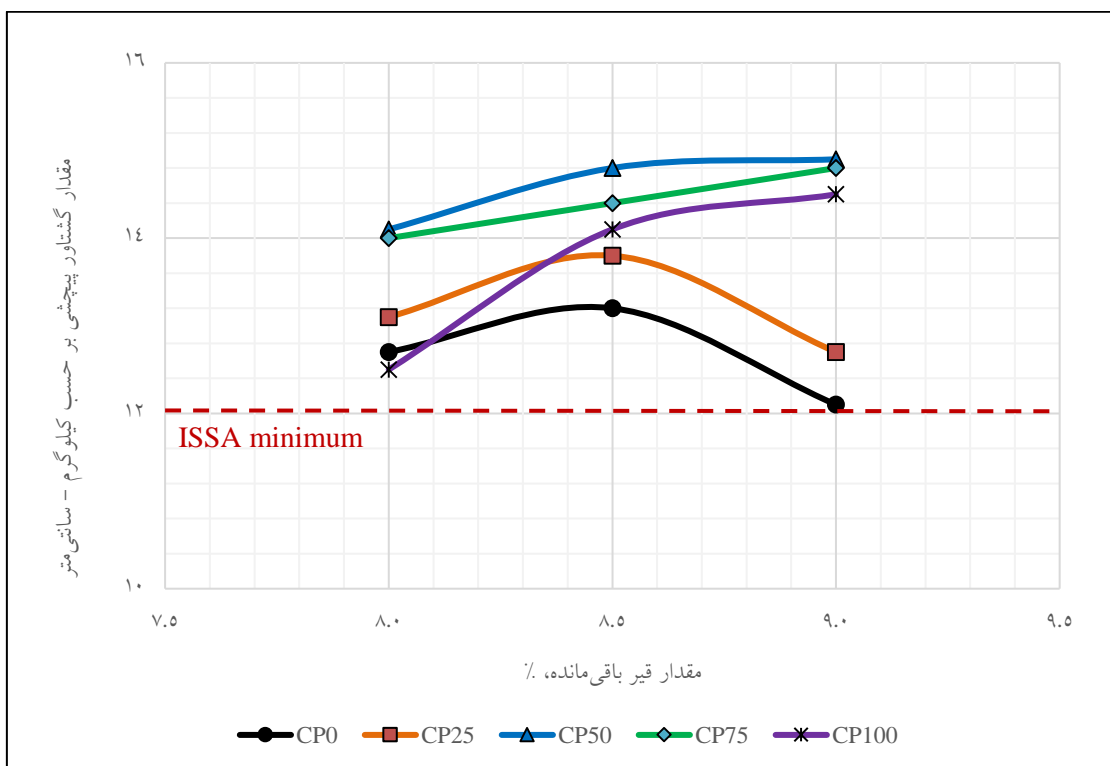
مدت زمان ۳۰ دقیقه به میزان ۴/۵، ۱۲/۱، ۹/۱ و ۶/۸ درصد و در مدت زمان ۱ ساعت به میزان ۴/۸، ۱۴/۲۹، ۹/۵ و ۴/۸ درصد شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، در مخلوط‌های CP0، CP25 و CP50 با افزایش مقدار قیر باقی مانده از ۸ به ۸/۵ درصد، مقدار چسبندگی افزایش یافته و سپس با افزایش قیر به ۹ درصد، مقدار چسبندگی کاهش می‌یابد؛ بنابراین می‌توان این طور استنباط کرد با افزایش در صد قیر تا اندازه مشخصی، چسبندگی در این نمونه‌ها بیشتر شده و سپس با افزایش بیشتر مقدار قیر امولسیون و به دنبال آن افزایش زمان عمل‌آوری، مقدار چسبندگی کاهش خواهد یافت. این در حالی است که در نمونه‌های CP75 و CP100 افزایش درصد قیر از ۸ به ۹ درصد، مقدار چسبندگی به طور صعودی افزایش یافته است. بر اساس آنالیز XRF و FESEM-EDS، قسمت قابل توجهی از ترکیب شیمیایی آن را اکسید سیلیس تشکیل داده است. بار سطحی مصالح سیلیسی منفی و از آنجایی که قیر امولسیون کاتیونی نیز دارای بار سطحی مثبت است، می‌توان نتیجه گرفت که پس از اختلاط پودر زغال سنگ با قیر امولسیون کاتیونی پیوند خوبی بین آن‌ها شکل گرفته و موجب افزایش چسبندگی در مخلوط آسفالتی می‌شود. از سوی دیگر، مطابق تصاویر مورفولوژی FESEM، اشکال زاویه‌ای، ساختار خرد شده و زبری بالای CP، موجب چسبندگی بهتر این ذرات با قیر شده است. این نتیجه با تحقیق دیگر محققان نیز همخوانی دارد (Almadwi & Assaf, 2021; Arabani et al., 2017).

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 برای هر یک از نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف از پودر زغال سنگ و قیر امولسیون، موردبررسی واقع شد. نتایج این آزمایش نشان داد با افزایش درصد پودر زغال سنگ، مقدار آب جهت دستیابی به زمان اختلاط تا حدود مجاز دستورالعمل ISSA افزایش یافت. جذب آب بالای پودر زغال سنگ نسبت فیلر طبیعی به دلیل خصوصیات فیزیکی مانند شکل ظاهری بوده که بر خصوصیات مخلوط تأثیر گذار بوده و پودر زغال سنگ به دلیل ساختار متخلخل و منافذ بالا باعث کاهش کارایی و مصرف بیشتر آب در انواع مخلوط‌های آسفالتی می‌شود.

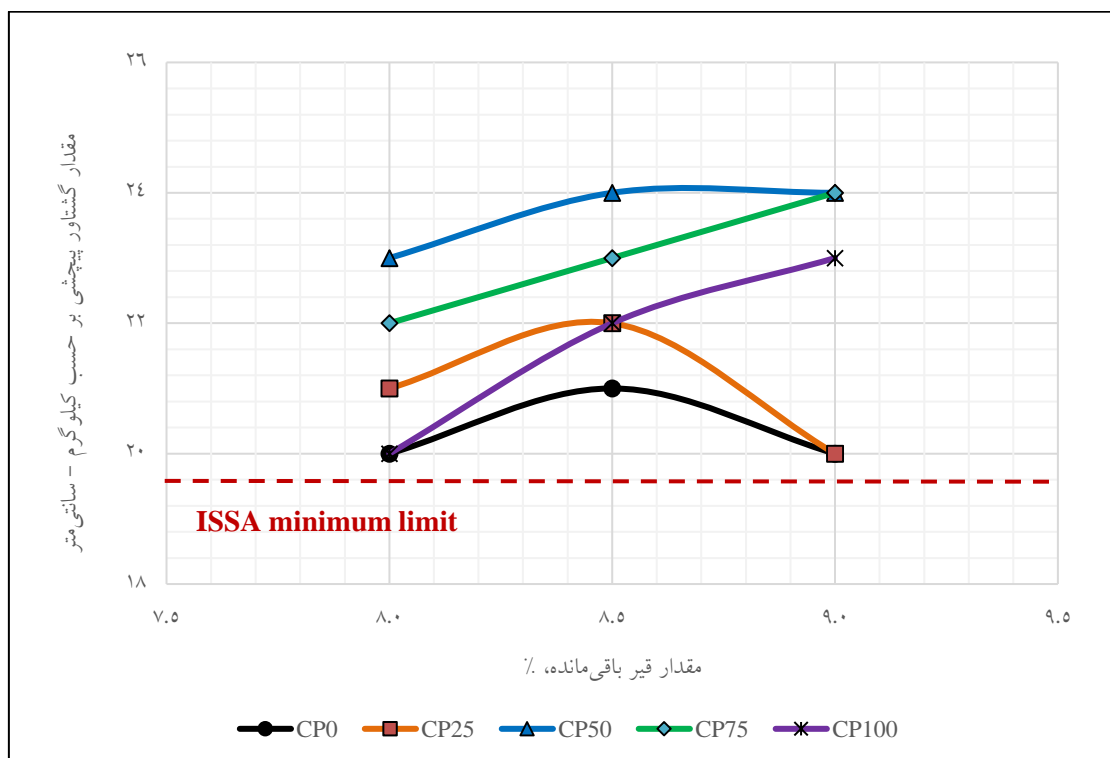
##### ۴-۲ آزمایش چسبندگی مرطوب

نتایج آزمایش چسبندگی مرطوب در سه سطح از قیر باقی مانده برای نمونه‌های اسلاری سیل در زمان‌های ۳۰ و ۶۰ دقیقه، در ادامه به شرح نمودارهای ۳ و ۴ است. با توجه به نتایج حاصله، تمامی نمونه‌ها مقاومت و گیرش لازم جهت بازگشایی ترافیک به ترتیب در طی مدت زمان ۳۰ و ۶۰ دقیقه را بدست آورده‌اند. به‌عنوان نمونه در قیر باقی مانده ۸/۵ درصد، مخلوط‌های CP25، CP50، CP75 و CP100 نسبت به نمونه شاهد (CP0) به ترتیب موجب افزایش چسبندگی به قیر در

تحلیل عملکردی استفاده از ضایعات زغال سنگ جایگزین فیلر طبیعی در آسفالت حفاظتی اسلاری سیل



شکل ۳. نتایج آزمایش چسبندگی مرطوب در ۳۰ دقیقه

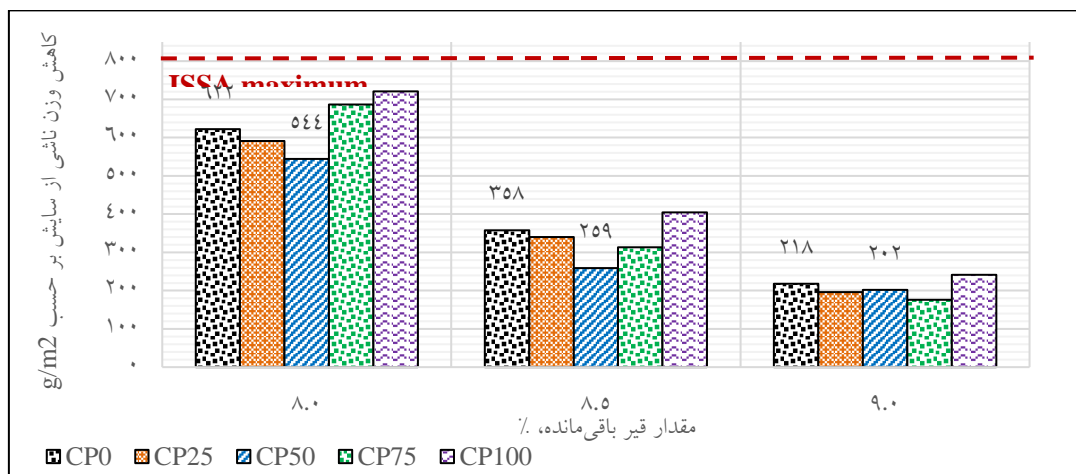


شکل ۴. نتایج آزمایش چسبندگی مرطوب در ۶۰ دقیقه

#### ۴-۳ آزمون سایش در شرایط مرطوب

نتایج این آزمایش در مدت‌زمان ۱ ساعت غوطه‌وری همه مخلوط‌ها در نمودار ۵ 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 نتایج بدست آمده، دو فاکتور افزایش درصد قیر و افزایش پودر زغال‌سنگ تا ۷۵ درصد سبب کاهش افت وزنی شده و سبب بهبود عملکرد در برابر سایش می‌گردد. اگرچه اختلاف مقدار کاهش افت وزنی نمونه‌ها در ۹ درصد قیر باقی‌مانده قابل توجه نیست. نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که در ۸/۵ درصد قیر باقی‌مانده، مقدار افت وزنی نمونه‌های CP25، CP50 و CP75 به ترتیب به مقدار ۴/۹، ۲۷/۶ و ۱۲/۵ درصد بیشتر از نمونه شاهد (نمونه CP0) است. در نتیجه نمونه CP50 با نسبت ۵ درصد فیلر زغال‌سنگ نسبت به وزن کل فیلر کمترین مقدار افت وزنی و در نتیجه بهترین عملکرد را در درصد قیر ۸/۵ داشته است و پس از آن نمونه‌های CP75 و CP25 در رتبه‌های بعدی قرار داشته‌اند. کمترین مقدار افت وزنی در نمونه‌ها متعلق به نمونه‌های CP75 و CP50 در ۹ درصد قیر باقی‌مانده به ترتیب با عدد ۱۷۶ و ۲۰۲ گرم بر متر مربع است. در گراف ۵، این نکته قابل توجه است که با افزایش قیر از ۸ تا ۸/۵ درصد نرخ کاهش افت وزنی در مخلوط‌های CP75 و CP10 بیشتر از مخلوط‌های CP0، CP25 و CP50 است. به عبارتی می‌توان

نتیجه گرفت افزایش قیر در کاهش نرخ سایش مخلوط‌های حاوی ۷۵ و ۱۰۰ درصد پودر زغال‌سنگ بسیار قابل توجه است؛ بنابراین توصیه می‌شود در صورت استفاده از پودر زغال‌سنگ به‌عنوان فیلر با درصد بالا، درصد بالایی از قیر امولسیون جهت افزایش مقاومت در برابر سایش و عریان‌شدگی استفاده شود. این موضوع این‌طور قابل توجیه است که با توجه به نتایج آزمون XRF، مخلوط CP10 به دلیل وجود سیلیس بیشتر در مقایسه با نمونه شاهد و آب‌دوست بودن این ماده در ترکیب خود باعث می‌شود تا در حضور رطوبت، پیوند قیر و سنگدانه جای خود را به پیوند آب و سنگدانه بدهد. در نتیجه عملکرد ضعیف‌تری (در محدوده مجاز) در مقایسه با سنگدانه معدنی دارد (Wozuk, Wróbel, Bandura, & Franus, 2020; Zulkati, Diew, & Delai, 2012). در مجموع، مطابق نتایج، استفاده بهینه از پودر زغال‌سنگ (به مقدار ۵ درصد وزنی سنگدانه جایگزین فیلر) در اسلاری سیل منجر به مقاومت بیشتری در برابر اثرات مخرب ناشی از آب و رطوبت می‌شود. بدین علت که پودر زغال‌سنگ دارای مقدار قابل‌توجهی  $Al_2O_3$  نسبت به مصالح معدنی است.  $Al_2O_3$  با میل ترکیبی بیشتر به قیر نسبت به آب، می‌تواند چسبندگی بین ذرات سنگدانه و قیر را بهبود بخشد؛ بنابراین استفاده بهینه از پودر زغال‌سنگ منجر به چسبندگی بیشتر در بین ذرات در سنگدانه‌ها و در نتیجه مخلوط آسفالت می‌شود.

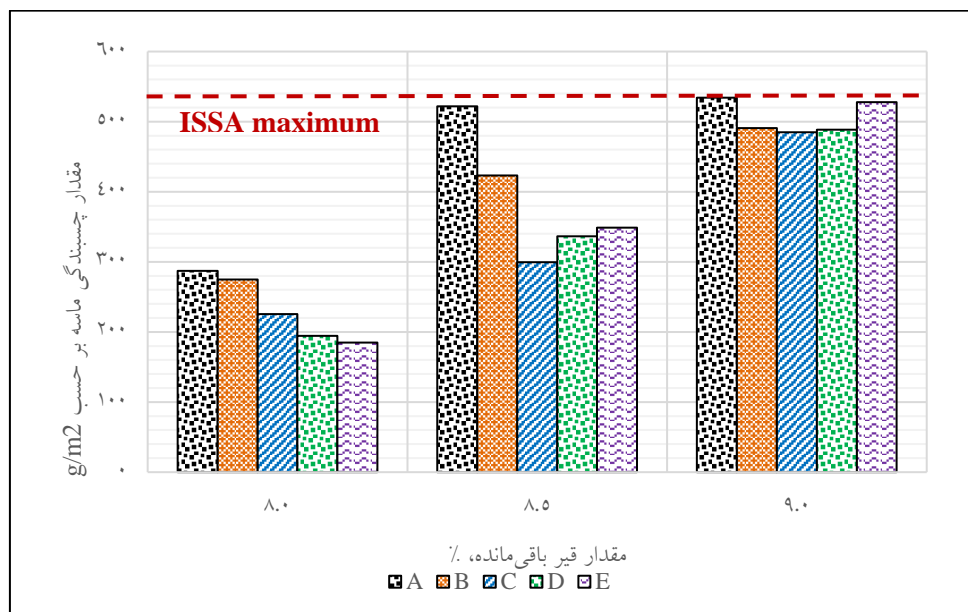


شکل ۵. نتایج مقدار افت وزنی نمونه‌های آزمایش سایش در شرایط مرطوب

## تحلیل عملکردی استفاده از ضایعات زغال‌سنگ جایگزین فیلر طبیعی در آسفالت حفاظتی اسلاری سیل

آسفالت سرد می‌گردد. نکته دیگری که از گراف‌ها دریافت می‌شود، نرخ قیرزدگی با افزایش قیر بعد از ۸ درصد در مخلوط‌های CP0 و CP25 تقریباً ثابت مانده و تأثیر کمتری بر افزایش پتانسیل قیرزدگی این مخلوط‌ها دارد. این درحالی است که در مخلوط‌های CP50، CP75 و CP100 نرخ قیرزدگی افزایش درصد قیر از ۸ به ۹ به صورت خطی افزایش یافته است. دلیل این امر آن است که پودر زغال‌سنگ دارای سطح ویژه بالاتری نسبت به فیلر طبیعی است. سطح ویژه بالاتر به معنای جذب قیر بیشتر توسط پودرها است؛ بنابراین قیر آزاد بیشتری در فیلر طبیعی نسبت پودر زغال‌سنگ وجود خواهد داشت. علاوه بر این با توجه نتایج FESEM و به دلیل خلل و فرج، سطح مخصوص بالا و بافت نامنظم پودر زغال‌سنگ، جذب قیر در این مخلوط‌ها بالاتر رفته که همه این عوامل باعث کاهش قیر زدگی این مواد در هر سه سطح از قیر امولسیون می‌شود.

۴-۴ آزمایش چرخ بارگذاری شده - چسبندگی ماسه  
نتایج این آزمایش برای نمونه‌های اسلاری سیل حاوی سرباره فولاد در ادامه به شرح نمودار ۶ است. همان‌طور که در نمودارها مشاهده می‌شود با کاهش قیر و یا افزایش درصد پودر زغال‌سنگ، قیرزدگی مخلوط‌ها کاهش پیدا می‌کند به طوری که همه نمونه‌ها در قیر ۸/۵ و ۹ درصد به ترتیب دارای کمترین و بیشترین مقدار قیرزدگی هستند. از این جهت بهترین عملکرد را مخلوط‌های با مقدار پودر زغال‌سنگ ۵۰ و ۷۵ درصد (CP75 و CP50) با مقدار چسبندگی ماسه نزدیک به هم و اختلاف ناچیز داشته‌اند. به‌طور مثال در قیر ۸/۵ درصد، نمونه‌های CP75، CP50، CP25 و CP100 عملکرد قیرزدگی را نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۱۸/۹، ۴۲/۶، ۳۵/۵ و ۳۳/۱ درصد بهبود داده‌اند. لذا، استفاده از CP در مخلوط‌ها، باعث بهبود قابل توجه عملکرد قیرزدگی مخلوط‌های



شکل ۶. چسبندگی ماسه (پتانسیل قیر زدگی) مخلوط‌های اسلاری سیل در آزمایش چرخ بارگذاری - چسبندگی ماسه

به‌صورت یک نمودار خطی و نتایج آزمایش سایش مرطوب به‌صورت نمودارهای توابع توانی نشان داده می‌شوند (ISSA, 2017e; Keymanesh et al., 2021; Zalnezhad & Hesami, 2020). محدوده مجاز قیر امولسیون برای تمامی مخلوط‌ها در جدول ۵ ارائه شده است. همان‌طور که از نتایج بدست آمده است درصد بهینه قیر امولسیون مخلوط‌های آسفالتی

## ۴-۵ تعیین کردن محدوده مجاز و بهینه قیر امولسیون

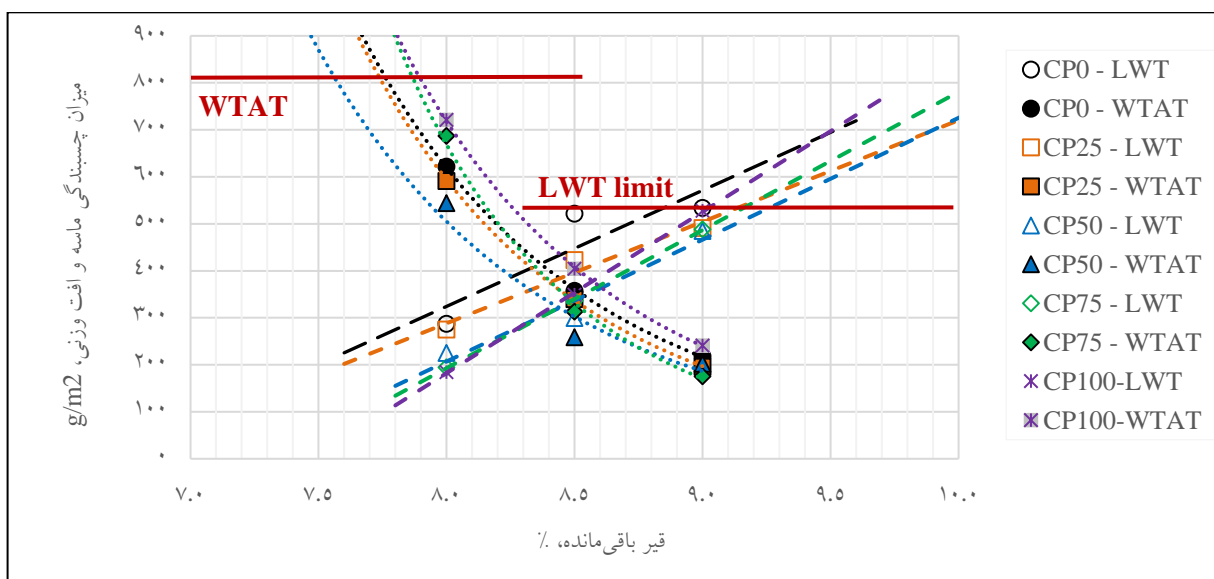
محدوده مجاز قیر امولسیون و مقدار بهینه آن از طریق رسم نتایج آزمایش‌های چرخ بارگذاری شده - چسبندگی ماسه و سایش در شرایط مرطوب و تلفیق نمودارهای این دو آزمایش در شکل ۷ بدست می‌آید. در تلفیق دو نمودار نتایج آزمایش ماسه چسبیده

بیشتر بوده است. دلیل این موضوع آن است که فیلر پودر زغال سنگ از لحاظ فیزیکی و شیمیایی دارای سطح مخصوص بالاتر و سطح زبرتری است که این امر باعث افزایش میزان قیر بهینه جهت پوشش سنگدانه‌ها خواهد شد.

حاوی پودر زغال‌سنگ نسبت به مخلوط شاهد افزایش داشته است. به طوری که مقدار بهینه قیر امولسیون مخلوط‌های CP25، CP50، CP75 و CP100 به ترتیب به مقدار ۰/۳۷، ۰/۵۶، ۰/۴۰ و ۰/۱۶ درصد نسبت به مخلوط CP0 (مخلوط شاهد)

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

نوع مخلوط	حداقل مقدار قیر امولسیون بدست آمده از آزمایش سایش	حداکثر مقدار قیر امولسیون بدست آمده از چسبندگی ماسه	دامنه قابل قبول قیر امولسیون	مقدار بهینه قیر امولسیون
CP0	۱۲/۵۵	۱۵/۲۹	۱۵/۲۹-۱۲/۹۳	۱۴/۱۱
CP25	۱۲/۳۴	۱۶/۰۳	۱۶/۰۳-۱۲/۹۳	۱۴/۴۸
CP50	۱۱/۹۱	۱۶/۴۱	۱۶/۴۱-۱۲/۹۳	۱۴/۶۷
CP75	۱۲/۶۰	۱۶/۰۹	۱۶/۰۹-۱۲/۹۳	۱۴/۵۱
CP100	۱۲/۹۱	۱۵/۶۰	۱۵/۶۰-۱۲/۹۳	۱۴/۲۷



شکل ۷. ترکیب نتایج آزمون‌های سایش در شرایط مرطوب و چرخ بارگذاری شده - چسبندگی ماسه

از دیدگاه مقدار فیلر، با توجه به نتایج بدست آمده در تمامی نمونه‌ها در قیر باقی‌مانده ۸ تا ۹ درصد، با افزایش میزان درصد فیلر زغال‌سنگ تا ۷۵ درصد وزن کل فیلر، از جابه‌جایی عمودی و جانبی کاسته شده است. این بدان معنا است که در مخلوط‌هایی که مستعد شیارشدگی هستند، می‌توان پس از تأمین قیر کافی، با افزایش فیلر زغال‌سنگ احتمال رخداد خرابی تغییرشکل را کاهش داد. به‌عنوان نمونه در قیر باقی‌مانده ۸/۵ درصد مخلوط‌های CP25، CP50، CP75 و CP100 نسبت به

۴-۶ تعیین میزان تغییر شکل عمودی و جانبی مخلوط

با آزمایش چرخ بارگذاری شده

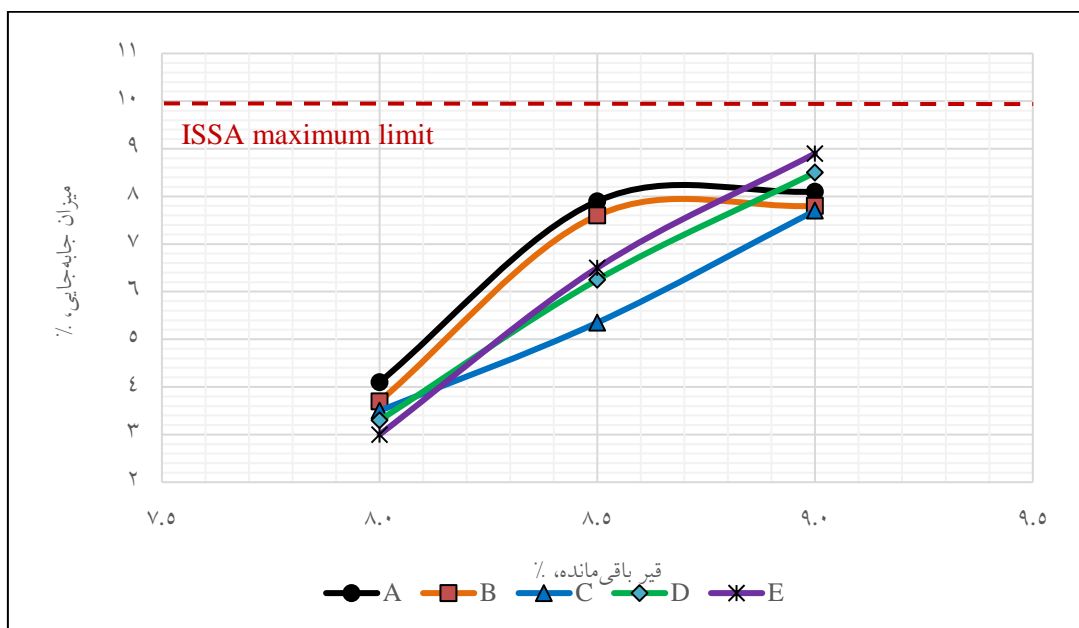
به‌منظور ارزیابی عملکرد مخلوط‌ها در برابر بارگذاری ترافیک، آزمایش چرخ بارگذاری شده انجام شده و نتایج بدست آمده از آن برای نمونه‌های اسلاری سیل در نمودارهای ۸ و ۹ ارائه شده است. نتایج این آزمایش از دو دیدگاه مقدار فیلر و قیر امولسیون در مخلوط‌ها قابل بررسی است.

## تحلیل عملکردی استفاده از ضایعات زغال‌سنگ جایگزین فیلر طبیعی در آسفالت حفاظتی اسلاری سیل

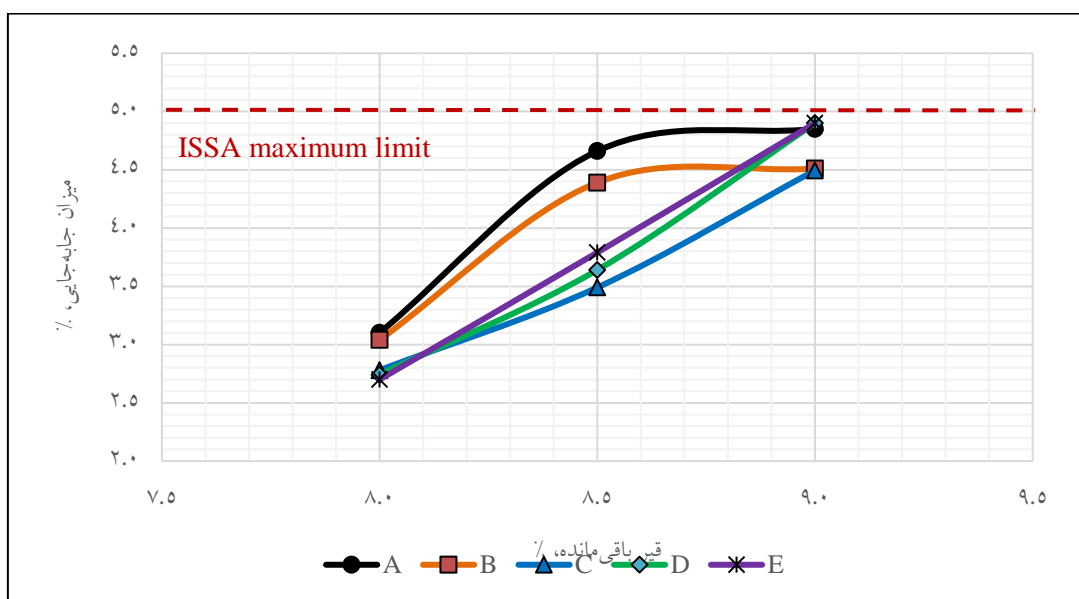
مخلوط آسفالت سرد در برابر ترافیک عبوری افزایش می‌یابد. از سوی دیگر تغییر شکل مخلوط آسفالتی مستقیماً تحت تأثیر سفتی قیر است. علاوه بر این، نشان داده شده است که رابطه مستقیمی بین نوع فیلر و سفتی قیر وجود دارد (Arabani et al., 2017; Hesami, 2014). پرکننده زغال‌سنگ به دلیل خواص فیزیکی (شکل ظاهری، زاویه‌داری و زبری سطح) و ساختاری مناسب، سفتی قیر را به میزان قابل توجهی افزایش داده که منجر به کاهش تغییر شکل مخلوط حاوی مقدار بهینه پودر زغال‌سنگ می‌شود.

نمونه شاهد موجب کاهش جابه‌جایی عمودی به ترتیب به میزان ۴، ۳۲، ۲۱ و ۱۸ درصد و موجب کاهش جابه‌جایی جانبی به میزان ۶، ۲۵، ۲۲ و ۱۹ درصد شده است. بدین ترتیب CP50 مناسب‌ترین عملکرد را در میزان جابه‌جایی عمودی و افقی ناشی از بارگذاری داشته است. از منظر قیر امولسیون همان‌طور که مشاهده می‌شود در مخلوط CP0 و CP25 با افزایش قیر باقی‌مانده ابتدا میزان جابه‌جایی در قیر باقی‌مانده ۸ به ۸/۵ درصد افزایش و سپس از قیر باقی‌مانده ۸/۵ به ۹ درصد ثابت مانده است. این بدان معنا است که در مخلوط‌های CP0 و CP25 افزایش قیر تا حدودی مشخص باعث افزایش بیشتر سطح پوشش سنگدانه و ازدیاد مقدار تغییر شکل در برابر بارگذاری شده و سپس افزایش درصد قیر تأثیری بر میزان تغییر شکل نداشته است. این در حالی است که با افزایش درصد قیر باقی‌مانده از ۸ به ۹ درصد در مخلوط‌های CP50، CP75 و CP100 میزان جابه‌جایی با شیب تقریباً ثابتی افزایش می‌یابد. لذا مشخص نمودن مقدار قیر مناسب برای کاهش میزان جابه‌جایی‌ها امری ضروری است.

به‌طور کلی با توجه به نتایج بدست آمده، در مجموع افزایش درصد قیر باقیمانده و افزایش پودر زغال‌سنگ اثر معناداری در مقدار جابه‌جایی‌ها افقی و عمودی دارند. افزایش جابه‌جایی در مخلوط شاهد (CP0) نسبت به مخلوط حاوی پودر زغال‌سنگ مرتبط با مقدار قیر مصرفی در این مخلوط است. به‌طوری که با افزایش درصد قیر مورد نیاز، این قیر به‌عنوان یک روان‌کننده عمل نموده و باعث کاهش مقاومت برشی در مخلوط می‌شود (Asi, 2007; Hainin, Rusbintardjo, Hameed, Hassan, & Yusoff, 2014; Skaf, Manso, Aragón, Fuente-Alonso, & Ortega-López, 2017). از این‌رو عمق شیار در مخلوط شاهد بیشتر از سایر مخلوط‌ها است. در واقع این موضوع نشان‌دهنده آن است که هرچه درصد ذرات فیلر زغال‌سنگ در مخلوط بیشتر باشد، این ذرات میزان جذب قیر بیشتری خواهند داشت. در نتیجه این موضوع منجر به ایجاد چسبندگی قوی بین قیر و سنگ‌دانه‌ها شده و به طبع آن مقاومت



شکل ۸. مقدار تغییر شکل عمودی نمونه‌های اسلاری سیل



شکل ۹. مقدار تغییر شکل افقی نمونه‌های اسلاری سیل

## ۵. نتیجه‌گیری

زغال سنگ جایگزین فیلر مخلوط شاهد بر اساس وزن کل فیلر استفاده گردید. بررسی نمونه‌های اسلاری سیل با آزمون‌های چسبندگی مرطوب، چرخ بارگذاری شده و سایش در شرایط مرطوب مطابق با دستورالعمل ASTM D3910 انجام شد. بر اساس نتایج XRF و FESEM، پودر زغال سنگ حاوی اکسید سیلیس به میزان تقریبی ۳۸ درصد و دارای اشکال زاویه‌ای، ساختار خرد شده و سطح زبر است. این موضوع باعث شده این مصالح سازگاری مناسبی با قیر امولسیون کاتیونی (با بار

در این مطالعه به بررسی استفاده از پودر زغال سنگ در طرح اختلاط اسلاری سیل جهت سنجش عملکرد آن پرداخته شد. در این راستا، ابتدا ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی فیلر طبیعی و زغال سنگ با آزمایش‌های XRF و FESEM مورد تحقیق واقع شد. در مرحله بعد جهت ارزیابی عملکرد مخلوط اسلاری سیل، از ۵ ترکیب مختلف حاوی صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد پودر

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال پانزدهم / شماره سوم (۶۰) / بهار ۱۴۰۳

## تحلیل عملکردی استفاده از ضایعات زغال‌سنگ جایگزین فیلر طبیعی در آسفالت حفاظتی اسلاری سیل

داشته است. لذا مشخص نمودن مقدار مناسب از قیر جهت تقلیل میزان جابه‌جایی‌ها ضروری است. در مشخص نمودن میزان قیر امولسیون بهینه، با بیشتر شدن پودر زغال‌سنگ در نمونه‌ها، درصد قیر امولسیون بهینه نسبت به نمونه شاهد افزایش یافت. همچنین معلوم گردید که بیشترین درصد قیر امولسیون در ارتباط با نمونه حاوی ۵۰ درصد پودر زغال‌سنگ است.

بر اساس نتایج، با توجه مسائل زیست‌محیطی و محدودیت‌های منابع طبیعی، می‌توان از پودر زغال‌سنگ به نحو مطلوبی در مخلوط اسلاری سیل استفاده کرد

### ۶. مراجع

– Almadwi, F. S., & Assaf, G. J. (2021). Effects of Brick Powder on the Properties of Asphalt Mixes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(1), 04020429. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003531

– 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:10.1080/14680629.2018.1465451

– Apaza, F. R. A., Guimarães, A. C. R., Vivoni, A. M., & Schroder, R. (2021). Evaluation of the performance of iron ore waste as potential recycled aggregate for micro-surfacing type cold asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 266, 121020.

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

– Asi, I. M. (2007). Evaluating skid resistance of different asphalt concrete mixes. *Building and Environment*, 42(1), 325-329.

مثبت) با توجه بار منفی این نوع مصالح خواهند داشت. در آزمایش چسبندگی مرطوب در زمان‌های ۳۰ دقیقه و ۱ ساعت، همه نمونه‌ها مقاومت لازم جهت عبور بار ترافیک را کسب کردند. با افزایش پودر زغال‌سنگ، مقدار چسبندگی به میزان قابل‌توجهی افزایش خواهد یافت. در تعیین میزان حساسیت رطوبتی با آزمون سایش در شرایط مرطوب مشخص شد، دو عامل افزایش زغال‌سنگ تا ۷۵ درصد و ازدیاد درصد قیر موجب بهبود عملکرد در برابر سایش کاهش افت وزنی شده و کاهش افت وزنی می‌شود. کمترین میزان افت وزنی در نمونه‌ها به مخلوط‌های CP50 و CP75 در ۹ درصد قیر باقی‌مانده به ترتیب با عدد ۱۷۶ و ۲۰۲ گرم بر متر مربع تعلق دارد. همچنین مشخص گردید افزایش قیر در کاهش نرخ سایش مخلوط‌های حاوی ۷۵ و ۱۰۰ درصد پودر زغال‌سنگ بسیار قابل‌توجه است. در آزمایش چرخ بارگذاری - چسبندگی ماسه معین گردید که با افزایش میزان قیر امولسیون در نمونه‌های آسفالتی، میزان چسبندگی ماسه و به دنبال آن استعداد قیرزدگی نمونه‌ها زیاد می‌شود. همچنین با رشد میزان پودر زغال‌سنگ از ۰ تا ۱۰۰ درصد استعداد قیر زدگی نمونه‌ها تقلیل پیدا کرد. از این جهت بهترین عملکرد را مخلوط‌های با مقدار پودر زغال‌سنگ ۵۰ و ۷۵ درصد (CP5 و CP75) با مقدار چسبندگی ماسه نزدیک به هم و اختلاف ناچیز داشته‌اند. در آزمایش چرخ بارگذاری جهت معین نمودن مقدار تغییر شکل مخلوط‌ها مشخص شد در تمامی نمونه‌ها در قیر باقی‌مانده ۸/۵ تا ۹ درصد، از جابه‌جایی عمودی و جانبی، با افزایش میزان درصد پودر زغال‌سنگ تا ۷۵ درصد وزن کل فیلر، کاسته شده است. در نتیجه در مخلوط‌هایی که متمایل به وقوع شیارشدگی هستند، می‌توان پس از تهیه میزان قیر مناسب، با افزایش فیلر زغال‌سنگ احتمال رخداد خرابی تغییر شکل را کاهش داد. بدین ترتیب CP5 مناسب‌ترین عملکرد را در میزان جابه‌جایی عمودی و افقی ناشی از بارگذاری داشته است. از طرفی افزایش درصد قیر باقیمانده اثر محسوسی در افزایش مقدار جابه‌جایی‌ها افقی و عمودی در تمامی مخلوط‌ها

- Esfahani, M. A., & Khatayi, A. (2020). Effect of type and quantity of emulsifier in bitumen polymer emulsion on microsurfacing performance. *International Journal of Pavement Engineering*, 1-15. doi:10.1080/10298436.2020.1784416
- Feng, X., Chen, W., & Li, W. (2020). Effects of silane coupling agent modified coal waste powder on performance of asphalt mortar and asphalt mixture. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 13(4), 383-391. doi:10.1007/s42947-020-0153-6
- Georgiou, P., & Loizos, A. (2021). Environmental assessment of warm mix asphalt incorporating steel slag and high reclaimed asphalt for wearing courses: a case study. *Road Materials and Pavement Design*, 22(sup1), S662-S671. doi:10.1080/14680629.2021.1906305
- Hainin, M. R., Rusbintardjo, G., Hameed, M. A. S., Hassan, N. A., & Yusoff, N. I. M. (2014). Utilisation of steel slag as an aggregate replacement in porous asphalt mixtures. *Jurnal Teknologi (Sciences and Engineering)*, 69(1), 67-73.
- Hesami, E. (2014). Characterisation and modelling of asphalt mastic and their effect on workability. KTH Royal Institute of Technology.
- 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
- Awed, A. M., Tarbay, E. W., El-Badawy, S. M., & Azam, A. M. (2020). Performance characteristics of asphalt mixtures with industrial waste/by-product materials as mineral fillers under static and cyclic loading. *Road Materials and Pavement Design*, 1-23. doi:10.1080/14680629.2020.1826347
- Barišić, I., Netinger Grubeša, I., & Hackenberger Kutuzović, B. (2017). Multidisciplinary approach to the environmental impact of steel slag reused in road construction. *Road Materials and Pavement Design*, 18(4), 897-912. doi:10.1080/14680629.2016.1197143
- Bhargava, N., Siddagangaiah, A. K., & Rynthiang, T. L. (2020). Reliability of Microsurfacing Mix Subjected to Variation in Aggregate Gradation. *Transportation research record*, 2674(11), 720-730.
- Choudhary, J., Kumar, B., & Gupta, A. (2020). Utilization of solid waste materials as alternative fillers in asphalt mixes: A review. *Construction and Building Materials*, 234, 117271. doi:[10.1016/j.conbuildmat.2019.117271](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117271)
- Choudhary, J., Kumar, B., & Gupta, A. (2021). Evaluation of engineering, economic and environmental suitability of waste filler incorporated asphalt mixes and pavements. *Road Materials and Pavement Design*, 22(sup1), S624-S640. doi:10.1080/14680629.2021.1905698
- de Matos, P. R., Oliveira, J. C., Medina, T. M., Magalhaes, D. C., Gleize, P. J., Schankoski, R. A., & Pilar, R. (2020). Use of air-cooled blast furnace slag as supplementary cementitious material for self-compacting concrete production. *Construction and Building Materials*, 262, 120102.

- untreated coal waste aggregates. *Construction and Building Materials*, 233, 117264. doi:[10.1016/j.conbuildmat.2019.117264](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117264)
- Keymanesh, M. R., Ziari, H., Zalnezhad, H., & Zalnezhad, M. (2020). Mix design and performance evaluation of microsurfacing containing electric arc furnace (EAF) steel slag filler. *Construction and Building Materials*, 269, 121336.
- 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:[10.1016/j.conbuildmat.2020.121336](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121336)
- Lin, J., Hong, J., & Xiao, Y. (2017). Dynamic characteristics of 100% cold recycled asphalt mixture using asphalt emulsion and cement. *Journal of Cleaner Production*, 156, 337-344.
- López, C., González, A., Thenoux, G., Sandoval, G., & Marcobal, J. (2019). Stabilized emulsions to produce warm asphalt mixtures with reclaimed asphalt pavements. *Journal of Cleaner Production*, 209, 1461-1472.
- Modarres, A., & Nosoudy, Y. M. (2015). Clay stabilization using coal waste and lime — Technical and environmental impacts. *Applied Clay Science*, 116-117, 281-288. doi:[10.1016/j.clay.2015.03.026](https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.03.026)
- Modarres, A., & Rahmanzadeh, M. (2014). Application of coal waste powder as filler in hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 66, 476-483. doi:[10.1016/j.conbuildmat.2014.06.002](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.002)
- Modarres, A., Rahmanzadeh, M., & Ayar, P. (2015). Effect of coal waste powder in hot mix asphalt compared to conventional fillers: mix 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 113: International Slurry Surfacing Association*.
- ISSA. (2017f). Trial mix procedure for slurry seal design. In *Technical Bulletin: International Slurry Surfacing Association*.
- ISSA A105. (2020). Recommended Performance Guideline For Emulsified Asphalt Slurry Seal. In: *International Slurry Surfacing Association*.
- Izadi, A., shaygan, s., & Zalnezhad, M. (2022). Investigation of the Effect of Blast-Furnace Slag Powder on Slurry Seal Surface Treatment Performance. *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, -. doi:[10.22119/jte.2021.298212.2550](https://doi.org/10.22119/jte.2021.298212.2550)
- Jalalian Khoshnood, A., Kamboozia, N., Ziari, H., & Zalnezhad, M. (2022). Evaluation of performance characteristics of polymer-modified slurry seal (PMSS) by replacing filler with ceramic waste powder. *Road Materials and Pavement Design*, 1-18. doi:[10.1080/14680629.2022.2117639](https://doi.org/10.1080/14680629.2022.2117639)
- Karimaei, M., Dabbaghi, F., Sadeghi-Nik, A., & Dehestani, M. (2020). Mechanical performance of green concrete produced with

on the Fatigue Life of Asphalt Mixtures with Dissipated Energy Method. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 10(2), 56-67. doi:10.22075/jrce.2021.22232.1468

– 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. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004033

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

– Skaf, M., Manso, J. M., Aragón, Á., Fuente-Alonso, J. A., & Ortega-López, V. (2017). EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use. *Resources, Conservation and Recycling*, 120, 176-185. doi:10.1016/j.resconrec.2016.12.009

– Son, H.-J., Kim, Y.-J., Lim, J.-K., Kwon, S.-A., Hong, J.-C., & Shin, H.-J. (2014). Influences of curing time on polymer-modified emulsion used for slurry seal and micro-surfacing mixes. In *Recent developments in evaluation of pavements and paving materials* (pp. 35-42).

– Vakharia, V., Gupta, V., & Kankar, P. (2017). Efficient fault diagnosis of ball bearing using ReliefF and Random Forest classifier. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 39(8), 2969-2982.

– Wang, A., Shen, S., Li, X., & Song, B. (2019). Micro-surfacing mixtures with reclaimed asphalt pavement: Mix design and performance

mechanical properties and environmental impacts. *Journal of Cleaner Production*, 91, 262-268. doi:10.1016/j.jclepro.2014.11.078

– Morian, D. A. (2011). Cost benefit analysis of including microsurfacing in pavement treatment strategies & cycle maintenance. Retrieved from.

– 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: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:10.1080/14680629.2019.1648311

– Rith, M., Kim, Y. K., & Lee, S. W. (2018). Behavior of RCC-base composite pavement for heavy duty area. *Construction and Building Materials*, 175, 144-151.

– Robati, M. (2012). Evaluation of a modification of current micro-surfacing mix design procedures. *École de technologie supérieure*.

– Rochlani, M., Canon Falla, G., Wellner, F., Wang, D., Fan, Z., & Leischner, S. (2020). Feasibility study of waste ceramic powder as a filler alternative for asphalt mastics using the DSR. *Road Materials and Pavement Design*, 1-13. doi:10.1080/14680629.2020.1778508

– Shafabakhsh, G., Rahmani, A., & Sadeghnejad, M. (2022). Evaluation the Effect of Different Kind of Waste and Mineral Filler

Treatment Containing Polypropylene Fibers. Quarterly Journal of Transportation Engineering, -. doi:10.22119/jte.2021.298308.2551

– Zulkati, A., Diew, W. Y., & Delai, D. S. (2012). Effects of fillers on properties of asphalt-concrete mixture. Journal of transportation engineering, 138(7), 902-910.

– Zulu, K., & Mukendi, K. K. (2018). An in-depth evaluation of micro-surfacing treatment. Civil Engineering Journal, 4(9), 2242-2251.

evaluation. Construction and Building Materials, 201, 303-313.

– Wozzuk, A., Wróbel, M., Bandura, L., & Franus, W. (2020). Brick Debris Dust as an Ecological Filler and Its Effect on the Durability of Asphalt Mix. Materials, 13(21), 5023.

– Xu, P., Chen, Z., Cai, J., Pei, J., Gao, J., Zhang, J., & Zhang, J. (2019). The effect of retreated coal wastes as filler on the performance of asphalt mastics and mixtures. Construction and Building Materials, 203, 9-17. doi:[10.1016/j.conbuildmat.2019.01.088](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.088)

– 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:[10.1016/j.jtte.2018.12.005](https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.12.005)

– Zhang, Y., Ma, T., Ling, M., & Huang, X. (2019). Mechanistic sieve-size classification of aggregate gradation by characterizing load-carrying capacity of inner structures. Journal of Engineering Mechanics, 145(9), 04019069.

– Zhou, Z., Gu, X., Jiang, J., Ni, F., & Jiang, Y. (2019). Fatigue cracking performance evaluation of laboratory-produced polymer modified asphalt mixture containing reclaimed asphalt pavement material. Construction and Building Materials, 216, 379-389.

– Ziari, H., Mahdizadeh, M. J., & Zalnejad, M. (2021). Experimental Performance Evaluation of Microsurfacing Surface Treatment Containing Polypropylene Fibers. Quarterly Journal of Transportation Engineering, -. doi:10.22119/jte.2021.298308.2551

– Ziari, H., Mahdizadeh, M. J., & Zalnezhad, M. (2021). Experimental Performance Evaluation of Microsurfacing Surface

حسن زیاری، درجه کارشناسی و کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران را در سال‌های ۱۳۶۵ و ۱۳۶۷ از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. در سال ۱۳۷۹ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی عمران- راه‌وترابری از دانشگاه علم‌وصنعت گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مدیریت نگهداری روسازی، طراحی روسازی، تکنولوژی قیر و آسفالت بوده و در حال حاضر عضو هیأت علمی با مرتبه استاد در دانشگاه علم و صنعت ایران است.



مهدی زال‌نژاد، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران و کارشناسی ارشد-گرایش راه‌وترابری را از دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل در سال‌های ۱۳۹۲ و ۱۳۹۶ اخذ نموده است. در حال حاضر دانشجوی دکتری عمران گرایش راه‌وترابری در دانشگاه علم‌وصنعت می‌باشد. به طور خاص، زمینه‌های اصلی تحقیقاتی ایشان رئولوژی چسباننده‌های قیری و امولسیون، تحلیل رفتاری آسفالت‌های سرد و حفاظتی، تعمیر و نگهداری پیشگیرانه روسازی راه و استفاده انواع مواد در ساختار مخلوط‌های آسفالتی است. در حال حاضر به عنوان مدیر فنی در شرکت عمارت گستر پیشگامان نوین فعالیت دارد.



الهه نصیری امیری، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۹۴ از دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل و درجه کارشناسی ارشد را در رشته مهندسی عمران گرایش راه‌وترابری در سال ۹۷ از دانشگاه علم‌وصنعت ایران اخذ نموده است. در حال حاضر، دانشجوی دکتری عمران گرایش راه‌وترابری در دانشگاه علم‌وصنعت ایران می‌باشد. به طور خاص زمینه‌های اصلی تحقیقاتی ایشان تحلیل و بررسی مواد ضایعاتی و بازیافتی در مخلوط آسفالتی گرم و سرد در جهت حفظ محیط‌زیست، بررسی رفتار خودترمیمی قیر و مخلوط آسفالتی به کمک روش‌های غیرذاتی خودترمیمی، تعمیر و نگهداری پیشگیرانه روسازی راه، و تحلیل رفتاری قیر و انواع مخلوط آسفالتی به روش آزمایشگاهی و آماری است. در حال حاضر او به عنوان دستیار آموزشی و تحقیقاتی در دانشگاه علم‌وصنعت ایران فعالیت دارد.



محمد علی زیاری، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۹۵ از دانشگاه تهران و درجه کارشناسی ارشد را در رشته مهندسی عمران گرایش راه‌وترابری در سال ۹۸ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر اخذ نموده است. در حال حاضر، دانشجوی دکتری عمران گرایش راه‌وترابری در دانشگاه تهران می‌باشد. به طور خاص زمینه‌های اصلی تحقیقاتی ایشان تحلیل و بررسی مواد ضایعاتی و بازیافتی در مخلوط آسفالتی گرم و سرد در جهت حفظ محیط‌زیست به روش آزمایشگاهی و آماری است. در حال حاضر او به عنوان استاد در دانشگاه پیام نور تهران شمال و دستیار استاد در دانشگاه تهران فعالیت دارد.

