

بررسی تأثیر استفاده از پودر بتن بازیافتی ضایعات ساختمانی بر عملکرد آسفالت حفاظتی لایه نازک (اسلاری سیل)

حسین ملکی طولابی، دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران

جنوب

سیدعظیم حسینی*، دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب

لیلا حاج نجفی، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب

Email: azim_hosseini@azad.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۴ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۲۲

چکیده

با توجه به اهمیت جاده‌ها و بزرگراه‌ها به‌عنوان یک عضو حیاتی از اقتصاد کشورها، که برای جابه‌جایی مسافر و کالا مورد استفاده قرار می‌گیرند، مسئله نگهداری و مدیریت آن‌ها همواره یکی از مهم‌ترین و بنیادی‌ترین اصول زیربنایی کشورها است. کاربرد آسفالت‌های حفاظتی به‌عنوان یک اقدام پیشگیرانه در تعمیر و نگهداری روسازی‌ها در ایران و جهان به شکل قابل چشمگیری رواج یافته است. در عصر حاضر، یکی از مشکلات بزرگ زیست‌محیطی ایجاد شده، تولید قابل توجه ضایعات ساختمانی (CW) می‌باشد. استفاده از CW قابل بازیافت در روسازی‌ها می‌تواند به حفظ مواد تجدیدناپذیر و در عین حال کاهش مشکلات زیست‌محیطی کمک کند. هدف اصلی این مطالعه، بررسی به‌کارگیری پودر بتن بازیافتی ضایعات ساختمانی (RWCP) در طرح اختلاط آسفالت حفاظتی لایه نازک (اسلاری سیل) در مقایسه با فیلر معدنی (MF) است. برای این منظور، آزمایش‌های چسبندگی مرطوب، سایش در شرایط مرطوب، بارگذاری چرخ-جابه‌جایی و بارگذاری چرخ-چسبندگی ماسه در پنج ترکیب مختلف شامل RWCP0+MF100، RWCP25+MF75، RWCP50+MF50، RWCP75+MF25 و RWCP100+MF0، بر اساس وزن کل فیلر انجام شده است. در ادامه، با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANNs)، همبستگی و دقت نتایج آزمایشگاهی مخلوط‌های آسفالت حفاظتی لایه نازک حاوی پودر بتن بازیافتی ضایعات ساختمانی، بررسی گردید. نتایج نشان داد که مخلوط RWCP100+MF0 با ۹ درصد قیر باقیمانده، چسبندگی مرطوب، سایش، جابه‌جایی عمودی و جانبی را به ترتیب در حدود ۲۷، ۲۴، ۲۸ و ۲۰ درصد بهبود داده است. از مهم‌ترین دلایل جایگزینی فیلر RWCP، دارا بودن شکل‌های نامنظم، سطوح ناهموار و خشن‌تر و درصد زیاد CaO و SiO₂ است که موجب بهبود عملکرد آسفالت حفاظتی لایه نازک می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آسفالت حفاظتی لایه نازک، اسلاری سیل، پودر بتن بازیافتی ساختمانی، آزمایش سایش در شرایط مرطوب، شبکه‌های عصبی مصنوعی.

۱. مقدمه

ساختمانی در صنعت روسازی راه، با توجه به تولید گسترده آن و حفظ منابع تجدیدناپذیر، روشی مؤثر در مدیریت ضایعات ساختمانی است.

یکی از انواع آسفالت‌های مورد استفاده در روسازی، اسلاری سیل^۲ با مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی است که به‌عنوان روکش سطحی، طول عمر روسازی‌ها را افزایش می‌دهد (ڈنگ و همکاران، ۲۰۱۸؛ ثقفی و همکاران، ۲۰۱۹). اسلاری سیل مخلوطی از سنگدانه خوب‌دانه‌بندی شده، قیر امولسیون، آب و فیلر معدنی با نسبت وزنی مشخص است که برای به حالت اول برگرداندن بافت سطحی، محافظت پیشگیرانه روسازی، پر کردن ترک‌ها، بهبود مقاومت در برابر لغزش و آب‌بندی سطحی برای جلوگیری از نفوذ رطوبت و هوا به روسازی استفاده می‌شود (حاج‌الی و همکاران، ۲۰۱۳). با این وجود، در صورتی که در انتخاب مصالح دقت کافی صورت نگیرد، خرابی‌های رایج مثل قیرزدگی، شیارشدگی، عریان‌شدگی و شن‌زدگی رخ می‌دهد. از این جهت، یک جزء مهم که به طور قابل توجهی بر عملکرد آسفالت حفاظتی تأثیر می‌گذارد و نیاز به انتخاب دقیق دارد، فیلر است که به طور قابل توجهی بر کیفیت عملکرد اسلاری سیل تأثیر می‌گذارد (شیائو و همکاران، ۲۰۱۸). زال نژاد و حسامی (۱۳۹۸) به بررسی عملکرد آسفالت حفاظتی حاوی مصالح سرباره فولادی پرداختند. در این پژوهش، از مصالح سرباره فولادی به‌عنوان سنگدانه در مخلوط آسفالت حفاظتی استفاده گردید. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که مصالح سرباره فولاد موجب بهبود عملکرد آسفالت حفاظتی شامل افزایش مقاومت در برابر جابه‌جایی، مقاومت در برابر سایش و افزایش چسبندگی قیر به مصالح سنگی خواهد شد.

دیواندری و همکاران (۱۴۰۰) به بررسی عملکرد آسفالت حفاظتی حاوی پودر سرباره فولاد کوره اکسیژنی به‌عنوان جایگزین فیلر طبیعی پرداختند. نتایج آزمایش‌ها

با توسعه اقتصادی و گسترش شهرنشینی در سال‌های اخیر، تعداد زیادی از ساختمان‌های بتنی که شرایط کاربری را برآورده نمی‌کنند، تخریب یا نوسازی شده‌اند و در نتیجه مقدار زیادی ضایعات بتن ایجاد می‌شود (شی و همکاران، ۲۰۱۹). بیشتر این ضایعات ساختمانی مستقیماً در هوای آزاد انباشته می‌شوند، یا به‌سادگی و بدون هیچ‌گونه تصفیه‌ای دفن می‌شوند که منابع زیادی از زمین و هزینه‌های بالای تصفیه را مصرف کرده و به‌طور جدی محیط را آلوده می‌کنند (بهره و باتاچاریا، ۲۰۱۴) و میزان زباله‌های ساختمانی در دهه‌های آینده در سطح بالایی قرار خواهد گرفت که نیاز به راه‌حل‌های فوری دارند (لو، ۲۰۱۹؛ گوئرا و همکاران، ۲۰۱۹؛ تنگ و همکاران، ۲۰۲۰؛ آه و همکاران، ۲۰۲۱؛ هو و همکاران، ۲۰۲۱).

بتن، پرمصرف‌ترین ماده در ساخت‌وساز و کاربردهای زیرساختی است (ملکی طولابی و همکاران، ۲۰۱۸؛ اورام و همکاران، ۲۰۲۰؛ گنسل و همکاران، ۲۰۲۰؛ ابراهیم و همکاران، ۲۰۲۱). در دهه‌های گذشته، تلاش‌های زیادی برای به‌کارگیری پودر بتن بازیافتی انجام شده است (کیم و چوی، ۲۰۱۲؛ کیم، ۲۰۱۷؛ شیائو و همکاران، ۲۰۱۸؛ ڈنگ و همکاران، ۲۰۱۹). با این حال، مقدار بازیافت ضایعات ساختمانی بسیار کم می‌باشد (گنسل و همکاران، ۲۰۲۰). در واقع، چگونگی حذف مؤثر مقدار زیادی از ضایعات ساختمانی هنوز به‌عنوان یک چالش بزرگ، باقی‌مانده است (شی و همکاران، ۲۰۱۹). در این راستا، باید راه‌های مؤثر یافت و به‌کار گرفت (گنسل و همکاران، ۲۰۲۰). انتظار می‌رود تولید این پودر بتن بازیافتی ضایعات ساختمانی^۱ به دلیل توسعه فناوری‌ها، با کیفیت بهتری تولید شود (آه و همکاران، ۲۰۲۱). از این رو، استفاده از پودر بتن بازیافتی ضایعات

^۲- Slurry seal

^۱- Recycled Waste Concrete Powder (RWCP)

مکانیکی مخلوط‌ها انجام شد. مشخص شد که مخلوط‌های حاوی مس‌باره به دلیل قفل‌وبست بهتر و خواص فیزیکی و مکانیکی برتر، نتایج بهتری داشته است. سیموئس و همکاران (۲۰۱۷) طی تحقیقاتی که در باره امکان‌سنجی استفاده از مواد ضایعاتی همچون سرباره مس، پوسته برنج و یا خاکستر بادی در آسفالت حفاظتی پرداختند، اعلام نمودند که پایداری و خواص مکانیکی آسفالت حفاظتی می‌تواند با استفاده از این فیلرهای معدنی بهبود یابد.

عربانی و همکاران (۲۰۱۷) به ارزیابی تأثیر مواد ضایعاتی به‌عنوان فیلر در آسفالت داغ پرداختند. مخلوط‌ها حاوی پودر شیشه ضایعاتی، پودر آجر ضایعاتی، خاکستر پوسته برنج و پودر سنگ (مخلوط شاهد) ساخته شده و درصد بهینه چسباننده قیری برای هر مخلوط تعیین شد. نتایج نشان داد که مخلوط‌های حاوی پودر شیشه ضایعاتی و پودر آجر ضایعاتی عمر خستگی طولانی‌تر و عملکرد بهتری نسبت به سایر مخلوط‌ها داشتند.

در مطالعه‌ای توسط میستری و همکاران (۲۰۱۹) ارزیابی آزمایشگاهی خاکستر پوسته برنج و خاکستر بادی به‌عنوان فیلرهای جایگزین در آسفالت داغ انجام شد. نتایج بررسی نشان داد که عملکرد آسفالت با افزودن خاکستر پوسته برنج و خاکستر بادی بهبود می‌یابد. مضاف بر اینکه درصد قیر بهینه در مخلوط‌های حاوی فیلر ضایعاتی نسبت به نمونه شاهد کاهش یافت.

مدرس و علی‌نیا بنگر (۲۰۱۹) آسفالت حفاظتی را توسط جایگزین کردن فیلرهای پودر سنگ‌آهک با پودر مس‌باره در نسبت‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، آزمون‌های مقاومت کششی غیرمستقیم، مدول برجهندگی و خستگی در چهار گروه مخلوط آسفالت گرم حاوی ۶ درصد پودر سنگ، ۴ درصد پودر سنگ + ۲ درصد پودر مس‌باره، ۲ درصد پودر سنگ + ۴ درصد پودر مس‌باره و ۶ درصد پودر مس‌باره نسبت به

نشان داد که مخلوط‌های حاوی فیلر سرباره فولاد کوره اکسیژنی موجب بهبود عملکرد آسفالت حفاظتی می‌شوند. همچنین، در میان مخلوط‌ها، مخلوط حاوی ۷/۵ درصد فیلر سرباره فولاد نسبت به نمونه شاهد موجب افزایش چسبندگی قیر به مصالح سنگی خواهد شد.

حسینی و همکاران (۱۴۰۱) به بررسی تأثیر استفاده از پسماند صنعتی مس در عملکرد آسفالت حفاظتی پرداختند. هدف اصلی این مطالعه، بررسی کاربرد پسماند صنعتی مس در مخلوط آسفالت حفاظتی در مقایسه با سنگدانه معدنی است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که مخلوط‌های حاوی ۳۰ درصد پسماند صنعتی مس، نسبت به نمونه شاهد، موجب افزایش چسبندگی قیر به مصالح سنگی خواهد شد.

کامبوزیا و همکاران (۱۴۰۱) فیلر سرامیکی ضایعاتی را به‌عنوان جایگزین فیلر در آسفالت حفاظتی استفاده کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که مخلوط حاوی ۱۰۰ درصد فیلر سرامیکی ضایعاتی، نتایج بهتری داشته است. کیم و چوی (۲۰۱۲) پودر بتن ضایعاتی تولید شده در فرایند تهیه سنگدانه بازیافتی را به‌عنوان هدف تحقیق در نظر گرفتند و از آن برای جایگزینی جزئی سیمان، برای تهیه ملات بازیافتی، استفاده کردند و تأثیر نرخ جایگزینی پودر بتن ضایعاتی بر روانی و مقاومت فشاری ملات بازیافتی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزودن پودر بتن ضایعاتی، تأثیر زیادی بر روانی و مقاومت فشاری ملات بازیافتی دارد و مطلوب است که نرخ جایگزینی پودر بتن ضایعاتی کمتر از ۱۵ درصد باشد.

بهنود و همکاران (۲۰۱۵) مس‌باره و سنگدانه بتن بازیافتی را به‌عنوان جایگزین بخشی از سنگدانه‌ها در مخلوط‌های آسفالت حفاظتی استفاده کردند. در این پژوهش، آزمایش‌های استحکام مارشال، مقاومت کششی غیرمستقیم، مدول برجهندگی، حساسیت به رطوبت و آزمایش خزش دینامیک برای ارزیابی خصوصیات

حسامی و همکاران (۲۰۲۰) به ارزیابی عملکرد آسفالت حفاظتی با پودر لاستیک پرداختند و اعلام نمودند که امروزه، افزایش شتابان تولید وسایل نقلیه موجب انباشت لاستیک‌های فرسوده خواهد شد، و به تبع آن مشکلات زیست‌محیطی را افزایش می‌دهد. از این رو، به بررسی امکان‌سنجی استفاده از ضایعات لاستیک‌های فرسوده در آسفالت حفاظتی پرداختند. برای این منظور، از ۰/۵ تا ۳ درصد خرده لاستیک به عنوان جایگزین سنگدانه‌ها استفاده شد. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد که استفاده از ۰/۵ درصد پودر لاستیک، بهترین عملکرد را در بین مقادیر مختلف آسفالت حفاظتی حاوی پودر لاستیک خواهد داشت و مقادیر بیش از این میزان موجب تضعیف عملکرد مخلوط می‌شود. استفاده از ۰/۵ درصد پودر لاستیک باعث می‌شود که مقدار قیر امولسیون بهینه مخلوط کاهش قابل ملاحظه‌ای پیدا کرده و شیارافتادگی روی نمونه نیز نسبت به نمونه شاهد مشابه کاهش یابد.

سان و همکاران (۲۰۲۰) طی پژوهشی، به بررسی استفاده از پودر سنگ در آسفالت حفاظتی پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از پودر سنگ در آسفالت حفاظتی می‌تواند الزامات استانداردهای فنی مربوطه را برآورده کند و از طرفی، استفاده از پودر سنگ، با توجه به عدم نیاز به تولید فیلر معدنی جهت ساخت آسفالت حفاظتی، و همچنین جلوگیری از انباشت پودر سنگ در طبیعت که موجب آلودگی آب‌های زیرزمینی و خاک می‌گردد، باعث حفظ محیط‌زیست نیز خواهد شد.

چنگ و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی تأثیر ضایعات سنگدانه‌های شیشه‌ای بر عملکرد آسفالت حفاظتی پرداختند و اعلام نمودند که هر ساله مقادیر زیادی شیشه زباله در چین تولید می‌شود که تأثیر مخربی بر محیط‌زیست وارد می‌کند. در این تحقیق، استفاده از ضایعات شیشه به‌عنوان سنگدانه در آسفالت حفاظتی ارزیابی شد. همچنین، اعلام شد که استفاده بالقوه از

وزن کل مصالح انجام گرفت. بر اساس نتایج به‌دست آمده، با افزایش مقدار پودر مس‌باره خواص مکانیکی آسفالت گرم بهبود می‌یابد.

زیاری و همکاران (۲۰۱۹) تأثیر جایگزینی سنگدانه‌های سنگ‌آهک توسط مس‌باره در صفر، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد را بر عملکرد آسفالت نیمه‌گرم بررسی کردند. در این پژوهش، مقدار بهینه مس‌باره از نظر پایداری مارشال، مقاومت در برابر شیار، مدول برجهنگی و انرژی شکست برای مقاومت در برابر ترک، ۲۰ درصد توصیه شده است. علاوه بر این، این درصد مس‌باره، به میزان قابل توجهی حساسیت رطوبت را با توجه به نتایج آزمایش نسبت مقاومت کششی بهبود می‌بخشد.

کوی و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی استفاده از سرباره فولادی در آسفالت حفاظتی پرداختند و اعلام نمودند که امروزه سرباره فولاد به طور گسترده‌ای به‌عنوان سنگدانه برای ساخت روسازی آسفالت استفاده می‌شود و می‌تواند آلودگی محیط‌زیست ناشی از کاهش مصرف سنگدانه‌های طبیعی و بازیافت زباله‌های جامد را به حداقل برساند. با این حال، مطالعات کمی در مورد کاربرد سرباره فولاد در نگهداری پیشگیرانه وجود دارد و مکانیسم افزایش آن در مقاومت در برابر لغزش سطح هنوز ناشناخته است. همچنین، نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که سرباره فولادی می‌تواند توانایی آسفالت حفاظتی برای مقاومت در برابر بار ترافیکی را افزایش دهد.

هان و همکاران (۲۰۲۱) به ارزیابی عملکرد آسفالت حفاظتی با استفاده از رزین اپوکسی پرداختند. مشخص شد که به‌منظور غلبه بر کاستی‌های دوام پوشش آسفالت در برابر لغزش و مقاومت در برابر سایش ناکافی، از رزین اپوکسی آب به‌عنوان اصلاح‌کننده برای تهیه آسفالت حفاظتی آسفالت حفاظتی استفاده گردید که موجب شد مقاومت در برابر سایش مخلوط آسفالت حفاظتی به طور قابل توجهی بهبود یابد.

مخلوط‌های آسفالت حفاظتی لایه‌نازک متمرکز نشده است. نوآوری در تحقیق حاضر، جایگزینی تا ۱۰۰ درصد فیلر با پودر بتن بازیافتی ضایعات ساختمانی در آسفالت حفاظتی لایه‌نازک می‌باشد. این تحقیق، فرض می‌کند که کیفیت آسفالت حفاظتی لایه‌نازک می‌تواند افزایش یابد و میزان ضایعات ساختمانی با استفاده از این نوآوری کاهش یابد. بنابراین، مطالعه حاضر، عملکرد آسفالت حفاظتی لایه‌نازک حاوی پودر بتن بازیافتی ضایعات ساختمانی را با مجموعه آزمایش‌های میکروسکوپی و عملکردی شامل چسبندگی مرطوب، سایش رطوبتی، چسبندگی ماسه و جابه‌جایی افقی و عمودی، بررسی می‌کند.

۲. مواد و مصالح

۲-۱. مصالح سنگی و فیلر

در این پژوهش، مصالح سنگی کارخانه چالدران واقع در استان مازندران مورد استفاده واقع شده است. از نظر دانه‌بندی، دانه‌بندی نوع II مطابق با جدول ۱ برای ساخت مخلوط‌های اسلاری سیل استفاده گردیده که مطابق با دستورالعمل ISSA A105 می‌باشد. در این پژوهش، از فیلر معدنی (MF) و همچنین پودر بتن بازیافتی ضایعات ساختمانی (RWCP) به‌عنوان فیلر جایگزین، برای چسبندگی و تسریع زمان گیرش و نیز عمل‌آوری در مخلوط‌های اسلاری سیل استفاده شد.

ضایعات شیشه می‌تواند مصرف بیش از حد منابع طبیعی را کاهش دهد و انتخاب خوبی برای استفاده در مصالح روسازی است.

شارما و همکاران (۲۰۲۱) عملکرد آسفالت ماکادام با دانه‌بندی توپر حاوی صفر، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد مس‌باره را از طریق آزمایش‌های مدول برجهندگی، نسبت مقاومت کششی، خزش دینامیک و مقاومت در برابر خستگی مورد بررسی قرار دادند. بر اساس بررسی‌های آزمایشگاهی، نتیجه گرفته شد که ریزدانه می‌تواند تا ۱۵ درصد با مس‌باره در آسفالت ماکادام متراکم جایگزین شده، بدون آنکه اثر منفی بر مقاومت و دوام مخلوط آسفالتی داشته باشد.

چودری و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی مخلوط‌های آسفالت حاوی پودر آجر، پودر سنگ‌آهک، خاکستر برنج، پودر شیشه، آهک کاربید و باطله مس پرداختند. عملکرد مخلوط‌های آسفالت حاوی مواد زائد مختلف در برابر شیارشدگی، ترک‌خوردگی و حساسیت به رطوبت ارزیابی شده و مقایسه آنها با مخلوط معمولی حاوی پودر سنگ انجام شد. نتایج نشان داد که پودر سنگ‌آهک و خاکستر پوسته برنج به‌عنوان مواد جایگزین فیلر به ترتیب دارای بهترین و بدترین عملکرد هستند.

مطالعات قبلی، تأثیر مهم استفاده از پودر بتن بازیافتی را بررسی کرده‌اند؛ اما هیچ تحقیقی در مورد اثرات پودر بتن بازیافتی ضایعات ساختمانی به‌عنوان فیلر بر

جدول ۱. دانه‌بندی مصالح سنگی اسلاری سیل

درصد عبور کرده از الک		اندازه الک
محدوده نوع II دستورالعمل ISSA A105	حد وسط دانه‌بندی نوع II دستورالعمل ISSA A105	
۱۰۰-۹۰	۱۰۰	۴/۷۵ میلی‌متر (شماره ۴)
۹۰-۶۵	۷۷/۵	۲/۳۶ میلی‌متر (شماره ۸)
۷۰-۴۵	۵۷/۵	۱/۱۸ میلی‌متر (شماره ۱۶)
۵۰-۳۰	۴۰	۶۰۰ میکرون (شماره ۳۰)
۳۰-۱۸	۲۴	۳۰۰ میکرون (شماره ۵۰)
۲۱-۱۰	۱۵/۵	۱۵۰ میکرون (شماره ۱۰۰)
۱۵-۵	۱۰	۷۵ میکرون (شماره ۲۰۰)

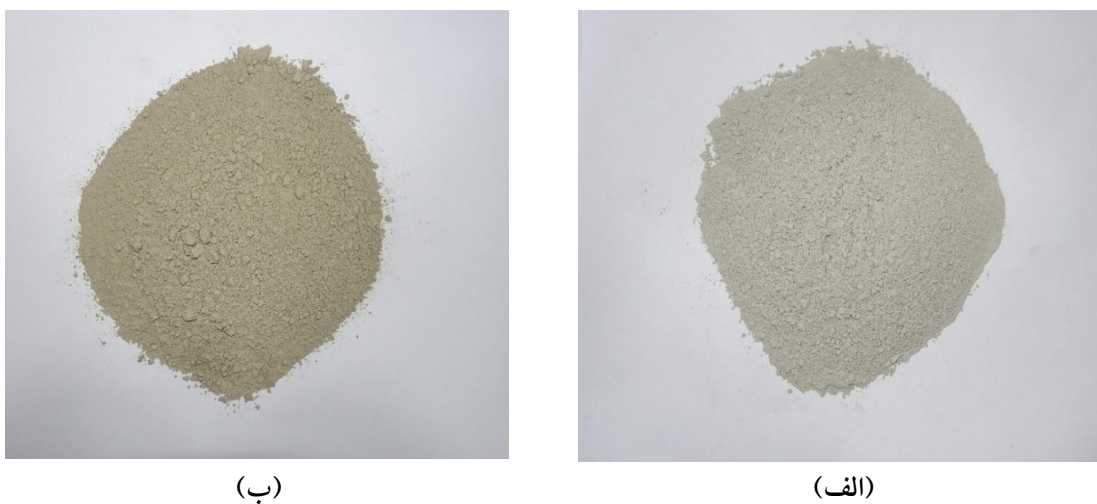
شدند و در ادامه توسط دستگاه سنگ‌شکن غلتکی، ضایعات بتنی خرد شده تبدیل به پودر بتن بازیافتی ضایعاتی گردید. شکل ۱، به ترتیب، مراحل تهیه پودر بتن بازیافتی ضایعات ساختمانی را نشان می‌دهد.

در این تحقیق، جهت تهیه پودر بتن بازیافتی ضایعات ساختمانی، ابتدا ضایعات بتنی از یک ساختمان بتنی در حال تخریب واقع در منطقه یک شهر تهران تأمین شد. سپس ضایعات بتنی توسط دستگاه سنگ‌شکن فکی خرد



شکل ۱. مراحل تهیه پودر بتن بازیافتی ضایعات ساختمانی مورد استفاده در این پژوهش

فیلر معدنی و پودر بتن بازیافتی ضایعات ساختمانی مورد استفاده، در شکل ۲ قابل مشاهده است.



شکل ۲. محصولات مورد استفاده در این تحقیق: (الف) پودر بتن بازیافتی ضایعات ساختمانی و (ب) فیلر معدنی

پودر بتن بازیافتی ضایعات ساختمانی با صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد از وزن کل فیلر جایگزین فیلر شد که در شکل ۳ نشان داده شده است. همچنین، جزئیات نام‌گذاری مخلوط‌های ساخته شده و مورد استفاده در این پژوهش، در جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۳. پودر بتن بازیافتی ضایعات ساختمانی به‌عنوان فیلر با نسبت درصدهای مختلف در مخلوط‌های اصلاح شده

جدول ۲. ترکیبات مخلوط مورد مطالعه در این پژوهش

نوع مخلوط	مقدار پودر ضایعاتی جایگزین فیلر (RWCP)، %	مقدار فیلر معدنی (MF)، %
RWCP0+MF100	۰	۱۰۰
RWCP25+MF75	۲۵	۷۵
RWCP50+MF50	۵۰	۵۰
RWCP75+MF25	۷۵	۲۵
RWCP100+MF0	۱۰۰	۰

۲-۲. قیر امولسیون کاتیونی

در این تحقیق، برای تهیه قیر امولسیون کاتیونی، از قیر با رده نفوذ ۶۰-۷۰ (شرکت نفت پاسارگاد، ایران) و امولسیفایر کاتیونی فرانسه^۱ استفاده گردید. مطابق استاندارد ASTM D2397 (2017; D2397)، و پژوهش‌های صورت گرفته توسط دیگر محققان (زیاری

و همکاران، ۲۰۲۰؛ زال‌نژاد و حسامی، ۲۰۲۰؛ کی‌منش و همکاران، ۲۰۲۱) قیر به مقدار ۵۸ درصد در دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس با محلول صابونی حاوی آب، اسید HCl و امولسیفایر در دستگاه امولسیون‌ساز آزمایشگاهی با سرعت ۲۸۴۰ دور بر دقیقه مورد اختلاط قرار گرفت. ویژگی‌های این قیر در جدول ۳ ارائه شده است.

^۱- CECA

جدول ۳. مشخصات قیر امولسیون کاتیونی

رواداری قابل پذیرش	نتیجه آزمایش	روش آزمایش	آزمایش
۲۰-۱۰۰	۲۳	AASHTO T59	کندروانی سی بولت - فیورل در دمای °C ۲۵ (ثانیه)
حداکثر ۱	۰/۲	ASTM D6930	نشست (پایداری) در انبارکردن قیر امولسیون، ۲۴ ساعت (%).
حداقل ۵۷	۵۸	ASTM D7497	تقطیر قیر امولسیون، جرم وزنی (%).
حداکثر ۰/۱	۰/۰۲	ASTM D244	الک (%).
-	۹۹	AASHTO T59	اندود (%).
مثبت	مثبت	AASHTO T59	بار ذرات
آزمایش‌ها روی قیر باقی مانده از تقطیر قیر امولسیون*			
-	۵۵	ASTM D36	نقطه نرمی قیر با آزمایش حلقه و گلوله (°C)
۴۰-۹۰	۶۵	ASTM D5	درجه نفوذ در °C ۲۵، ۱۰۰ گرم، ۵ ثانیه

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

۲-۳. آب

به طور کلی، آب مصرفی برای عملیات اجرایی بتن باید صاف و فاقد مواد روغنی، اسیدی، قلیایی، املاح و دیگر مواد مضر باشد. همچنین، آب مصرفی نباید شور باشد. آب مورد استفاده در این تحقیق، آب شهری تصفیه شده و دارای pH برابر ۷ بود.

۳. برنامه آزمایشگاهی و روش انجام

آزمایش‌های آسفالتی

۳-۱. برنامه آزمایشگاهی

در بخش اول آزمایش‌ها، آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM^۱) و آزمایش فلورسانس اشعه ایکس (XRF^۲) برای مقایسه سطحی و شناسایی

اکسیدهای فلزی و اجزای تشکیل دهنده مصالح انجام شد. سپس، در فرایند طرح اختلاط نمونه‌های آسفالت حفاظتی، مقادیر اولیه قیر باقی مانده، فیلر معدنی و آب، نسبت به وزن خشک مصالح سنگی، مطابق جدول ۴ تعیین گردید. برای دستیابی به طرح اختلاط مناسب و ارزیابی عملکرد مخلوط‌های آسفالت حفاظتی، آزمایش چسبندگی مرطوب، آزمایش سایش در شرایط مرطوب، آزمایش چسبندگی ماسه و ارزیابی میزان جابه‌جایی با دستگاه چرخ بارگذاری شده، مطابق دستورالعمل ISSA A105 با رعایت مقادیر مجاز جدول ۵، انجام شده است. لازم به ذکر است که مقدار بهینه قیر مطابق دستورالعمل ISSA TB111 توسط نتایج آزمایش سایش در شرایط مرطوب و آزمایش چسبندگی ماسه مشخص می‌شود (ISSA, 2017b).

²- X-ray Fluorescence

¹- Field Emission Scanning Electron Microscopy

جدول ۴. حدود مواد تشکیل دهنده آسفالت حفاظتی (ISSA A105, 2020)

مواد تشکیل دهنده	حدود پیشنهادی نسبت به وزن خشک مصالح سنگی
قیر باقی مانده	۷/۵ تا ۱۳/۵ درصد
فیلر معدنی	صفر تا ۳ درصد
آب	به میزان لازم برای ایجاد غلظت مناسب در مخلوط

جدول ۵. مقادیر مجاز آزمایش‌های آسفالت حفاظتی (ISSA A105, 2020)

آزمایش	مقدار مجاز	شماره استاندارد
چسبندگی مرطوب در ۳۰ و ۶۰ دقیقه	حداقل ۱۲ و ۲۰ کیلوگرم - سانتی متر	TB 139
افت سایش در شرایط مرطوب ۱ ساعت	حداکثر ۸۰۷ گرم بر مترمربع	TB 100
چسبندگی ماسه توسط چرخ بارگذاری شده	حداکثر ۵۳۸ گرم بر مترمربع	TB 109
تغییر مکان عمودی توسط چرخ بارگذاری شده	حداکثر ۱۰ درصد	TB 147
تغییر مکان افقی توسط چرخ بارگذاری شده	حداکثر ۵ درصد	

۲-۳. آزمایش‌ها

۱-۲-۳. آزمایش چسبندگی مرطوب

مقدار چسبندگی اولیه و زمان عمل‌آوری جهت بازگشایی ترافیک، با استفاده از آزمایش چسبندگی مرطوب، مطابق دستورالعمل (ISSA TB139 تعیین گردید (ISSA, 2017e). این آزمایش شامل ساخت مخلوط و اندازه‌گیری گشتاور آن بعد از ۳۰ و ۶۰ دقیقه عمل‌آوری در دمای ۲۵

درجه سلسیوس، با استفاده از دستگاه آزمایش چسبندگی نشان داده شده در شکل ۴ است. مطابق دستورالعمل، حداقل مقادیر تعیین شده چسبندگی جهت سنجش زمان ترافیک برای بازگشایی برای زمان‌های ۳۰ و ۶۰ دقیقه به ترتیب ۱۲ و ۲۰ کیلوگرم- سانتی متر مربع است. شکل ۵ (الف) و (ب)، به ترتیب نمونه‌های مخلوط قبل و بعد از آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۴. دستگاه آزمایش چسبندگی و نمونه‌های آن



(ب)



(الف)

شکل ۵. نمونه‌های مخلوط آسفالت حفاظتی لایه نازک قبل (الف) و بعد (ب) از آزمایش چسبندگی

چرخشی، با استفاده از یک نوار لاستیکی دوار، تحت عمل سایش در شرایط مرطوب به مدت ۳۰۰ ثانیه قرار می‌گیرد. نمونه سایش یافته تا رسیدن به وزن ثابت خشک می‌شود. مقدار از دست‌رفتگی سنگدانه (مقاومت سایش رطوبتی) مطابق رابطه (۱) تعیین می‌گردد.

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

که WTAT شاخص سایش (g/m^2)، m_a وزن نمونه قبل از سایش (g)، m_b وزن نمونه بعد از سایش (g) و A مساحت سایش یافته (m^2) است.

۲-۲-۳. آزمایش سایش در شرایط مرطوب

از دستگاه آزمایش سایش در شرایط مرطوب مطابق شکل ۶ جهت تعیین حداقل مقدار قیر باقی‌مانده و ارزیابی مقاومت در برابر سایش برای جلوگیری از خرابی شن-زدگی مطابق دستورالعمل ISSA TB100 استفاده گردید (ISSA, 2017a). در این آزمایش، مخلوط آسفالتی به ضخامت ۶ میلی‌متر و قطر ۲۸۰ میلی‌متر در دمای ۶۰ درجه سلسیوس عمل‌آوری می‌شود. مخلوط عمل‌آوری شده به مدت ۱ ساعت در آب ۲۵ درجه سلسیوس غوطه‌ور می‌گردد. سپس نمونه آسفالتی به روش



شکل ۶. دستگاه آزمایش سایش در شرایط مرطوب

شکل ۷ (الف) و (ب)، به ترتیب نمونه‌های مخلوط قبل و بعد از آزمایش را نشان می‌دهد.



(ب)



(الف)

شکل ۷. نمونه‌های مخلوط آسفالت حفاظتی لایه نازک قبل (الف) و بعد (ب) از آزمایش سایش در شرایط مرطوب

اندازه‌گیری می‌شود (ISSA, 2017c). رابطه (۲) برای محاسبه میزان قیرزدگی (چسبندگی ماسه) هر یک از مخلوط‌ها استفاده می‌شود.

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

که، SA چسبندگی ماسه (g/m^2)، G_a وزن خشک نمونه بعد از ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری (g)، G_b وزن خشک نمونه بعد از ۱۰۰ سیکل بارگذاری (g) و A مساحت چرخ در قسمت بارگذاری (m^2) است.

همچنین، در آزمایش تعیین مقدار جابه‌جایی با استفاده از چرخ بارگذاری مطابق دستورالعمل ISSA TB147، نمونه‌های عمل‌آوری شده تحت ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری چرخ ۵۶/۷ کیلوگرمی متراکم شدند (ISSA, 2017d). عرض و ارتفاع نمونه در مسیر چرخ، قبل و بعد از تراکم، جهت تعیین میزان جابه‌جایی افقی و عمودی اندازه‌گیری می‌گردد. در نهایت، میزان جابه‌جایی‌های افقی و عمودی مطابق روابط (۳) و (۴) تعیین می‌گردد. مقدار حداکثر مقادیر جابه‌جایی افقی و عمودی مطابق استاندارد به ترتیب ۵ و ۱۰ درصد است.

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

۳-۲-۳. آزمایش چسبندگی ماسه و ارزیابی میزان

جابه‌جایی توسط دستگاه چرخ بارگذاری شده

در این پژوهش، از دستگاه بارگذاری چرخ مطابق شکل ۸، برای آزمایش چسبندگی ماسه و ارزیابی مقدار جابه‌جایی افقی و عمودی استفاده گردید. آزمایش چسبندگی ماسه مطابق دستورالعمل ISSA TB109، جهت تعیین حداکثر قیر و میزان مقاومت مخلوط در مقابل خرابی قیرزدگی تحت بار ترافیک سنگین به کار می‌رود (ISSA, 2017c). در این آزمایش، نمونه‌ها تحت ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری چرخ ۵۶/۷ کیلوگرمی متراکم می‌گردند. سپس، نمونه وزن شده و وزن اندازه‌گیری شده ثبت می‌گردد. مقداری تعیین‌شده از ماسه اتاوا با دانه‌بندی مشخص در گرمخانه با دمای ۸۲ درجه سلسیوس قرار گرفته و سپس ماسه داغ به صورت یکنواخت روی نمونه پخش می‌شود. در این حالت، بارگذاری به میزان ۱۰۰ سیکل، مشابه حالت قبل، برای تراکم نمونه انجام می‌گردد. در ادامه، نمونه از جای مورد نظر خارج شده و سپس ماسه‌هایی که به سطح نمونه نچسبیده‌اند با ضرباتی آرام جدا می‌شوند. نمونه دوباره وزن شده و ثبت می‌گردد. اختلاف بین دو وزن اندازه‌گیری شده به عنوان مقدار ماسه‌ای که چسبیده است، گزارش می‌گردد. بدین ترتیب، در این شیوه، مقدار قیر موجود در مخلوط به صورت غیرمستقیم

بررسی تأثیر استفاده از پودر بتن بازیافتی ضایعات ساختمانی بر عملکرد آسفالت ...

جابه‌جایی عمودی (%)، LD_b عرض نمونه قبل از تراکم (میلی‌متر)، LD_a عرض نمونه بعد از تراکم (میلی‌متر) و LD میزان جابه‌جایی جانبی (%). است.

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

که، VD_{ba} عمق جابه‌جایی عمودی (میلی‌متر)، VD_a ضخامت نمونه قبل از تراکم (میلی‌متر)، VD میزان

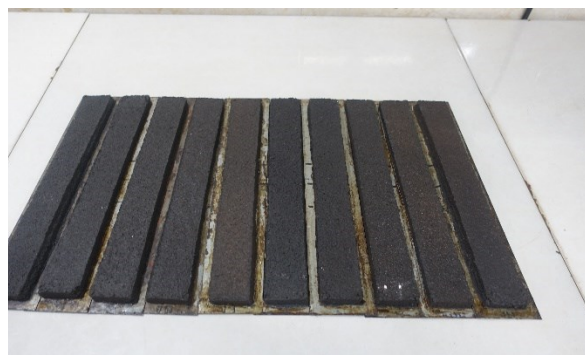


شکل ۸. دستگاه آزمایش چرخ بارگذاری

شکل ۹ (الف) و (ب)، به ترتیب نمونه‌های مخلوط قبل و بعد از آزمایش را نشان می‌دهد.



(ب)



(الف)

شکل ۹. نمونه‌های مخلوط آسفالت حفاظتی لایه‌نازک قبل (الف) و بعد (ب) از آزمایش چرخ بارگذاری

شکل ۱۰، به ترتیب نحوه تولید نمونه‌های مخلوط را نشان می‌دهد.



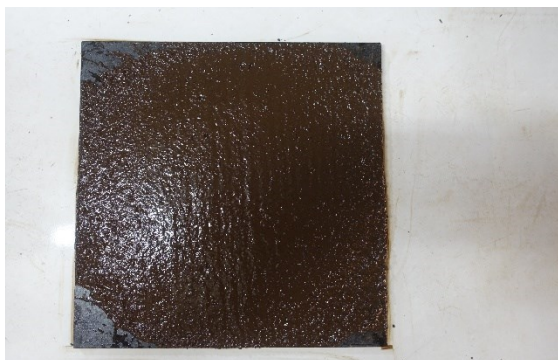
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱۰. نحوه تولید نمونه‌های مخلوط آسفالت حفاظتی لایه نازک

چسبندگی قیر با سنگدانه‌ها در مخلوط آسفالتی را افزایش می‌دهند، در نتیجه، سختی و استحکام مکانیکی مخلوط را بهبود می‌بخشند (مونباندی و همکاران، ۲۰۱۳؛ مائو و همکاران، ۲۰۱۵؛ شی و همکاران، ۲۰۱۹؛ شر و لیائو، ۲۰۲۲).

شکل ذرات و آنالیز سطح پودر بتن بازیافتی ضایعات ساختمانی و فیلر معدنی با استفاده از FESEM مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به تصاویر FESEM در شکل ۱۱، ذرات پودر بتن بازیافتی ضایعات ساختمانی (الف) در مقایسه با فیلر معدنی (ب)، دارای شکل‌های نامنظم و سطوح ناهموار و خشن‌تر بودند که می‌تواند خاصیت جذب و چسبندگی به قیر را بهبود بخشد.

مطابق تحقیقات صورت گرفته قبلی (زیاری و همکاران، ۲۰۱۹؛ زال‌نژاد و حسامی، ۲۰۲۰؛ زال‌نژاد و همکاران، ۲۰۲۲)، شکل نامنظم و سطح زبرتر موجب

۴. نتایج و بحث

۴-۱. مطالعات ریز ساختمانی

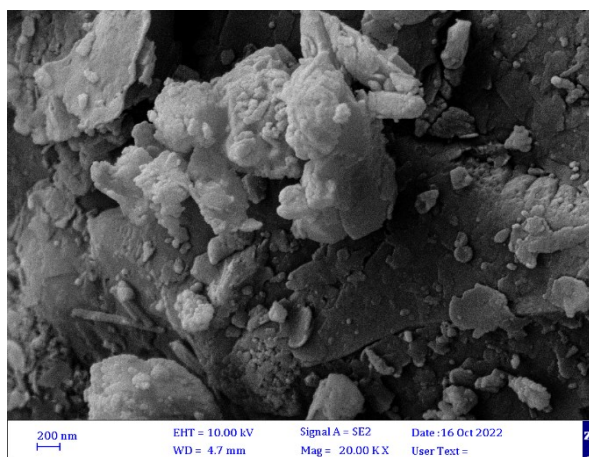
آنالیز نتایج FESEM-EDS در جدول ۶ و شکل ۱۱ آورده شده است. همان‌طور که نشان داده شده، CaO و SiO_2 اجزای اصلی پودر بتن بازیافتی ضایعات ساختمانی را تشکیل می‌دهند که مقادیر آن‌ها بیشتر از فیلر معدنی است و به ترتیب برابر ۷۱۴ و ۴۵/۰۴ درصد می‌باشد.

تحقیقات قبلی نیز گزارش کرده‌اند که ضایعات بتن تولیدشده از تخریب و بازسازی ساختمان‌ها سرشار از سیلیس (SiO_2)، و کلسیم اکسید (CaO) است (چن و همکاران، ۲۰۱۱؛ پارک و همکاران، ۲۰۱۴؛ شون و همکاران، ۲۰۱۵؛ مالدونادو و آلیوارس، ۲۰۱۷؛ راتاناشوتینونت و همکاران، ۲۰۱۸؛ آشیش، ۲۰۱۹؛ شی و همکاران، ۲۰۱۹؛ ما و همکاران، ۲۰۲۰؛ هو و همکاران، ۲۰۲۱؛ آه و همکاران، ۲۰۲۱). در واقع، CaO و SiO_2

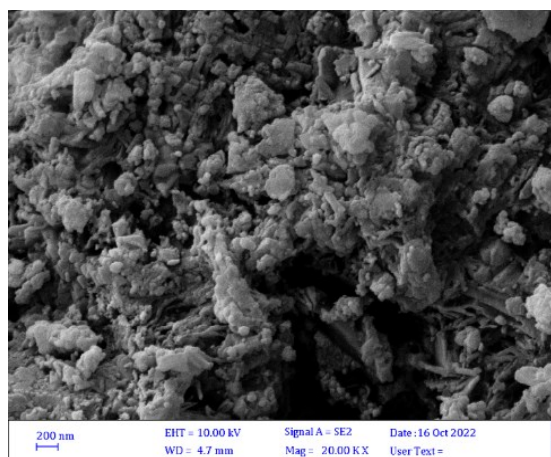
افزایش خاصیت جذب می‌گردد و چسبندگی بهتری را با قیر به همراه خواهد داشت.

جدول ۶. ترکیب شیمیایی فیلر معدنی و پودر بتن بازیافتی ضایعات ساختمانی

نوع مواد	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	Ba	LOI
فیلر معدنی	۰/۰۲۹	۴/۳۴۳	۲/۸۱۶	۸/۰۷۲	۰/۸۷۸	۰/۳۳۶	۴۲/۲۱۹	۰/۲۶۶	-	۱/۵۹	۰/۰۲۲	۳۹/۳۲
پودر بتن بازیافتی ضایعات ساختمانی	۰/۱۵۹	۲/۶۸۲	۲/۹	۱۴/۴۷۶	۱/۰۶۳	۰/۲۰۵	۴۵/۰۴۲	۰/۲۰۷	۰/۱۰۹	۲/۴۰۶	۰/۰۵	۳۰/۵۳



(ب)



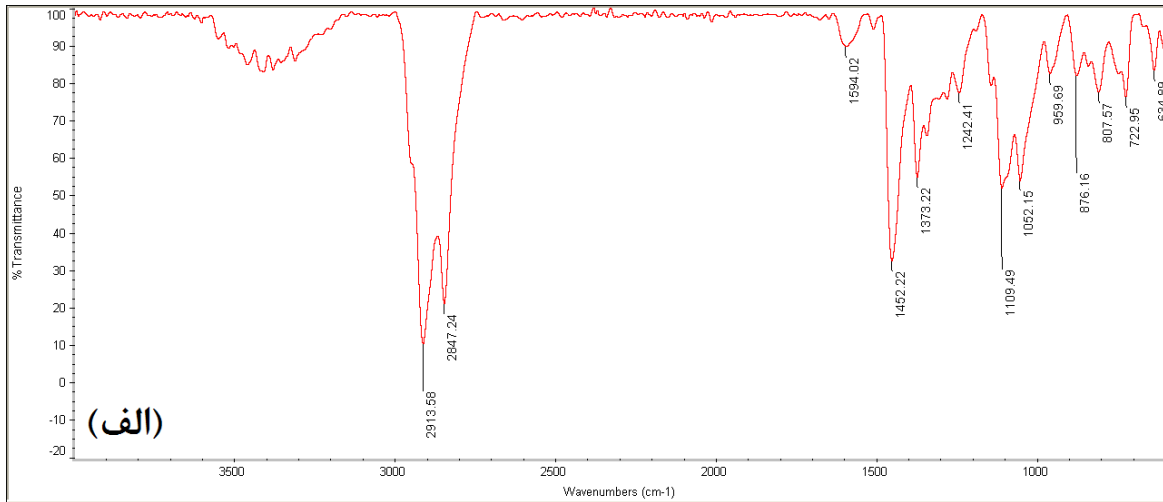
(الف)

شکل ۱۱. عکس‌های FESEM: (الف) پودر بتن بازیافتی ضایعات ساختمانی و (ب) فیلر معدنی

شکل‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ به ترتیب نتایج آنالیز FTIR برای تعیین ساختار و شناسایی ترکیبات آلی، پیوندهای شیمیایی و شناسایی گروه‌های عاملی و ساختار مولکولی نمونه قیر اصلاح شده پلیمری، قیر اصلاح شده پلیمری حاوی فیلر معدنی، و قیر اصلاح شده پلیمری حاوی پودر بتن بازیافتی را نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل ۱۲ (الف) مشاهده می‌شود، در طیف قیر اصلاح شده پلیمری، قله در ناحیه بالای cm^{-1} ۳۰۰۰ تأییدکننده حضور گروه هیدروکسیل OH در ترکیب است.

اسپکترومتری مادون‌قرمز تبدیل فوریه (FTIR^۱)، تکنیکی شیمیایی است که برای شناسایی گروه‌های عاملی از آن استفاده می‌شود. این تکنیک می‌تواند میزان شدت طیف مادون‌قرمز را بر اساس طول موج جذبی رسم نماید. در طیف‌های مادون‌قرمز، هر پیک نشان‌دهنده میزان جذب در عدد موجی متناظر با آن می‌باشد و توسط یک پیوند شیمیایی مشخص ایجاد می‌شود (رامالا و همکاران، ۲۰۱۵؛ لیو و همکاران، ۲۰۱۸؛ گربا و عثمان، ۲۰۲۱).

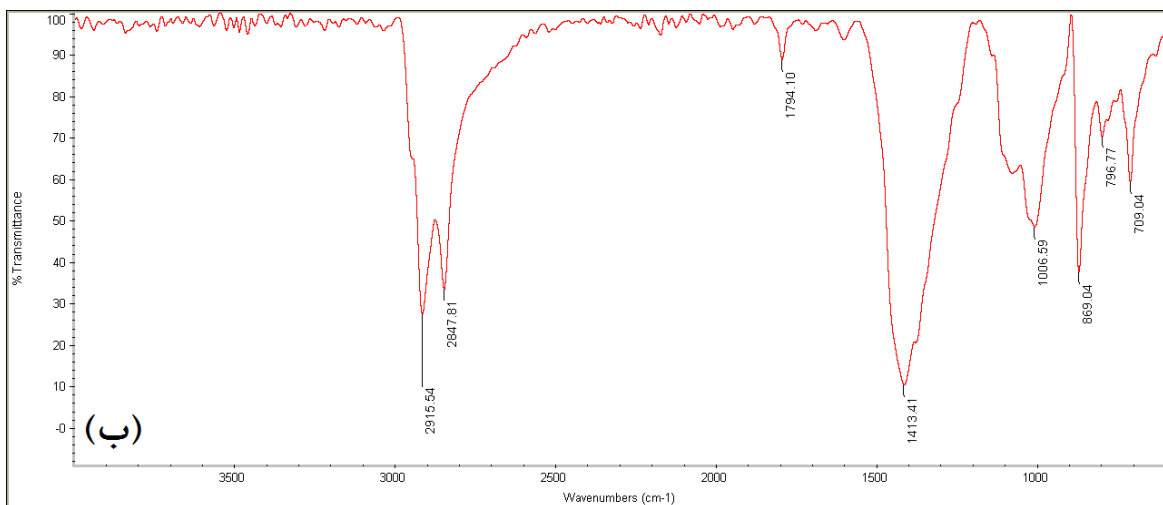
^۱ - Fourier-Transform Infrared Spectroscopy



شکل ۱۲. نتایج آزمایش FTIR برای قیر اصلاح شده مورد استفاده در این تحقیق

هیدروژن اسیدی در ساختار قیر اصلاح شده گشته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تغییرات بسیار جالبی در محدوده 1400 cm^{-1} در طیف دیده می‌شود. قله در محدوده 1413 و 869 cm^{-1} با شدت نسبتاً قوی مربوط به ارتعاشات کششی گروه CaO در ساختار فیلر معدنی است که در فرکانس متفاوتی دیده شده است. این تغییرات به دلیل برهمکنش دوقطبی بین CaO و گروه OH در ساختار قیر خالص است. این موضوع نشان‌دهنده اختلاط مناسب قیر و فیلر معدنی می‌باشد.

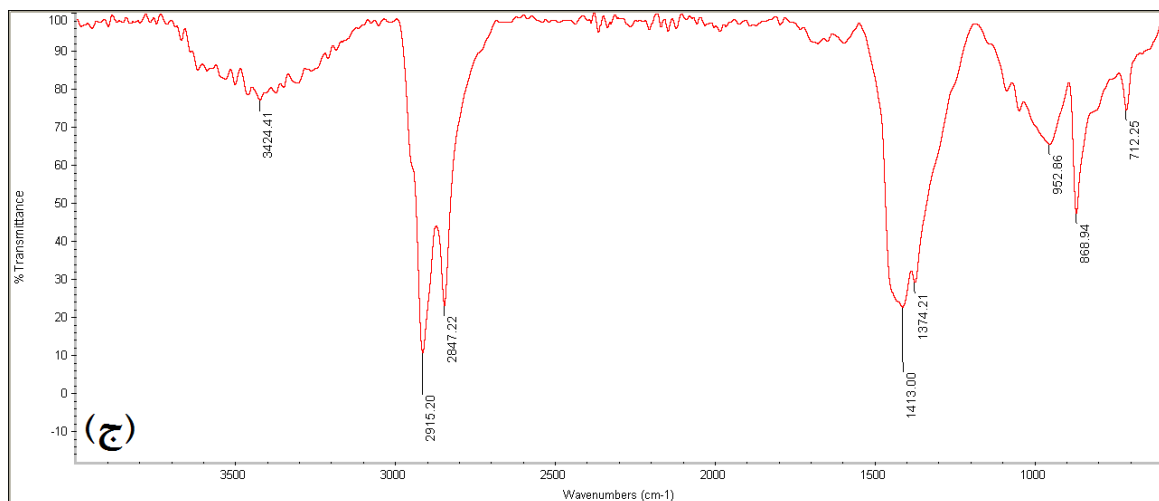
بررسی طیف FTIR در قیر با افزودن فیلر معدنی، در شکل ۱۳- ب نشان داده شده است. همان‌طور که در الگوی پیک‌ها، جابه‌جایی‌ها و شدت آن‌ها مشاهده می‌شود، تغییرات قابل توجهی در ترکیب شیمیایی قیر اصلاح شده ایجاد شده است. پیک در ناحیه بالای cm^{-1} 3000 مربوط به گروه OH در ساختار قیر خالص، با اضافه شدن فیلر معدنی، دیده نشده است. این تغییرات تأییدکننده برهمکنش بین گروه OH در قیر و گروه SiO_2 و CaO در ساختار فیلر معدنی است که منجر به حذف



شکل ۱۳. نتایج آزمایش FTIR برای قیر اصلاح شده به همراه فیلر معدنی مورد استفاده در این تحقیق

بازیافتی است که نسبت به پودر بتن بازیافتی خالص، در فرکانس متفاوت دیده شده است. این تغییر به دلیل برهمکنش دوقطبی بین CaO و گروه OH در ساختار قیر خالص است. این موضوع نشان‌دهنده اختلاط مناسب قیر و پودر بتن بازیافتی می‌باشد. قله در ناحیه 11374 cm^{-1} با شدت نسبتاً قوی مربوط به ارتعاشات خمشی متقارن و نامتقارن گروه متیل (گروه CH_3) در ساختار قیر خالص است. با اضافه شدن پودر بتن بازیافتی به قیر خالص، هترو اتم‌های Si ، Ca و اکسیژن با بستر قیر خالص پیوند شیمیایی برقرار کرده و گروه عاملی C-O ، C-Si ، C-Ca معمولاً در ناحیه 1000 cm^{-1} ظاهر می‌شود. این امر سبب افزایش ویسکوزیته قیر اصلاح شده می‌گردد.

بررسی طیف FTIR در قیر با افزودن پودر بتن بازیافتی ساختمانی در شکل ۱۴-ج نشان داده شده است. از الگوی پیک‌ها، جابه‌جایی‌ها و شدت آن‌ها مشاهده می‌شود که تغییرات قابل توجهی در ترکیب شیمیایی قیر اصلاح‌شده امولسیون ایجاد شده است. پیک در ناحیه بالای 3000 cm^{-1} مربوط به گروه OH در ساختار قیر خالص با اضافه شدن پودر بتن بازیافتی در ناحیه 3424.41 cm^{-1} به صورت پهن دیده شده است که تأییدکننده برهمکنش هیدروژنی بین گروه OH در قیر و گروه CaO ، SiO_2 در ساختار پودر بتن بازیافتی است. تغییرات مهمی در محدوده 1400 cm^{-1} در طیف دیده شده است. قله در محدوده 1413 و 868.94 cm^{-1} با شدت نسبتاً قوی مربوط به ارتعاشات کششی گروه CaO در ساختار پودر بتن



شکل ۱۴. نتایج آزمایش FTIR برای قیر اصلاح شده به همراه پودر بتن بازیافتی ساختمانی مورد استفاده در این تحقیق

چسبندگی به بیشترین مقدار می‌رسد. لذا، با افزایش درصد قیر، چسبندگی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، نمونه‌های اصلاح‌شده، به‌خصوص نمونه‌های حاوی ۷۵ و ۱۰۰ درصد پودر بتن ضایعات ساختمانی، بیشترین مقدار گشتاور پیچشی را در میزان قیر ۸/۵ و ۹ درصد به دست آورده‌اند. بنابراین، دارای بیشترین مقدار چسبندگی نسبت به سایر مخلوط‌ها هستند. به‌عنوان نمونه، در قیر باقی‌مانده ۹ درصد، مخلوط‌های

۲-۴. نتایج عملکرد مخلوط‌های آسفالت حفاظتی لایه نازک

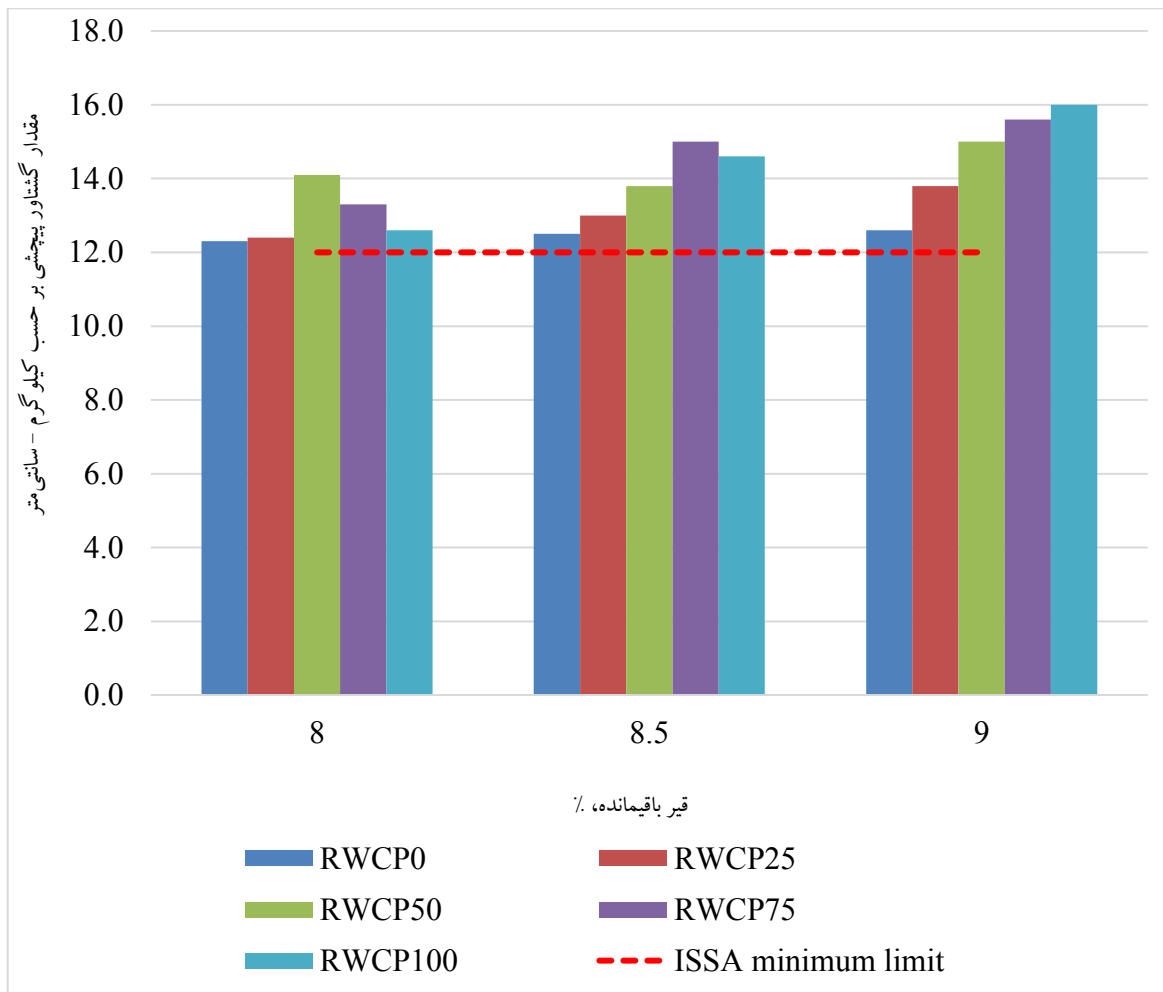
۱-۲-۴. آزمایش چسبندگی مرطوب

با توجه به شکل‌های ۱۵ و ۱۶ و نتایج حاصله، تمامی مخلوط‌ها با توجه به دستورالعمل ISSA 143 گیرش و مقاومت لازم برای بازگشایی ترافیک، به‌ترتیب در مدت زمان ۳۰ دقیقه و ۶۰ دقیقه، را کسب کرده‌اند. در مدت زمان ۳۰ و ۶۰ دقیقه، با افزایش قیر از ۸ به ۹ درصد،

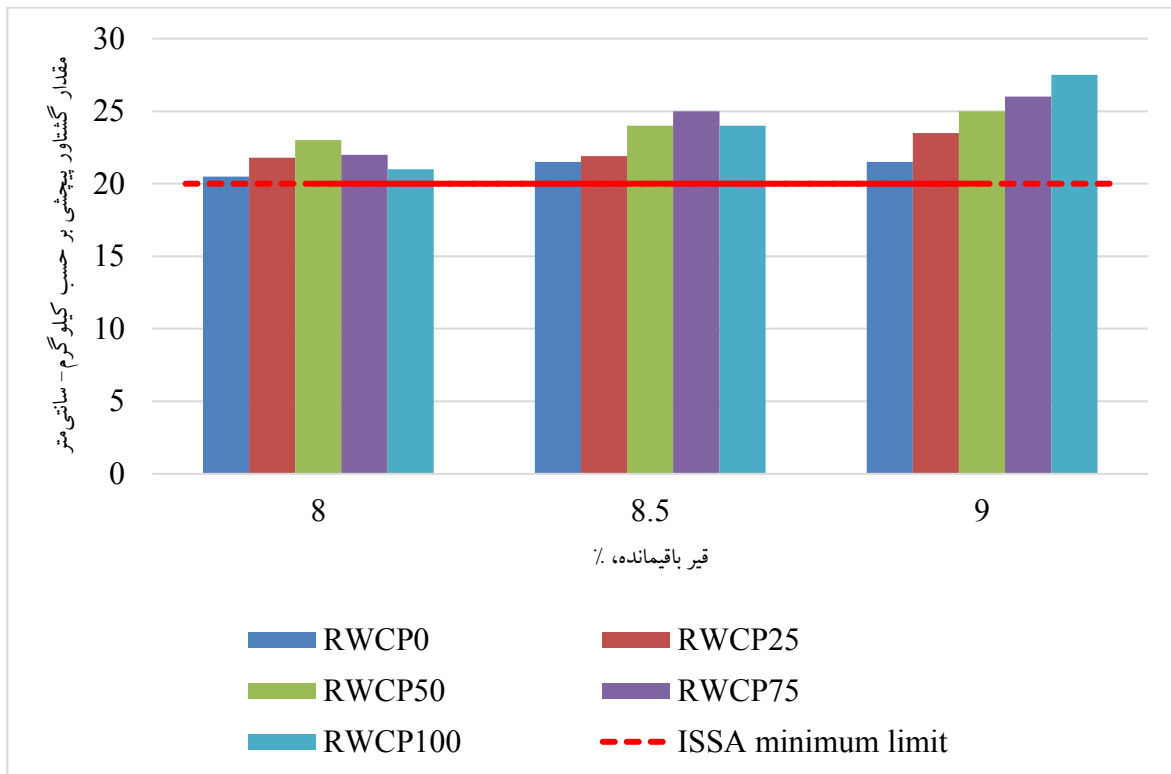
RWCP100 عملکرد بهتری نسبت به سایر مخلوط‌ها داشته‌اند.

بر اساس آنالیز شیمیایی، عمده ترکیب شیمیایی پودر بتن ضایعات ساختمانی را CaO و SiO₂ تشکیل داده است که پس از ترکیب و اختلاط با قیر امولسیون، پیوند خوبی بین آن‌ها شکل گرفته و موجب افزایش چسبندگی در مخلوط آسفالتی می‌شود که با نتایج تحقیق پژوهشگران دیگر مانند اختر و سرماه (۲۰۱۸)، هو و همکاران (۲۰۲۱) و منجوناتا و همکاران (۲۰۲۱) مطابقت دارد.

RWCP100، RWCP75، RWCP50، RWCP25 نسبت به نمونه شاهد RWCP0 به ترتیب موجب افزایش چسبندگی در مدت زمان ۳۰ دقیقه به میزان ۹/۵، ۱۹، ۲۳/۸ و ۲۷ درصد و در مدت زمان ۱ ساعت به میزان ۹/۳، ۱۶/۳، ۲۰/۹ و ۲۷/۹ درصد شده‌اند. نکته دیگری که حائز اهمیت است اینکه با افزایش قیر باقیمانده، مقدار بهینه پودر بتن ضایعات ساختمانی افزایش می‌یابد. به طوری که در قیر باقیمانده ۸ درصد، مخلوط RWCP50 بیشترین چسبندگی را دارد. ولی با افزایش قیر به ۸/۵ و ۹ درصد، به ترتیب مخلوط‌های RWCP75 و



شکل ۱۵. نتایج آزمایش چسبندگی مرطوب در ۳۰ دقیقه



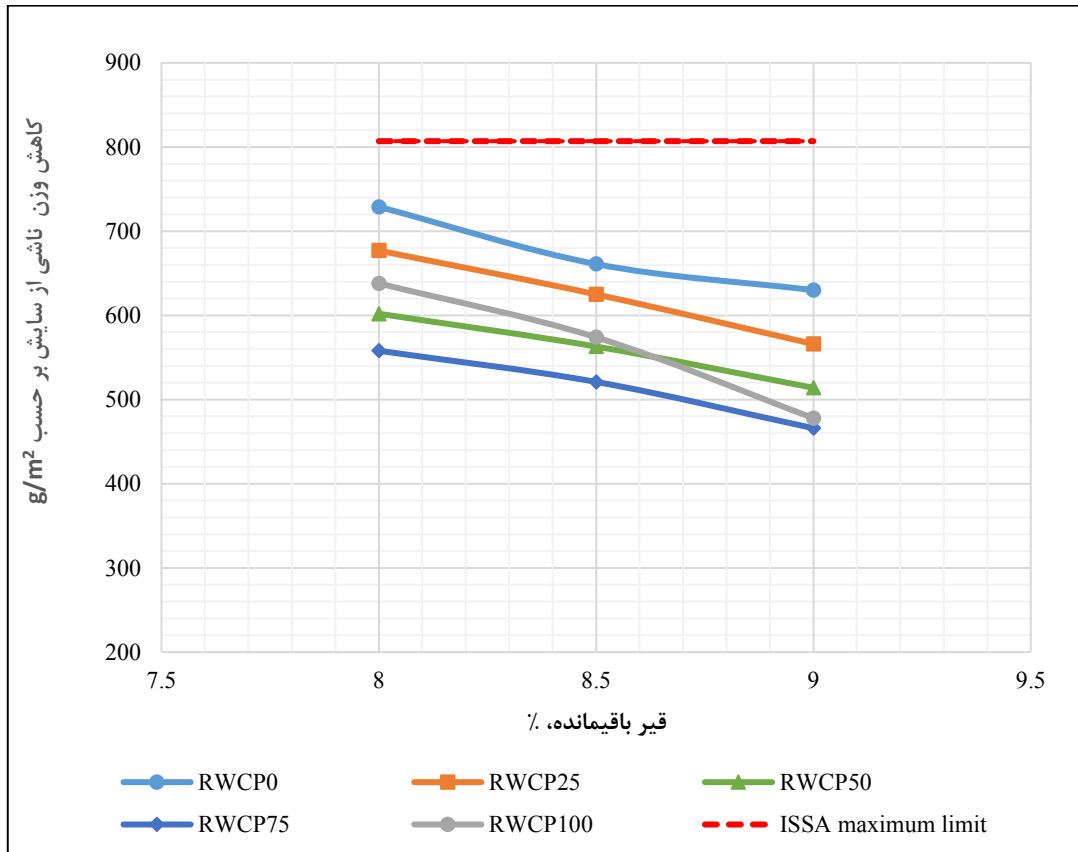
شکل ۱۶. نتایج آزمایش چسبندگی مرطوب در ۶۰ دقیقه

بنابراین، در قیر باقیمانده ۸ درصد، مخلوط‌های RWCP50 و RWCP75 افت وزنی کمتری نسبت به سایر مخلوط‌ها دارند؛ ولی با افزایش قیر باقیمانده به ۹ درصد، مخلوط‌های RWCP75 و RWCP100 عملکرد بهتری نسبت به سایر مخلوط‌ها دارند که نشان می‌دهد با افزایش مقدار قیر باقیمانده، درصد بهینه پودر بتن ضایعات ساختمانی افزایش خواهد یافت. در مجموع، در صورت جایگزینی پودر بتن ضایعات ساختمانی، عملکرد سایشی مخلوط‌ها بهبود می‌یابد، ولی بایستی مقدار پودر بتن ضایعات ساختمانی به‌منظور به‌حداقل رساندن پدیده‌عریان‌شدگی تعیین گردد.

بهبود چسبندگی و سطوح ناهموار و خشن‌تر باعث می‌شود تا ذرات در شرایط مرطوب در برابر سایش، از خود مقاومت خوبی نشان دهند که با نتایج پژوهشگران دیگر (کی‌منش و همکاران، ۲۰۲۱) مطابقت دارد.

۲-۲-۴. آزمایش سایش در شرایط مرطوب

نتایج آزمایش WTAT در مدت زمان ۱ ساعت غوطه‌وری برای همه مخلوط‌های آسفالت حفاظتی لایه‌نازک در شکل ۱۷ نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۷، افزایش درصد قیر سبب بهبود عملکرد سایشی مخلوط‌ها شده است. لذا، با افزایش قیر باقیمانده از ۸ به ۹ درصد، افت وزنی ناشی از سایش کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، از منظر پودر بتن ضایعات ساختمانی، در قیر باقیمانده ۸ درصد، مخلوط‌های RWCP75، RWCP50، RWCP25 و RWCP100 نسبت به نمونه شاهد (RWCP0) به ترتیب به مقدار ۷، ۱۷، ۲۳ و ۱۲ درصد عملکرد سایش را بهبود داده‌اند. با افزایش قیر به ۹ درصد، عملکرد مخلوط‌های RWCP75، RWCP50، RWCP25 و RWCP100 نسبت به نمونه شاهد (RWCP0) به ترتیب به مقدار ۱۰، ۱۸، ۲۶ و ۲۴ درصد بهبود یافته است.



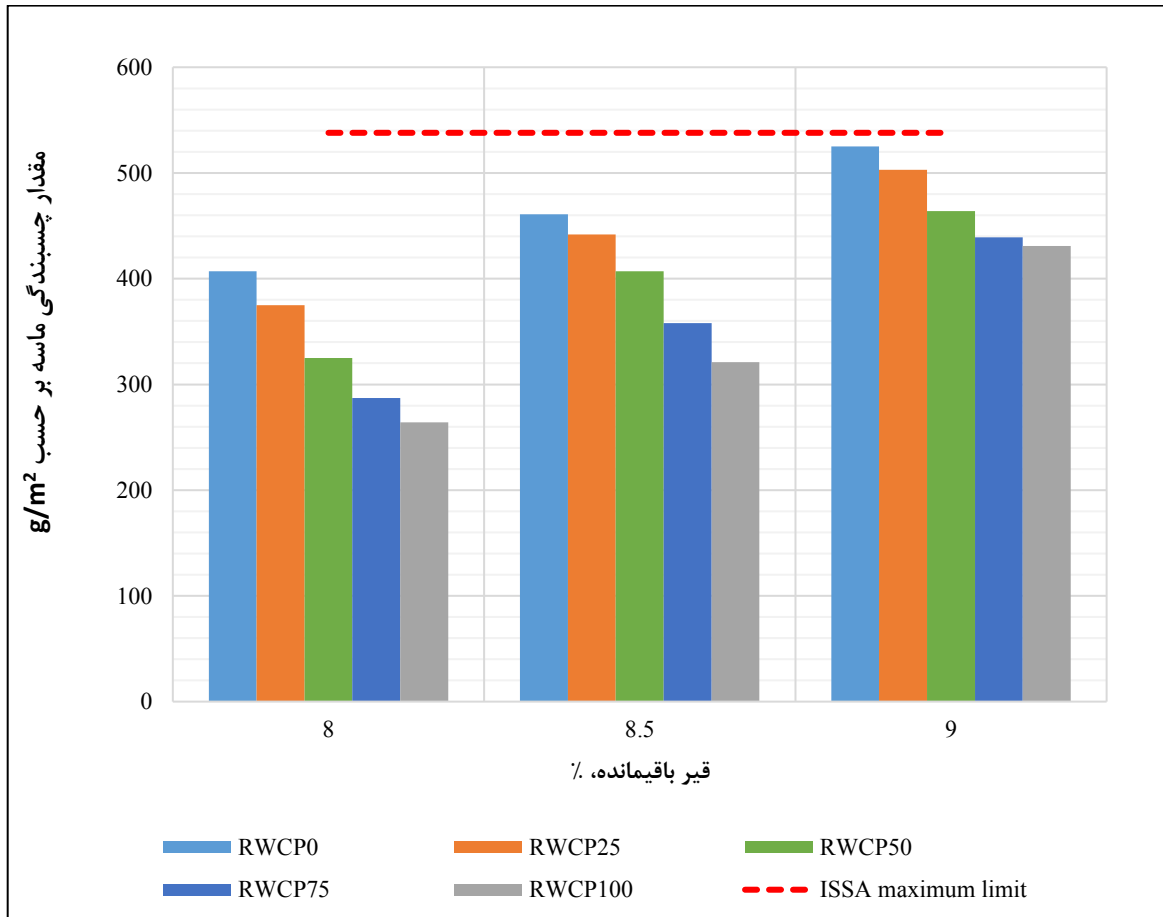
شکل ۱۷. نتایج آزمایش سایش در شرایط مرطوب در ۱ ساعت برای هر یک از مخلوط‌های اسلاری سیل

۴-۲-۳. آزمایش چرخ بارگذاری شده- چسبندگی

ماسه

مطابق نتایج این نمودار، عملکرد قیر زدگی مخلوط‌ها، با افزایش درصد پودر بتن ضایعات ساختمانی بهبود می‌یابد. به‌عنوان نمونه، در قیر باقیمانده ۸ درصد، مخلوط‌های RWCP25، RWCP50، RWCP75 و RWCP100 نسبت به نمونه شاهد RWCP0 به ترتیب به مقدار ۸، ۲۰، ۲۹ و ۳۵ درصد سبب کاهش قیرزدگی شده است که با افزایش قیر به ۹ درصد، عملکرد مخلوط‌های RWCP25، RWCP50، RWCP75 و RWCP100 نسبت به نمونه شاهد RWCP0 به ترتیب به مقدار ۴، ۱۲، ۱۶ و ۱۸ درصد بهبود یافته است. بنابراین، در قیر باقیمانده ۸، ۹/۵ و ۹ درصد، مخلوط‌های RWCP75 و RWCP100 بهترین عملکرد را داشته‌اند. از سوی دیگر، از منظر قیر باقیمانده، با افزایش قیر باقیمانده، قیرزدگی مخلوط‌ها

به‌صورت صعودی افزایش پیدا می‌کند. ولی با این وجود، تمام مخلوط‌ها در محدوده مجاز آیین‌نامه می‌باشند. همچنین، نکته‌ای که حائز اهمیت است اینکه در قیر ۸، ۹/۵ و ۹ درصد، پودر بتن ضایعات ساختمانی به طور میانگین به ترتیب، ۲۳، ۱۷ و ۱۳ درصد عملکرد آسفالت در برابر قیرزدگی را بهبود داده است. این بدان معناست که در صورت افزایش مقدار قیر، تأثیر پودر بتن ضایعات ساختمانی برای بهبود قیرزدگی کاهش پیدا می‌کند. به‌عبارت دیگر، پودر بتن ضایعات ساختمانی سبب کاهش چسبندگی ماسه شده است. سایر پژوهشگران (زیاری و همکاران، ۲۰۲۲؛ جلالیان خشنود و همکاران، ۲۰۲۲) نیز گزارش کرده‌اند که استفاده از پودرهای بازیافتی حاوی کلسیم اکسید و سیلیس موجب کاهش مقدار قیرزدگی در مخلوط‌های آسفالتی شده است که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد.

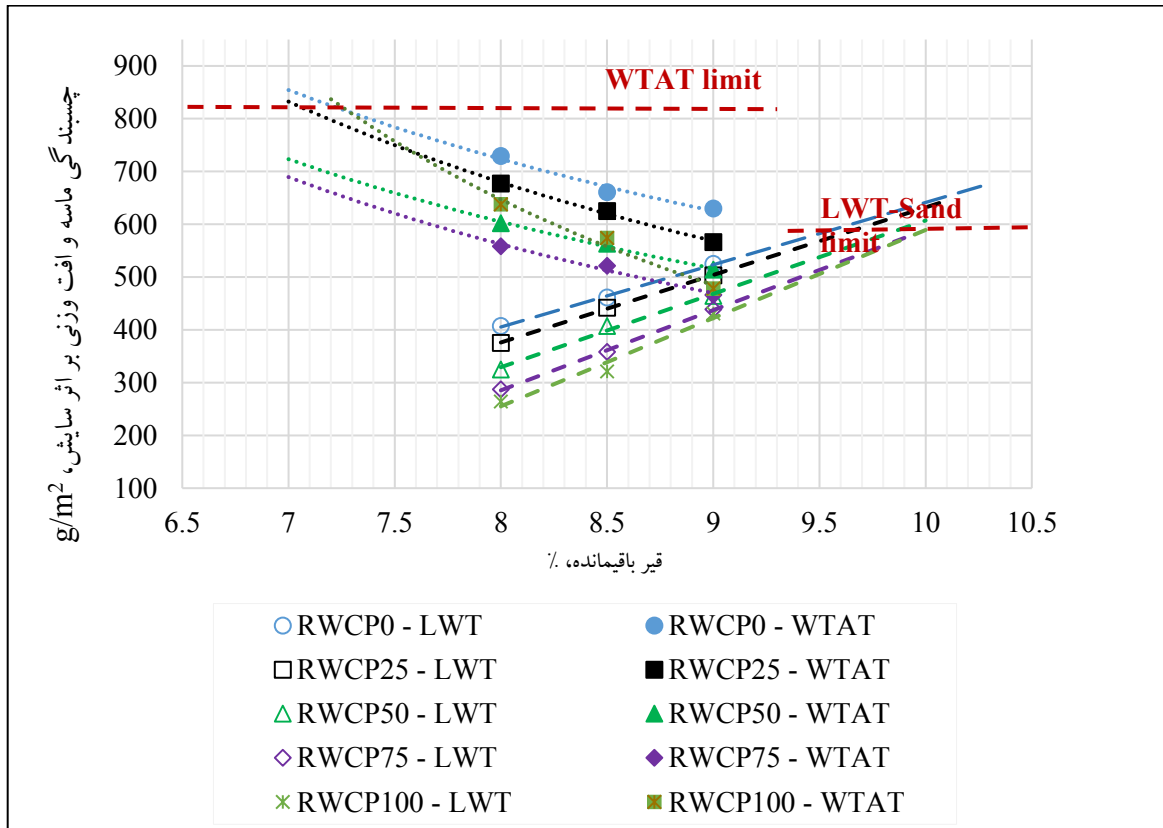


شکل ۱۸. چسبندگی ماسه (پتانسیل قیرزدگی) مخلوط‌های اسلاری سیل در آزمایش چرخ بارگذاری - چسبندگی ماسه

۴-۲-۴. تعیین مقدار بهینه قیر باقیمانده

با بررسی نتایج آزمایش‌های چرخ بارگذاری شده - چسبندگی ماسه و سایش در شرایط مرطوب، محدوده مجاز قیر باقیمانده و مقدار بهینه آن مطابق ISSA TB111 به دست می‌آید. نمودار شکل ۱۹، حاصل از تلفیق نمودار آزمایش چرخ بارگذاری - چسبندگی ماسه و نمودار آزمایش سایش در شرایط مرطوب می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مقدار پودر بتن ضایعات

ساختمانی، محدوده مجاز و مقدار درصد قیر بهینه افزایش می‌یابد. مطابق این شکل، بیشترین مقدار قیر بهینه متعلق به مخلوط‌های RWCP75 و RWCP100 است. لذا، در صورت افزایش قیر باقیمانده، بهتر است مقدار پودر بتن ضایعات ساختمانی برای بهبود عملکرد افزایش یابد. در مجموع، قیر بهینه مخلوط‌های اصلاح‌شده حاوی پودر بتن ضایعات ساختمانی تحت تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی همچون جذب آب و درصد زیاد CaO و SiO_2 می‌باشد.

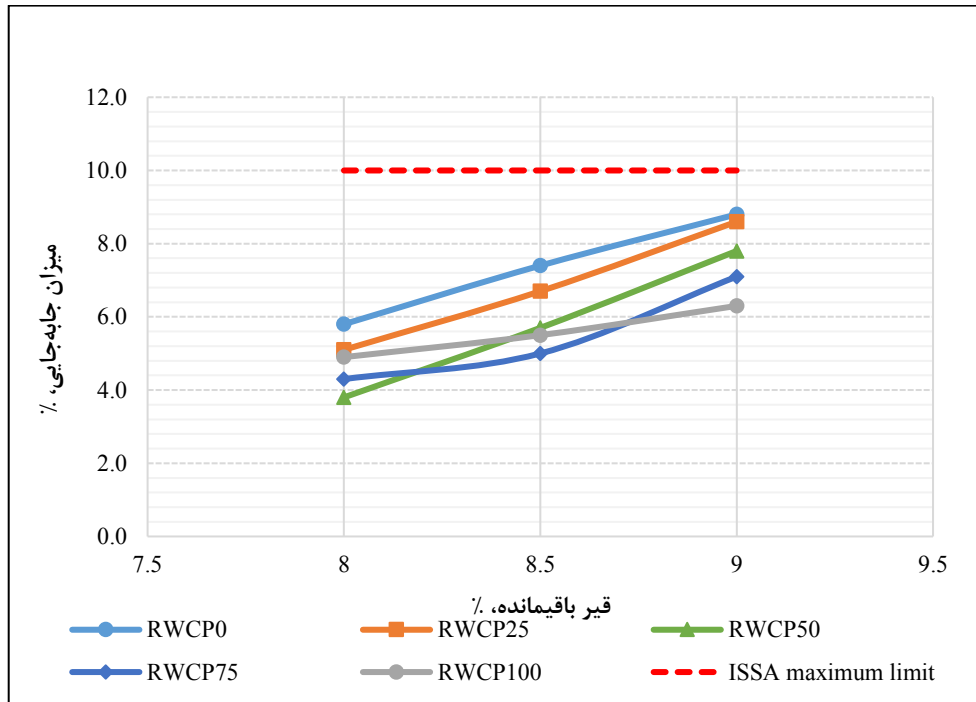


شکل ۱۹. ترکیب نتایج آزمایش سایش در شرایط مرطوب در مدت زمان ۱ ساعت و آزمایش چرخ بارگذاری شده - چسبندگی ماسه

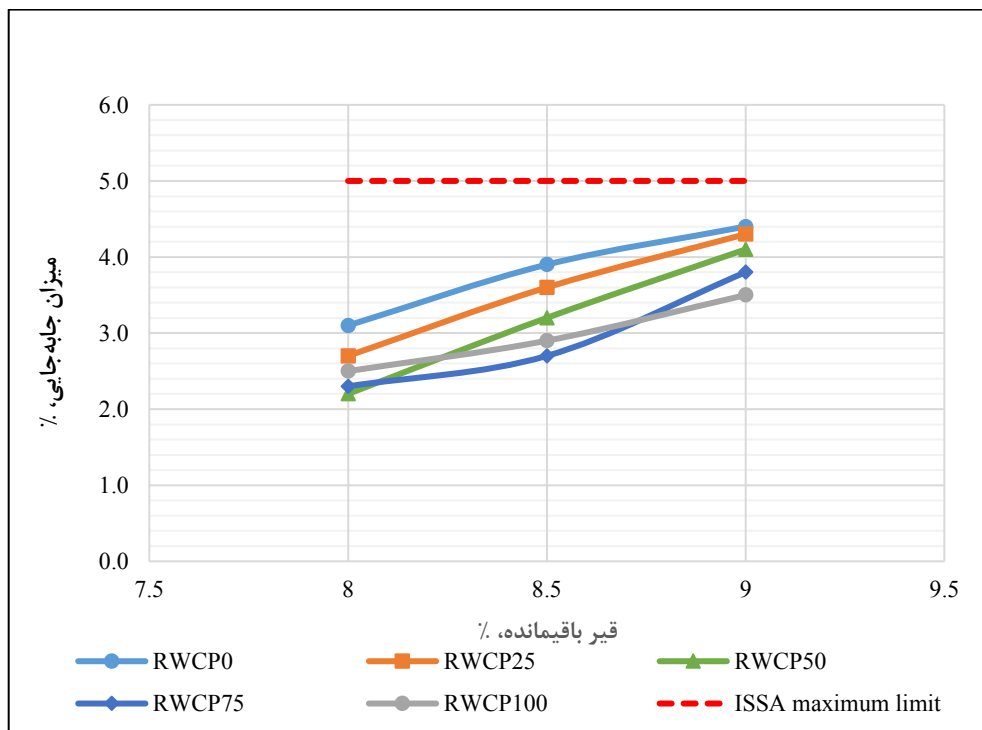
RWCP75 و RWCP100 عملکرد بهتری نسبت به سایر مخلوطها داشته‌اند. بنابراین، در صورت افزایش قیر باقیمانده، پودر بتن ضایعات ساختمانی باید برای کاهش جابه‌جایی افزایش یابد. از سوی دیگر، از منظر قیر باقیمانده، افزایش قیر باقیمانده از ۸ به ۹ درصد باعث افزایش جابه‌جایی عمودی و افقی مخلوطها می‌شود. پس می‌توان نتیجه گرفت که کاهش مقدار قیر باقیمانده و افزایش مقدار پودر بتن ضایعات ساختمانی تا مقدار بهینه برای کاهش میزان جابه‌جایی‌ها امری لازم و ضروری است. در پژوهش‌های قبلی (نوید و همکاران، ۲۰۱۹؛ محمدآوی و مولنهور، ۲۰۲۰؛ جلالیان خشنود و همکاران، ۲۰۲۲) نیز گزارش شده که استفاده از مواد حاوی درصد زیاد کلسیم اکسید و سیلیس سبب کاهش جابه‌جایی در آسفالت حفاظتی لایه‌نازک شده است که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد.

۴-۲-۵. آزمایش چرخ بارگذاری شده- جابه‌جایی
نتایج آزمایش LWT برای مخلوطهای آسفالت حفاظتی لایه‌نازک از دو منظر مقدار قیر امولسیون و مقدار پودر بتن ضایعات ساختمانی قابل بررسی است. مطابق شکل- های ۲۰ و ۲۱، نمونه‌های حاوی پودر بتن ضایعات ساختمانی عملکرد بهتری نسبت به نمونه شاهد داشته‌اند. به‌عنوان نمونه، در قیر باقیمانده ۹ درصد، مخلوطهای RWCP75، RWCP50، RWCP25 و RWCP100 نسبت به نمونه شاهد RWCP0، موجب بهبود عملکرد جابه‌جایی عمودی به ترتیب به میزان ۲، ۱۱، ۱۹ و ۲۸ درصد و بهبود عملکرد جابه‌جایی افقی به ترتیب به میزان ۲، ۷، ۱۴ و ۲۰ درصد شده‌اند. نکته‌ای که حائز اهمیت است این است که در قیر باقیمانده ۸ درصد، مخلوط RWCP50 بهترین عملکرد را در جابه‌جایی دارد. ولی با افزایش قیر به ۸/۵ و ۹ درصد، به ترتیب مخلوطهای

بررسی تأثیر استفاده از پودر بتن بازیافتی ضایعات ساختمانی بر عملکرد آسفالت ...



شکل ۲۰. میزان جابه‌جایی عمودی مخلوط‌ها در درصد‌های مختلف قیر



شکل ۲۱. میزان جابه‌جایی افقی مخلوط‌ها در درصد‌های مختلف قیر

R2021b، شبکه عصبی مصنوعی با تعداد پنج ورودی شامل قیر، آب، فیلر معدنی، فیلر پودر بتن بازیافتی ضایعات ساختمانی، و سنگدانه برای ورودی^۱ مدل، در

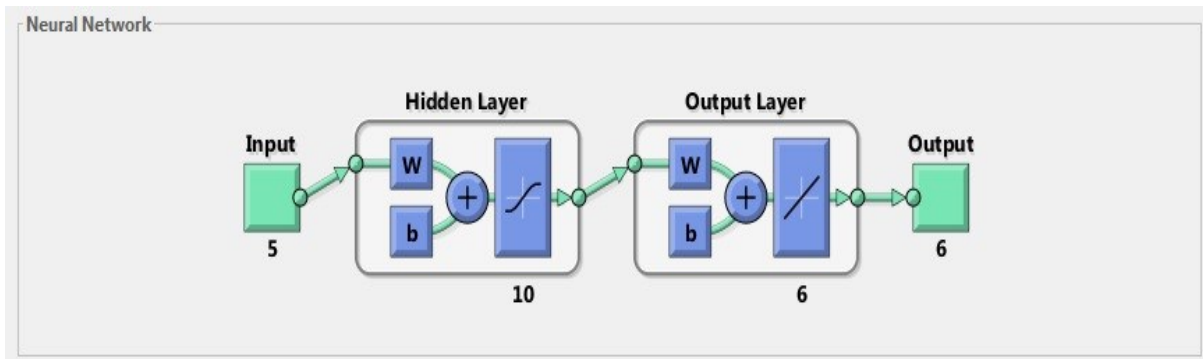
۳-۴. شبکه‌های عصبی مصنوعی

در این تحقیق، با استفاده از نرم‌افزار MATLAB

¹- Input

رطوبتی) می‌باشد. در این مدل، تعداد ۱۰ لایه مخفی مورد استفاده قرار گرفت. همچنین، ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش^۲، ۱۵ درصد برای اعتبارسنجی^۳ و ۱۵ درصد نیز برای آزمایش^۴ شبکه عصبی در نظر گرفته شد.

نظر گرفته شد و در شکل ۲۲ نشان داده شده است که شامل شش خروجی (هدف^۱) از جمله جابه‌جایی افقی، جابه‌جایی عمودی، چسبندگی مرطوب در ۳۰ دقیقه، چسبندگی مرطوب در ۶۰ دقیقه، قیرزدگی (چسبندگی ماسه)، و از دست‌رفتگی سنگدانه (مقاومت سایش



شکل ۲۲. معماری شبکه عصبی مصنوعی مورد استفاده در این تحقیق

داده‌ها هستند. آموزش بردارها تا زمانی ادامه می‌یابد که خطای شبکه در بردارهای صحت (اعتبار) کاهش یابد. پس از آن که شبکه آموزش دید، فرایند یادگیری متوقف می‌شود. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، خطای میانگین مربعات در مرحله آموزش کمترین بوده و در مرحله آزمایش نیز روند کاهشی مناسبی داشته است. این موضوع بیانگر عملکرد قابل اطمینان شبکه عصبی طراحی شده است. از این‌رو، در این تحقیق، پس از تعیین مقادیر خطای میانگین مربعات برای شبکه‌های مختلف، شبکه‌ای با مقدار خطای میانگین مربعات ۳۳۹/۳۹۰۴ انتخاب گردید.

برای ارزیابی عملکرد شبکه عصبی مذکور از خطای میانگین مربعات (MSE)^۵ استفاده گردید.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2 \quad (5)$$

که، Y مقادیر محاسباتی، \bar{Y} میانگین محاسباتی، i شماره داده و n کل داده‌ها است.

شکل ۲۳، خطای میانگین مربعات شبکه را نشان می‌دهد که از مقادیر بزرگ شروع شده و به مقادیر کوچک‌تر کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، این مسئله نشان می‌دهد که شبکه در حال یادگیری است. این نمودار دارای سه خط است که هر یک نماینده یک دسته از

^۴- Test

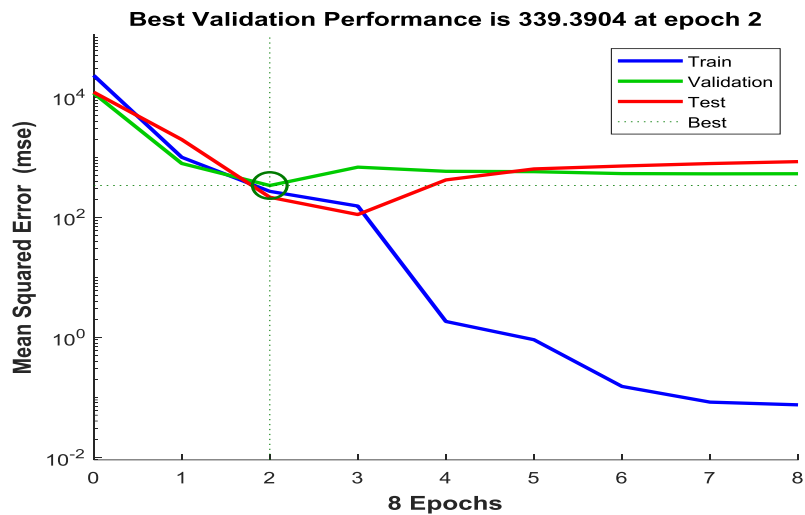
^۵- Mean squared error

^۱- Target

^۲- Train

^۳- Validation

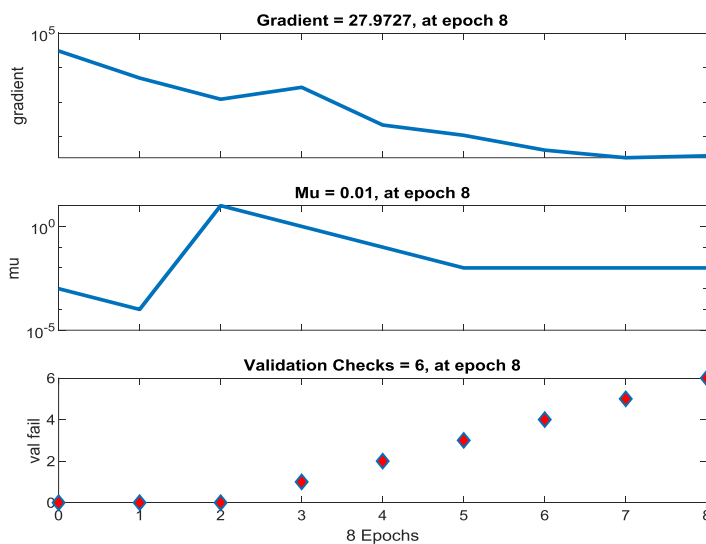
بررسی تأثیر استفاده از پودر بتن بازیافتی ضایعات ساختمانی بر عملکرد آسفالت ...



شکل ۲۳. خطای میانگین مربعات برای شبکه عصبی با ۱۰ نورون در لایه مخفی

هنگامی که کنترل‌های اعتبار^۱ به ۶ برسد، متوقف می‌شود. گرادیان برابر با ۲۷/۹۷۲۷ در دوره ۸ و تعداد بررسی‌های اعتبارسنجی ۶ در دوره ۸ است.

در شکل ۲۴، روند رسیدن به مقدار خطای میانگین مربعات به دست آمده در فرایند آموزش برای داده‌های مختلف توسط نمودارهای شیب و اعتبارسنجی نشان داده شده است. فرایند آموزش بر اساس مقدار پیش‌فرض،



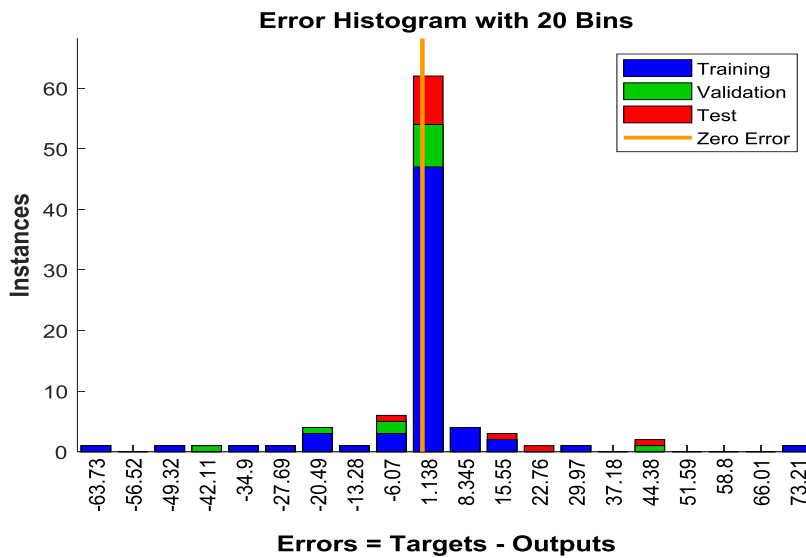
شکل ۲۴. بررسی گرادیان و اعتبارسنجی در هر یک از دوره‌ها

رنگ قرمز نشان داده شده‌اند. مطابق شکل ۲۵، تمام مقادیر خطا در محدوده ۶۳/۷۳- تا ۷۳/۲۱ هستند که نشان‌دهنده خطای بسیار ناچیز است.

نمودار خطا^۲ در شکل ۲۵، عملکرد شبکه عصبی مصنوعی را نشان می‌دهد. داده‌های آموزش با رنگ آبی، داده‌های اعتبارسنجی با رنگ سبز، و داده‌های تست با

^۲- Error histogram

^۱- Validation checks



شکل ۲۵. نمودار خطای شبکه عصبی مصنوعی مورد استفاده در این تحقیق

ضایعات ساختمانی جایگزین فیلر مورد بررسی قرار گرفتند. در این راستا، مشخصات فیزیکی و شیمیایی با استفاده از آزمایش‌های XRF، FESEM، و سپس ویژگی-های گیرش، سایش، قیرزدگی و جابه‌جایی به ترتیب با آزمایش‌های چسبندگی مرطوب، سایش در شرایط مرطوب، چرخ بارگذاری شده- چسبندگی ماسه و چرخ بارگذاری شده- جابه‌جایی ارزیابی شدند. بررسی و تحلیل نتایج آزمایش‌های انجام شده به صورت زیر جمع‌بندی می‌شود:

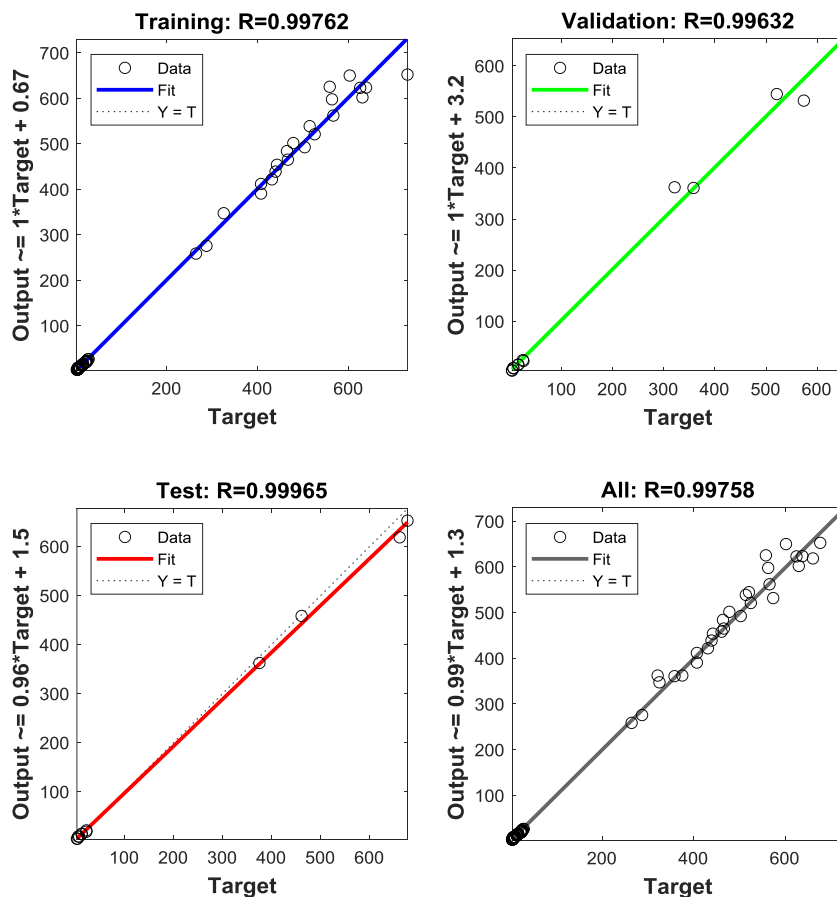
- نتایج آزمایش چسبندگی مرطوب در زمان‌های ۳۰ و ۶۰ دقیقه نشان داد که با افزایش پودر بتن بازیافتی ضایعات ساختمانی، به دلیل درصد زیاد SiO_2 و CaO موجود در پودر بتن بازیافتی ساختمانی، مقدار چسبندگی مخلوط‌های آسفالتی افزایش خواهد یافت. در این راستا، نمونه‌های اصلاح‌شده، به خصوص نمونه‌های حاوی ۷۵ و ۱۰۰ درصد پودر ضایعاتی، با افزایش چسبندگی در حدود ۲۲ درصد بیشتر از مخلوط شاهد، بیشترین مقدار چسبندگی نسبت به سایر نمونه‌ها، در همه درصد‌های قیر باقیمانده، داشته‌اند.

در شکل ۲۶، ضریب همبستگی برای هر یک از مراحل آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش، و همچنین مقایسه خروجی شبکه با نتایج آزمایشگاه برای مخلوط‌های آسفالتی ارائه شده است. هر قدر ضریب همبستگی بر خط نقطه‌چین ($Y=X$) منطبق‌تر باشد عملکرد شبکه عصبی بهتر خواهد بود. بهترین شبکه، شبکه‌ای است که ۱۰ نرون در لایه پنهان خود دارد، زیرا مقادیر رگرسیون خوبی ارائه داده و دارای کمترین خطای میانگین در تمام شبکه‌ها می‌باشد. معیار عملکرد شبکه، یعنی ضریب همبستگی هر یک از داده‌ها را در آزمون نهایی نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، مقدار R برای پیش‌بینی مقادیر مخلوط‌های آسفالت حفاظتی لایه‌نازک حاوی پودر بتن بازیافتی ضایعات ساختمانی برابر ۰/۹۹۷۵ است که نشان‌دهنده همبستگی بسیار خوب بین مقادیر آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده می‌باشد.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مخلوط‌های آسفالت حفاظتی حاوی صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد پودر بتن بازیافتی

بررسی تأثیر استفاده از پودر بتن بازیافتی ضایعات ساختمانی بر عملکرد آسفالت ...



شکل ۲۶. رگرسیون داده‌های مربوط به آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش شبکه با ۱۰ نورون در لایه مخفی

عملکرد جابه‌جایی عمودی به میزان ۲۸ درصد و بهبود عملکرد جابه‌جایی افقی به میزان ۲۰ درصد شده است.

- مطابق آزمایش سایش در شرایط مرطوب، و چرخ بارگذاری- چسبندگی ماسه، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش مقدار پودر بتن بازیافتی ضایعات ساختمانی، محدوده مجاز و مقدار درصد قیر بهینه افزایش می‌یابد. لذا، در صورت افزایش قیر باقیمانده، بهتر است مقدار پودر بتن بازیافتی ضایعات ساختمانی برای بهبود عملکرد افزایش یابد.

- مطابق نتایج حاصل از شبکه عصبی مصنوعی، که شامل ۱۰ نورون در لایه مخفی بود، مقدار R برای

- مطابق آزمایش سایش در شرایط مرطوب، افزایش پودر بتن بازیافتی ضایعات ساختمانی و نیز افزایش درصد قیر سبب بهبود عملکرد سایشی مخلوط‌ها شده است. بر این اساس، نمونه‌های حاوی ۷۵ درصد پودر بتن بازیافتی ضایعات ساختمانی، بهترین عملکرد را در تمامی قیرهای باقی‌مانده داشتند.

- بر اساس نتایج آزمایش چرخ بارگذاری- جابه‌جایی، افزایش پودر بتن بازیافتی ضایعات ساختمانی و همچنین افزایش درصد قیر، موجب بهبود عملکرد مخلوط‌ها شده است. بر این اساس، در قیر باقیمانده ۹ درصد، مخلوط RWCP100 نسبت به نمونه شاهد (RWCP0)، موجب بهبود

پودر بتن بازیافتی ضایعات ساختمانی را به عنوان جایگزین فیلر معدنی در آسفالت حفاظتی لایه نازک، با توجه به بهبود ویژگی‌های عملکردی آن و نیز مسائل زیست‌محیطی در چارچوب توسعه پایدار، توصیه می‌کند.

پیش‌بینی مقادیر مخلوط‌های آسفالت حفاظتی لایه نازک حاوی پودر بتن بازیافتی ضایعات ساختمانی، برابر ۰/۹۹۷۵ به دست آمد که نشان‌دهنده همبستگی بسیار خوب بین مقادیر آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده می‌باشد.

• این مطالعه، بر اساس بررسی‌های آزمایشگاهی و بهره‌گیری از شبکه‌های عصبی مصنوعی، استفاده از

۶. مراجع

- حسینی، س.، زال‌نژاد، ع.، شیرین‌آبادی، ر. و امامی کورنده، م. ۱۴۰۱. "بررسی تأثیر استفاده از پسماند صنعتی مس در عملکرد آسفالت حفاظتی لایه نازک". مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۸(۳۲): ۵۰-۴۱.
- دیواندری، ح.، حیدری، م. و زال‌نژاد، م. ۱۴۰۰. "مشخصات عملکردی مخلوط میکروسرفیسینگ حاوی پودر سرباره فولاد کوره اکسیژنی به عنوان جایگزین فیلر طبیعی". مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۷(۲۸): ۱۳۴-۱۱۵.
- زال‌نژاد، م. و حسامی، س. ۱۳۹۸. "ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر استفاده از سرباره فولاد بر مشخصات آسفالت حفاظتی میکروسرفیسینگ". مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۵(۱): ۳۵-۱۶.
- کامبوزیا، ن.، زیاری، ح.، زال‌نژاد، م. و جلالیان خشنود، ع. ۱۴۰۱. "بررسی تأثیر فیلر سرامیکی ضایعاتی بر عملکرد آسفالت حفاظتی میکروسرفیسینگ". مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۸(۲۹): ۲۲-۱.
- Akhtar, A. and Sarmah, A. K. 2018. "Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective". J. Clean. Prod., 186: 262-281. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.085>
- Ashish, D. K. 2019. "Concrete made with waste marble powder and supplementary cementitious material for sustainable development". J. Clean. Prod., 211: 716-729. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.245>
- Arabani, M., Tahami, S. A. and Taghipoor, M. 2017. "Laboratory investigation of hot mix asphalt containing waste materials". Road Mater. Pavement Design, 18(3): 713-729. <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1189349>
- Behera, M. and Bhattacharyya, S. K. 2014. "Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete- A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review". Constr. Build. Mater., 68, 501-516. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.003>
- Behnood, A., Modiri Gharehveran, M., Gozali Asl, F. and Ameri, M. 2015. "Effects of copper slag and recycled concrete aggregate on the properties of CIR mixes with bitumen emulsion, rice husk ash, Portland cement and fly ash". Constr. Build. Mater., 96: 172-180. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.021>
- Chen, M., Lin, J. and Wu, S. 2011. "Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture". Constr. Build. Mater., 25(10): 3909-3914. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.022>
- Cheng, M., Chen, M., Wu, S., Yang, T., Zhang, J. and Zhao, Y. 2021. "Effect of waste glass aggregate on performance of asphalt micro-surfacing". Constr. Build. Mater., 307: 125133. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125133>
- Choudhary, J., Kumar, B. and Gupta, A. 2021. "Evaluation of engineering, economic and environmental suitability of waste filler incorporated asphalt mixes and pavements". Road Mater. Pavement Design, 22(S1): 624-640. <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1905698>
- Cui, P., Wu, S., Xiao, Y., Yang, C. and Wang, F. 2020. "Enhancement mechanism of skid resistance in preventive maintenance of asphalt pavement by steel slag based on micro-surfacing". Constr. Build. Mater., 239: 117870. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117870>

- D2397, A. 2017. "Standard specification for cationic emulsified asphalt". West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Deng, X., Guo, H., Tan, H., He, X., Zheng, Z., Su, Y. and Yang, J. 2019. "An accelerator prepared from waste concrete recycled powder and its effect on hydration of cement-based materials". *Constr. Build. Mater.*, 296: 123767. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123767>
- Dong, Q., Chen, X., Huang, B. and Gu, X. 2018. "Analysis of the influence of materials and construction practices on slurry seal performance using LTPP data". *J. Transport. Eng., Part B: Pavements*, 144(4): 04018046. <https://doi.org/10.1061/JPEODX.0000069>
- Etcheberria, M., Vázquez, E. and Marí, A. 2006. "Microstructure analysis of hardened recycled aggregate concrete". *Mag. Concrete Res.*, 58(10): 683-690. <https://doi.org/10.1680/mac.2006.58.10.683>
- Evrarn, A., Akçaoğlu, T., Ramyar, K. and Çubukçuoğlu, B. 2020. "Effects of waste electronic plastic and marble dust on hardened properties of high strength concrete". *Constr. Build. Mater.*, 263: 120928. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120928>
- Garba, A. A. and Usman, B. 2021. "Optimization and evaluation of biodiesel quality produced from cattle fat using CaO/Al₂O₃ as catalyst". *Moroccan J. Chem.*, 9(1): 132-141.
- Gencel, O., Erdugmus, E., Sutcu, M. and Oren, O. H. 2020. "Effects of concrete waste on characteristics of structural fired clay bricks". *Constr. Build. Mater.*, 255: 119362. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119362>
- Guerra, Q. C., Bakchan, A., Leite, F. and Faust, K. M. 2019. "BIM-based automated construction waste estimation algorithms: The case of concrete and drywall waste streams". *Waste Manag.*, 87: 825-832. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.03.010>
- Hajj Elie, Y., Loria Luis, G., Sebaaly Peter, E., Cortez, E. and Gibson, S. 2013. "Effective timing for two sequential applications of slurry seal on asphalt pavement". *Constr. Build. Mater.*, 249: 118835. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118835>
- Han, S., Yao, T., Han, X., Hongwei, Z. and Yang, X. 2020. "Performance evaluation of waterborne epoxy resin modified hydrophobic emulsified asphalt micro-surfacing mixture". *J. Transport. Eng.*, 139(5): 476-484. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000521](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000521)
- Hesami, E., Ataollahi, A. and Sadeghi, V. 2020. "Performance evaluation of microsurfacing with rubber powder". *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, 35(9): 1213-1230. <https://doi.org/10.1177/0892705720930760>
- Huo, W., Zhu, Z., Chen, W., Zhang, J., Kang, S. Pu. and Wan, Y. 2021. "Effect of synthesis parameters on the development of unconfined compressive strength of recycled waste concrete powder-based geopolymers". *Constr. Build. Mater.*, 292: 123264. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123264>
- Ibrahim, K. I. M. 2021. "Recycled waste glass powder as a partial replacement of cement in concrete containing silica fume and fly ash". *Case Stud. Constr. Mater.*, 15: e00630. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00630>
- ISSA. 2017a. "Laboratory test method for wet track abrasion of slurry surfacing systems". Technical Bulletin 100: International Slurry Surfacing Association.
- ISSA. 2017b. "Outline guide design procedure for slurry seal". Technical Bulletin 111: International Slurry Surfacing Association.
- ISSA. 2017c. "Test method for measurement of excess asphalt in bituminous mixtures by use of a loaded wheel tester and sand adhesion". Technical Bulletin: International Slurry Surfacing Association.
- ISSA. 2017d. "Test method for measurement of stability and resistance to compaction, vertical and lateral displacement of multilayered fine aggregate cold mixes". Technical Bulletin 147: International Slurry Surfacing Association.
- ISSA. 2017e. "Test method to classify emulsified asphalt/aggregate mixture systems by modified cohesion tester measurement of set and cure characteristics". Technical Bulletin: International Slurry Surfacing Association.
- ISSA A105. 2020. "Recommended performance guideline for emulsified asphalt slurry seal". International Slurry Surfacing Association.
- Jalalian Khoshnood, A., Kamboozia, N., Ziari, H. and Zalnezhad, M. 2022. "Evaluation of performance characteristics of polymer-modified slurry seal (PMSS) by replacing filler with ceramic waste powder". *Road Mater. Pavement Design*, 2022: 1-18. <https://doi.org/10.1080/14680629.2022.2117639>
- Keymanesh, M. R., Ziari, H., Zalnezhad, H. and Zalnezhad, M. 2021. "Mix design and performance evaluation of microsurfacing containing electric arc furnace (EAF) steel slag filler". *Constr. Build. Mater.*, 269: 121336. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121336>
- Kim, Y. J. 2017. "Quality properties of self-consolidating concrete mixed with waste concrete powder". *Constr. Build. Mater.*, 135: 177-185. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.174>

- Kim, Y. J. and Choi, Y. W. 2012. "Utilization of waste concrete powder as a substitution material for cement". *Constr. Build. Mater.*, 30: 500-504. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.042>
- Liu, W., Yan, K., Ge, D. and Chen, M. 2018. "Effect of APAO on the aging properties of waste tire rubber modified asphalt binder". *Constr. Build. Mater.*, 175: 333-341. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.098>
- Lu, W. 2019. "Big data analytics to identify illegal construction waste dumping: A Hong Kong study". *Resour., Conserv. Recyc.*, 141: 264-272. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.039>
- Ma, Z., Liu, M., Duan, Z., Liang, C. and Wu, H. 2020. "Effects of active waste powder obtained from C&D waste on the microproperties and water permeability of concrete". *J. Clean. Prod.*, 257: 120518. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120518>
- Maldonado, E. A. and Olivares, F. H. 2017. "Study of fine mortar powder from different waste sources for recycled concrete production". *Sustain. Dev. Renov. Archit., Urban. Eng.*, 18: 253-262. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51442-0_21
- Maleki Toulabi, H., Hosseini, M. and Rahimof, K. 2018. "Technical evaluation of integrated wall and roof formwork system and its comparison with ordinary concrete building construction method". *Civ. Eng. J.*, 4(2): 422-432. <https://doi.org/10.28991/cej-0309102>
- Manjunatha, M., Dinesh, S., Balaji, K. V. G. D. and Srilakshmi, C. 2021. "Influence of PVC waste powder and silica fume on strength and microstructure properties of concrete: An experimental study". *Case Stud. Constr. Mater.*, 15: e00610. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00610>
- Mao, X. Q., Qu, W. J. and Zhu, P. 2015. "Research status of recycled micropowder from construction waste, China". *Cement Concrete Prod.*, 8: 89-93.
- Mistry, R., Karmakar, S. and Kumar Roy, T. 2019. "Experimental evaluation of rice husk ash and fly ash as alternative fillers in hot-mix asphalt". *Road Mater. Pavement Design*, 20(4): 979-990. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1422791>
- Modarres, A. and Alinia Bengar, P. 2019. "Investigating the indirect tensile stiffness, toughness and fatigue life of hot mix asphalt containing copper slag powder". *Int. J. Pavement Eng.*, 20(8): 977-985. <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1373390>
- Mohammedawi, A. A. and Mollenhauer, K. 2020. "A study on the influence of chemical nature of fillers on rheological and fatigue behaviour of bitumen emulsion mastic". *Mater.*, 13(20): 4726. <https://doi.org/10.3390/ma13204627>
- Muniandy, R., Aburkaba, E. and Taha, R. 2013. "Effect of mineral filler type and particle size on the engineering properties of stone mastic asphalt pavements". *J. Eng. Res.*, 10(2): 13-32. <https://doi.org/10.24200/tjer.vol10iss2pp13-32>
- Naveed, H., Rehman, Z. U., Khan, A. H., Qamar, S. and Akhtar, M. N. 2019. "Effect of mineral fillers on the performance, rheological and dynamic viscosity measurements of asphalt mastic". *Constr. Build. Mater.*, 222: 390-399. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.170>
- Oh, D., Noguchi, T., Kitagaki, R. and Choi, H. 2021. "Proposal of demolished concrete recycling system based on performance evaluation of inorganic building materials manufactured from waste concrete powder". *Constr. Build. Mater.*, 135: 110147. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.110147>
- Park, D. C., Kwon, E. and Ahn, J. 2014. "Analysis on calcination of cementitious powder of waste concrete for raw cement". *J. Kor. Instit. Build. Constr.*, 831: 267-271. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2014.14.1.054>
- Ramalla, I., Gupta, R. K. and Bansal, K. 2015. "Effect on superhydrophobic surfaces on electrical porcelain insulator, improved technique at polluted areas for longer life and reliability". *Int. J. Eng. Tech.*, 4(4): 509-515. <https://doi.org/10.14419/ijet.v4i4.5405>
- Rattanashotinunt, C., Tangchirapat, W., Jaturapitakkul, C., Cheewaket, T. and Chindaprasirt, P. 2018. "Investigation on the strength, chloride migration, and water permeability of eco-friendly concretes from industrial by-product materials". *J. Clean. Prod.*, 172: 1691-1698. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.044>
- Saghafi, M., Tabatabaee, N. and Nazarian, S. 2019. "Performance evaluation of slurry seals containing reclaimed asphalt pavement". *Transport. Res. Record*, 2673(1): 358-368. <https://doi.org/10.1177/0361198118821908>
- Schoon, J., Buysser, K. D., Driessche, I. V. and Belie, N. D. 2015. "Fines extracted from recycled concrete as alternative raw material for Portland cement clinker production". *Cement Concrete Compos.*, 58: 70-80. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.01.003>
- Sharma, T. K., Swami, B. L. and Vyas, A. K. 2021. "Performance evaluation of hot mix asphalt containing copper slag". *Mater. Today: Proc.*, 38: 1241-1244. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.557>

- Sherre, D. K. and 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". *J. Mater. Civ. Eng.*, 34(1): 04021395. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004033](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004033)
- Shi, M., Ling, T. C., Gan, B. and Guo, M. Z. 2019. "Turning concrete waste powder into carbonated artificial aggregates". *Constr. Build. Mater.*, 199: 178-184. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.021>
- Simões, D., Almeida-Costa, A. and Benta, A. 2017. "Preventive maintenance of road pavement with microsurfacing- an economic and sustainable strategy". *Int. J. Sustain. Transport.*, 11(9): 670-680. <https://doi.org/10.1080/15568318.2017.1302023>
- Sun, X., Liu, Z., Qin, X., Zeng, Y. and Yin, Y. 2020. "Purifying effect evaluation of pavement surfacing materials modified by novel modifying agent". *Front. Mater.*, 7: 1-13. <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.0180>
- Tang, Q., Ma, Z., Wu, H. and Wang, W. 2020. "The utilization of eco-friendly recycled powder from concrete and brick waste in new concrete: A critical review". *Cement Concrete Compos.*, 114: 103807. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103807>
- Xiao, J., Ma, Z., Sui, T., Akbarnezhad, A. and Duan, Z. 2018. "Mechanical properties of concrete mixed with recycled powder produced from construction and demolition waste". *J. Clean. Prod.*, 188: 720-731. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.277>
- Zalnezhad, M. and Hesami, E. 2020. "Effect of steel slag aggregate and bitumen emulsion types on the performance of microsurfacing mixture". *J. Traffic Transport. Eng. (English Edition)*, 7(2): 215-226. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.12.005>
- Zalnezhad, A., Hosseini, S. A., Shirin Abadi, R. and Emami Korandeh, M. 2022. "Feasibility of using copper slag as natural aggregate replacement in microsurfacing for quality enhancement: Microscopic and mechanical analysis". *Constr. Build. Mater.*, 354: 129176. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129175>
- Ziari, H., Moniri, A., Imannasab, R. and Nakhaei, M. 2019. "Performance evaluation of waterborne epoxy resin modified hydrophobic emulsified asphalt micro-surfacing mixture". *Int. J. Pavement Eng.*, 20(7): 775-781. <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1339884>
- Ziari, H., Keymanesh, M. R. and Zalnezhad, H. 2020. "Effect of emulsifying agent on rheological properties of bitumen emulsion modified with different techniques of adding SBR latex polymer". *Road Mater. Pavement Design*, 23(3): 639-655. <https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1835695>