

بررسی تأثیر پودر سرباره کوره آهنگدازی بر عملکرد آسفالت حفاظتی

اسلاری سیل

امیر ایزدی (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شمال، مازندران، آمل

E-mail: amirizadi60@gmail.com

ساسان شایگان، کارشناس ارشد گرایش راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شمال، مازندران، آمل

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

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۲۴

دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۳

چکیده

یکی از روش‌های مؤثر در تعمیر و نگهداری پیشگیرانه راه‌ها استفاده از آسفالت حفاظتی اسلاری سیل است. هدف این تحقیق بررسی به‌کارگیری پودر سرباره کوره آهنگدازی جایگزین فیلر معدنی مخلوط در طرح اختلاط اسلاری سیل جهت سنجش عملکرد آن است. در این رابطه، ابتدا مشخصات مصالح سنگی و پودر سرباره کوره آهن‌گدازی مورد بررسی قرار گرفت. سپس به منظور ارزیابی عملکرد مخلوط اسلاری سیل، از ۵ ترکیب مختلف حاوی صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد فیلر سرباره کوره آهنگدازی جایگزین فیلر مخلوط استفاده گردید. سنجش نمونه‌ها به واسطه آزمایش‌های چسبندگی مرطوب، چرخ بارگذاری شده و سایش در شرایط مرطوب مطابق با دستورالعمل *ASTM D3910* و *ISSA A105* انجام شد. نتایج نشان داد که مخلوط‌های حاوی فیلر پودر سرباره کوره آهنگدازی، موجب بهبود عملکرد اسلاری سیل می‌شوند. همچنین در میان مخلوط‌ها، مخلوط حاوی ۱۰۰ درصد سرباره نسبت به نمونه شاهد موجب افزایش چسبندگی در مدت‌زمان ۳۰ و ۶۰ دقیقه به ترتیب به میزان ۲۵،۰ و ۳۳/۳ درصد و کاهش قیر زدگی مخلوط به میزان ۵۱/۹ درصد گردید. این مخلوط نسبت به نمونه شاهد دارای ۱/۸۹ درصد قیر امولسیون بیشتر به منظور دستیابی به چسبندگی مناسب در زمان مشخص است.

واژه‌های کلیدی: اسلاری سیل، پودر سرباره کوره آهنگدازی، آزمایش چسبندگی مرطوب، مقاومت در برابر سایش، مقاومت در برابر

تغییر شکل

۱. مقدمه

آهنگدازی یک محصول جانبی از سنگ آهن، زغال سنگ و سنگ آهک است که در کوره بلند آهنگدازی برای تولید آهن خام بدست می‌آید. این محصول دارای سطح مخصوص بالا، خصوصیات قلیایی و غیر پلاستیکی است (Muniandy, Aburkaba, Hamid, & Yunus, 2009). فرآیند تولید آهن خام باعث تولید مقادیر زیادی از سرباره می‌شود. محصول سرد کردن آهسته آن، سرباره کوره بلند آهن سرد شده با هوا است که دارای میزان واکنش پذیری کمتری در مقایسه با سرباره کوره بلند دانه‌ای (سرد شده با آب) است. سرباره کوره بلند آهن سرد شده با هوا از تکه‌های کوچک حفره‌دار با گوشه‌های تیز تشکیل شده است (de Matos et al., 2020; Valcuende, Benito, Parra, & Miñano, 2015). سرباره‌های کوره بلند دانه‌ای دارای خواصی شامل سطح زیر و بافت سطحی حفره‌دار (منجر به بهبود چسبندگی و افزایش مقاومت لغزشی)، سازگاری بالا با قیر، بهبود در مقاومت خرابی‌های رطوبتی، عریان‌شدگی و وزن مخصوص پایین‌تر نسبت به سنگدانه‌های معدنی هستند (Airey, Collop, & Thom, 2004). بخش قابل توجهی از مواد پسماند سرباره‌های کوره بلند آهنگدازی قابلیت استفاده در پروژه‌های راه‌سازی و ساختمان‌سازی را دارند (M Arabani & Azarhoosh, 2012). استفاده پسماندها به‌عنوان بخشی از سنگدانه در صنعت راه‌سازی و روسازی از سویی می‌تواند باعث جلوگیری از انباشتگی مصالح دور ریز و آلودگی محیط‌زیست شود. از دیگر سو منجر به پایین آمدن هزینه تولید اولیه شده و خصوصیات مخلوط آسفالتی را بهبود می‌بخشد (Z. Chen et al., 2020; Ruíz-Ibarra, Rondón-Quintana, & Chaves-Pabón, 2020). به‌کارگیری این مواد در مخلوط آسفالتی نه‌تنها مدیریت ایمن پسماند را تضمین می‌کند بلکه صنعت راه‌سازی را به راهی برای ساخت‌وسازی زیست‌پایشی سوق می‌دهد (Z. Chen et al., 2020; Choudhary et al., 2020; Ruíz-Ibarra et al., 2020). در صورت محقق شدن این امر،

استخراج سنگدانه‌های طبیعی نگرانی‌های شدید زیست‌محیطی مانند جنگل‌زدایی، از بین رفتن چشم‌انداز طبیعی و تولید گردوغبار را ایجاد می‌کند. در بسیاری از مناطق، سنگدانه‌های طبیعی باکیفیت خوب در دسترس نیستند و حتی معادن سنگدانه‌های طبیعی نیز محدود شده است که باعث کمبود سنگدانه‌ها و افزایش کلی هزینه پروژه‌های بزرگراهی شده است (S.-H. Chen, Lin, Luo, & Lin, 2017; Pattanaik, Choudhary, Kumar, & Kumar, 2021). از سوی دیگر هر ساله مقدار زیادی از پسماندهای جامد صنعتی تولید شده که نه‌تنها حجم زیادی از زمین را اشغال کرده بلکه باعث بسیاری از مشکلات زیست‌محیطی می‌شوند (Dulaimi, Shanbara, & Al-Rifaie, 2020; Song et al., 2020). این پسماندها می‌توانند به دسته‌هایی شامل، پسماندهای صنعتی مانند انواع سرباره‌ها، خاکستر بادی، پسماندهای شهری و خانگی مانند پسماندهای شیشه، خرده‌های پلاستیک، پسماند معادن مانند انواع زغال سنگ و پسماندهای عملیات ساخت و تخریب مانند بتن‌ها و آسفالت‌های بازیافتی، طبقه‌بندی شوند (Ahmedzade & Sengoz, 2009; Puligilla & Mondal, 2013; Zhang, Li, Ma, & Wang, 2016). این پسماندها عمدتاً در مدفن زباله دپو شده که برای سلامت انسان و محیط‌زیست خطرناک بوده و سطح وسیعی را اشغال می‌کنند (Nasir, Johari, Maslehuddin, Yusuf, & Al-Harathi, 2020; Yang, Xia, Thompson, & Flower, 2017). دپوی بیش‌ازحد و عدم استفاده از پسماندها منجر به فقدان و کمبود زمین شده مضاف بر آنکه باعث آلودگی زمین و هوا می‌شوند (Choudhary, Kumar, & Gupta, 2020; Guo, Xie, Zheng, & Li, 2018; Shafabakhsh & Ahmadi, 2019). در گروه پسماندهای صنعتی سرباره کوره بلند آهنگدازی در مناطق مختلف جهان به فراوانی تولید می‌شود. سرباره کوره بلند

بررسی تأثیر پودر سرباره کوره آهنگدازی بر عملکرد آسفالت حفاظتی اسلاری سیل

فیلرهای طبیعی و معدنی از معادن سطح زمین برداشت شده و در مخلوط بکار برده می‌شوند که این استخراج بی‌رویه فیلرهای متداول باعث مشکلاتی از قبیل از بین رفتن پوشش گیاهی، پایین آمدن سطح آب زیرزمینی و اختلال در اکوسیستم موجود می‌شود (Choudhary et al., 2020; Robinson Jr, Menzie, & Hyun, 2004) میزان بهینه استفاده از مواد پسماند به‌عنوان بخشی از سنگدانه علاوه بر آنکه برای محیط‌زیست سودمند است، می‌تواند در عملکرد مخلوط‌های آسفالتی و بتنی نیز مفید واقع شود (Choudhary et al., 2020). در این خصوص مطالعاتی توسط پژوهشگران در استفاده از سرباره کوره بلند انجام شده است. الیس و همکاران (۲۰۰۴) در مقاله‌ای به ارزیابی خصوصیات مخلوط قیر امولسیون حاوی سرباره با سنگدانه‌های بازیافتی پرداختند. در این پژوهش با اضافه کردن سرباره کوره بلند دانه‌ای به مخلوط قیر امولسیون به این نتیجه دست یافتند که این ماده عملکرد درازمدت و مکانیکی مخلوط را در مقایسه با مخلوط شاهد بهبود بخشیده است (Ellis, Zhao, Barnes, & Jones, 2004). در پژوهشی از ولکونده و همکاران (۲۰۱۵) ارزیابی بتن خود متراکم حاوی سرباره کوره بلند آهنگدازی به‌عنوان درصدی از جایگزین ریزدانه صورت گرفت. نتایج نشان داد مقاومت فشاری بتن با سرباره در سنین اولیه مشابه با بتن با سنگدانه رودخانه‌ای بوده ولی مقاومت فشاری در سنین بالاتر با افزایش جایگزینی سرباره با ذرات ریزدانه، افزایش می‌یابد (Valcuende et al., 2015). ناصر و همکارانش (۲۰۱۶) در پژوهشی از ترکیب فیلر سرباره کوره بلند دانه‌ای و خاکستر بادی در مخلوط آسفالت سرد امولسیونی استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد استفاده از این مواد به طرز چشمگیری باعث افزایش سختی خزشی شده که برای استفاده در ترافیک سنگین مناسب است (Nassar, Mohammed, Thom, & Parry, 2016). در دیگر مطالعه ایبارا و همکارانش (۲۰۱۹) رفتار مخلوط آسفالتی گرم شامل سرباره کوره بلند مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور آزمایش‌های

استفاده این سرباره‌ها نه تنها به کاهش مشکلات آلودگی محیط‌زیست منجر می‌شود، بلکه استفاده از آن باعث کاهش استفاده از منابع طبیعی نیز می‌شود. بنابراین پیدا کردن فنی مناسب برای ارزش افزایی آن ضروری است (Chandru, Karthikeyan, Sahu, Sharma, & Natarajan, 2021; Farooq, Sato, Ayano, & Niitani, 2017).

یکی از راه‌های مورد استفاده از سرباره استفاده از آن در آسفالت حفاظتی اسلاری سیل است. یکی از مؤثرترین روش‌ها که به‌طور وسیعی در نگهداری پیشگیرانه، حفاظت روسازی‌ها و به تأخیر انداختن خرابی سطح راه، حفظ و ارتقای شاخص خدمت‌رسانی روسازی‌ها استفاده می‌شود، استفاده از اسلاری سیل است. استفاده از آسفالت‌های دیگر ضمن آن‌که موجب افزایش هزینه‌های اجرایی و طولانی شدن انجام پروژه‌ها می‌شود، باعث افزایش رقوم سطح راه نیز می‌گردد که خود مشکلات دیگری نظیر اختلاف ارتفاع با سطح شانه راه و کاهش ارتفاع حفاظ‌های ایمنی کناره راه‌ها و آزادراه‌ها را به دنبال دارد. اسلاری سیل مخلوطی از مصالح ریزدانه، قیر امولسیون، آب، فیلر معدنی و افزودنی‌های مناسب با نسبت وزنی مشخص بوده که بر روی سطح آماده‌شده ریخته و پخش شده و به‌صورت تک لایه اجرا می‌شود. این نوع آسفالت سرد برای درزگیری سطح روسازی‌های آسفالتی، ترمیم زبر شدگی سطحی با شدت کم، درزگیری ترک‌های کوچک و افزایش میزان اصطکاک سطحی کاربرد داشته که برای گبرایی کامل نیاز به هوای گرم و خشک قبل از قرار گرفتن در شرایط بارندگی دارد. استفاده از آن در مکان‌هایی که مشکل اصلی روسازی اکسیداسیون یا سخت شدگی بیش‌ازحد سطح روسازی است، مؤثر است (Gransberg, Board, & Program, 2010). به‌کارگیری مواد سرباره کوره آهنگدازی به‌عنوان فیلر به‌جای فیلرهای متداول استخراج شده از سنگدانه‌های طبیعی و به‌عنوان بخشی از سنگدانه در طرح اختلاط، به‌طور قابل‌توجهی باعث کم شدن آلاینده‌گی محیط‌زیست در فرآیند ساخت‌وساز می‌شود (Choudhary et al., 2020). به این دلیل که

مقرون به صرفه محسوب شده و می‌تواند کمکی به مدیریت پسماند باشد. لذا در این تحقیق با ساخت نمونه‌هایی از مخلوط اسلاری سیل، به بررسی اثر افزودن درصد‌های مختلف فیلر سرباره کوره بلند بر خواص این نوع از آسفالت، پرداخته شده است. در این راستا، ابتدا مشخصات فیزیکی و شیمیایی مصالح سنگی و سرباره کوره بلند مورد ارزیابی قرار گرفته و سپس به منظور ارزیابی عملکرد مخلوط اسلاری سیل حاوی سرباره، ۵ ترکیب مختلف حاوی صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد سرباره جایگزین فیلر تهیه شد. سنجش نمونه‌های آسفالتی به واسطه آزمایش‌های چسبندگی، چرخ بارگذاری شده و سایش در شرایط مرطوب مطابق با دستورالعمل ISSA A105 و استاندارد ASTM D3910 انجام شد.

۲. مواد و مصالح

آسفالت حفاظتی اسلاری سیل مطابق ISSA A105 شامل قیر امولسیون کاتیونی، مصالح صد درصد شکسته، آب و فیلر فعال معدنی (معمولاً سیمان) است. هرکدام از مواد مطابق با استاندارد، بایستی دارای ویژگی‌هایی مشخصی باشند که در ادامه بررسی می‌گردد (ASTM D3910, 2015; ISSA A105, 2020).

۲-۱ مصالح سنگی

انتخاب سنگدانه مناسب به علت مواجهه مستقیم با بار ترافیک و شرایط آب و هوایی، یکی از بخش‌های مهم در طرح اختلاط اسلاری سیل است (Apaza, Guimarães, Vivoni, & Schroder, 2021; Esfahani & Khatayi, 2020). داشتن مخلوطی با مقاومت بالا و عملکرد مناسب باید از سنگدانه‌هایی با کیفیت بالا، شکسته و خوب دانه‌بندی شده استفاده کرد (Zulu & Mukendi, 2018). در این پژوهش مصالح سنگی کوهی (کارخانه چالدران، مازندران) در اندازه ۰-۵ میلی‌متر و پودر سرباره کوره بلند دانه‌ای (کارخانه ذوب‌آهن اصفهان، اصفهان) مورد استفاده واقع شد. از منظر دانه‌بندی، دانه‌بندی نوع II استفاده گردیده و محدوده آن مطابق جدول ۱

فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال چهاردهم / شماره سوم (۵۶) / بهار ۱۴۰۲

استقامت مارشال، سختی، مقاومت کششی غیرمستقیم در شرایط خشک و اشباع اعمال شد. نتایج نشان داد که مخلوط آسفالتی گرم شامل ۱۲/۵ درصد سرباره جایگزین درشت‌دانه باعث افزایش چشمگیری در سختی تحت بار یکنواخت یا بارهای دوره‌ای شده و همچنین منجر به افزایش مقاومت در برابر خرابی‌های رطوبتی و تغییر شکل‌های دائمی در مقایسه با نمونه شاهد مخلوط آسفالتی داغ می‌شود (Ruíz-Ibarra et al., 2020). در تحقیقی دیگر کوییتانا و همکارانش (۲۰۱۸) به بررسی سرباره کوره بلند آهنگدازی جایگزین شده با ریزدانه در مخلوط آسفالتی پرداختند. در این پژوهش یک نمونه شاهد و دو نمونه مخلوط حاوی ۱۲/۵ و ۱۹/۵ درصد سرباره جایگزین ریزدانه استفاده شد. خصوصیات مکانیکی مخلوط آسفالتی با آزمایش‌های مقاومت کششی غیرمستقیم، مدول برجهندگی، تغییر شکل دائمی، مقاومت در برابر خستگی و خرابی‌های رطوبتی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد بهترین عملکرد تحت بارهای یکنواخت و دوره‌ای و مقاومت در برابر خرابی‌های رطوبتی متعلق به مخلوط شامل ۱۲/۵ درصد سرباره است. محققین در این مطالعه اظهار داشتند که استفاده از ذرات ریزدانه سرباره منجر به افزایش سختی و بهبود مقاومت در برابر تغییر شکل‌های دائمی و افزایش چسبندگی بین سنگدانه و قیر خواهد شد (Rondón-Quintana et al., 2018). بنابراین، ضایعات سرباره کوره بلند را می‌توان در مخلوط آسفالت برای بازیافت این مواد مورد استفاده قرار داد. این رویکرد نه تنها مقدار این پسماند را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد، بلکه ممکن است مصرف سنگدانه‌های طبیعی و فیلر را به‌عنوان منابع غیر تجدید پذیر کاهش دهد (Patel & Bhavsar, 2016).

تأثیر مهم سرباره کوره بلند در بتن و مخلوط‌های گرم آسفالتی مورد مطالعه قرار گرفته است اما مطالعات محدودی در اثربخشی آن در مخلوط‌های آسفالتی سرد به‌خصوص اسلاری سیل، انجام شده است. یکی از اهداف این تحقیق ارائه آسفالت حفاظتی است که در مصرف انرژی و در مدیریت تعمیر و نگهداری گزینه‌ای

بررسی تأثیر پودر سرباره کوره آهنگدازی بر عملکرد آسفالت حفاظتی اسلاری سیل

آهنگدازی پس از انجام آزمایش XRF به شرح جدول ۳ است. همانطور که از نتایج جدول ۳ مشخص است، مصالح مورد استفاده در این پژوهش از نوع کلسیتی بوده (حاوی ۸۹/۹ درصد CaO) و پودر سرباره نیز دارای مقدار قابل توجهی از اکسید سیلیس (به میزان ۳۸/۶ درصد) نسبت به مصالح معدنی است.

است. این نوع دانه بندی به دلیل وجود ریزدانه بیشتر در مقایسه با نوع III صدای کمتری داشته و استفاده از آن در مکان های شهری و مسکونی مناسب است (Esfahani & Khatayi, 2020; Zulu & Mukendi, 2018). ویژگی سنگدانه های مخلوط پس از آزمایش در این پژوهش در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین ترکیب شیمیایی سنگدانه و پودر سرباره کوره

جدول ۱. دانه بندی مصالح سنگی اسلاری سیل

اندازه الک	درصد عبور کرده از الک
۴/۷۵ میلی متر (شماره ۴)	حد وسط دانه بندی نوع II دستورالعمل ISSA A105
۲/۳۶ میلی متر (شماره ۸)	محدوده نوع II دستورالعمل ISSA A105
۱/۱۸ میلی متر (شماره ۱۶)	
۶۰۰ میکرون (شماره ۳۰)	
۳۰۰ میکرون (شماره ۵۰)	
۱۵۰ میکرون (شماره ۱۰۰)	
۷۵ میکرون (شماره ۲۰۰)	

جدول ۲. خصوصیات مصالح سنگی

آزمایش ها	استاندارد	درشت دانه	ریزدانه	مشخصات مطابق 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 ماسه ای مصالح ریزدانه و خاک ها	ASTM D2419	۶۴٪		حداقل ۴۵٪
سلامت مصالح با سولفات سدیم	ASTM C88	۴٪		حداکثر ۱۵٪
مقاومت سایشی در ماشین لس آنجلس	ASTM C131	۲۰٪		حداکثر ۳۵٪

جدول ۳. ترکیب شیمیایی سنگدانه و پودر سرباره کوره آهنگدازی

نوع مواد	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	MnO	SiO ₂	K ₂ O	TiO ₂	Na ₂ O	SrO
مصالح کوهی	۰/۲۷	۱/۰۳	۱/۱۲	۸۹/۹	۱/۸۶	۳۰۰ppm	۴/۹۷	۸۰۰ppm	۰/۱۷	-	۰/۲۲
سرباره کوره آهنگدازی	۰/۲۴	۰/۳۳	۵/۲۲	۴۰/۹۰	۹/۱۱	۱/۲۲	۳۸/۵۶	۱/۰۴	۰/۸۴	۱/۶۷	-

۲-۲ قیر امولسیون

در این تحقیق در تمامی مخلوط‌ها از قیر امولسیون کاتیونی مطابق با توصیه ASTM D3910 استفاده گردید. حداقل مقدار قیر باقیمانده بر اساس وزن جامد قیر در قیر امولسیون کاتیونی بر اساس دستورالعمل JSSA A105، ۵۷ درصد است. به منظور ساخت قیر امولسیون، قیر با رده نفوذ ۷۰-۶۰ به مقدار ۶۰ درصد در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد با ۴۰ درصد محلول سوپ حاوی ۳۷ درصد آب، ۱ درصد اسید HCL و ۲ درصد امولسیفایر

CSS در دستگاه امولسیون ساز آزمایشگاهی با سرعت ۲۸۴۰ دور بر دقیقه مورد اختلاط قرار گرفت. این روش تولید قیر امولسیون مطابق استاندارد ASTM D2397 و پژوهش‌های صورت گرفته دیگر محققان انجام شده است (Abedini, Hassani, Kaymanesh, Yousefi, & Abedini, 2020; Esfahani & Khatayi, 2020). همچنین مشخصات امولسیفایر و قیر امولسیون تولیدی پس از آزمایش در این تحقیق به ترتیب مطابق با جداول ۴ و ۵ است.

جدول ۴. مشخصات قیر امولسیون کاتیونی

آزمایش	روش آزمایش	نتیجه‌ی آزمایش	رواداری قابل پذیرش
کندروانی سی بولت- فورل در دمای ۲۵°C، ثانیه	AASHTO T59	۲۲	۲۰-۱۰۰
نشست (پایداری) در انبار کردن قیر امولسیون، ۲۴ ساعت، %	ASTM D6930	۰/۴	حداکثر ۱
تقطیر قیر امولسیون، جرم وزنی %	ASTM D7497	۶۰	حداقل ۵۷
الک، %	ASTM D244	۰/۰۲	حداکثر ۰/۱
اندود، %	AASHTO T59	۹۸	-
بار ذرات	AASHTO T59	مثبت	مثبت
آزمایش‌های بر روی قیر باقی‌مانده از تقطیر قیر امولسیون			
نقطه نرمی قیر با آزمایش حلقه و گلوله، درجه سانتی‌گراد	ASTM D36	۵۵*	-
درجه نفوذ در ۲۵°C، ۱۰۰ گرم، ۵ ثانیه	ASTM D5	۶۲*	۴۰-۹۰

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

جدول ۵. مشخصات امولسیفایر CSS

ویژگی	مشخصه
ظاهر (در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد)	مایع ویسکوز
مقدار آمین، mgKOH/g	۴۷۰
آب، %	۱
نقطه انجماد، درجه سانتی‌گراد	۱۴
ویسکوزیته در ۲۵ درجه سانتی‌گراد، سانتی پوز	کمتر از ۸۰۰

۲-۳ سیمان پرتلند

از جمله فیلرهای فعال معدنی که می‌توان در مخلوط اسلاری سیل استفاده کرد، سیمان پرتلند، آهک هیدراته، خاکستر بادی و غیره است. این مواد چسبندگی مخلوط را نیز افزایش داده و جدایی

مصالح سنگی را به حداقل می‌رساند. در واقع یون‌های هیدروکسل موجود در فیلرهای فعال معدنی با یون‌های قیر امولسیون واکنش داده و باعث می‌شوند تا قیر امولسیون سریع‌تر شکسته شده و عمل‌آوری مخلوط اسلاری سیل سریع‌تر انجام شود (A. Wang, Shen, Li, & Song, 2019). استفاده از سیمان به میزان مناسب، به‌عنوان کنترل‌کننده‌ای برای زمان شکست قیر امولسیون است. در این پژوهش از سیمان پرتلند مطابق مشخصات جدول ۶ و به میزان ۱٪ برای بهبود خصوصیات مخلوط به‌عنوان فیلر معدنی فعال در اسلاری سیل استفاده شد.

بررسی تأثیر پودر سرباره کوره آهن‌گدازی بر عملکرد آسفالت حفاظتی اسلاری سیل

جدول ۶. مشخصات فیزیکی و مکانیکی سیمان

مقدار	مشخصات فیزیکی
۳/۱۴	وزن مخصوص، gr/cm^3
۳۲۵۰	سطح ویژه (آزمایش بلین)، cm^2/g
۰/۱	انبساط اتوکلاو، %
۱۷۰	زمان عمل‌آوری اولیه (آزمایش ویکات)، دقیقه
۳/۵	زمان عمل‌آوری نهایی (آزمایش ویکات)، ساعت
مشخصات مکانیکی	
۳۹۵	مقاومت فشاری ۷ روزه، kg/cm^2
۵۰۵	مقاومت فشاری ۲۸ روزه، kg/cm^2

۴-۲ آب

منظور از آب، آبی است که در هنگام هم زدن مخلوط اضافه شده و علاوه بر آبی است که در قیر امولسیون وجود دارد. آب اضافه شده هیدراسیون سیمان را تسریع کرده و باعث پوشش بهتر مصالح و بهبود کارایی مخلوط می‌شود. (Kumar & Ryntathiang, 2016; A. Wang et al., 2019). آب مورد استفاده باید تمیز و عاری از مواد مضر مانند نمک‌ها و سولفات‌ها باشد چراکه ممکن است باعث ایجاد واکنش‌های شیمیایی ناخواسته در مخلوط شود (Bista, 2020). آب مورد استفاده در این تحقیق برای رسیدن به کارایی مناسب، آب شرب بوده که در تمامی مخلوط‌های اسلاری سیل استفاده گردید.

۳. طرح اختلاط و آزمایش‌ها

۳-۱ طرح اختلاط

در این تحقیق پودر سرباره کوره آهن‌گدازی به‌عنوان جایگزین فیلر در درصد‌های ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ در مخلوط‌های اسلاری سیل مورد استفاده واقع شد. درجه‌بندی هریک از مخلوط‌های اسلاری سیل در جدول ۷ آورده شده است. طراحی اسلاری سیل و آزمایش‌های مرتبط با آن به ترتیب در دستورالعمل و آیین‌نامه ASTM D3910 و ISSA A105 ارائه شده است. در طراحی مخلوط‌های اسلاری سیل پس از انتخاب مصالح

سنگی و قیر امولسیونی مناسب سازگار با سنگدانه، آزمایش‌های لازم مطابق با استاندارد ASTM D3910 بر روی مصالح انجام گرفته و الزامات مربوط به آن مورد بررسی قرار می‌گیرند. پس از برآورده شدن الزامات مصالح، طرح اختلاط و ارزیابی عملکرد مخلوط‌ها با آزمایش‌های زمان اختلاط، چسبندگی مرطوب، سایش در شرایط مرطوب، تعیین حداکثر قیر به‌وسیله چرخ بارگذاری شده - چسبندگی ماسه و ارزیابی میزان تغییر عمودی و جانبی با چرخ بارگذاری شده انجام می‌شود (Izadi, Zalnezhad, Bozorgi Makerani, & Zalnezhad, 2020; Keymanesh, Ziari, Zalnezhad, & Zalnezhad, 2020). در تعیین مقدار بهینه قیر امولسیون،

به‌منظور بدست آوردن محدوده مجاز قیر امولسیون و تعیین حداقل و حداکثر آن به ترتیب نتایج آزمایش‌های سایش در شرایط مرطوب و آزمایش چرخ بارگذاری شده-چسبندگی ماسه مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به الزامات دستورالعمل ISSA A105، اگر اختلاف بین حداقل و حداکثر قیر بیشتر از ۳٪ باشد، مقدار بهینه قیر امولسیون در وسط دامنه ۳ درصدی از بیشترین مقدار تعیین شده برای قیر باقی‌مانده است. همچنین، اگر مقدار حداقل و حداکثر قیر باقی‌مانده کمتر از ۳٪ باشد، مقدار بهینه قیر امولسیون با توجه به الزام‌های حداقل و حداکثر قیر، وسط دامنه مورد نظر انتخاب می‌گردد (Zalnezhad & Hesami, 2020). مقادیر مجاز هریک از آزمایش‌ها در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول ۷. درجه‌بندی مخلوط‌های اسلاری سیل حاوی درصد‌های

مختلف فیلر سرباره کوره آهنگدازی

نوع مخلوط	فیلر سرباره کوره آهنگدازی جایگزین فیلر مخلوط شاهد، %
A	۰
B	۲۵
C	۵۰
D	۷۵
E	۱۰۰

جدول ۸. مقادیر مجاز آزمایش‌های اسلاری سیل (ISSA A105, 2020)

شماره استاندارد	مقدار مجاز	آزمایش
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)

(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 (Hesami, Ataollahi, & Sadeghi, 2020). این آزمون مطابق با ISSA TB 113 و مطابق با حدود مواد تشکیل‌دهنده اسلاری سیل ارائه شده در جدول ۹، 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. در این آزمایش مدت زمان شکستن مخلوط در اثر اختلاط به‌عنوان زمان اختلاط معرفی شده که بایستی حداقل ۱۸۰ ثانیه باشد. به‌صورت جامع‌تر

۳-۲ آزمایش‌ها

۳-۲-۱ 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 (Nishant Bhargava, Anjan Kumar Siddagangaiah, & Teiborlang L Ryntathieng, 2020). هنگام ساخت آسفالت سرد حفاظتی باید زمان کافی جهت پخش کردن توسط دستگاه وجود داشته و مخلوط بلافاصله پس از آن نشکند

بررسی تأثیر پودر سرباره کوره آهنگدازی بر عملکرد آسفالت حفاظتی اسلاری سیل

بدست آمده پس از ۳۰ و ۶۰ دقیقه و عمل آوری در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، مخلوط مناسب جهت بازگشایی ترافیک انتخاب می‌شود. حداقل مقادیر چسبندگی به‌منظور ارزیابی خاصیت شکنندگی قیر امولسیون در مدت‌زمان ۳۰ دقیقه و بازگشایی ترافیک در مدت‌زمان ۶۰ دقیقه به ترتیب ۱۲ کیلوگرم- سانتی‌متر و ۲۰ کیلوگرم- سانتی‌متر است.

برای انجام این آزمایش، مخلوط‌ها در قالب حلقه‌ای متناسب با دانه‌بندی نوع II ریخته شده و مرکز به مرکز یک پوشش نمدی در دمای اتاق قرار داده می‌شوند. هنگامی که نمونه‌ها به اندازه کافی سفت شدند، قالب دور نمونه‌ها برداشته می‌شود. پس از اینکه گیرش نمونه‌ها حاصل شد، در دستگاه چسبندگی قرار گرفته و از طریق سیلندر دستگاه با فشاری معادل ۱۹۳ کیلو پاسکال تحت پیچش قرار می‌گیرد. سپس در فواصل زمانی مناسب، میزان پیچش بدست آمده که در ارتباط با چسبندگی مخلوط تعریف‌شده قرائت می‌شود (Nishant Bhargava, Anjan Kumar Siddagangaiah, & Teiborlang Lyngdoh Ryntathiang, 2020). نتیجه این آزمایش منجر به شناسایی زمان مناسب جهت بازگشایی ترافیک بر روی مخلوط‌های اسلاری سیل می‌شود (ISSA, 2017d). نمایی از دستگاه ارزیابی چسبندگی و نمونه‌ها در شکل ۱ ارائه شده است.

در بیش از این زمان، مخلوط دیگر نمی‌تواند به‌صورت همگن مخلوط شود (ISSA, 2017e). هنگامی که زمان اختلاط در طرح اختلاط مخلوط مورد تأیید قرار گرفت نمونه برای آزمایش چسبندگی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (Poursoltani & Hesami, 2020).

جدول ۹. حدود مواد تشکیل‌دهنده اسلاری سیل (ISSA A105, 2020)

مواد	حدود پیشنهادی نسبت به وزن خشک مصالح
تشکیل‌دهنده	سنگی
قیر باقی‌مانده	۷/۵ تا ۱۳/۵ درصد
فیلر معدنی	۰ تا ۳ درصد
آب	به میزان لازم برای ایجاد غلظت مناسب در مخلوط
۳-۲-۲	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). از دستگاه آزمایش چسبندگی برای اندازه‌گیری زمان عمل‌آوری استفاده می‌شود. بر اساس نتایج



ب



الف

شکل ۱. الف- نمایی از دستگاه آزمایش چسبندگی ب- نمونه‌ها بعد از عمل‌آوری



شکل ۲. نمایی از دستگاه آزمایش WTAT و نمونه‌های ساخته شده این آزمایش

ثبت می‌گردد. در مرحله بعد، مطابق دستورالعمل ISSA A105، ماسه اتاوا در دمای ۸۲ درجه سانتی‌گراد در آن قرار گرفته و سپس به صورت یکنواخت بر روی نمونه در محل شیار ایجاد شده، پخش می‌شود. در این حالت ۱۰۰ سیکل بارگذاری مشابه حالت قبل جهت تراکم نمونه انجام می‌گردد. در ادامه نمونه از جای موردنظر خارج شده و دوباره وزن می‌شود. اختلاف بین وزن اندازه‌گیری شده و وزن اولیه پس از ۱۰۰۰ سیکل تراکم به عنوان مقدار ماسه‌ای که چسبیده است، گزارش می‌گردد. بدین ترتیب حداکثر مقدار مجاز قیر باقی مانده در هریک از مخلوط‌ها تعیین می‌شود (ISSA, 2017a).

۳-۲-۵ 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 ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری چرخ ۵۶/۷ کیلوگرم متراکم شده و سپس عرض و ضخامت نمونه، قبل و بعد از تراکم با ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری، در مسیر چرخ و در وسط طول نمونه اندازه‌گیری می‌گردد. تغییر مکان عمودی و جانبی نمونه‌ها نبایستی به ترتیب از ۱۰ و ۵ درصد تجاوز نماید (ISSA,

۳-۲-۳ آزمایش سایش در شرایط مرطوب

در این آزمایش حداقل مقدار قیر امولسیون مورد نیاز جهت جلوگیری از بروز خرابی شن‌زدگی اندازه‌گیری شده و مقدار از دست رفتن سنگدانه نمونه‌های ساخته شده، بعد از سایش با لوله لاستیکی نیز مشخص می‌شود. در روند این آزمایش یک نمونه از مخلوط اسلاری سیل، عمل‌آوری شده در آن در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت حداقل ۱۵ ساعت، وزن شده و سپس در مدت زمان ۱ ساعت در آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد غوطه‌ور می‌شود. سپس با یک نوار لاستیکی در شرایط غوطه‌وری در آب به روش چرخشی به مدت ۵ دقیقه تحت عمل سایش قرار می‌گیرد. در نهایت نمونه سایش یافته در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک و سپس وزن شده تا مقدار هدرروی سنگدانه‌ها مشخص گردد (ISSA, 2017c). دستگاه آزمایش سایش در شرایط مرطوب و نمونه‌های آن در شکل ۲ ارائه شده است.

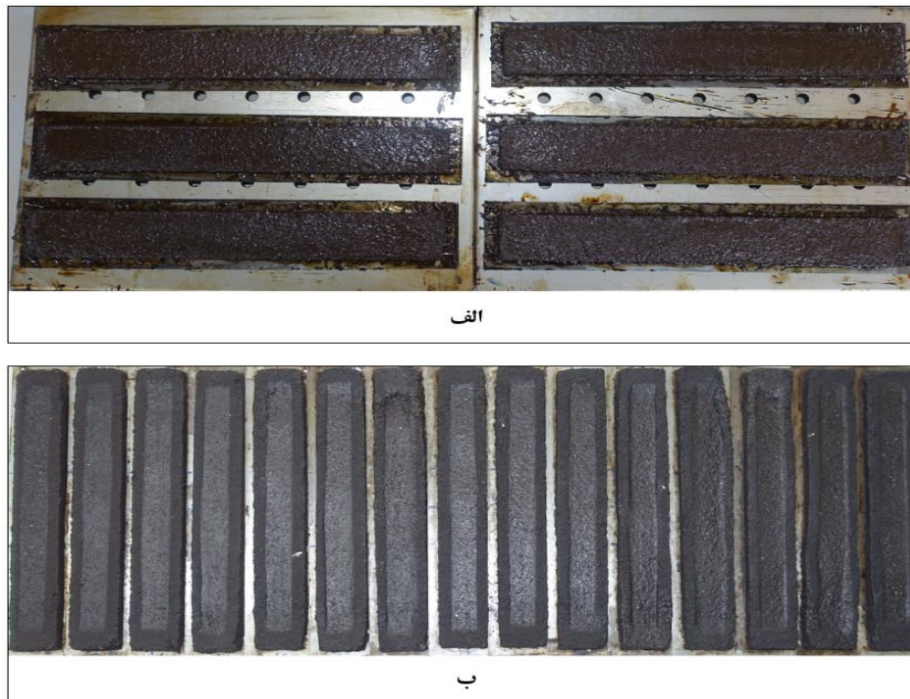
۳-۲-۴ آزمایش چرخ بارگذاری شده -

چسبندگی ماسه

در این آزمایش حداکثر قیر جهت جلوگیری از خرابی قیر زدگی مخلوط‌های اسلاری سیل، تعیین می‌شود. در این آزمایش مخلوط‌ها با چرخ بارگذاری ۵۶/۷ کیلوگرمی طی ۱۰۰۰ سیکل متراکم شده و سپس مخلوط وزن شده و وزن اندازه‌گیری شده

(2017b). نمایی از نمونه‌های آزمایش چرخ بارگذاری شده در

شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. نمونه‌های ساخته شده چرخ بارگذاری (الف- نمونه‌ها قبل از عمل‌آوری ب- نمونه‌ها بعد از عمل‌آوری و ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری)

جدول ۱۰. آزمایش زمان اختلاط برای مخلوط‌های اسلاری سیل

E		D		C		B		A		نوع مخلوط					
۹	۸/۵	۸	۹	۸/۵	۸	۹	۸/۵	۸	۹	۸/۵	۸	درصد قیر باقی‌مانده			
۱۱	۱۱/۵	۱۱/۵	۱۰	۱۱	۱۱/۵	۱۰	۱۰	۱۰/۵	۸	۹/۵	۹/۵	۷/۵	۸/۵	۹/۵	درصد آب
۱۸۸	۱۸۷	۱۸۵	۱۸۸	۱۸۷	۱۸۵	۱۸۸	۱۸۶	۱۸۹	۱۸۸	۱۸۷	۱۸۶	۱۸۸	۱۹۰	۱۸۹	زمان اختلاط بدست آمده

نشان داد با افزایش درصد سرباره به دلیل جذب آب بیشتر توسط آن، مقدار آب برای رساندن زمان اختلاط به محدوده دستورالعمل ISSA افزایش یافت. دلیل این امر آن است که خصوصیات فیزیکی مانند شکل ظاهری فیلر بر خصوصیات مخلوط تأثیرگذار بوده و فیلسرباره به دلیل ساختار متخلخل و منافذ بالا باعث کاهش کارایی و مصرف بیشتر آب در انواع مخلوط‌های آسفالتی می‌شود. این موضوع، با تحقیق دیگر پژوهشگران نیز مطابقت دارد (M. Chen, Lin, & Wu, 2011; Melotti, Santagata, Bassani, Salvo, & Rizzo, 2013;

۴. نتایج و بحث

۴-۱ آزمایش زمان اختلاط

در جدول ۱۰ مقادیر اولیه قیر امولسیون در سه سطح، مقادیر مناسب سیمان و آب اضافه شده به مخلوط، مشخص گردیده است. زمان اختلاط حداقل ۱۸۰ ثانیه مطابق ISSA TB113 برای هریک از مخلوط‌ها حاوی درصدهای مختلف از قیر امولسیون و سرباره، موردبررسی واقع شد. نتایج این آزمایش

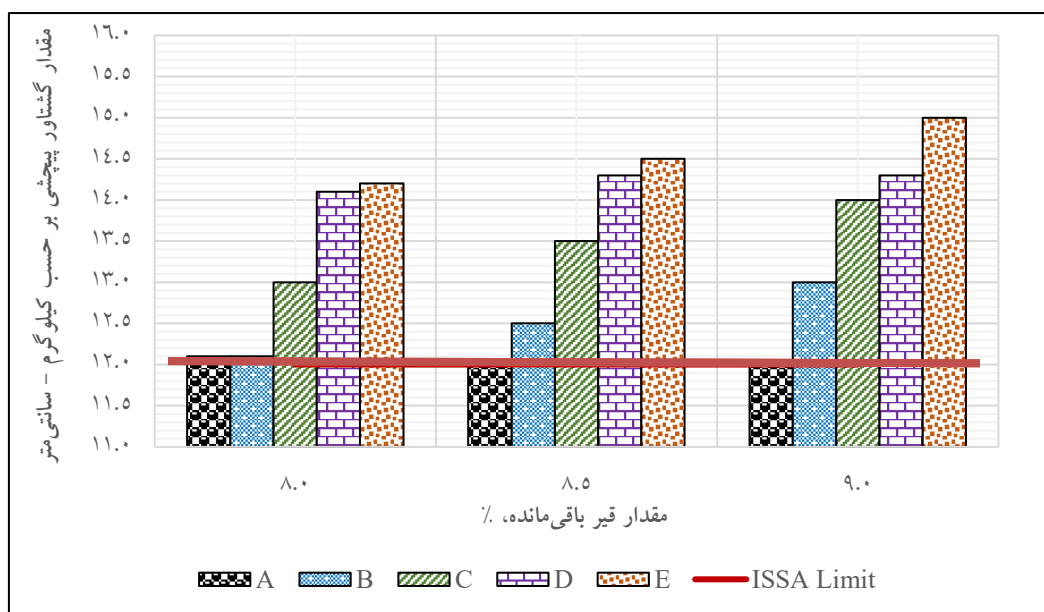
Ozbakkaloglu et al., 2016; Rondón-Quintana et al., 2018; H. Wang et al., 2011

۲-۴ آزمایش چسبندگی مرطوب

نتایج آزمایش چسبندگی مرطوب در زمان‌های ۳۰ و ۶۰ دقیقه مخلوط‌های اسلاری سیل در گراف‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. با توجه به نتایج حاصله، تمامی مخلوط‌ها گیرش و مقاومت لازم برای بازگشایی ترافیک به ترتیب در مدت‌زمان ۳۰ دقیقه و ۱ ساعت را کسب کرده و مخلوط E در مقدار قیر باقی‌مانده ۹ درصد، دارای بیشترین مقدار گشتاور پیچشی (متناظر با چسبندگی) نسبت به سایر مخلوط‌ها است. به‌عنوان نمونه در قیر باقی‌مانده ۹ درصد، مخلوط‌های B، C، D و E نسبت به نمونه شاهد A به ترتیب موجب افزایش چسبندگی به قیر در مدت‌زمان ۳۰ دقیقه به میزان ۸/۳، ۱۶/۷، ۱۹/۲ و ۲۵/۰ درصد و در مدت‌زمان ۱ ساعت به میزان ۴/۸، ۱۹/۰، ۲۸/۶ و ۳۳/۳ درصد شده است. در مدت‌زمان ۱ ساعت در مخلوط شاهد (A) با افزایش مقدار قیر باقی‌مانده از ۸ به ۸/۵ درصد، مقدار چسبندگی کاهش یافته و سپس با افزایش قیر به ۹ درصد، مقدار چسبندگی بدون تغییر باقی می‌ماند. بنابراین می‌توان این‌طور استنباط کرد با

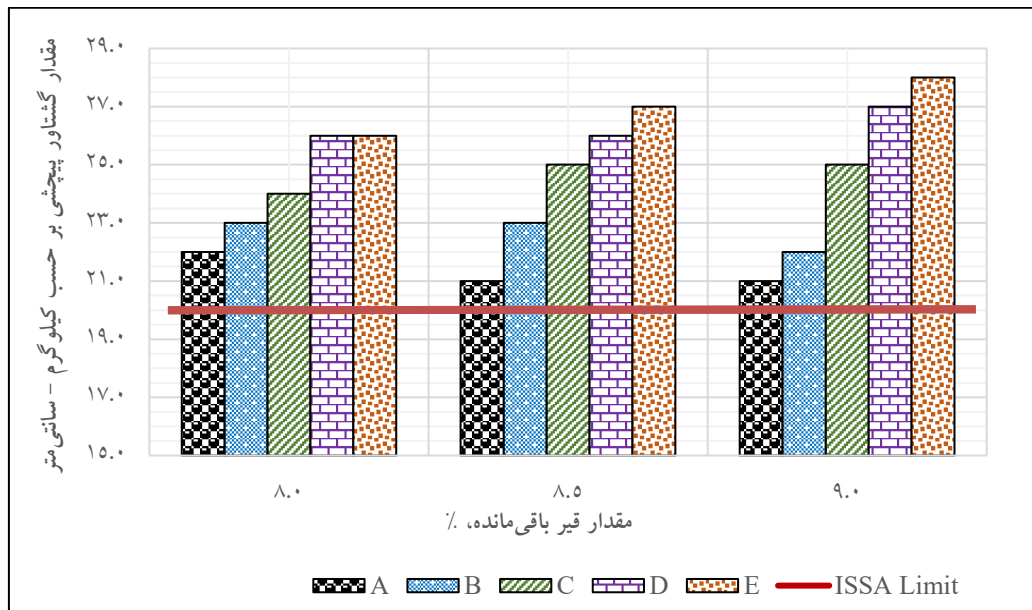
افزایش درصد قیر در نمونه شاهد (مخلوط A) در مدت‌زمان ۱ تأثیر در افزایش میزان چسبندگی نداشته است. این در حالی است که در نمونه‌های حاوی سرباره، با افزایش میزان سرباره و مقدار قیر، مقدار چسبندگی مخلوط‌ها افزایش یافته است.

بر اساس آنالیز XRF پودر سرباره کوره آهن‌گدازی قسمت قابل‌توجهی 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 سرباره با قیر امولسیون کاتیونی پیوند خوبی بین آن‌ها شکل گرفته و موجب افزایش چسبندگی در مخلوط آسفالتی می‌شود (Brown et al., 2009; Zhou, Xu, Masliyah, & Czarnecki, 1999). همچنین تیز گوشه بودن سرباره و زاویه اصطکاک بالای سرباره منجر به قفل و بست خوب سنگدانه‌ها نسبت به یکدیگر شده و باعث استحکام بیشتر و چسبندگی بهتر سنگدانه‌ها و قیر با یکدیگر می‌شود (Mahyar Arabani, Tahami, & Taghipoor, 2017; Choudhary et al., 2020; G. C. Wang, 2016).



شکل ۴. نتایج آزمایش چسبندگی مرطوب در ۳۰ دقیقه

بررسی تأثیر پودر سرباره کوره آهنگدازی بر عملکرد آسفالت حفاظتی اسلاری سیل

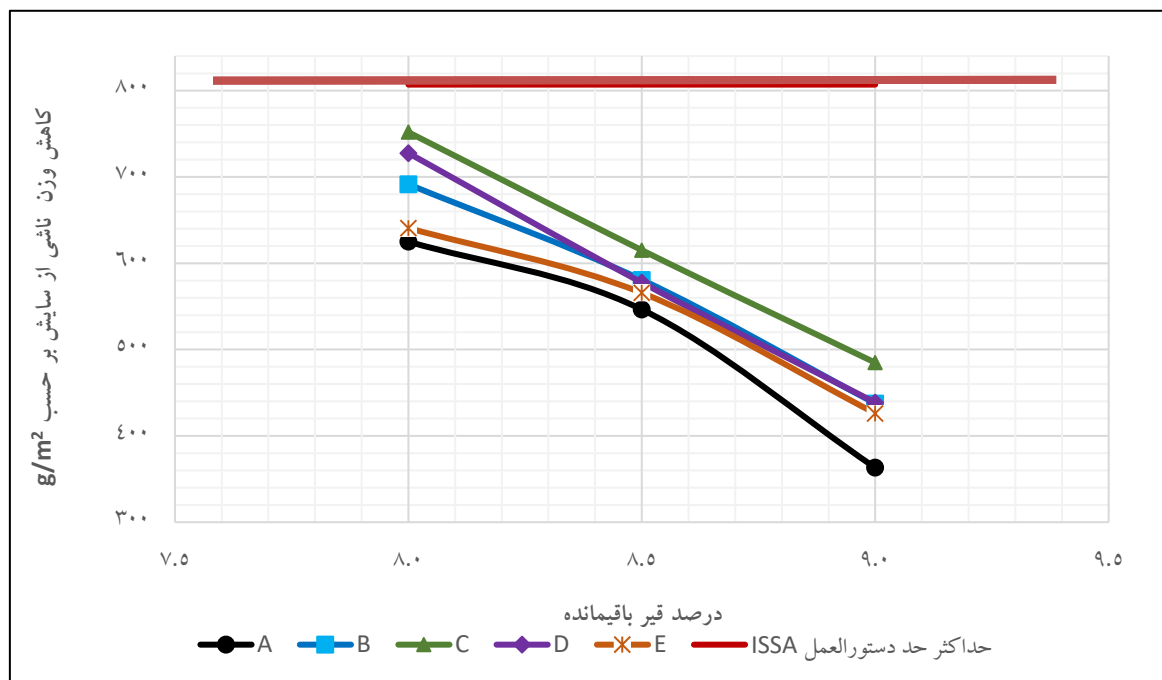


شکل ۵. نتایج آزمایش چسبندگی مرطوب در ۶۰ دقیقه

درصد قیر و افزایش سرباره به ترتیب سبب کاهش و افزایش افت وزنی نمونه‌های آسفالتی می‌گردد. در این رابطه نمونه‌های شاهد و اصلاح‌شده در قیر باقیمانده ۹ درصد بهترین عملکرد را در مقابل سایش داشته‌اند. در این مقدار قیر باقیمانده، مقدار افت وزنی نمونه‌های اصلاح‌شده حاوی سرباره B, C, D و E به ترتیب ۲۰/۵، ۳۳/۵، ۲۰/۸، ۱۷/۳ درصد بیشتر از نمونه شاهد (مخلوط A) است.

۳-۴ آزمایش سایش در شرایط مرطوب

نتایج این آزمایش در مدت‌زمان ۱ ساعت غوطه‌وری همه مخلوط‌های اسلاری سیل در آب در نمودار ۶ 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 نمودار، افزایش



شکل ۶. نتایج آزمایش سایش در شرایط مرطوب در ۱ ساعت برای هریک از مخلوط‌های اسلاری سیل

سنگدانه طبیعی و همچنین وجود اکسید سیلیسیم قابل توجه سرباره با توجه به آزمون XRF، باعث چسبندگی کمتر بین قیر و سرباره می‌شود (Melotti et al., 2013). از دیگر عوامل خرابی‌های رطوبتی آب‌دوست بودن فیلر است. سرباره کوره آهن‌گدازی به دلیل وجود سیلیس بیشتری در مقایسه با سنگدانه کلسیتی 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 مقایسه با سنگدانه معدنی دارد (Zulkati, Diew, & Delai, 2012).

۴-۴ آزمایش چرخ بارگذاری شده- چسبندگی ماسه

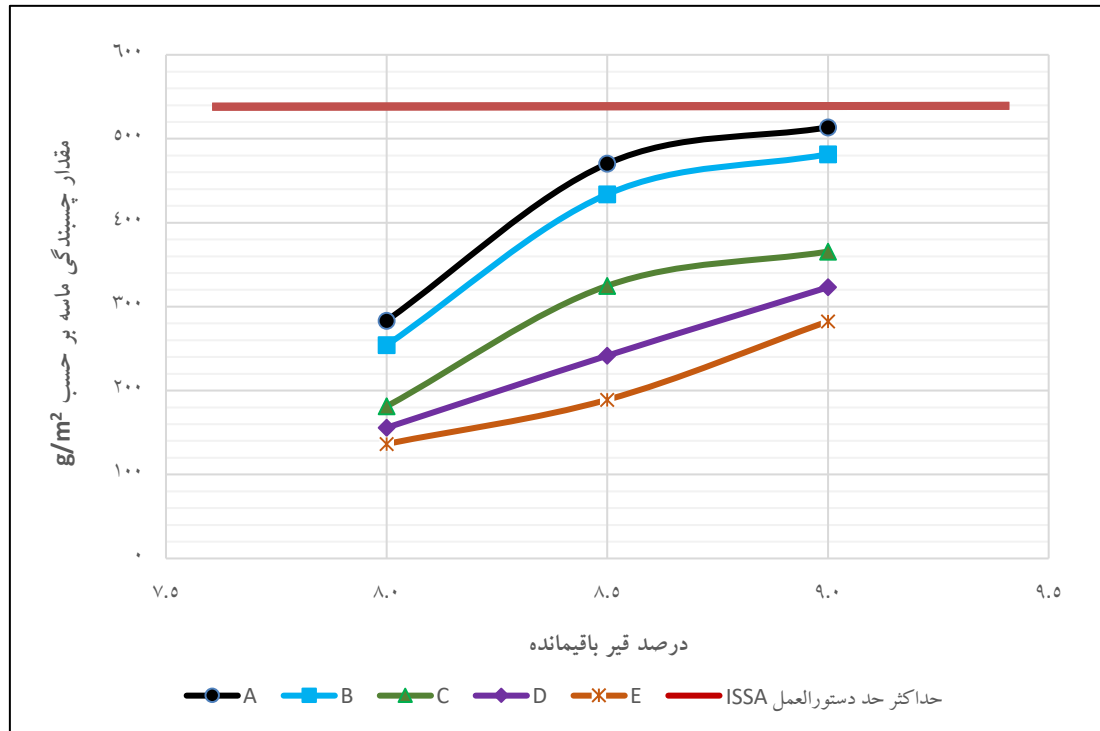
نتایج این آزمایش برای مخلوط‌های آسفالتی در ادامه به شرح گراف ۷ است. همان‌طور که از نتایج دریافت می‌شود کاهش درصد قیر و افزایش درصد سرباره قیر زدگی مخلوط‌ها (جذب ماسه) را کاهش می‌دهد. به طوری که همه نمونه‌ها در قیر ۸ و ۹ درصد به ترتیب دارای کمترین و بیشترین مقدار قیر زدگی هستند. در میان مخلوط‌ها، مخلوط E با حداکثر مقدار سرباره

این نمودار نشان می‌دهد در نمونه‌های حاوی سرباره، نمونه E با کمترین مقدار افت وزنی عملکرد بهتری در برابر سایش در همه درصد‌های قیر داشته و پس از آن نمونه‌های B، D، و C در رتبه‌های بعدی قرار دارند. بنابراین با افزایش سرباره تا ۵۰ درصد، عملکرد مخلوط در برابر سایش افت خواهد کرد ولی پس از آن، با افزایش جایگزینی سرباره در فیلر مخلوط اسلاری سیل تا میزان ۷۵ و ۱۰۰ درصد، عملکرد در برابر پدیده عریان شدگی رو به بهبود می‌رود. بنابراین توصیه می‌شود برای افزایش مقاومت در برابر سایش و عریان شدگی، پودر سرباره با درصد بالایی جایگزین فیلر مخلوط‌های اسلاری سیل شود. وجود رطوبت یکی از عوامل مهم در خرابی عریان‌شدگی مخلوط آسفالتی است که منجر به از دست رفتن دوام مخلوط می‌شود. یکی از عوامل عریان‌شدگی ضعیف شدن چسبندگی و پیوند بین قیر و سنگدانه به دلیل نفوذ رطوبت باشد (Choudhary et al., 2020). وجود کلسیم بالا در ترکیب فیلر باعث خصوصیات ضد عریان شدگی می‌شود (Melotti et al., 2013). بنابراین میزان CaO کمتر سرباره نسبت به

بررسی تأثیر پودر سرباره کوره آهن‌گدازی بر عملکرد آسفالت حفاظتی اسلاری سیل

(۱۰۰ درصد) در قیر باقیمانده ۸ درصد بهترین عملکرد را در

برابر قیر زدگی داشته است.



شکل ۷. چسبندگی ماسه (پتانسیل قیر زدگی) مخلوط‌های اسلاری سیل در آزمایش چرخ بارگذاری- چسبندگی ماسه

۸ به ۸/۵ درصد با شیب بیشتری نسبت به افزایش قیر از ۸/۵ تا ۹ درصد، رشد کرده است. این در حالی است که در مخلوط‌های D و E، افزایش درصد قیر از ۸ به ۸/۵ و از ۸/۵ به ۹ درصد، نرخ افزایش چسبندگی ماسه، رشد داشته است. دلیل این امر آن است که به دلیل خلل و فرج، سطح مخصوص بالا و بافت نامنظم سرباره، جذب قیر در مخلوط حاوی سرباره، بالاتر رفته که باعث کاهش قیر زدگی در هر سه سطح به خصوص در قیرهای با درصد بالا می‌شود (M. Chen et al., 2011; Rondón-Quintana et al., 2018).

۴-۵ تعیین مقدار بهینه قیر امولسیون مخلوط‌های

اسلاری سیل

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 بدست

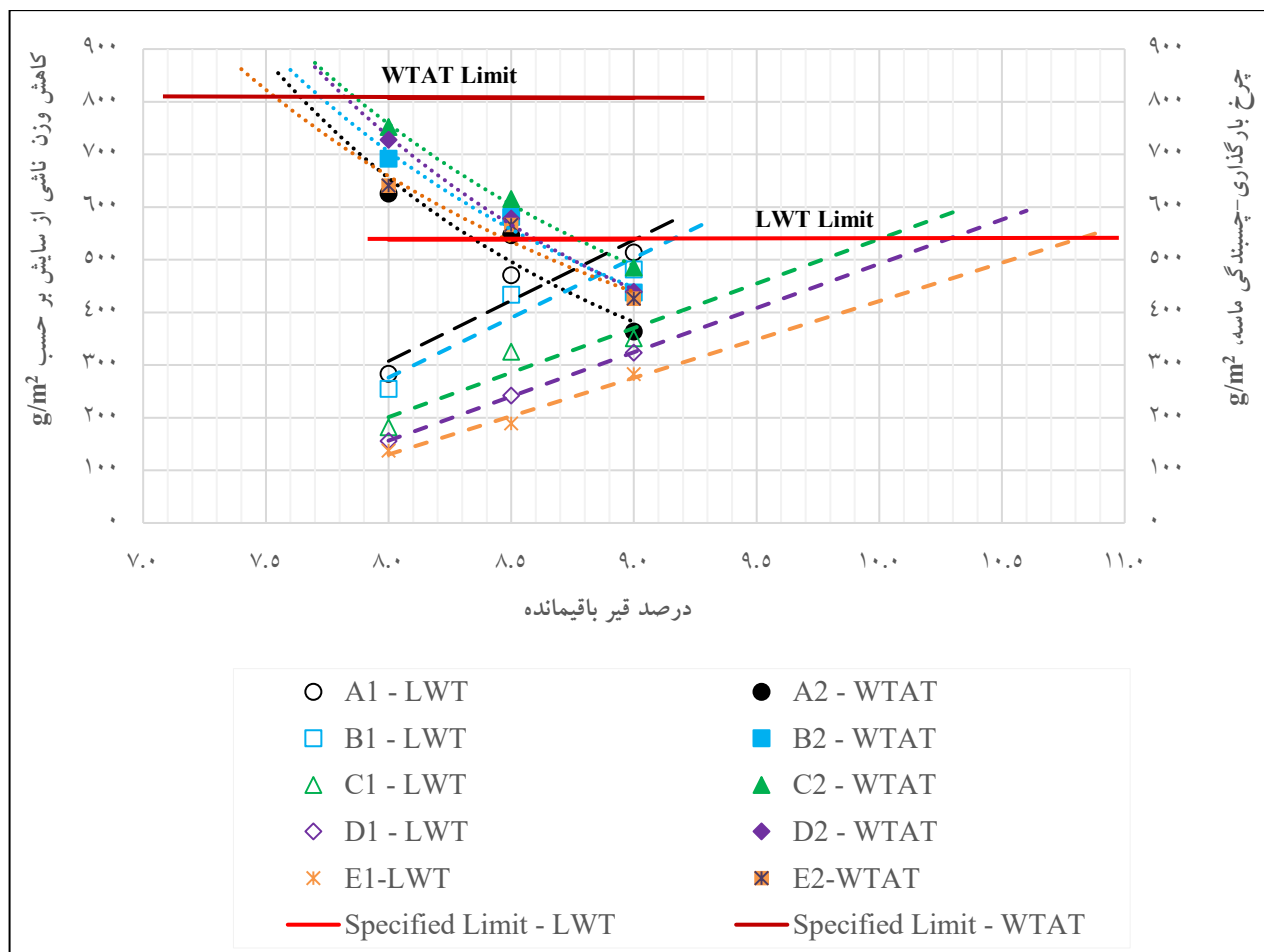
در ۸ درصد قیر باقی مانده، مقدار جذب ماسه نمونه‌های B، C، D و E نسبت به نمونه A به ترتیب ۱۰/۳، ۳۶/۱، ۴۵/۰، ۵۱/۹ درصد کاهش یافته است. البته، این روند کاهش قیر زدگی مخلوط‌ها در همه درصد‌های قیر از ۸ تا ۹ تکرار شده است. این نمودار نشان می‌دهد که مقادیر قیر زدگی نمونه‌های A و B فاصله چندانی با یکدیگر ندارند ولی با افزایش پودر سرباره تا ۱۰۰ درصد، مقدار قیر زدگی به‌طور چشمگیری در همه درصد‌های قیر باقی مانده کاهش می‌یابد. به‌طور خلاصه مطابق نتایج این نمودار، افزایش سرباره سبب بهبود عملکرد مخلوط‌ها در برابر قیر زدگی شده است. از این جهت بهترین عملکرد را مخلوط‌های با مقدار سرباره جایگزین فیلر ۷۵ و ۱۰۰ درصد (D و E) به ترتیب در قیرهای ۸، ۸/۵ و ۹ درصد داشته‌اند. نکته دیگری که از گراف ۸ دریافت می‌شود این است که نرخ قیر زدگی (افزایش چسبندگی ماسه) در مخلوط‌های A، B و C از

پودر سرباره کوره آهن‌گدازی نسبت به مخلوط شاهد افزایش داشته است. به طوری که مقدار بهینه قیر امولسیون مخلوط‌های B, C, D و E به ترتیب به مقدار ۰/۲۹، ۰/۹۹، ۱/۲۳ و ۱/۸۹ درصد نسبت به مخلوط A (مخلوط شاهد) بیشتر بوده است. دلیل این موضوع آن است که فیلر سرباره دارای سطح مخصوص بالاتری است که این امر باعث افزایش قابل توجه میزان قیر بهینه جهت پوشش سطح سنگدانه‌ها خواهد شد (M. Chen et al., 2011; Liao, 2007; Taylor, 2007; Zulkati et al., 2012).

می‌آید. در تلفیق دو نمودار نتایج آزمایش ماسه چسبیده به صورت یک نمودار خطی و نتایج آزمایش سایش مرطوب به صورت نمودارهای توابع توانی نشان داده می‌شوند (ISSA, 2017e; Keymanesh et al., 2020; Zalnezhad & Hesami, 2020). محدوده مجاز قیر امولسیون برای تمامی مخلوط‌ها در جدول ۱۱ ارائه شده است. در شکل ۸ برای هریک از مخلوط‌های A, B, C, D و E اندیس‌های ۱ و ۲ به ترتیب نشان‌دهنده نتایج و نمودار آزمایش چرخ بارگذاری - چسبندگی ماسه و آزمایش سایش در شرایط مرطوب است. همان‌طور که از نتایج بدست آمده است درصد بهینه قیر امولسیون مخلوط‌های آسفالتی حاوی

جدول ۱۱. محدوده مجاز قیر باقی‌مانده و درصد بهینه آن برای مخلوط‌هایی با قیر امولسیونی CSS

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
A	٪۱۳/۵۲	٪۱۴/۴۸	٪۱۳/۵۲ - ٪۱۴/۴۸	٪۱۴
B	٪۱۳/۸۵	٪۱۴/۷۳	٪۱۳/۸۵ - ٪۱۴/۷۳	٪۱۴/۲۹
C	٪۱۴/۱۶	٪۱۵/۸۲	٪۱۴/۱۶ - ٪۱۵/۸۲	٪۱۴/۹۹
D	٪۱۳/۸۷	٪۱۶/۵۸	٪۱۳/۸۷ - ٪۱۶/۵۸	٪۱۵/۲۳
E	۱۳/۷۶	٪۱۷/۳۹	٪۱۴/۳۹ - ٪۱۷/۳۹	٪۱۵/۸۹



شکل ۸. ترکیب نتایج آزمایش سایش در شرایط مرطوب در مدت زمان ۱ ساعت و آزمایش چرخ بارگذاری شده -چسبندگی ماسه

۶-۴ تعیین میزان تغییر شکل عمودی و جانبی مخلوط با آزمایش چرخ بارگذاری شده

نتایج این آزمایش برای مخلوط‌های اسلاری سیل از دو منظر مقدار قیر امولسیون و فیلر با توجه به نمودارهای ۹ و ۱۰ قابل بررسی است:

مطابق نتایج این نمودار، افزایش درصد قیر از ۸ تا ۹ به ترتیب باعث کاهش جابه‌جایی‌های عمودی و جانبی نمونه‌های اصلاح شده با سرباره مخلوط‌های C, D و E شده است. در مقابل با افزایش درصد قیر در مخلوط A و B، جابه‌جایی‌های عمودی و جانبی روندی رو به افزایش داشته است. بنابراین تعیین میزان قیر مناسب با توجه به نوع مخلوط برای کاهش میزان جابه‌جایی‌ها

امری لازم و ضروری است. این نتایج نشان داد که مخلوط E و D به ترتیب بهترین عملکرد را در میزان جابه‌جایی عمودی و افقی ناشی از شیار داشته‌اند. اگرچه فاصله مقادیر تغییر شکل این مخلوط‌ها (D و E) قابل توجه نیست. به‌طور مثال در قیر ۹ درصد، مطابق نمودار جابه‌جایی افقی نمونه‌های C, B, D و E نسبت به نمونه A به‌اندازه ۵/۸، ۴۴/۲، ۴۶/۸ و ۵۳/۹ درصد کاهش داشته است. از سوی دیگر، مطابق نمودار افزایش فیلر سرباره در مخلوط‌های C, B, D و E، در درصد قیر باقیمانده ۹ درصد، نسبت به نمونه شاهد به ترتیب موجب کاهش جابه‌جایی عمودی به میزان ۹/۵، ۴۷/۴، ۴۹/۵ و ۵۵/۸ درصد شده است. در نهایت این نتایج گواه آن است که افزایش فیلر سرباره

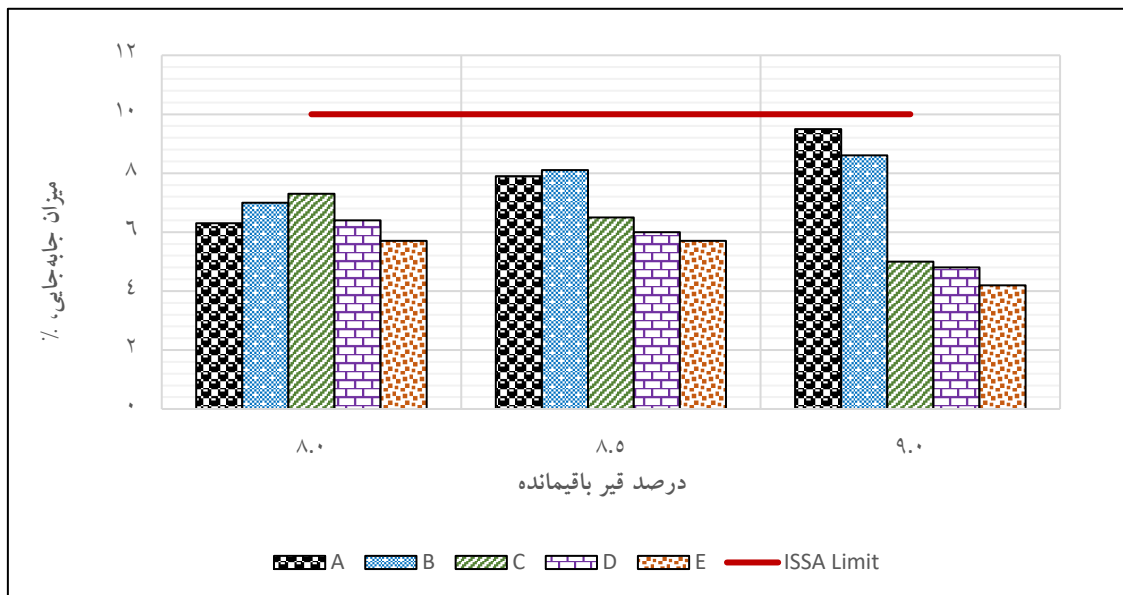
شیار می‌شوند (Rondón-Quintana, Ruge-Cárdenas,)
(& Farias, 2019).

کوره آهنگدازی، سبب بهبود عملکرد آسفالت حفاظتی در برابر
جابه‌جایی‌ها به‌ویژه در مخلوط‌های D و E می‌شود.

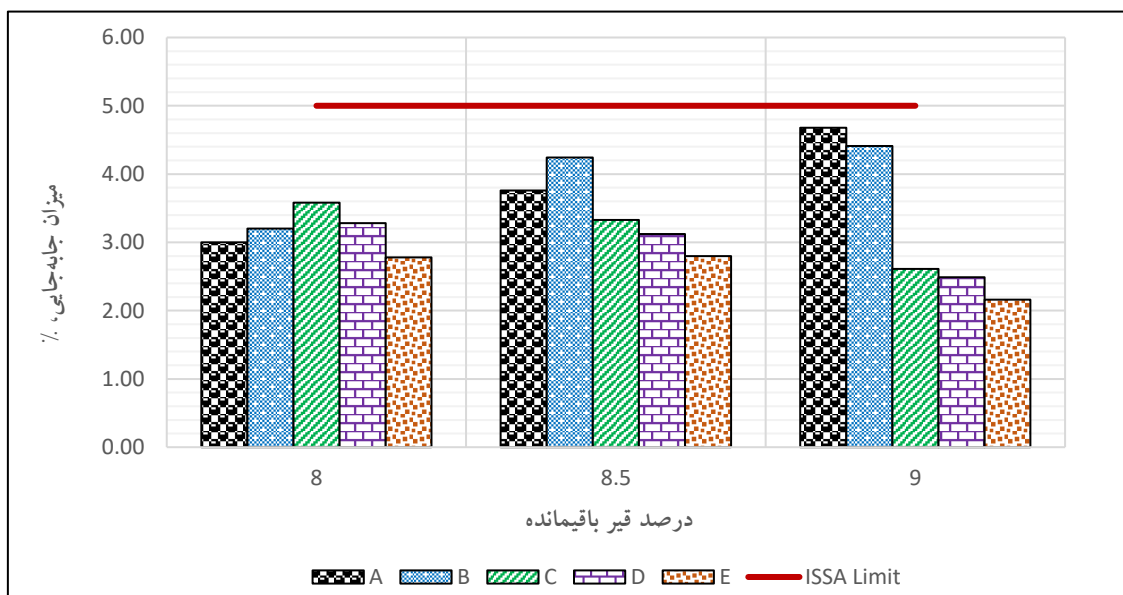
از منظر میزان فیلر، با توجه به نتایج حاصله در درصد قیر
باقی‌مانده ۸/۵ و ۹ درصد، مخلوط‌های حاوی ۰ و ۲۵ درصد فیلر
تفاوت محسوسی در عمق شیار باهم نداشته‌اند ولی با افزایش
سرباره تا ۵۰ درصد جابه‌جایی عمودی و جانبی کاسته شده است
که تا ۱۰۰ درصد این روند بهبود پیدا کرده است. از سوی دیگر
در قیر باقی‌مانده ۸ درصد، عمق شیارشدگی مخلوط با افزایش
درصد فیلر سرباره تا ۵۰ درصد، عمق شیار شدگی افزایش پیدا
کرده است. این در حالی است که مخلوط‌های حاوی ۷۵ و ۱۰۰
درصد سرباره عملکرد بهتری نسبت به بقیه مخلوط‌ها داشته
است. بنابراین توصیه می‌شود در درصد قیر پایین، فیلر با درصد
بالایی از سرباره جایگزین شود.

در حالت کلی با افزایش درصد قیر در مخلوط با سنگدانه طبیعی،
قیر اضافی در فضای بین دانه‌ای به‌عنوان روان‌کننده عمل کرده
و در نتیجه عمق شیار افزایش می‌یابد. درحالی‌که فیلرهای سرباره
با تخلخل بالاتر می‌توانند قیرهای آزاد را در مخلوط به دلیل پر
شدن حفرات با قیر به قیر سازه‌ای تبدیل کرده و باعث ساخت
مخلوطی با ساختاری مستحکم‌تر و در نهایت مقاوم‌تر در برابر
خرابی‌های شیارشدگی شوند (Mogawer & Stuart,)
(1996; H. Wang et al., 2011). شکل ظاهری فیلرها نیز
بر روی عمق شیارشدگی و تغییر شکل‌های دائمی نیز تأثیر
می‌گذارند (Melotti et al., 2013). مخلوط‌ها با
سنگدانه‌هایی با بافت سطحی صاف و گرد گوشه به دلیل عدم
اصطکاک کافی و سرخوردن سنگدانه‌ها بر روی یکدیگر هنگام
تراکم حساسیت بیشتری در برابر شیار شدگی دارند. سرباره به
دلیل ساختار نامنظم و تیز گوشه بودن و زاویه اصطکاک داخلی
بالا و قفل و بست بهتر سنگدانه‌ها باهم که از دلایل اصلی
مقاومت در برابر شیارشدگی در مخلوط‌های آسفالتی با ضخامت
کم است، باعث افزایش مقاومت برشی مخلوط و کاهش عمق

بررسی تأثیر پودر سرباره کوره آهن‌گدازی بر عملکرد آسفالت حفاظتی اسلاری سیل



شکل ۹. میزان جابه‌جایی عمودی مخلوط‌ها در درصدهای مختلف از قیر



شکل ۱۰. میزان جابه‌جایی افقی مخلوط‌ها در درصدهای مختلف از قیر

۵. نتیجه‌گیری

را کسب کردند. به‌طور خلاصه با افزایش میزان سرباره و مقدار قیر، مقدار چسبندگی مخلوط‌ها افزایش یافته است.

- در آزمایش سایش در شرایط مرطوب مشخص گردید با افزایش سرباره تا ۵۰ درصد، عملکرد مخلوط در برابر سایش افت خواهد کرد ولی پس‌از آن، با افزایش جایگزینی سرباره در فیلر مخلوط اسلاری سیل تا میزان ۷۵ و ۱۰۰ درصد، عملکرد

نتایج آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق به‌طور خلاصه در ادامه ارائه شده است:

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

modified bitumen emulsions. *Journal of Testing and Evaluation*, 48(4).

- Ahmedzade, P., & Sengoz, B. (2009). Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete. *Journal of hazardous materials*, 165(1-3), 300-305.

- Airey, G. D., Collop, A. C., & Thom, N. H. (2004). Mechanical performance of asphalt mixtures incorporating slag and glass secondary aggregates. Paper presented at the Proceedings of the 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA'04), South Africa.

- 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., & Azarhoosh, A. (2012). The effect of recycled concrete aggregate and steel slag on the dynamic properties of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 35, 1-7.

- 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.

- ASTM D3910. (2015). Standard Practice for Design, Testing, and Construction of Slurry Seal. In. West Conshohocken, PA: American Society of Testing and Materials.

- Bhargava, N., Siddagangaiah, A. K., & Rynthathiang, T. L. (2020). Reliability of Microsurfacing Mix Subjected to Variation in Aggregate Gradation. *Transportation research record*, 2674(11), 720-730.

- Bhargava, N., Siddagangaiah, A. K., & Rynthathiang, T. L. (2020). State of the art

در برابر پدیده عریان شدگی رو به بهبود می‌رود. بنابراین توصیه می‌شود برای افزایش مقاومت در برابر سایش و عریان شدگی، پودر سرباره با درصد بالایی جایگزین فیلر مخلوط‌های اسلاری سیل شود

• در آزمایش تعیین حداکثر قیر به وسیله چرخ بارگذاری - چسبندگی ماسه معلوم گردید که با افزایش درصد قیر امولسیون در مخلوط‌های آسفالتی میزان چسبندگی ماسه و به تبع آن پتانسیل قیر زدگی مخلوط‌ها افزایش خواهد یافت. همچنین با افزایش درصد فیلر سرباره از ۰ تا ۱۰۰ درصد پتانسیل قیر زدگی مخلوط‌ها کاهش یافت.

• در آزمایش چرخ بارگذاری - چسبندگی ماسه (جهت تعیین پتانسیل قیر زدگی مخلوط‌ها)، افزایش سرباره سبب بهبود عملکرد مخلوط‌ها در برابر قیر زدگی شده است. از این جهت بهترین عملکرد را مخلوط‌های با مقدار سرباره جایگزین فیلر ۷۵ و ۱۰۰ درصد (D و E) داشته‌اند.

• با بررسی گراف‌های آزمایش سایش و چسبندگی ماسه می‌توان این‌طور برداشت کرد که نمونه‌های E و D که حاوی ۷۵ و ۱۰۰ درصد پودر سرباره کوره آهن‌گدازی هستند، در هر دو آزمایش نتایج نزدیک و مشابهی با یکدیگر دارند. در واقع این موضوع مؤید آن است که با حضور هر چه بیشتر سرباره نتایج بهبود پیدا کرده و نشان از سازگاری خوب بین این مصالح و قیر امولسیون کاتیونیک است

• در تعیین درصد بهینه قیر امولسیون، با افزایش پودر سرباره کوره آهن‌گدازی در مخلوط‌ها درصد بهینه قیر امولسیون بیشتری نسبت به نمونه شاهد افزایش می‌یابد. همچنین مشخص شد که بیشترین درصد قیر امولسیون مرتبط با مخلوط حاوی ۱۰۰ درصد فیلر سرباره آهن‌گدازی است.

۶. مراجع

- Abedini, M., Hassani, A., Kaymanesh, M. R., Yousefi, A. A., & Abedini, H. (2020). Multiple stress creep and recovery behavior of SBR-

- Construction and Building Materials, 234, 117271.
- 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.
- Dulaimi, A., Shanbara, H. K., & Al-Rifaie, A. (2020). The mechanical evaluation of cold asphalt emulsion mixtures using a new cementitious material comprising ground-granulated blast-furnace slag and a calcium carbide residue. *Construction and Building Materials*, 250, 118808.
- Ellis, C., Zhao, B., Barnes, J., & Jones, N. (2004). Properties of GGBS-bitumen emulsion systems with recycled aggregates. *Road Materials and Pavement Design*, 5(3), 373-383.
- 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
- Farooq, M. A., Sato, Y., Ayano, T., & Niitani, K. (2017). Experimental and numerical investigation of static and fatigue behavior of mortar with blast furnace slag sand as fine aggregates in air and water. *Construction and Building Materials*, 143, 429-443.
- Gransberg, D. D., Board, T. R., & Program, N. C. H. R. P. S. (2010). NCHRP Synthesis 411: Microsurfacing.
- Guo, Y., Xie, J., Zheng, W., & Li, J. (2018). Effects of steel slag as fine aggregate on static and impact behaviours of concrete. review on design and performance of microsurfacing. *Road Materials and Pavement Design*, 21(8), 2091-2125.
- Bista, S. (2020). Guidelines for Mix Design and Construction of Slurry Seal and Microsurfacing Pavement Preservation Treatments. University of Nevada, Reno.
- Brown, E. R., Kandhal, P. S., Roberts, F. L., Kim, Y. R., Lee, D. Y., & Kennedy, T. W. (2009). *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction: Third Edition*: National Asphalt Pavement Association.
- Chandru, P., Karthikeyan, J., Sahu, A. K., Sharma, K., & Natarajan, C. (2021). Some durability characteristics of ternary blended SCC containing crushed stone and induction furnace slag as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 270, 121483.
- Chen, M., Lin, J., & Wu, S. (2011). Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 25(10), 3909-3914.
- Chen, S.-H., Lin, D.-F., Luo, H.-L., & Lin, Z.-Y. (2017). Application of reclaimed basic oxygen furnace slag asphalt pavement in road base aggregate. *Construction and Building Materials*, 157, 647-653. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.136>
- Chen, Z., Gong, Z., Jiao, Y., Wang, Y., Shi, K., & Wu, J. (2020). Moisture stability improvement of asphalt mixture considering the surface characteristics of steel slag coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 251, 118987.
- Choudhary, J., Kumar, B., & Gupta, A. (2020). Utilization of solid waste materials as alternative fillers in asphalt mixes: A review.

mixture containing natural iron oxide red pigments. *Road Materials and Pavement Design*, 1-18.
doi:10.1080/14680629.2020.1860803

- 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.

- Kumar, R., & Ryntathiang, T. L. (2016). New laboratory mix methodology of microsurfacing and mix design. *Transportation research procedia*, 17, 488-497.

- Liao, M.-C. (2007). Small and large strain rheological and fatigue characterisation of bitumen-filler mastics. University of Nottingham.

- Melotti, R., Santagata, E., Bassani, M., Salvo, M., & Rizzo, S. (2013). A preliminary investigation into the physical and chemical properties of biomass ashes used as aggregate fillers for bituminous mixtures. *Waste management*, 33(9), 1906-1917.

- Mogawer, W. S., & Stuart, K. D. (1996). Effects of mineral fillers on properties of stone matrix asphalt mixtures. *Transportation research record*, 1530(1), 86-94.

- Muniandy, R., Aburkaba, E. E., Hamid, H. B., & Yunus, R. B. (2009). An initial investigation of the use of local industrial wastes and by-products as mineral fillers in stone mastic asphalt pavements. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 4(3), 54-63.

- Nasir, M., Johari, M. A. M., Maslehuddin, M., Yusuf, M. O., & Al-Harhi, M. A. (2020). Influence of heat curing period and temperature on the strength of silico-manganese fume-blast

Construction and Building Materials, 192, 194-201.

- Hesami, E., Ataollahi, A., & Sadeghi, V. (2020). Performance evaluation of microsurfacing with rubber powder. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 0892705720930760.

- 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*.

- ISSA A105. (2020). Recommended Performance Guideline For Emulsified Asphalt Slurry Seal. In: *International Slurry Surfacing Association*.

- Izadi, A., Zalnezhad, M., Bozorgi Makerani, P., & Zalnezhad, H. (2020). Mix design and performance evaluation of coloured slurry seal

- Robinson Jr, G. R., Menzie, W. D., & Hyun, H. (2004). Recycling of construction debris as aggregate in the Mid-Atlantic Region, USA. *Resources, Conservation and Recycling*, 42(3), 275-294.
- Rondón-Quintana, H. A., Ruge-Cárdenas, J. C., & Farias, M. M. d. (2019). Behavior of hot-mix asphalt containing blast furnace slag as aggregate: Evaluation by mass and volume substitution. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(2), 04018364.
- Rondón-Quintana, H. A., Ruge-Cárdenas, J. C., Patiño-Sánchez, D. F., Vacca-Gamez, H. A., Reyes-Lizcano, F. A., & Muniz de Farias, M. (2018). Blast furnace slag as a substitute for the fine fraction of aggregates in an asphalt mixture. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(10), 04018244.
- Ruíz-Ibarra, J. F., Rondón-Quintana, H. A., & Chaves-Pabón, S. B. (2020). Behavior of a warm mix asphalt containing a blast furnace slag. *International Journal of Civil Engineering*, 18(3), 325-334.
- Shafabakhsh, G., & Ahmadi, S. (2019). Investigating the Effects of Steel Slag and Different Tack Coats on the Shear Strength of Composite Pavement Layers. *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, 11(2), 475-499. doi:10.22119/jte.2019.69459
- Song, W., Zhu, Z., Pu, S., Wan, Y., Huo, W., Song, S., . . . Hu, L. (2020). Efficient use of steel slag in alkali-activated fly ash-steel slag-ground granulated blast furnace slag ternary blends. *Construction and Building Materials*, 259, 119814.
- Taylor, R. E. (2007). Surface interactions between bitumen and mineral fillers and their effects on the rheology of bitumen-filler mastics. University of Nottingham Nottingham.
- furnace slag-based alkali-activated mortar. *Construction and Building Materials*, 251, 118961.
- Nassar, A. I., Mohammed, M. K., Thom, N., & Parry, T. (2016). Mechanical, durability and microstructure properties of Cold Asphalt Emulsion Mixtures with different types of filler. *Construction and Building Materials*, 114, 352-363.
- Ozbakkaloglu, T., Gu, L., & Pour, A. F. (2016). Normal-and high-strength concretes incorporating air-cooled blast furnace slag coarse aggregates: Effect of slag size and content on the behavior. *Construction and Building Materials*, 126, 138-146.
- Patel, C. P., & Bhavsar, J. K. (2016). Enhancement of concrete properties by replacing cement and fine aggregate with ceramic powder. *Journal of civil engineering and environmental technology*, 3(3).
- 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
- Poursoltani, M., & Hesami, S. (2020). Performance evaluation of microsurfacing mixture containing reclaimed asphalt pavement. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(12), 1491-1504.
- Puligilla, S., & Mondal, P. (2013). Role of slag in microstructural development and hardening of fly ash-slag geopolymer. *Cement and Concrete Research*, 43, 70-80.

Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 148(3), 199-211.

- 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.

- Valcuende, M., Benito, F., Parra, C., & Miñano, I. (2015). Shrinkage of self-compacting concrete made with blast furnace slag as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 76, 1-9.

- Wang, A., Shen, S., Li, X., & Song, B. (2019). Micro-surfacing mixtures with reclaimed asphalt pavement: Mix design and performance evaluation. *Construction and Building Materials*, 201, 303-313.

- Wang, G. C. (2016). Slag use in asphalt paving. In G. C. Wang (Ed.), *The Utilization of Slag in Civil Infrastructure Construction* (pp. 201-238): Woodhead Publishing.

- Wang, H., Al-Qadi, I. L., Faheem, A. F., Bahia, H. U., Yang, S.-H., & Reinke, G. H. (2011). Effect of mineral filler characteristics on asphalt mastic and mixture rutting potential. *Transportation research record*, 2208(1), 33-39.

- Yang, H., Xia, J., Thompson, J. R., & Flower, R. J. (2017). Urban construction and demolition waste and landfill failure in Shenzhen, China. *Waste management*, 63, 393-396.

- 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:<https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.12.005>

- Zhang, Z., Li, L., Ma, X., & Wang, H. (2016). Compositional, microstructural and mechanical properties of ambient condition cured alkali-activated cement. *Construction and Building Materials*, 113, 237-245.

- Zhou, Z., Xu, Z., Masliyah, J. H., & Czarnecki, J. (1999). Coagulation of bitumen with fine silica in model systems. *Colloids and*

بررسی تأثیر پودر سرباره کوره آهنگدازی بر عملکرد آسفالت حفاظتی اسلاری سیل

امیر ایزدی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران - عمران از دانشگاه صنعتی اصفهان اخذ نموده است و دوره کارشناسی ارشد و دکتری را در دانشگاه علم و صنعت ایران در رشته عمران گرایش راه و ترابری به پایان رسانده است. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان تحلیل رفتاری و بهبود خصوصیات عملکردی مخلوط های آسفالتی گرم، سرد و آسفالت های حفاظتی است. در حال حاضر عضو هیأت علمی دانشگاه شمال می باشد.



ساسان شایگان، درجه کارشناسی از مهندسی عمران را در سال ۱۳۹۳ از دانشگاه غیرانتفاعی شمال آمل و کارشناسی ارشد مهندسی راه و ترابری را در سال ۱۴۰۰ از دانشگاه شمال اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان ارزیابی عملکردی و زیست محیطی انواع مخلوط های آسفالتی سرد با افزودنی ها و پسماندهای مختلف است



مهدی زال نژاد، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران و کارشناسی ارشد-گرایش راه و ترابری را از دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل اخذ نموده است. در حال حاضر دانشجوی دکتری عمران گرایش راه و ترابری در دانشگاه علم و صنعت می باشد. به طور خاص، زمینه های اصلی تحقیقاتی ایشان رئولوژی چسباننده های قیری و امولسیون، تحلیل رفتاری آسفالت های سرد و حفاظتی (میکروسرفیسنگ، اسلاری سیل و غیره)، تعمیر و نگهداری پیشگیرانه روسازی راه و استفاده انواع مواد در ساختار مخلوط های آسفالتی است. در حال حاضر، او به عنوان مدیر فنی در شرکت عمارت گستر پیشگامان نوین فعالیت دارد.

