

ارزیابی اسلاری سیل رنگی حاوی رنگدانه طبیعی و قیر امولسیون: مطالعه آزمایشگاهی عملکرد و مشخصه‌های رنگ‌سنجی

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

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

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

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

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۰۱

دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۱۷

چکیده

رویه‌های رنگی به‌منظور ساماندهی فضاهای شهری (مسیر عبور و مرور دوچرخه‌سواران و عابران پیاده، خطوط ویژه یا اقدامات کاهش ترافیک) و بهبود دید و ایمنی رانندگی، مورد استفاده گسترده واقع شده است. این مطالعه باهدف بررسی عملکرد و طرح اختلاط اسلاری سیل رنگی با استفاده از قیر امولسیون و رنگدانه‌های طبیعی جایگزین فیلر طبیعی انجام شده است. در این خصوص، در مرحله اول ویژگی‌های پودرهای رنگی و فیلر طبیعی با آزمایش‌های BET XRD، XRF و FESEM و برهم‌کنش قیر و فیلر با آزمون FTIR بررسی گردید. در مرحله بعد برای ساخت مخلوط‌ها، از ۷ ترکیب رنگی حاوی رنگدانه‌های پودری قرمز، زرد و آبی (کوچک‌تر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر) به‌عنوان مصالح جایگزین فیلر طبیعی و در ترکیب با TiO_2 استفاده گردید. ارزیابی و مقایسه نمونه‌های آسفالتی با آزمایش‌های چسبندگی مرطوب، سایش در شرایط مرطوب و چرخ بارگذاری شده-چسبندگی ماسه، چرخ بارگذاری شده-میزان جابه‌جایی و تعیین مشخصه‌های رنگی (با دستگاه اسپکتروفوتومتر) صورت گرفت. نتایج نشان داد در میان نمونه‌های آسفالتی، مخلوط حاوی رنگدانه قرمز دارای مناسب‌ترین عملکرد بوده به‌طوری که نسبت به نمونه شاهد سبب افزایش چسبندگی در مدت‌زمان ۳۰ و ۶۰ دقیقه به ترتیب به میزان ۸/۱ و ۷/۶ درصد و کاهش دسایت رطوبتی مخلوط به میزان ۲۷/۶ درصد و کاهش میزان جابه‌جایی عمودی در برابر بارگذاری ترافیکی به میزان ۱۱/۷ درصد گردید. در تعیین مشخصه‌های رنگی مشخص گردید، استفاده از TiO_2 در مقادیر ۱ تا ۳ درصد بر ترکیب‌های آبی و قرمز و مقدار ۱ درصد برای ترکیب‌های رنگی زرد مناسب است.

واژه‌های کلیدی: رنگدانه‌های طبیعی، اسلاری سیل رنگی، حساسیت رطوبتی، مقاومت در برابر تغییر شکل، اسپکتروفوتومتر

۱. مقدمه

به‌عنوان فیلر در اسلاری سیل رنگی، استفاده از انواع رنگدانه‌ها است.

برای تهیه آسفالت‌های رنگی از پیگمنت‌های معدنی و عموماً طبیعی استفاده شده بدین علت که هزینه آن‌ها پایین و قدرت پوشش دهی آن‌ها قابل قبول است. پیگمنت‌های معدنی نظیر اکسید آهن، اکسید کروم و پیگمنت‌های ترکیبی نظیر کبالت آبی، ترکیبات مناسبی برای رنگی کردن آسفالت هستند. رنگدانه‌های معدنی مانند اکسید آهن قرمز، زرد و اکسید کروم سبز از رایج‌ترین رنگدانه‌های مصرفی و پایدار در برابر حرارت و با ثبات رنگی بالا هستند (Autelitano & Giuliani, 2019; Izadi et al., 2022). از دیگر سو باید به نقش رنگدانه‌ها و تأثیر آن‌ها بر روی طرح اختلاط مخلوط آسفالتی نیز توجه داشت. رنگدانه‌ها اجزایی هستند که بر روی خواص مکانیکی قیر و مخلوط تأثیر قابل توجهی خواهند داشت. در حقیقت، رنگدانه‌ها به دلیل نوع دانه‌بندی و سایز آن، مشخصات ماستیک را تحت تأثیر خود قرار می‌دهند. سختی این ماستیک تأثیر بسیار زیادی بر مشخصات مخلوط آسفالتی دارد. این ماستیک باید سختی لازم را برای تأمین مقاومت آسفالت در برابر تغییر شکل دائمی داشته باشد و همچنین کارپذیری مخلوط را نیز مختل ننماید (Jiang, Deng, Chen, & Tian, 2020). لذا از آنجایی که نوع ماده سازنده رنگ و میزان پایداری آن بر روی مشخصات مکانیکی آسفالت حفاظتی اثر داشته، برای بدست آوردن مخلوط‌های آسفالت رنگی با کیفیت مطلوب، توجه ویژه‌ای به طراحی مخلوط و عملکرد مکانیکی آن نیاز است (Izadi et al., 2022). در حوزه تشخیص رنگ رویه، برای استانداردسازی تفسیر یک رنگ خاص، باید آن را بر اساس مقادیر عددی تعیین نمود. بر اساس نظریه کمی سازی رنگ که در اوایل قرن بیستم توسعه یافت، چندین مدل پیچیده از فضای رنگی ایجاد شد که از جمله‌ی آن‌ها، می‌توان به سیستم‌های رنگ‌سنجی CIELAB و CIELCh اشاره کرد (Ladan Hatami, Jamshidi, & Yavari, 2023). این سیستم‌ها در صنعت آسفالت نیز مفید

در سال‌های اخیر، به‌منظور بهبود دید و ایمنی رانندگی، سامانه‌ی فضا‌های شهری (مسیر عبور و مرور دوچرخه‌سواران و عابران پیاده، خطوط ویژه یا اقدامات کاهش ترافیک)، ویژگی‌های نورسنجی بهتر و افزایش زیبایی مناطق شهری، استفاده گسترده از روسازی‌های رنگی برای فضا‌های مختلف شهری در سطح بین‌المللی توسط سازمان‌های دولتی در دستور کار قرار گرفته است (Autelitano, 2021; Izadi, Zalnezhad, Bozorgi Makerani, & Zalnezhad, 2022). اصطلاح روسازی رنگی عموماً شامل دو رویکرد اصلی است. رویکرد اول شامل رنگ اپوکسی و سایر اندودهای سطحی است که بر روی سطح جاده تکمیل شده اعمال می‌شود. روش دوم شامل سنگدانه‌ها با رنگ طبیعی یا رنگدانه‌های پودری است که به‌صورت مستقیم به مخلوط آسفالتی یا بتنی اضافه می‌شود (Autelitano & Giuliani, 2019). اجرای روسازی‌های رنگی به‌صورت سازه‌ای و با ضخامت بالا هزینه نسبتاً بالایی دارد. بنابراین، به‌صورت رویه‌های نازک آسفالتی رنگی مانند اسلاری سیل^۱ اعمال می‌شوند. مخلوط اسلاری سیل شامل سنگدانه با دانه‌بندی مشخص، قیر امولسیون کاتیونی، آب و فیلرهای معدنی فعال (اغلب سیمان) است (Jalalian, Khoshnood, Kamboozia, Ziari, & Zalnezhad, 2022). در این بین فیلر، به‌عنوان جزئی از مخلوط آسفالتی نقش مهمی در خواص عملکردی آسفالت دارد. تغییرات در نوع و مقدار فیلر بر خواص مخلوط آسفالتی اثرگذار است (Keymanesh, Ziari, Zalnezhad, & Zalnezhad, 2021; Shaygan, Izadi, & Zalnezhad, 2022). فیلر در آسفالت به‌طور کلی به‌عنوان ماده ریزتر از ۰/۰۷۵ میکرومتر تعریف شده و شامل فیلر طبیعی که بیشتر از خرد کردن و غربال‌سازی سنگدانه‌ها بدست می‌آید، است (Rezaei Lori, Bayat, & Azimi, 2021). یکی از اجزای مورد استفاده

ارزیابی اسلاری سیل رنگی حاوی رنگدانه طبیعی و قیر امولسیون: مطالعه آزمایشگاهی عملکرد و مشخصه‌های رنگ‌سنجی

شد که با افزودن پودرهای ترموکرومیک، میزان نفوذ و سرعت خزش چسباننده‌های قیری کاهش می‌یابد. این درحالی است که نقطه نرمی، ویسکوزیته، پارامتر شیارشدگی و سفتی افزایش یافت. در این پژوهش در نهایت محتوای بهینه پودرهای ترموکرومیک را ۵ تا ۶ درصد توصیه نموده است (Bo, Liu, Peng, Peng, & Yu, 2020). در دیگر تحقیق از الشمسی و حسن (۲۰۱۸) مشخصات فیزیکی چسباننده‌های شفاف در مقایسه قیرهای متداول مورد ارزیابی قرار گرفت. بازرسی بصری سطح روسازی همراه با بررسی دقیق آزمایشگاهی بر روی خصوصیات رئولوژیکی چسباننده‌ها انجام شد. نتایج نشان داد که چسباننده شفاف آزمایش شده دارای چسبندگی مناسب و عملکرد مطلوبی نسبت به مشخصات تعیین شده توسط استانداردهای ASTM است. علاوه بر این، چسباننده شفاف در مقایسه با قیر معمولی، شکل‌پذیری بسیار کمتری دارد (Al-Shamsi & Hassan, 2018). لی و همکاران (۲۰۱۸) به تأثیر مواد ترموکرومیک بر خواص فیزیکی و پیری قیر اصلاح شده با SBS پرداختند. اثرات انواع مختلف (رنگ قرمز، سیاه و آبی) و محتوای (۲ و ۴ درصد) پودرهای ترموکرومیک بر خواص پیری قیر اصلاح شده با کوپلیمر SBS مورد بررسی قرار گرفت. خواص فیزیکی چسباننده‌ها (قابلیت شکل‌پذیری، نفوذ، ویسکوزیته و نقطه نرمی) قبل و بعد از پیری پرتوهای حرارتی - اکسیداتیو فرابنفش مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان داد که پودرهای ترموکرومیک تغییر شکل‌پذیری را بهبود بخشیده و عملکرد قیر اصلاح شده در دمای بالا را تا حدودی تضعیف می‌کنند. علاوه بر این، قیر اصلاح شده با SBS با مواد ترموکرومیک در ۲ درصد بهترین مقاومت در برابر پیری را در تمام حالت‌های پیری نشان داد (Li, Zhang, & Chen, 2018).

با توجه به مطالعات انجام شده، عمده بررسی‌های صورت گرفته تاکنون، بر پایه چسباننده‌هایی رزینی در کنار رنگدانه‌های آلی و مواد ترموکرومیک برای تولید رویه‌های رنگی بوده است. اما

هستند. اسپکتروفوتومتری^۱ سطح رویه‌های رنگی، هر گونه تغییر جزئی در روشنایی، خلوص و فام رنگ‌ها را کمی سازی می‌کند، بنابراین می‌توان طرح اختلاط را از نظر ثبات در خلوص رنگ محصولات کنترل کرد (L. Hatami & Jamshidi, 2021). به‌طور خلاصه برخلاف روسازی‌های سنتی «سیاه»، طراحی مناسب اجزای مخلوط به سبب کسب عملکرد مناسب در شرایط جوی و ترافیکی، طراحی رنگ مناسب، قابلیت دید و تشخیص، مسائل مورد توجه این نوع از رویه‌ها هستند. از این‌رو، اسلاری سیل به‌طور اجتناب‌ناپذیری در معرض مکانیسم‌های خرابی مختلفی مانند حساسیت رطوبتی، خرابی چسبندگی، قیرزدگی و تغییر شکل‌های بیش از حد بوده که بسته به شرایط این خرابی‌ها می‌توانند تشدید شوند (Keymanesh et al., 2021). بر این اساس محققان در حال توسعه آسفالت رنگی و بررسی عملکرد آن برای پوشش سطوح روسازی هستند.

در پژوهشی دیگر خصوصیات مکانیکی و شیمیایی بایندهای شفاف برای پوشش‌های سطحی جاده توسط گرلی و همکاران (۲۰۲۰) ارزیابی شد. در این مقاله یک برنامه آزمایشی شامل آزمایش‌های تجربی، آنالیز طیف مادون‌قرمز و آزمایش رئولوژیکی در طیف گسترده‌ای از دما و فرکانس برای تعیین رفتار مکانیکی کلی سه چسباننده شفاف ارائه شده است. نتایج نشان داد که رفتار مکانیکی چسباننده‌های شفاف با قیر سنتی متفاوت است. ترکیب یا منشأ متفاوت می‌تواند عملکرد کاملاً متفاوتی را القا کند (Grilli, Bocci, Virgili, & Conti, 2020). خواص و خصوصیات آسفالت مقاوم به دما با استفاده از سه نوع پودر ترموکرومیک^۳ (قرمز، آبی و مشکی) روی قیر پایه با محتوای ۳، ۶ و ۱۰ درصد برای تهیه قیر ترموکرومیکی توسط بو و همکاران (۲۰۲۰) مورد تحلیل قرار گرفت. در این مطالعه کروماتوگرافی نفوذ ژل، طیف‌سنجی مادون‌قرمز تبدیل فوری، خواص فیزیکی، رئولوژیکی و ترمودینامیکی چسباننده‌های قیری پایه و ترموکرومیک از طریق آزمایش‌های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. در طول مطالعه مشخص

مطالعات محدودی در اثربخشی رنگدانه‌های طبیعی به همراه چسباننده قیر امولسیون در مخلوط‌های آسفالتی سرد به‌خصوص اسلاری‌سیل، انجام شده است. لذا در این مطالعه با ساخت نمونه‌هایی از مخلوط اسلاری‌سیل حاوی چسباننده قیر امولسیون، به بررسی اثر افزودن رنگ‌دانه‌های معدنی قرمز، آبی و زرد به همراه دی‌اکسید تیتانیوم بر طرح اختلاط و عملکرد این نوع آسفالت و خصوصیات رنگ‌سنجی آن پرداخته شد. برای این منظور، ابتدا ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی مصالح سنگی و پودرهای رنگی مورد سنجش واقع شد. سپس جهت تعیین مشخصات عملکردی مخلوط‌های اسلاری‌سیل رنگی، ۷ ترکیب آسفالتی متفاوت حاوی پودرهای رنگی جایگزین فیلر بر اساس وزن کل مصالح سنگی تهیه شد. سنجش عملکرد و طرح اختلاط نمونه‌های آسفالتی به‌واسطه آزمایش‌های چسبندگی، چرخ بارگذاری شده و سایش در شرایط مرطوب مطابق با دستورالعمل ISSA A105 و استاندارد ASTM D3910 انجام شد. همچنین ارزیابی رنگ نمونه‌های اسلاری‌سیل رنگی با استفاده از سیستم‌های رنگ‌سنجی CIELCh بررسی گردید.

۲. مواد و مصالح

۱-۲ مصالح سنگی و رنگدانه‌ها

در این تحقیق رنگدانه‌های پودری طبیعی قرمز، زرد و آبی (ایران، هرمزگان) و سنگدانه‌های کوهی (ایران، مازندران) در اندازه ۰-۵ میلی‌متر استفاده گردید. همچنین در ترکیب با سایر رنگدانه‌ها از پودر TiO_2 (با نام تجاری کرنوس، آلمان)، با ساختار کریستالی روتیل، چگالی $4/1 \text{ g/cm}^3$ و قطر ۴۵ میکرومتر با خلوص ۹۹٪، به‌عنوان رنگدانه آلی استفاده گردید. از لحاظ دانه‌بندی، دانه‌بندی نوع II مورد استفاده واقع شده و حدود آن در جدول ۱ مشخص است. استفاده از این نوع دانه‌بندی به دلیل داشتن ریزدانه قابل توجه در مقایسه با نوع III و تولید صدای

کمتری، در مکان‌های مسکونی و شهری مناسب است (ISSA, 2020). مشخصات مصالح سنگی در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است که ارزش ماسه‌ای، سلامت در برابر سولفات سدیم و سایش به‌وسیله لس‌آنجلس مصالح سنگی در محدوده ارائه شده در ISSA A105 قابل قبول بوده، به همین جهت سنگدانه‌ها دارای مشخصات فنی مناسب هستند. جدول ۳ و شکل ۱ به ترتیب نشان‌دهنده نتایج آزمون‌های XRF و XRD برای فیلر طبیعی و پودرهای رنگی است. آنالیز XRF نشان می‌دهد اجزای اصلی فیلر مصالح طبیعی و رنگدانه آبی CaO و SiO_2 است. رنگدانه قرمز دارای مقدار قابل توجهی از SiO_2 و Fe_2O_3 به ترتیب به میزان تقریبی ۲۵ و ۶۷ درصد است. همچنین رنگدانه زرد از عناصر SiO_2 و CaO به ترتیب به مقدار ۵۴ و ۱۵ درصد تشکیل شده است. به‌طور مشابه در آنالیز XRD، مطابق شکل ۱-N، فاز اصلی تشکیل‌دهنده نمونه فیلر طبیعی فاز کلسیت ($CaCO_3$) است و در کنار آن فازهای کوارتز (SiO_2) و دولومیت ($CaMg(CO_3)_2$) نیز با مقادیر کمتری نسبت به فاز کلسیت وجود دارد. مطابق شکل ۱-B، در نتایج آزمون XRF فاز اصلی تشکیل‌دهنده پودر آبی رنگ فاز کلسیت ($CaCO_3$) است و در کنار آن فاز بورنیت (Cu_5FeS_4) نیز با مقادیر کمتری نسبت به فاز کلسیت وجود دارد. در الگوهای پراش مربوط به پودر قرمز که در شکل ۱-R نشان داده شده است، فازهای اصلی تشکیل‌دهنده این نمونه فاز هماتیت (Fe_2O_3) و کوارتز (SiO_2) است و فاز باسانیت ($Ca_{12}S_{12}O_{54}H_{12}$) نیز با مقادیر کمتری وجود دارد. مطابق شکل ۱-Y، فاز اصلی تشکیل‌دهنده نمونه زرد رنگ فاز کوارتز (SiO_2) است و در کنار آن فازهای کلسیت و دولومیت نیز با مقادیر کمتری نسبت به فاز کوارتز وجود دارد. وجود فازهای متفاوت در هر کدام از فیلرها توسط آزمون‌های XRF نیز اثبات شده است.

ارزیابی اسلاری سیل رنگی حاوی رنگدانه طبیعی و قیر امولسیون: مطالعه آزمایشگاهی عملکرد و مشخصه‌های رنگ‌سنجی

جدول ۱. دانه‌بندی مصالح سنگی مخلوط‌های آسفالتی

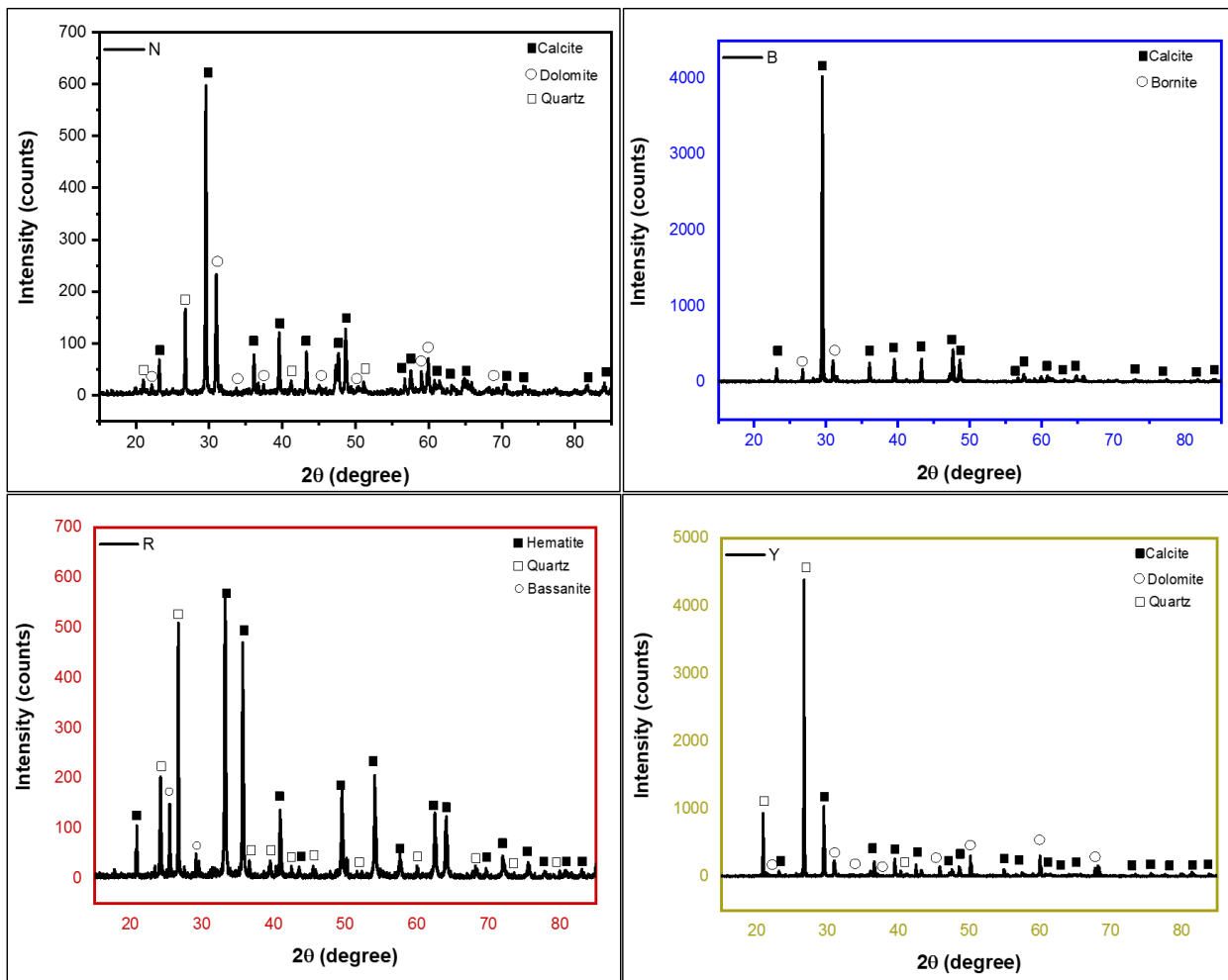
اندازه الک	حد وسط دانه‌بندی نوع II دستورالعمل ISSA A105	محدوده نوع II دستورالعمل ISSA A105
۴/۷۵ میلی‌متر (شماره ۴)	۱۰۰	۹۰-۱۰۰
۲/۳۶ میلی‌متر (شماره ۸)	۷۷/۵	۶۵-۹۰
۱/۱۸ میلی‌متر (شماره ۱۶)	۵۷/۵	۴۵-۷۰
۶۰۰ میکرون (شماره ۳۰)	۴۰	۳۰-۵۰
۳۰۰ میکرون (شماره ۵۰)	۲۴	۱۸-۳۰
۱۵۰ میکرون (شماره ۱۰۰)	۱۵/۵	۱۰-۲۱
۷۵ میکرون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

جدول ۲. خصوصیات مصالح سنگی

آزمایش‌ها	استاندارد	درشت‌دانه	ریزدانه	مشخصات مطابق ISSA A105
وزن مخصوص حقیقی (gr/cm^3)	ASTM C127	۲,۶۳	۲,۶۵	-
وزن مخصوص ظاهری (gr/cm^3)	ASTM C128	۲,۶۸	۲,۷۰	-
درصد جذب آب	ASTM C127	۱/۲۵	۱,۳۹	-
ارزش ماسه‌ای مصالح ریزدانه و خاک‌ها	ASTM D2419	-	٪۸۲	حداقل ٪۴۵
سلامت مصالح با سولفات سدیم	ASTM C88	-	٪۴	حداکثر ٪۱۵
مقاومت سایشی در ماشین لس‌آنجلس	ASTM C131	٪۱۶	-	حداکثر ٪۳۵

جدول ۳. ترکیب شیمیایی مواد و مصالح

نوع مواد	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	Pb	Cu	L.O.I
فیلر مصالح سنگی	۴/۵	۳/۸	۲۴/۳	۱/۷	-	۵۴/۲	۰/۴	-	۳/۷	-	-	۶/۷
رنگدانه قرمز	۰/۴	۱/۴	۱۵/۱	۷/۱	۰/۴	۲/۲	۰/۱۵	-	۷۰/۷	-	-	۲
رنگدانه آبی	۲/۰	۱/۳	۱۰/۲	۳/۴	-	۶۵/۴	-	۰/۰۱	۲/۱	۰/۱	۹/۵	۵/۵
رنگدانه زرد	۳/۹	۶/۳	۵۳/۴	۰/۷	۰/۲	۱۶/۸	-	۱/۵	۹/۲	-	-	۷/۵



شکل ۱. تصاویر XRD فیلرها: N- فیلر طبیعی، B- پودر آبی، R- پودر قرمز و Y- پودر زرد

جدول ۴. مشخصات قیر امولسیون کاتیونی

آزمون‌ها	استاندارد آزمون	نتیجه	حدود مورد پذیرش
کندروانی سی بولت- فیورل در دمای ۲۵°C، ثانیه	AASHTO T59	۲۷	۱۰۰-۲۰
الک، %	ASTM D244	۰/۰۱	حداکثر ۰/۱
اندود، %	AASHTO T59	۹۹	-
پایداری انبارش و ذخیره قیر امولسیون، ۲۴ ساعت، %	ASTM D6930	۰/۲	حداکثر ۱
تقطیر قیر امولسیون، جرم وزنی %	ASTM D7497	۶۲	حداقل ۶۲
آزمون‌ها بر روی باقی‌مانده قیر امولسیون			
درجه نفوذ در ۲۵°C، ۱۰۰ گرم، ۵ ثانیه	ASTM D5	۶۱*	۹۰-۴۰
نقطه نرمی قیر با آزمایش حلقه و گلوله، درجه سانتی‌گراد	ASTM D36	۶۶*	-

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

جدول ۵. ترکیب شیمیایی سیمان پرتلند از تحلیل آزمایش XRF

نوع ترکیب	CaO	SiO ₂	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃
سیمان پرتلند	۶۲/۳	۲۱/۹	۳/۱	۰/۶	۰/۵	۴/۹	۴/۲	۱/۶

مورد استفاده بایستی عاری از مواد مضر مانند سولفات‌ها و نمک‌ها باشد. این موضوع بدان جهت است که ممکن است واکنش‌های شیمیایی ناخواسته در مخلوط ایجاد شود. آب استفاده شده در تمامی نمونه‌ها، آب شرب است.

۳. روش پژوهش

۳-۱ برنامه آزمایشگاهی

برنامه آزمایشگاهی در این پژوهش مطابق شکل ۲ در سه بخش اصلی ارائه گردیده است. در بخش ۱، انتخاب مصالح (اعم از مصالح سنگی و قیر امولسیون) و تعیین ویژگی فیلر طبیعی و پودرهای رنگی با آزمایش‌های XRF, XRD, FESEM و BET انجام می‌شود. همچنین جهت شناسایی مکانیسم تعامل بین قیر امولسیون و فیلرها، از آزمون FTIR استفاده شد. در ادامه، در بخش ۲، برای ساخت مخلوط‌های اسلاری سیل رنگی، رنگدانه‌های پودری (قرمز، زرد و آبی) عبوری از الک ۰/۰۷۵ میلی‌متر به‌عنوان مصالح جایگزین فیلر طبیعی و در ترکیب با TiO₂ مطابق با جدول ۶ استفاده گردید. بر این اساس ۷ مخلوط اسلاری سیل (۶ ترکیب رنگی و ۱ نمونه شاهد) برای بررسی‌های طرح اختلاط، عملکرد و مشخصه‌های رنگ‌سنجی در نظر گرفته شد. طراح اختلاط و آزمایش‌های عملکردی مخلوط‌های اسلاری سیل مطابق با آیین‌نامه ASTM D3910 انجام گرفت. در طراحی مخلوط اسلاری سیل بعد از انتخاب قیر امولسیون و سنگدانه‌های مناسب، آزمون‌ها براساس استاندارد ASTM D3910 بر روی مصالح صورت گرفته و حدود مجاز مشخصات مورد بررسی واقع می‌شوند. پس از برآورده شدن الزامات مصالح، طرح اختلاط و سنجش عملکرد نمونه‌ها با آزمایش‌های زمان اختلاط، چسبندگی مرطوب^۱، سایش در شرایط مرطوب^۲، تعیین حداکثر قیر به‌وسیله چرخ بارگذاری شده

۲-۲ قیر امولسیونی

جهت ساخت نمونه‌های اسلاری سیل، قیر امولسیون کاتیونی بر اساس استاندارد ASTM D3910 مورد استفاده قرار گرفت. جهت تولید قیر امولسیون، ۳۸ درصد محلول سوپ حاوی اسید HCL، آب و امولسیفایر دیر شکن (با نام تجاری سکا، فرانسه) با قیر با رده نفوذ ۶۰/۷۰ به میزان ۵۷ درصد (مطابق با ISSA A105) در دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد، در دستگاه امولسیون ساز آزمایشگاهی با سرعت ۲۸۴۰ دور بر دقیقه مخلوط شدند. این روش از ساخت قیر امولسیون کاتیونی بر اساس استاندارد ASTM D2397 و پژوهش‌های صورت گرفته دیگر پژوهشگران صورت گرفت (Zalnezhad & Hesami, 2020; Ziari, Zalnezhad, Ali Ziari, & Nasiri, 2022; Amiri, 2022). همچنین خصوصیات قیر امولسیون کاتیونی تولیدی در جدول ۴ ارائه شده است.

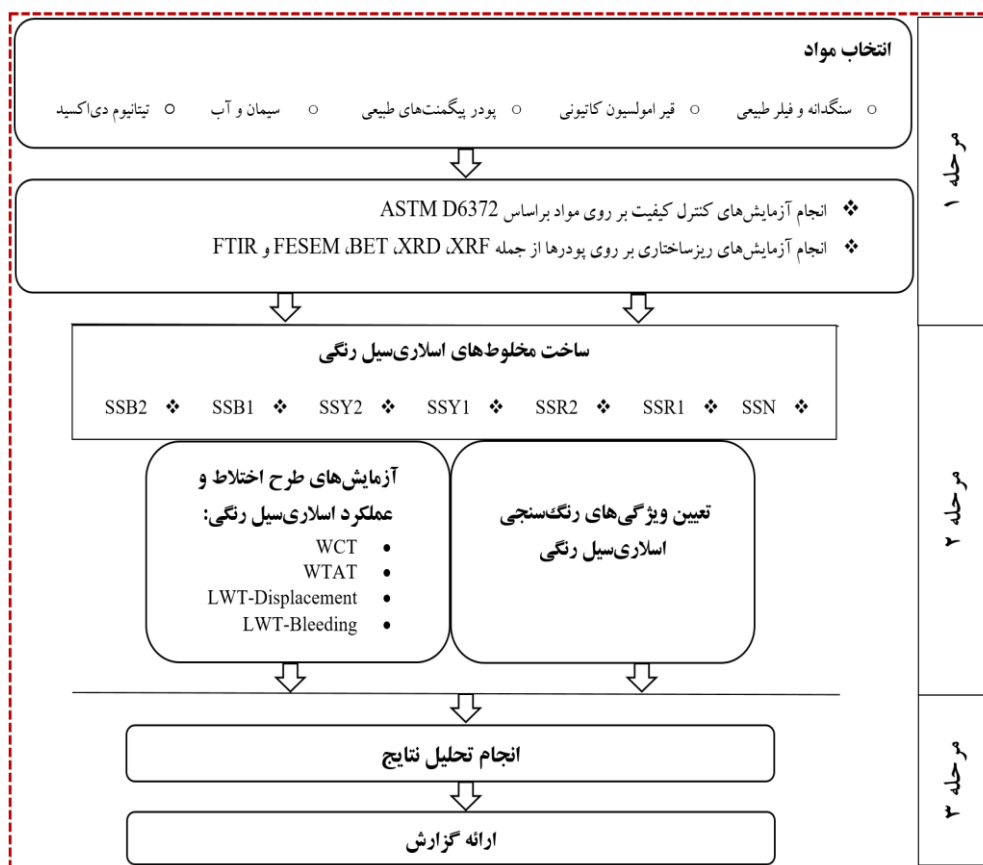
۲-۳ سیمان پرتلند و آب

فیلرهای معدنی فعال باعث به حداقل رساندن جدایی مصالح سنگی از یکدیگر شده و منجر به افزایش چسبندگی مخلوط می‌شود. این موضوع به این دلیل است که یون‌های هیدروکسل فیلرهای معدنی فعال با یون‌های قیر امولسیون وارد واکنش می‌شوند. سپس قیر امولسیون سریع‌تر شکسته شده و عمل‌آوری مخلوط اسلاری سیل سریع‌تر انجام خواهد شد (A. Wang, Shen, Li, & Song, 2019). در این مطالعه، سیمان پرتلند نوع II (کارخانه فیروزکوه، ایران) با مشخصات شیمیایی (XRF) ارائه شده در جدول ۵، به مقدار ۱ درصد برای ارتقاء ویژگی‌های مخلوط به‌عنوان فیلر فعال معدنی در اسلاری سیل مورد استفاده واقع شد. منظور از آب، آبی است که به هنگام هم زدن به مخلوط اضافه گردیده و موجب بهبود کارایی و پوشش بهتر مصالح می‌شود (A. Wang et al., 2019). آب

جدول ۶. درجه‌بندی ترکیب‌های اسلاری سیل رنگی

شماره	ترکیب فیلر	شناسه
مخلوط		مخلوط
۱	۱۰۰ درصد فیلر طبیعی	SSN
۲	۹۰ درصد رنگدانه قرمز، ۱۰ درصد TiO_2	SSR1
۳	۷۰ درصد رنگدانه قرمز، ۳۰ درصد TiO_2	SSR2
۴	۹۰ درصد رنگدانه زرد، ۱۰ درصد TiO_2	SSY1
۵	۷۰ درصد رنگدانه زرد، ۳۰ درصد TiO_2	SSY2
۶	۹۰ درصد رنگدانه آبی، ۱۰ درصد TiO_2	SSB1
۷	۷۰ درصد رنگدانه آبی، ۳۰ درصد TiO_2	SSB2

- چسبندگی ماسه^۶ و ارزیابی میزان تغییر عمودی و جانبی با چرخ بارگذاری شده^۷ انجام می‌شود. لازم به ذکر است که مقدار بهینه قیر امولسیون توسط نتایج آزمایش‌های چرخ بارگذاری شده-چسبندگی ماسه و سایش در شرایط مرطوب مشخص می‌شود. (Keymanesh et al., 2021; Zalnezhad & Hesami, 2020). در ادامه‌ی آزمایش‌های بخش ۲، سنجش رنگ هر یک از مخلوط‌ها در فضای سه‌بعدی CIELCH انجام شد. در بخش ۳ (بخش نهایی) این تحقیق، نتایج مورد تحلیل قرار گرفت.



شکل ۲. روند پژوهش در این مطالعه

به صورت cm^2/g گزارش می‌شود. سطح ویژه بالاتر به معنای جذب بیشتر پودرها است. با افزایش سطح ویژه، سطح تماس بین پرکننده و قیر افزایش می‌یابد. در این راستا ناحیه تماس عامل مهمی است که بر واکنش سطحی بین قیر و فیلر و

۲-۳ آزمایش‌ها

۱-۲-۳ آزمایش‌های میکرو ساختاری

از آزمون سطح ویژه مطابق با BS EN 4359-1 برای تعیین مقدار جذب فیلرها استفاده می‌شود. نتایج این آزمایش

سانتی‌متر بوده و برای قرارگیری زیر ترافیک عبوری در مدت زمان ۶۰ دقیقه، ۲۰ کیلوگرم- سانتی‌متر است. از نتایج حاصله این آزمایش برای تعیین زمان مناسب جهت بازگشایی ترافیک عبوری بر روی نمونه‌های اسلاری سیل استفاده می‌شود (ISSA, 2017d). تصویری از نمونه‌ها و دستگاه ارزیابی چسبندگی در شکل ۳-ا ارائه شده است.

در آزمون سایش در شرایط مرطوب برای جلوگیری از وقوع خرابی‌شن‌زدگی، حداقل میزان قیر امولسیون، تعیین شده و مقدار افت وزنی هریک از نمونه‌ها (از دست رفتن سنگدانه نمونه‌های ساخته شده)، بعد از سایش با لوله لاستیکی، معین می‌شود. به‌طور خلاصه در طی این آزمایش نمونه‌های اسلاری سیل عمل‌آوری شده در شرایط غوطه‌وری در آب به مدت ۵ دقیقه با یک نوار لاستیکی به روش چرخشی تحت عمل سایش قرار می‌گیرند. در پایان نمونه سایش یافته توزین شده تا میزان افت وزنی معین شود (ISSA, 2017c). تصویری از نمونه‌ها و دستگاه آزمایش سایش در شرایط مرطوب در شکل ۳-ب نشان داده شده است. رابطه ۱ برای محاسبه میزان سایش و هدرروی مصالح هریک از مخلوط‌ها استفاده می‌شود. در این رابطه، WTAT، شاخص سایش بر حسب g/m^2 ، m_a وزن قبل از سایش، m_b وزن بعد از سایش و A مساحت سایش یافته بر حسب m^2 است.

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

آزمایش چرخ بارگذاری-چسبندگی ماسه جهت اندازه‌گیری حداکثر قیر برای جلوگیری از خرابی قیر زدگی مخلوط‌های اسلاری سیل است. در این آزمایش مخلوط‌ها طی ۱۰۰۰ سیکل با چرخ بارگذاری ۵۶۷ کیلوگرمی متراکم شده و سپس مخلوط توزین می‌شود. در مرحله بعد، ماسه اتاوا با دمای ۸۲ درجه سانتی‌گراد بر روی نمونه در محل شیار ایجاد شده به‌صورت یکنواخت، پخش می‌گردد. در این حالت مشابه حالت قبل جهت تراکم نمونه ۱۰۰ سیکل بارگذاری انجام می‌شود. سپس نمونه پس از بارگذاری مجدداً توزین می‌شود. اختلاف بین وزن‌های اندازه‌گیری شده، به‌عنوان مقدار ماسه‌ای که چسبیده است،

چسبندگی بین آن‌ها تأثیرگذار است. آزمون FESEM برای تشخیص بافت سطحی مواد انجام می‌شود. در این آزمایش، با گرفتن تعدادی تصویر از سطح مواد در مقیاس میکرو، می‌توان ویژگی‌های مورفولوژیکی را ارزیابی کرد [۱۷]. تجزیه و تحلیل FTIR برای شناسایی گروه‌های عاملی و پیوندهای شیمیایی انجام می‌شود، به‌طوری که هر گروه عاملی تحت یک طول موج خاص ارتعاش می‌کند. لذا، اساس تحلیل نتایج آزمون FTIR بر اساس تغییرات شدت تابش در طول موج‌های مختلف بنا شده است به‌طوری که بر اساس این ارتعاشات و شدت پیک‌ها، گروه‌های عاملی موجود در ماده افزودنی، قیر خالص و قیر حاوی افزودنی مشخص می‌گردند (Nasrekani, Nakhaei, Naderi, Fini, & Aflaki, 2017)

۳-۲-۳- آزمایش‌های عملکردی

آزمایش زمان اختلاط اولین مرحله در طراحی مخلوط و شامل اختلاط مصالح سنگدانه، فیلر، آب و قیر امولسیون کاتیونی است. در آسفالت حفاظتی اسلاری سیل ضروری است زمان اختلاط کافی و مناسب تعیین شده تا از شکست زودهنگام قیر امولسیونی جلوگیری شود. همچنین این آزمون علاوه بر آنکه زمان لازم برای اختلاط را مشخص می‌کند، سازگاری مواد را با یکدیگر کنترل و تأیید می‌نماید. این آزمون مطابق با ISSA TB 113 انجام می‌شود. مدت‌زمان شکستن نمونه در اثر اختلاط به‌عنوان زمان اختلاط معرفی شده که بایستی حداقل ۱۲۰ ثانیه باشد (ISSA, 2017e).

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 (ISSA, 2017d). مخلوط آسفالتی مناسب جهت قرارگیری در ترافیک عبوری، مطابق نتایج حاصله در مدت‌زمان ۳۰ و ۶۰ دقیقه، انتخاب می‌گردد. حداقل میزان چسبندگی جهت بررسی خواص شکنندگی قیر امولسیون در مدت‌زمان ۳۰ دقیقه، ۱۲ کیلوگرم-

تراکم، در مسیر چرخ و در وسط طول نمونه ارزیابی می‌شود (ISSA, 2017b). شکل ۳-۳ نشان‌دهنده دستگاه و نمونه‌های این آزمایش است. رابطه‌های (۳) و (۴) برای محاسبه میزان جابه‌جایی هریک از مخلوط‌ها استفاده می‌شود. در این رابطه، VD و LD به ترتیب شاخص میزان جابه‌جایی عمودی و جانبی است. در ادامه VD_{ba} عمق شیار (mm)، VD_a ضخامت نمونه قبل از ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری (mm)، LD_b عرض نمونه قبل از ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری (mm) و LD_a عرض نمونه بعد از ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری (mm) است.

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

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

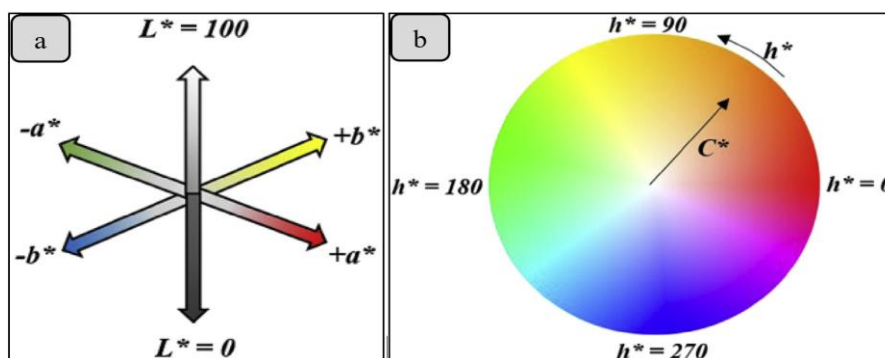
گزارش می‌شود. بدین‌صورت در هریک از مخلوط‌ها حداکثر مقدار مجاز قیر مشخص می‌گردد (ISSA, 2017a). رابطه (۲) برای محاسبه میزان قیرزدگی (چسبندگی ماسه) هریک از مخلوط‌ها استفاده می‌شود. در این رابطه، SA شاخص قیرزدگی بر حسب $G_a, g/m^2$ وزن نمونه بعد از ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری، G_b وزن نمونه بعد از ۱۰۰ سیکل بارگذاری بر روی ماسه و نمونه و A مساحت قسمت بارگذاری چرخ m^2 است.

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

آزمایش ارزیابی میزان تغییر مکان عمودی و جانبی با چرخ بارگذاری شده، ویژگی‌های تغییر شکل مخلوط را تحت بار ترافیک شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد. در این پژوهش مخلوط با استفاده از چرخ ۵۶۷ کیلوگرم طی ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری متراکم می‌شود. متعاقباً ضخامت و عرض نمونه، قبل و بعد از



شکل ۳. نمونه‌های اسلاری سیل رنگی: (a). WCT، (b). WTAT و (c). LWT



شکل ۴. سیستم مشخصه‌های رنگ‌سنجی: (a) CIELAB و (b) CIELCh (L. Hatami & Jamshidi, 2016)

در این بررسی، ویژگی‌های رنگ‌سنجی در درجه اول برای ۳ نقطه در هر وجه جانبی نمونه‌ها به دست آمد. اسپکتروفتومتری روی سه نمونه تکرار شد و مجموعه نهایی L^*C^*h به صورت ارقامی برای هر نمونه گزارش شد. لازم به ذکر است که محدوده عدم قطعیت در محاسبات نهایی از طریق انحراف معیار به صورت نوار خطا در ارقام مربوطه گزارش شده است.

۴. تحلیل داده‌ها

۴-۱- آزمایش‌های FTIR و FESEM, BET

سطح ویژه پودرها شامل فیلر طبیعی، پودر قرمز، پودر زرد و پودر آبی پس از آزمایش مطابق با استاندارد BS EN 4359-1 به ترتیب $۱۴/۷$ ، $۳۲۲/۹$ ، $۳۷۹/۳$ و $۳۴۵/۵$ cm^2/g گزارش گردید. سطح ویژه بالاتر به معنای جذب بیشتر پودرها است. بدین ترتیب پودر قرمز نسبت به دیگر فیلرها دارای بالاترین جذب بوده و فیلر طبیعی و پودرهای رنگی زرد و آبی (با نتایج نزدیک به هم) در رتبه‌های بعدی قرار دارند. با افزایش سطح ویژه، سطح تماس بین پرکننده و قیر افزایش می‌یابد. بر این اساس ناحیه تماس عامل مهمی است که بر واکنش سطحی بین قیر و فیلر و چسبندگی بین آن‌ها تأثیرگذار است. بنابراین واکنش سطحی بین پرکننده و قیر افزایش می‌یابد (Ziari et al., 2022). برای مثال، سطح تماس بین قیر-پودر قرمز بیشتر از قیر-فیلر طبیعی است که نشان‌دهنده واکنش سطحی و چسبندگی قوی‌تر بین پودر قرمز و قیر نسبت به فیلر طبیعی است. در شکل ۵ به ترتیب هر کدام از حروف نماد n: فیلر طبیعی، b: پودر آبی،

۳-۲-۳ تعیین مشخصه‌های رنگی

به منظور بررسی رنگ ظاهری، مختصات رنگی نمونه‌ها با دستگاه اسپکتروفتومتر مدل XRite SP-64 تحت استاندارد روشنایی D65 و مشاهده‌کننده استاندارد 10 درجه در فضاهای رنگی CIELAB و CIELCH اندازه‌گیری شد. رنگ‌های قرمز، زرد، سبز و آبی در سیستم رنگ‌سنجی CIELAB به ترتیب در زوایای صفر، ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ درجه به صورت $+a$ ، $+b$ ، $-a$ و $-b$ نشان داده می‌شوند (شکل ۴-ا). پارامترهای رنگ‌سنجی به صورت روابط ۵ و ۶ محاسبه می‌شوند. در این رابطه، a^* و b^* مکان رنگ را با توجه به محورهای قرمز-سبز و زرد-آبی در سیستم CIELAB نشان می‌دهند. داده‌های حاصل از سنجش رنگ بر اساس مختصات رنگ‌سنجی CIELCH بر اساس سه پارامتر روشنایی (L^*)، خلوص C^* و فام h^* (همانند آنچه در شکل (ب-۴) ارائه شده، بیان می‌شود. پارامتر L^* نشانگر میزان روشنایی بوده و از سفید تا مشکی در محدوده صفر تا ۱۰۰ تغییر می‌کند. پارامتر C^* مشخص‌کننده فاصله خلوص است و میزان دور بودن از یک خاکستری با همان میزان روشنایی را نشان می‌دهد. خلوص با برداری از مرکز مختصات به سمت محیط نشان داده می‌شود. فام به کمک زاویه‌ای از صفر تا ۳۶۰ درجه نشان داده شده است.

$$C_{ab}^* = (a^{*2} + b^{*2})^{0.5} \quad (5)$$

$$h_{ab} = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (6)$$

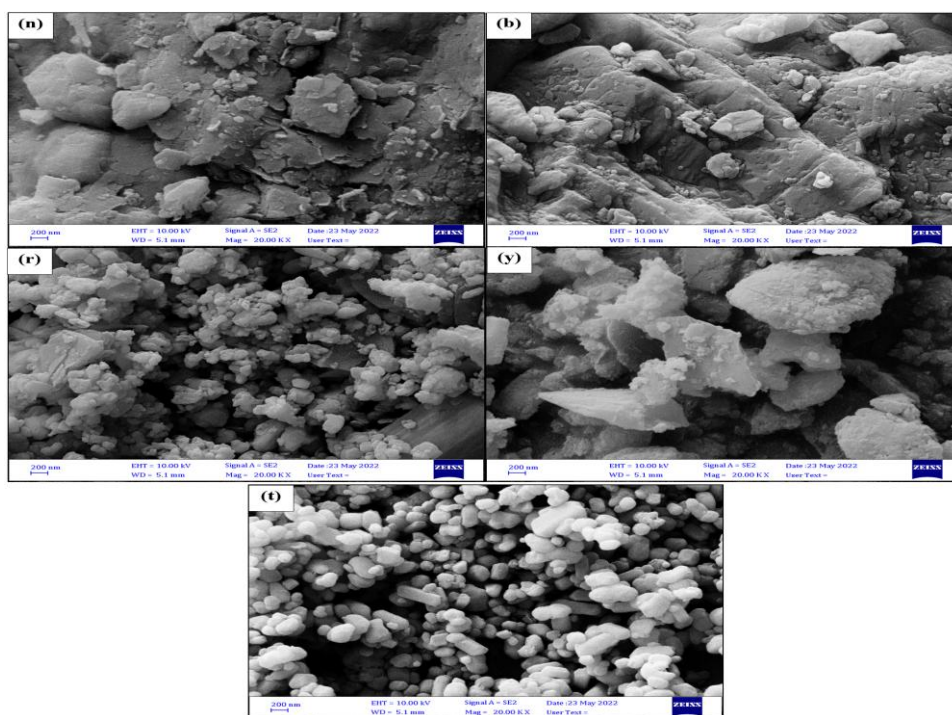
می‌شود (Bahçeli, Güleç, Erdoğan, & Söğüt, 2016). مطابق این شکل در نمونه کامپوزیتی حاوی فیلر طبیعی، شدت پیک مربوط به ارتعاش کششی پیوندهای C-H نسبت به نمونه پودری تشدید شده و شدت پیک مربوط به ارتعاش کششی پیوند O-H نسبت به نمونه قیر خالص شدیدتر شده است که این بیانگر اختلاط پودر با قیر و تشکیل کامپوزیت است. همچنین مطابق این شکل، برهمکنش پیوندهای S=O در قیر و گروه‌های موجود در ساختار فیلر طبیعی مانند کربنات و کوارتز باعث جابجایی پیک مربوط به این پیوند به عدد موج‌های بالاتر شده است. بنابراین وجود پیک‌های مربوط به هر دو ساختار فیلر طبیعی و قیر در نمونه کامپوزیتی اثباتی بر کامپوزیت سازی موفقیت‌آمیز این نمونه است. در نمونه کامپوزیتی حاوی پودر آبی (شکل ۶-b)، مجدداً پیک‌های مربوط به گروه‌های کربناتی در عدد موج‌های حدود 1421 cm^{-1} ، 874 cm^{-1} و 710 cm^{-1} که به ترتیب مربوط به ارتعاش کششی و خمشی پیوندهای C-O در ساختار CO_3^{2-} است (Lakkakula et al., 2016; Zhang et al., 2010). همچنین پیوند C=O در عدد موج حدود 1710 cm^{-1} مشاهده شده است. با این حال بر خلاف پودر طبیعی در این نمونه اثری از ارتعاش کششی مربوط به ساختار کوارتز نیست که این مورد توسط آزمون XRF و XRD نیز قابل اثبات است. مطابق این شکل پیک شدید OH به دلیل آبدوستی بالای کربنات کلسیم است. در نمونه کامپوزیتی پودر آبی نیز مجدداً همین پیک شدید مربوط به ارتعاش کششی پیوند O-H البته با شدتی کمتر نسبت به نمونه پودر آبی خالص قابل مشاهده است که مؤید وجود پودر آبی در این کامپوزیت است. به‌علاوه، وجود پیک‌های مربوط به هر دو ساختار پودر آبی و قیر در نمونه کامپوزیتی اثباتی بر کامپوزیت سازی موفقیت‌آمیز این نمونه است. همچنین جابجایی پیک واقع شده در عدد موج حدود 710 cm^{-1} در نمونه کامپوزیتی نسبت به هر دو نمونه قیر و پودر آبی خالص به سمت عدد موج‌های کمتر می‌تواند بیانگر بر هم کنش گروه‌های کربناتی موجود در پودر آبی و ساختار

f: پودر قرمز، y: پودر زرد و t: پودر دی‌اکسید تیتانیوم است. بر اساس شکل ۵، $(n-y)$ ذرات رنگدانه دارای اشکال زاویه‌ای، ساختار خرد شده و سطح زبر می‌باشند. این در حالی است که ذرات تیتانیوم دی‌اکسید، براساس شکل ۵ - f)، دارای شکلی کروی بوده که با بررسی بیشتر این ذرات، دارای اندازه‌های بسیار کوچک‌تر می‌باشند. این موضوع سبب پخش شدگی و رنگ‌دهی بسیار مناسب این پودر در ماستیک و مخلوط‌های حفاظتی خواهد شد. همچنین براساس شکل ۵، شکل زاویه‌ای پودرهای رنگی در مقیاس میکرو مشابه فیلر مصالح سنگی است که می‌تواند خاصیت جذب و چسبندگی مناسبی را با قیر به همراه داشته باشد.

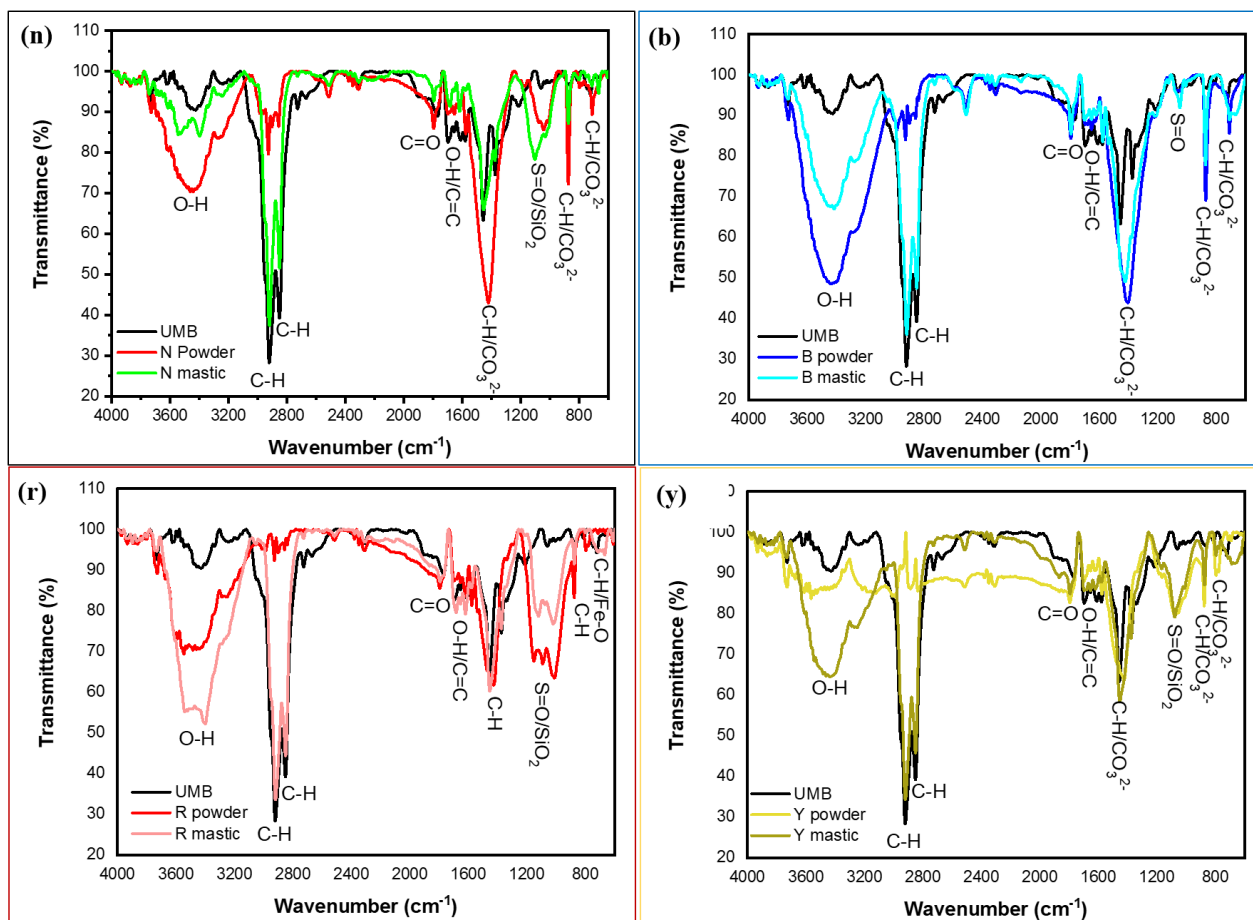
در این مطالعه جهت ارزیابی برهم‌کنش پودرها و قیر امولسیون، FTIR نمونه‌ها در طول موج 400 تا 4000 اندازه‌گیری گردید. در شکل ۶ طیف‌های FTIR قیر، پودرهای خالص و همچنین کامپوزیت این دو ماده نشان داده شده است. در نمونه کامپوزیتی حاوی فیلر طبیعی (شکل ۶-n)، وجود گروه‌های کربناتی (کربنات کلسیم و دولومیت) باعث ایجاد پیک‌های شدیدی در عدد موج‌های حدود 1421 cm^{-1} ، 874 cm^{-1} و 710 cm^{-1} شده است که به ترتیب مربوط به ارتعاش کششی و خمشی پیوندهای C-O در ساختار CO_3^{2-} است (Lakkakula et al., 2016; Zhang, Guo, Li, & Li, 2010). همچنین پیوند C=O در عدد موج حدود 1710 cm^{-1} در این نمونه تأیید دیگری بر وجود ساختار کربناتی در این نمونه است که توسط آزمون XRF و XRD نیز قابل اثبات است (Hwidi, Izhar, & Saad, 2018). به‌علاوه، پیک تشدید شده در عدد موج حدود 1103 cm^{-1} مربوط به ارتعاش کششی پیوند Si-O-Si تأیید کننده نتایج آزمون‌های XRF و XRD مبنی بر وجود کوارتز در این نمونه است (Bwatanglang, Magili, & Kaigamma, 2021). باهچلی و همکارانش اثبات نمودند که وجود پیوندهای Si-O-Si در ساختار می‌تواند با گروه‌های هیدروکربنی وارد اندرکنش شده و باعث افزایش ویسکوزیته قیر

متیلنی موجود در قیر باشد. این برهم کنش بین ساختار کلسیم کربنات با ساختار قیر مطابق پژوهش ژینگ و همکارانش باعث افزایش دمای نقطه نرم شوندگی قیر شده و چقرمگی قیر را افزایش می‌دهد (Xing, Pei, Li, & Tan, 2019). در نمونه کامپوزیتی حاوی پودر زرد (شکل ۶-y)، مجدداً شبیه به نمونه فیلر طبیعی وجود گروه‌های کربناتی (کربنات کلسیم و دولومیت) باعث ایجاد پیک‌های شدیدی در عدد موج‌های حدود cm^{-1} ۱۴۲۱، cm^{-1} ۸۷۴ و cm^{-1} ۷۱۰ شده است که به ترتیب مربوط به ارتعاش کششی و خمشی پیوندهای C-O در ساختار CO_3^{2-} است (Lakkakula et al., 2016; Zhang et al., 2010). همچنین پیوند C=O در عدد موج حدود cm^{-1} ۱۷۱۰ در این نمونه تأیید دیگری بر وجود ساختار کربناتی در این نمونه است که توسط آزمون XRF و XRD نیز قابل اثبات است. به‌علاوه، پیک تشدید شده در عدد موج حدود cm^{-1} ۱۱۰۳ مربوط به ارتعاش کششی پیوند Si-O-Si تأیید کننده نتایج آزمون‌های XRF و XRD مبنی بر وجود کوارتز در این نمونه است (Bwatanglang et al., 2021). تفاوت پودر زرد با فیلر طبیعی را می‌توان در شدت بالاتر پیک‌های مربوط به ساختار کوارتز دانست که در دیگر آزمون‌ها نیز این مقدار بیشتر کوارتز اثبات شده است. اثبات شده است که وجود پیوندهای Si-O-Si در کنار ساختارهای موجود در قیر منجر به تشکیل ساختارهای پلی آروماتیک شده که این ساختارها خواص الاستیسیته و چسبندگی قیر را بهبود می‌بخشد (Soenen & Redelius, 2014). در نمونه کامپوزیتی حاوی پودر قرمز (شکل ۶-r)، وجود گروه سولفات کلسیم (حاوی S=O) در کنار کوارتز (Si-O-Si) باعث تشدید پیک‌های واقع شده در عدد موج‌های حدود cm^{-1} ۱۰۰۰ تا cm^{-1} ۱۲۰۰ شده است (Abdi, 2021; Goel et al., 2018). در این نمونه توسط آزمون‌های XRF و XRD نیز قابل اثبات است. ساختار سولفات کلسیم به دلیل دارا بودن هترواتم گوگرد اثر قابل توجهی در خودسامانی سیستم و در نتیجه افزایش ویسکوزیته سیستم دارد (Michalica, Kazatchkov, Stastna, & Zanzotto, 2008). مجدداً شدت پیک مربوط به ارتعاش کششی پیوندهای C-H نسبت به نمونه پودری تشدید شده و نسبت به نمونه قیر خالص کمتر بوده است که این بیانگر اختلاط پودر با قیر و تشکیل کامپوزیت است. از طرف دیگر مشاهده می‌شود که شبیه به نمونه ماستیک پودر زرد، در این نمونه نیز پیک مربوط به ارتعاش کششی O-H در نمونه کامپوزیتی از نمونه‌های خالص بیشتر بوده است. همچنین مطابق این شکل، در طیف مربوط به نمونه کامپوزیتی مجدداً جابجایی پیک واقع شده در عدد موج حدود cm^{-1} ۷۱۰ به عدد موج‌های کمتر نسبت به هر دو نمونه قیر و پودر R خالص قابل مشاهده است که می‌تواند بیانگر برهم کنش گروه هماتیت موجود در پودر R (مطابق نتایج آزمون‌های XRF و XRD) و ساختار متیلنی موجود در قیر باشد.

فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال شانزدهم / شماره چهارم (۶۵) / تابستان ۱۴۰۴
۴۸۲۷



شکل ۵. تصاویر FESEM فیلرها: n- فیلر طبیعی، b- پودر آبی، r- پودر قرمز، y- پودر زرد و t: پودر سفید دی اکسید تیتانیوم



شکل ۶. طیف FTIR انواع پودرها و ماستیک تشکیل شده با قیر: n- فیلر طبیعی، b- پودر آبی، r- پودر قرمز و y- پودر زرد

۴-۲ نتایج طرح اختلاط و عملکرد اسلاری سیل

رنگی

۴-۲-۱ آزمایش زمان اختلاط

در جدول ۷ مقادیر اولیه قیر امولسیون در سه سطح، مقادیر مناسب سیمان و آب اضافه شده به مخلوط برای نمونه‌ها تعیین شده است. برای مخلوط اسلاری سیل، زمان اختلاط ۱۸۰ ثانیه مطابق *ISSA TB113* برای هریک از نمونه‌های حاوی درصدهای مختلف از رنگدانه و قیر امولسیون، مورد بررسی واقع شد. نتایج این آزمایش نشان داد با افزایش درصد قیر امولسیون، مقدار آب جهت دستیابی به زمان اختلاط تا حدود مجاز دستورالعمل *ISSA* کاهش یافت. کمترین میزان آب اضافه شده جهت دستیابی به الزام زمان اختلاط در اسلاری سیل رنگی مربوط به نمونه‌های حاوی پودر آبی، یعنی *SSB1* با میزان آب اضافه شده ۶ درصد بوده است. پس از آن نمونه‌های *SSB2* و *SSR2* با میزان آب حدوداً به ترتیب ۷ و ۷/۵ درصد در رتبه‌های بعدی قرار دارند. بنابراین به هنگام استفاده از پودر آبی رنگ در مخلوط اسلاری سیل بایستی توجه داشت که آب به میزان مناسبی مصرف شده تا حدود کارایی در محدود مجاز قرار گیرد.

۴-۲-۲ آزمایش چسبندگی مرطوب

نتایج آزمایش چسبندگی مرطوب در سه سطح از قیر باقی مانده برای نمونه‌های اسلاری سیل رنگی در زمان‌های ۳۰ و ۶۰ دقیقه، در ادامه در نمودار ۷ ارائه شده است. با توجه به نتایج حاصله، تمامی نمونه‌ها مقاومت و گیرش لازم جهت بازگشایی ترافیک به ترتیب در طی مدت زمان ۳۰ و ۶۰ دقیقه را بدست آورده‌اند. به طوری که در مخلوط اسلاری سیل رنگی، ترکیب‌های *SSR1* و *SSR2* دارای مناسب‌ترین عملکرد یا بیشترین مقدار گشتاور پیچشی (متناظر با چسبندگی) بوده و بعد از آن ترکیب‌های حاوی فیلر طبیعی، پودر زرد و پودر آبی در رتبه‌های بعدی قرار داشته‌اند. در مخلوط اسلاری سیل، در قیر باقی مانده ۸ درصد، نمونه‌های *SSR1*، *SSR2*، *SSB1*، *SSB2*، *SSY1* و *SSY2* نسبت به نمونه شاهد (*SSN*) به ترتیب در زمان ۳۰

دقیقه به میزان ۸/۱، ۲/۰، ۸/۷، ۱۰/۷، ۴/۰ و ۸/۱- درصد و در مدت زمان ۱ ساعت به میزان ۷/۶، ۰/۴، ۸/۴، ۱۱/۲، ۴/۰، ۸/۰ و ۱۲/۰- درصد تغییرات داشته‌اند. از منظر افزایش درصد قیر امولسیون، با توجه به نتایج بدست آمده، در نمونه‌های اسلاری سیل رنگی با افزایش مقدار قیر باقی مانده از ۷/۵ به ۸ درصد، مقدار چسبندگی افزایش یافته و سپس با افزایش قیر به ۸/۵ درصد، مقدار چسبندگی کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان این‌طور استنباط کرد با افزایش درصد قیر تا اندازه مشخصی، چسبندگی در این نمونه‌ها بیشتر شده و سپس با افزایش بیشتر مقدار قیر امولسیون و به دنبال آن افزایش زمان عمل‌آوری، مقدار چسبندگی کاهش خواهد یافت. به‌عنوان یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان این‌طور استنباط نمود که با افزایش درصد قیر تا مقدار معینی، چسبندگی در نمونه‌ها افزایش یافته و سپس با افزایش بیشتر مقدار قیر امولسیون و به تبع آن افزایش زمان عمل‌آوری، مقدار چسبندگی افزایش چندانی نخواهد داشت.

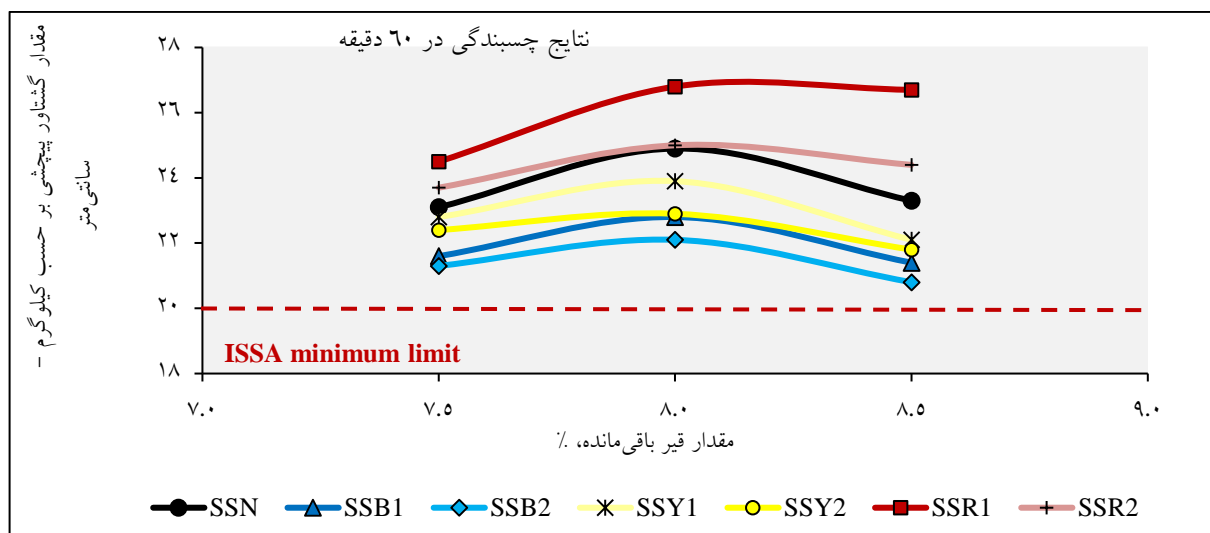
مطابق با آنالیز *XRF*، بخش قابل توجهی از پودرهای استفاده شده دارای ترکیب *SiO2* بوده است. از این منظر، رنگدانه زرد، فیلر طبیعی، رنگدانه قرمز و رنگدانه آبی به ترتیب دارای ۴۴/۲، ۳۴/۳، ۲۵/۱ و ۱۵/۹ درصد *SiO2* بوده‌اند. بار سطحی مصالح سیلیسی منفی و از آنجایی که قیر امولسیون کاتیونی نیز دارای بار سطحی مثبت است، می‌توان نتیجه گرفت که پس از اختلاط پودرهای رنگی با قیر امولسیون کاتیونی پیوند خوبی بین آن‌ها شکل گرفته و موجب افزایش چسبندگی در مخلوط آسفالتی می‌شود. مطابق داده‌های *FTIR* (ترکیب قیر-پودر رنگی)، الگوی پیک‌ها، جابه‌جایی‌ها و شدت نشان داد که تغییرات قابل توجهی در ترکیب قیر باقی مانده ایجاد شده است. این موضوع مؤید آن بوده است که اختلاط مناسبی بین قیر و رنگدانه‌ها تشکیل شده و ویژگی‌های قیر با انواع پودرهای مورد استفاده تغییر یافته است. از دیگر سو، بر اساس تصاویر مورفولوژی *FESEM*، ذرات رنگدانه دارای اشکال زاویه‌ای، ساختار خرد شده و سطح زبر می‌باشند. این موضوع به دلیل تیز گوشه بودن

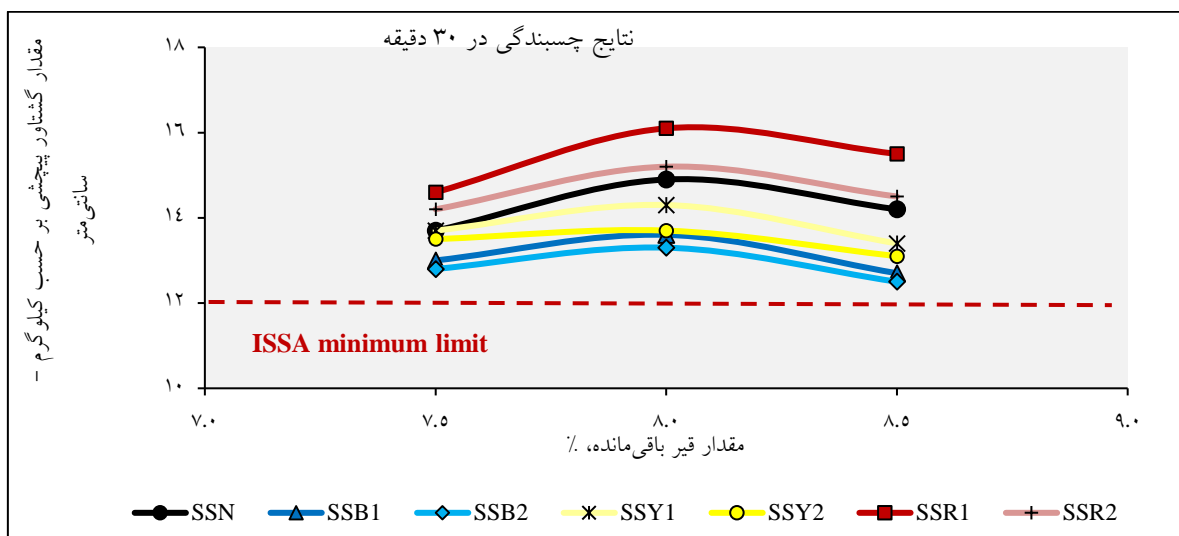
نوع مخلوط	قیر باقی مانده، %	آب اضافه شده، %	زمان اختلاط،
			ثانیه
SSR2	۷/۵	۸	۱۸۵
	۸	۸	۱۸۴
	۸/۵	۷/۵	۱۸۴
SSB1	۷/۵	۷	۱۸۳
	۸	۶/۵	۱۸۶
	۸/۵	۶	۱۸۵
SSB2	۷/۵	۷/۵	۱۸۲
	۸	۷	۱۸۴
	۸/۵	۷	۱۸۵
SSY1	۷/۵	۹	۱۸۳
	۸	۸	۱۸۶
	۸/۵	۸	۱۸۴
SSY2	۷/۵	۸/۵	۱۸۴
	۸	۸	۱۸۵
	۸/۵	۸	۱۸۶

پودرهای رنگی و زاویه اصطکاک مناسب آن‌ها، منجر به تشکیل ماستیک مناسب در ساختار قیر-فیلر گردید. در نهایت ماستیک مناسب باعث قفل‌وبست خوب سنگدانه‌ها نسبت به یکدیگر شده و باعث استحکام بیشتر و چسبندگی بهتر سنگدانه‌ها و قیر با یکدیگر می‌شود. این مطلب با نتایج پژوهش دیگر محققان نیز همخوانی دارد (Arabani, Tahami, & Taghipoor, 2017; Choudhary, Kumar, & Gupta, 2020; G. C. Wang, 2016).

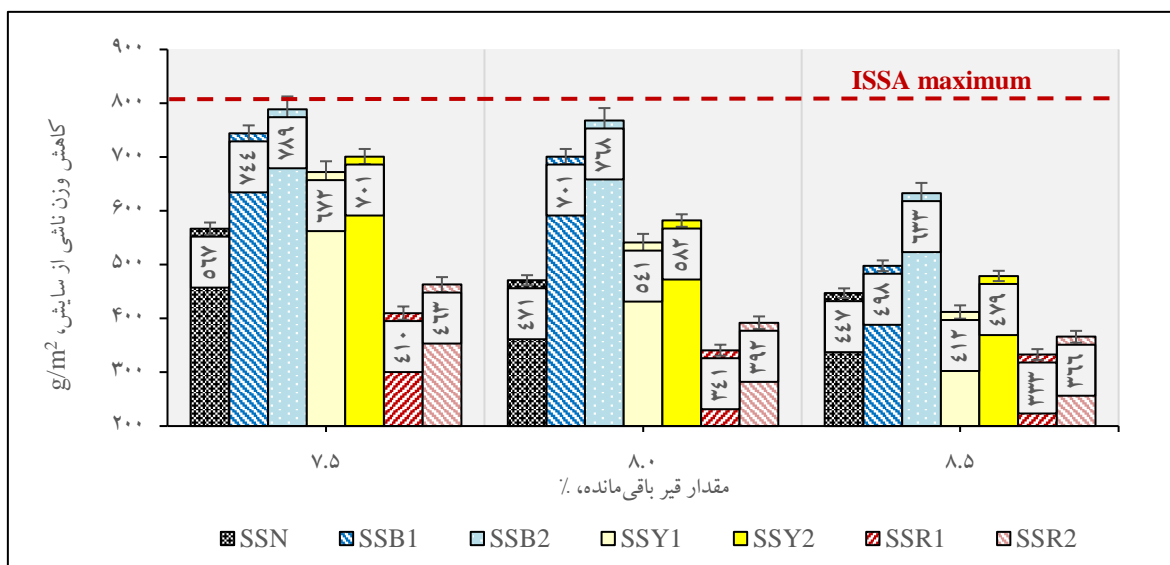
جدول ۷. آزمایش زمان اختلاط اسلاری سیل رنگی

نوع مخلوط	قیر باقی مانده، %	آب اضافه شده، %	زمان اختلاط،
			ثانیه
SSN	۷/۵	۸/۵	۱۸۷
	۸	۸/۵	۱۸۴
	۸/۵	۸	۱۸۲
SSR1	۷/۵	۸/۵	۱۸۶
	۸	۸	۱۸۶
	۸/۵	۸	۱۸۳





شکل ۷. نتایج آزمایش چسبندگی مخلوط‌های اسلاری سیل رنگی



شکل ۸. نتایج مقدار افت وزنی نمونه‌های آزمایش سایش در شرایط مرطوب

مخلوط اسلاری سیل و در قیر باقیمانده ۸ درصد، نمونه‌های SSR1 و SSR2 نسبت به نمونه شاهد (SSN) به ترتیب به مقدار ۲۷/۶ و ۱۶/۸ درصد در حساسیت رطوبتی رشد داشته‌اند. این در حالی است که نمونه‌های SSB1، SSY1، SSY2 و SSB2 نسبت به نمونه شاهد (SSN) به ترتیب به مقدار ۴۸/۸، ۶۳/۱، ۱۴/۹ و ۲۳/۶ و ۶۹/۹ درصد کاهش داشته‌اند. در مجموع، کمترین مقدار افت وزنی در نمونه‌ها متعلق به نمونه SSR1 با عدد ۳۳۳ گرم بر مترمربع است. پس از آن ترکیب‌های حاوی فیلر طبیعی، پودر زرد و پودر آبی در رتبه‌های بعدی قرار

۳-۲-۴ تعیین هدرروی سنگدانه با آزمایش

WTAT

نتایج حساسیت رطوبتی (افت وزنی در اثر سایش) نمونه‌های اسلاری سیل در مدت زمان ۱ ساعت غوطه‌وری در آب در نمودار ۸ نشان داده شده است. مطابق با محدوده مشخص شده در ISSA TB100 مبنی بر افت وزنی ۸۰۷ گرم بر مترمربعی، اغلب مخلوط‌ها در محدوده مجاز دستورالعمل قرار دارند. با توجه به گراف ۸، در همه مخلوط‌ها، افزایش درصد تیتانیوم دی‌اکسید و کاهش قیر باقی‌مانده باعث افت عملکرد در مقابل سایش شده و خرابی رطوبتی تشدید می‌شود. به‌طور مثال در

و پوشش مناسب بر روی سنگدانه بیشتر از ۸ درصد است. بنابراین در صورت استفاده از رنگدانه آبی در ترکیب مخلوط‌های رنگی باید قیر متناسب با آن به منظور به حداقل رساندن پدیده عریان‌شدگی تعیین و تأمین شود. نتیجه این آزمایش، تأیید‌کننده نتایج FTIR مبنی بر آب‌دوست بودن این نوع فیلر است. همان‌طور که در مطالب پیشین عنوان شد، وجود رطوبت یکی از عوامل مهم در خرابی عریان‌شدگی مخلوط آسفالتی است که منجر به از دست رفتن دوام مخلوط می‌شود. به عبارت دیگر عریان‌شدگی به دلیل پیوند ضعیف بین مصالح سنگی و قیر است، در صورتی که مصالح سنگی و قیر نتوانند پیوند مناسبی باهم ایجاد کنند، احتمالاً وقوع پدیده عریان‌شدگی افزایش می‌یابد. از آنجایی که در ترکیبات رنگی حاوی پودر آبی، قطبیت آب بیشتر از چسباننده قیری است، وجود آب موجب جدایی مولکول‌های قیر از سطح مصالح شده و خرابی رطوبتی تشدید خواهد شد. به‌طور خلاصه، جهت به حداقل رساندن خرابی عریان‌شدگی نیاز است که قیر متناسب با هر ترکیب رنگی مشخص شود.

۴-۲-۴ تعیین پتانسیل قیرزدگی مخلوط‌های

اسلاری سیل رنگی

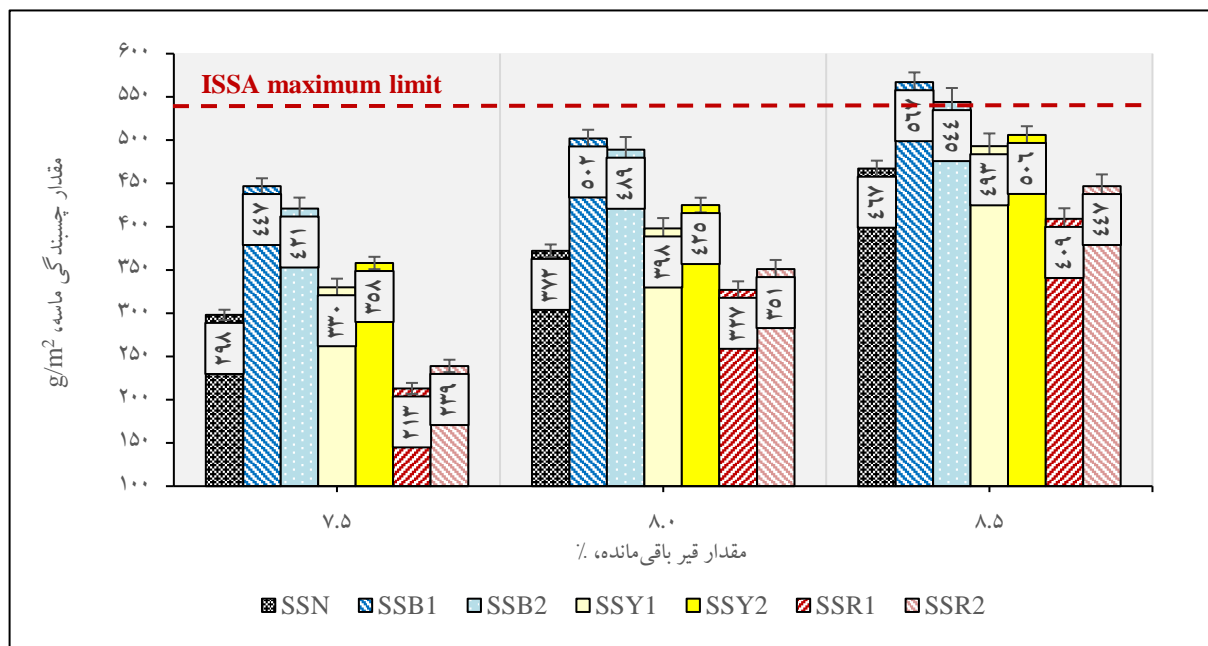
نتایج این آزمایش برای نمونه‌های اسلاری سیل رنگی در ادامه به شرح نمودار ۹ است. همان‌طور که در نمودارها مشاهده می‌شود با افزایش درصد قیر باقی‌مانده قیرزدگی مخلوط‌ها افزایش می‌یابد. به‌طوری که نمونه‌ها در قیر ۷/۵ و ۸/۵ درصد به ترتیب دارای کمترین و بیشترین مقدار قیرزدگی هستند. همچنین استفاده از پودر قرمز در مخلوط‌ها، باعث بهبود قابل‌توجه عملکرد قیرزدگی مخلوط‌های آسفالت سرد می‌گردد. از این جهت بهترین عملکرد را مخلوط‌های قرمز رنگ با ترکیب رنگی SSR1 و SSR2 با مقدار چسبندگی ماسه نزدیک به هم و اختلاف ناچیز داشته‌اند. به‌طور کلی، در مخلوط اسلاری سیل، در قیر باقی‌مانده ۸ درصد، نمونه‌های SSR1، SSR2، SSB1، SSB2، SSY1، SSY2 و SSW نسبت به نمونه شاهد (SSN) به ترتیب به میزان ۱۲/۱، ۵/۶،

داشته‌اند. بنابراین با توجه به نتایج می‌توان این‌طور استنباط کرد که جایگزینی پودر رنگی قرمز، باعث ارتقاء عملکرد حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها می‌شود. این موضوع با نتایج آزمایش BET مبنی بر چسبندگی مناسب قیر-پودر قرمز رنگ همخوانی دارد. موضوع دیگر که در نمودار قابل مشاهده است نرخ کاهش افت وزنی بوده که در درصد‌های متفاوت از قیر در مخلوط اسلاری سیل ثابت نیست. به‌طوری که در مخلوط اسلاری سیل و در نمونه‌های SSR1، SSR2 و SSN با افزایش درصد قیر از ۷/۵ به ۸ درصد، کاهش وزن ناشی از سایش تقریباً با نرخ ثابتی کاهش یافته است. اما با افزایش مجدد درصد قیر از ۸ به ۸/۵ درصد تفاوت معناداری در کاهش وزن مشاهده نشد. این در حالی است که در نمونه‌های SSY1 و SSY2 با افزایش درصد قیر از ۷/۵ به ۸/۵ درصد، نرخ کاهش وزن ناشی از سایش به‌صورت خطی تغییر یافته است. به عبارتی این نتیجه گویای آن است که افزایش قیر در کاهش نرخ سایش مخلوط‌های حاوی پودر زرد رنگ بسیار قابل‌توجه است. موضوع این‌طور قابل توجیه است که با توجه به نتایج آزمون XRF، XRD و FTIR، ترکیب‌های حاوی پودر زرد رنگ به دلیل وجود سیلیس بیشتر در مقایسه با دیگر نمونه‌ها و آب‌دوست بودن این ماده در ترکیب خود باعث می‌شود تا در حضور رطوبت، پیوند قیر و سنگدانه جای خود را به پیوند آب و سنگدانه بدهد. در نتیجه عملکرد ضعیف‌تری (در محدوده مجاز) در مقایسه با دیگر ترکیب‌ها مانند Wozzuk, Wróbel, Bandura, & (Franus, 2020; Zulkati, Diew, & Delai, 2012). در ترکیب‌های حاوی پودر آبی این موضوع متفاوت بوده است. با افزایش درصد قیر از ۷/۵ به ۸ درصد کاهش وزن به طرز محسوسی مشاهده نشده و همچنان دارای عملکرد ضعیف‌تر نسبت به دیگر ترکیبات بوده است. ولی با افزایش مجدد قیر از ۸ به ۸/۵ درصد رشد قابل‌توجهی در مقاومت در برابر سایش به وقوع پیوست. به عبارتی درصد قیر مورد نیاز در نمونه‌های SSB1 و SSB2 برای تأثیرگذاری در برابر حساسیت رطوبتی

ارزیابی اسلاری سیل رنگی حاوی رنگدانه طبیعی و قیر امولسیون: مطالعه آزمایشگاهی عملکرد و مشخصه‌های رنگ‌سنجی

سطح ویژه بالاتر به معنای جذب بیشتر پودرها است. بدین ترتیب پودر قرمز نسبت به دیگر فیلرها دارای بالاترین جذب قیر بوده و فیلر طبیعی و پودرهای رنگی زرد و آبی (با نتایج نزدیک به هم) در رتبه‌های بعدی قرار دارند.

۳۴/۹، -۳۱/۵، -۷/۰، -۱۴/۲ و -۲۶/۱- تغییرات (رشد و کاهش) داشته‌اند. علت تفاوت در پتانسیل قیرزدگی ترکیب‌های رنگی اسلاری سیل، مرتبط با سطح ویژه هریک از پودرهای رنگی است. همان‌طور که بیان شد، سطح ویژه فیلر طبیعی، پودر قرمز، پودر زرد، پودر آبی به ترتیب ۴۱۴/۷، ۶۳۲/۹، ۳۷۹/۳ و ۳۴۵/۵ است.



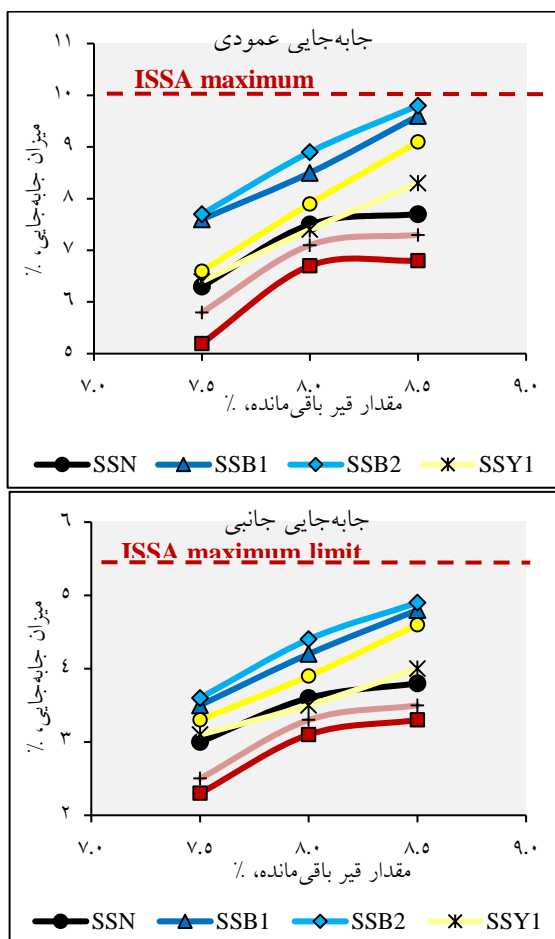
شکل ۹. چسبندگی ماسه (پتانسیل قیر زدگی) مخلوط‌های میکروسرفیسینگ در آزمایش چرخ بارگذاری- چسبندگی ماسه

۴-۲-۵ تعیین میزان تغییر شکل عمودی و جانبی مخلوط‌ها

به منظور ارزیابی عملکرد مخلوط‌ها در برابر بارگذاری ترافیک، آزمایش چرخ بارگذاری شده انجام شده و نتایج بدست آمده از آن برای مخلوط اسلاری سیل رنگی در نمودار ۱۰ ارائه شده است. نتایج این آزمایش از دو دیدگاه نوع ترکیب رنگی و میزان قیر امولسیون در مخلوط‌ها قابل بررسی است. از دیدگاه نوع فیلر، تمامی ترکیب‌های رنگی، در محدوده مجاز دستورالعمل ISSA TB147 دارای میزان جابه‌جایی مناسب عمودی و جانبی بوده‌اند. از منظر نوع ترکیب، استفاده از نمونه‌های رنگی SSR1 و SSR2 منجر به کاهش جابه‌جایی عمودی و جانبی شده است. این بدان معنا است که در مخلوط‌هایی که مستعد شیارشدگی هستند، می‌توان پس از تأمین قیر کافی، با استفاده از ترکیب رنگی

ماسه در آزمایش بارگذاری چرخ-چسبندگی ماسه جذب قیر مازاد شده و بدین ترتیب به‌طور غیرمستقیم قیرزدگی مخلوط‌ها برآورد می‌شود. بنابراین، قیر مازاد بیشتری به ترتیب در ترکیب‌های حاوی پودرهای آبی، زرد و فیلر طبیعی نسبت به پودر قرمز وجود خواهد داشت. از این رو پتانسیل قیرزدگی بیشتری در هریک از ترکیب‌های رنگی و حاوی فیلر طبیعی نسبت به ترکیب‌های قرمز رنگ ایجاد شده است. نکته دیگری که از گراف‌ها دریافت می‌شود، نرخ افزایش وزن (پتانسیل قیرزدگی) بوده که با افزایش درصد قیر از ۷/۵ به ۸/۵ درصد، تأثیر محسوسی بر افزایش پتانسیل قیرزدگی این مخلوط‌ها داشته است. در مجموع این نتایج حاکی از آن است که می‌توان با انتخاب ترکیب مناسب از رنگدانه‌ها و درصد مناسب از قیر امولسیون، مقدار قیر زدگی را به حداقل رساند.

قیر تأثیری بر میزان تغییر شکل نداشته است. اما در نمونه‌های SSB1، SSB2، SSY1 و SSY2 روندی متفاوت مشاهده شده است. به طوری که با افزایش قیر از ۷/۵ به ۸/۵ درصد میزان جابه‌جایی با شیب تقریباً ثابتی افزایش یافته و رشد قابل توجهی داشته است. به طور کلی با توجه به نتایج بدست آمده، در مجموع افزایش درصد قیر باقیمانده اثر معناداری در مقدار جابه‌جایی‌ها افقی و عمودی دارند. افزایش جابه‌جایی در ترکیب‌های رنگی مرتبط با مقدار قیر مصرفی در این نمونه‌ها است. به طوری که با افزایش درصد قیر مورد نیاز، این قیر به‌عنوان یک روان‌کننده عمل نموده و باعث کاهش مقاومت برشی در مخلوط می‌شود (Hainin, Rusbintardjo, Hameed, Hassan, & Yusoff, 2014; Skaf, Manso, Aragón, Fuente-Alonso, & Ortega-López, 2017). از این رو عمق شیار در انواع نمونه‌های رنگی با افزایش درصد قیر، رشد داشته است.



شکل ۱۰. میزان تغییر شکل نمونه‌های اسلاری سیل رنگی

قرمز احتمال رخداد خرابی تغییر شکل را کاهش داد. به طور کلی، در مخلوط اسلاری سیل، نمونه‌های SSR1 و SSR2 نسبت به نمونه شاهد (SSN) به ترتیب به مقدار ۱۱/۷ و ۵/۲ درصد در جابه‌جایی عمودی و به میزان ۱۳/۲ و ۷/۹ درصد در جابه‌جایی جانبی موجب بهبود عملکرد شدند. این در حالی است که نمونه‌های SSB1، SSB2، SSY1، SSY2 و SSW نسبت به نمونه شاهد (SSN) در شاخص جابه‌جایی عمودی به ترتیب به مقدار ۲۴/۷، ۲۷/۳، ۷/۸ و ۱۸/۲ درصد و در شاخص جابه‌جایی جانبی به ترتیب به مقدار ۲۶/۳، ۲۸/۹، ۵/۳ و ۲۱/۱ درصد کاهش داشته‌اند. در واقع این موضوع نشان‌دهنده آن است که ذرات رنگدانه قرمز با توجه سطح ویژه بالا نسبت به دیگر پودرها رنگی میزان جذب قیر مؤثر بیشتری خواهند داشت. در نتیجه این موضوع منجر به ایجاد چسبندگی قوی بین قیر و سنگدانه‌ها شده و به طبع آن مقاومت مخلوط آسفالت سرد در برابر ترافیک عبوری افزایش می‌یابد. از سوی دیگر تغییر شکل مخلوط آسفالتی مستقیماً تحت تأثیر سفتی قیر است. علاوه بر این، نشان داده شده است که رابطه مستقیمی بین نوع فیلر و سفتی قیر وجود دارد (Arabani et al., 2017; Hesami, 2014). رنگدانه قرمز به دلیل خواص فیزیکی (شکل ظاهری، زاویه‌داری و زبری سطح) و ساختاری مناسب، سفتی قیر را به میزان قابل توجهی افزایش داده که منجر به کاهش تغییر شکل مخلوط اسلاری سیل رنگی می‌شود. این نتیجه با تحقیق دیگر محققان نیز همخوانی دارد (Almadwi & Assaf, 2021; Taherkhani & Bayat, 2020). از منظر قیر امولسیون همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نمونه‌های SSR1، SSR2 و SSN با افزایش قیر باقی‌مانده ابتدا میزان جابه‌جایی در قیر باقی‌مانده ۷/۵ به ۸ درصد افزایش و سپس از قیر باقی‌مانده ۸ به ۸/۵ درصد تقریباً ثابت مانده است. این بدان معنا است که در مخلوط‌های SSR1، SSR2 و SSN افزایش قیر تا حدودی مشخص باعث افزایش بیشتر سطح پوشش سنگدانه و ازدیاد مقدار تغییر شکل در برابر بارگذاری شده و سپس افزایش درصد

ارزیابی اسلاری سیل رنگی حاوی رنگدانه طبیعی و قیر امولسیون: مطالعه آزمایشگاهی عملکرد و مشخصه‌های رنگ‌سنجی

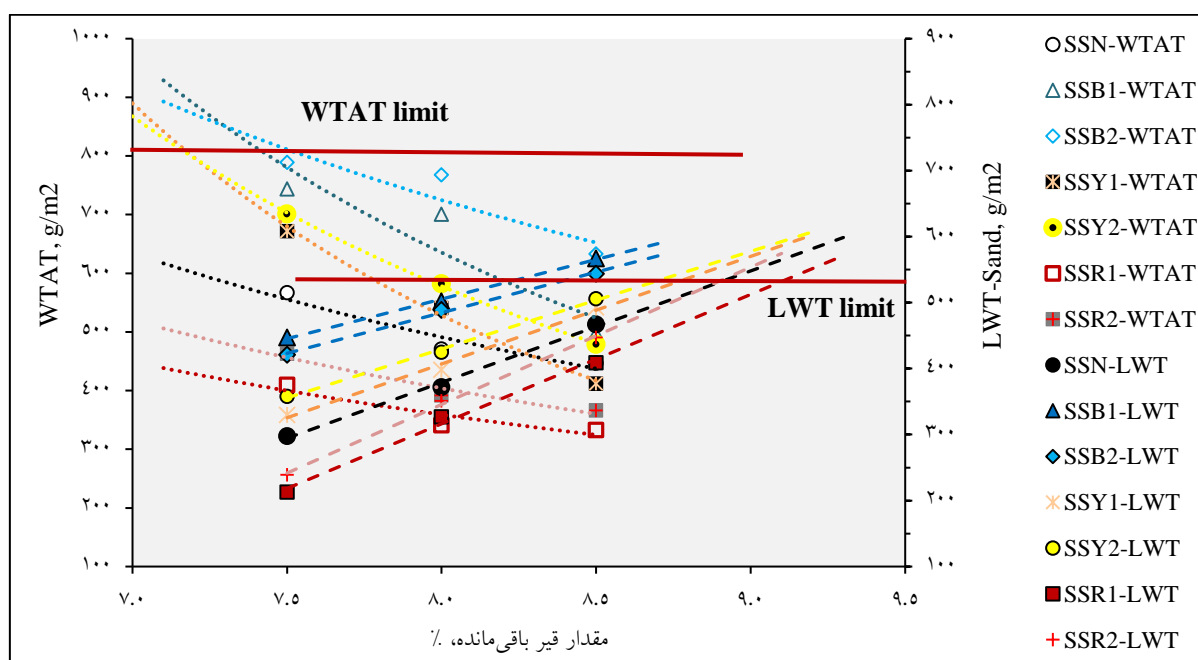
۴-۲-۶ تعیین کردن محدوده مجاز و بهینه قیر امولسیون

محدوده مجاز قیر امولسیون و مقدار بهینه آن از طریق رسم نتایج آزمایش‌های چرخ بارگذاری شده - چسبندگی ماسه و سایش در شرایط مرطوب و تلفیق نمودارهای این دو آزمایش بدست 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, 2017f; Keymanesh et al., 2021; Zalnezhad & Hesami, 2020). محدوده مجاز قیر برای مخلوط اسلاری سیل رنگی در جدول ۸ و شکل ۱۱ ارائه شده است. همان‌طور که از نتایج بدست آمده است درصد بهینه قیر امولسیون مخلوط‌های آسفالتی حاوی ترکیب‌های رنگی متفاوت نسبت به مخلوط شاهد تغییرات مثبت و منفی (رشد و کاهش) داشته است. به طوری که نمونه‌های SSR1 نسبت به نمونه شاهد (SSN) به مقدار ۰/۱۹ دارای قیر

امولسیون بیشتر بوده است. این در حالی است که نمونه‌های SSB1, SSB2, SSY1 و SSY2 نسبت به نمونه شاهد (SSN) در میزان قیر امولسیون بهینه به ترتیب به مقدار ۰/۶۱، ۰/۴۵، ۰/۱۴ و ۰/۲۱ درصد کاهش داشته‌اند. تفاوت در مقدار قیر بهینه مرتبط با مشخصات فیزیکی و شیمیایی هریک از پودرها است. تحقیقات نشان می‌دهد که درصد قیر بهینه مخلوط آسفالتی با افزایش درصد رنگدانه قرمز بکارگرفته شده در مخلوط افزایش می‌یابد. پس از اضافه شدن رنگدانه قرمز، بخشی از قیر آسفالت توسط فیلر رنگدانه جذب می‌شود، به این معنی که مخلوط آسفالتی برای تأمین این بخش از قیر جذب شده توسط فیلر، به قیر بیشتری نیاز داشته تا عملکرد مناسب و قابل قبولی را کسب کند. به طور کلی پودر قرمز رنگ اخرا دارای سطح ویژه به مراتب بالاتر نسبت به دیگر فیلرها بوده و از دیگر سو با توجه به ماهیت شیمیایی و وجود ترکیب هماتیت در ساختار آن باعث افزایش میزان قیر بهینه جهت پوشش سطح سنگدانه‌ها شده است.

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

نوع مخلوط	حداقل مقدار قیر (قیر امولسیون) بدست آمده از آزمایش سایش، %	حداکثر مقدار قیر (قیر امولسیون) بدست آمده از بارگذاری چرخ-چسبندگی ماسه، %	دامنه قابل قبول قیر، %	مقدار بهینه قیر (قیر امولسیون)، %
SSN	۷/۵۰ (۱۳/۱۶)	۸/۸۱ (۱۵/۴۶)	۸/۸۱-۷/۵۰	۸/۱۶ (۱۴/۳۱)
SSR1	۷/۵۰ (۱۳/۱۶)	۹/۰۳ (۱۵/۸۴)	۹/۰۳-۷/۵۰	۸/۲۷ (۱۴/۵۰)
SSR2	۷/۵۰ (۱۳/۱۶)	۸/۸۲ (۱۵/۴۷)	۸/۸۲-۷/۵۰	۸/۱۷ (۱۴/۳۲)
SSB1	۷/۵۰ (۱۳/۱۶)	۸/۱۱ (۱۴/۲۳)	۸/۱۱-۷/۵۰	۷/۸۱ (۱۳/۷۰)
SSB2	۷/۵۲ (۱۳/۱۹)	۸/۲۸ (۱۴/۵۳)	۸/۲۸-۷/۵۲	۷/۹۰ (۱۳/۸۶)
SSY1	۷/۵۰ (۱۳/۱۶)	۸/۶۵ (۱۵/۱۸)	۸/۶۵-۷/۵۰	۸/۰۸ (۱۴/۱۷)
SSY2	۷/۵۰ (۱۳/۱۶)	۸/۵۷ (۱۵/۰۴)	۸/۵۷-۷/۵۰	۸/۰۴ (۱۴/۱۰)



شکل ۱۱. ترکیب نتایج آزمون‌های سایش در شرایط مرطوب و چرخ بارگذاری شده - چسبندگی ماسه

۳-۴ مشخصات رنگ‌سنجی

۱۵/۴ و ۲۷/۰ درصد شده است. این تغییرات در ترکیب‌های رنگی قرمز برجسته‌تر بوده و سپس ترکیب‌های آبی و زرد در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. نکته دیگر که از گراف‌ها دریافت می‌شود با افزایش مقدار مصرف رنگدانه طبیعی (یا کاهش میزان تیتانیوم‌دی‌اکسید) از روشنایی کاسته شده و بر میزان خلوص هر ترکیب اضافه شده است. به طوری که نمونه‌های حاوی ۱ درصد TiO_2 دارای بیشترین میزان خلوص نسبت به دیگر ترکیب‌ها می‌باشند. این در حالی است که با افزایش یا کاهش مصرف TiO_2 تغییراتی قابل توجهی در پارامتر h^{ab} ایجاد نشده و محدوده رنگ تقریباً برای هر گروه از ترکیب رنگی ثابت مانده است. در مجموع با توجه به نتایج رنگ‌سنجی حاصل شده استفاده از TiO_2 در مقادیر ۱ تا ۳ درصد بر ترکیب‌های آبی و قرمز مناسب بوده و استفاده بیش از ۳ درصد TiO_2 منجر به تغییر محسوس در نتایج رنگ‌سنجی نخواهد شد. همچنین مقدار بیشتر از آن مطابق با آزمایش‌های عملکردی در این گروه‌ها توصیه نمی‌شود. این در حالی است که مقدار مناسب TiO_2 برای ترکیب‌های رنگی زرد، ۱ درصد بوده و پس از آن تغییرات قابل توجه نیست.

پارامترهای حاصل از آزمایش رنگ بر روی نمونه‌های اسلاری سیل در جدول ۹ و شکل ۱۲ ارائه شده است. همچنان که نتایج نشان می‌دهد، نمونه شاهد حاوی فیلر طبیعی با توجه به h^{ab} خلوص و روشنایی در محدوده رنگ مشکی قرار گرفته است. در نمونه‌های $SSY1$ و $SSY2$ ، h^{ab} در تقریبی ۸۸ درجه قرار گرفته است. بدان معنا که رنگ نمونه‌های این گروه با توجه به خلوص در محدوده زرد-قهوه‌ای است. محدوده h^{ab} در ترکیب‌های آبی به‌طور متوسط در زاویه ۱۹۷ درجه قرار گرفته و رنگ نمونه‌های در محدوده آبی-سبز روشن (متمایل به سبز) قرار دارد. در نمونه‌های قرمز h^{ab} حدوداً در زاویه ۳۵ درجه قرار گرفته و رنگ نمونه‌های این گروه با توجه به خلوص در محدوده قرمز قرار دارد. همچنان که از نتایج گراف‌ها و جدول ۹ برداشت می‌شود، تغییر درصد تیتانیوم‌دی‌اکسید در ترکیب‌ها باعث ایجاد اختلافاتی در رنگ ترکیب‌ها به‌ویژه مؤلفه روشنایی (L^*) شده است. به طوری که افزایش تیتانیوم‌دی‌اکسید در نمونه‌های اسلاری سیل، از ۱ به ۳ درصد در گروه‌های ۲، ۳ و ۴ به ترتیب موجب افزایش روشنایی (L^*) به میزان ۲۰۷/۶، ۱/۷،

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی به‌کارگیری پودرهای طبیعی رنگی در طرح اختلاط مخلوط اسلاری سیل جهت سنجش عملکرد آن پرداخته شد. در این راستا، ابتدا مشخصات فیزیکی و شیمیایی انواع پودرهای رنگی قرمز، آبی و زرد مورد بررسی قرار گرفته و سپس به‌منظور ارزیابی عملکرد مخلوط‌ها، از ترکیب‌های آسفالتی حاوی پودرهای رنگی و فیلر طبیعی استفاده گردید. نتایج آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق به‌طور خلاصه در ادامه ارائه شده است:

- براساس نتایج XRF، اجزای اصلی فیلر مصالح طبیعی و رنگدانه آبی CaO و SiO_2 است. رنگدانه قرمز دارای مقدار قابل توجهی از SiO_2 و Fe_2O_3 به ترتیب به میزان تقریبی ۲۵ و ۶۷ درصد است. همچنین رنگدانه زرد از عناصر SiO_2 و CaO به ترتیب به مقدار ۵۴ و ۱۵ درصد تشکیل شده است. وجود SiO_2 در ترکیب رنگدانه‌ها با توجه بار منفی این نوع مصالح، سازگاری مناسبی با قیر امولسیون کاتیونی خواهند داشت. بر اساس نتایج FESEM، ذرات رنگدانه دارای اشکال زاویه‌ای، ساختار خرد شده و سطح زبر می‌باشند. شکل زاویه‌ای پودرهای رنگی موجب خاصیت جذب و چسبندگی مناسبی با قیر می‌شوند.

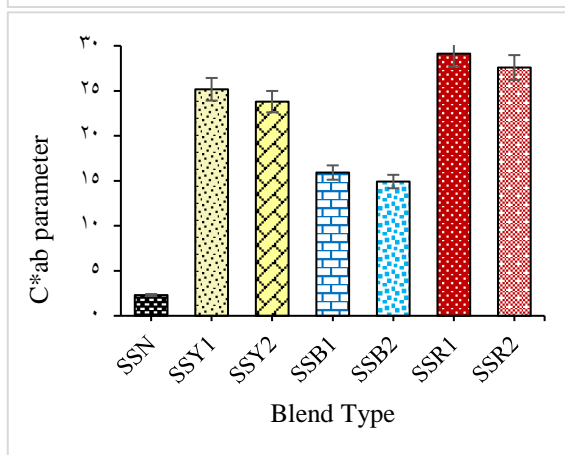
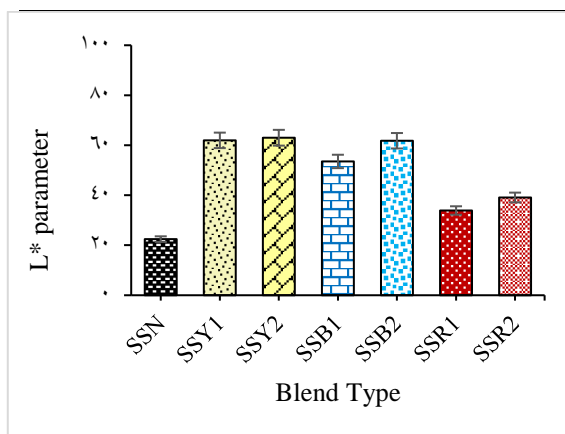
- به‌طور خلاصه در بررسی طیف FTIR در قیر-پودر مشاهده گردید، تغییرات قابل توجهی در ترکیب قیر ایجاد شده است. به‌طوری که به ازای رنگدانه‌های مختلف در محدوده 1600 cm^{-1} در طیف دیده شده است. قله در محدوده 1653 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات کششی گروه پیوند دوگانه $\text{C}=\text{C}$ (الکنی و حلقه آروماتیک) در ساختار قیر است. در این ناحیه از طیف، نسبت به طیف قیر خالص، فرکانس ارتعاشی پیوند دوگانه افزایش یافته که این تغییر موجب افزایش قدرت پیوند دوگانه در سیستم آروماتیک و الکنی در قیر خالص شده است. این موضوع نشان‌دهنده اختلاط مناسب قیر و رنگدانه‌ها است

جدول ۹. مختصات رنگی نمونه‌ها در سیستم رنگی CIELAB

و CIELCH تحت استاندارد روشی D65 و مشاهده‌کننده ۱۰

درجه

نوع مخلوط	پارامتر L^*	پارامتر a^*	پارامتر b^*	پارامتر C^*_{ab}	پارامتر h°_{ab}
SSN	۲۲/۴۵	۱/۱۴	۲/۰۰	۲/۳۰	۶۰/۳۲
SSY1	۶۱/۹۶	۰/۶۲	۲۵/۱۶	۲۵/۱۷	۸۸/۵۹
SSY2	۶۳/۰۱	۰/۴۹	۲۳/۷۹	۲۳/۸۰	۸۸/۸۲
SSB1	۵۳/۵۳	-۱۵/۴۲	-۳/۹۵	۱۵/۹۲	۱۹۴/۳۷
SSB2	۶۱/۸۰	-۱۴/۱۰	-۴/۸۷	۱۴/۹۲	۱۹۹/۰۵
SSR1	۳۳/۹۰	۲۳/۷۱	۱۶/۹۲	۲۹/۱۳	۳۵/۵۱
SSR2	۳۹/۱۰	۲۲/۱۱	۱۶/۵۰	۲۷/۵۹	۳۶/۷۳



شکل ۱۲. مقایسه مختصات رنگی نمونه‌های اسلاری سیل رنگی

جانبی موجب بهبود عملکرد شده‌اند. از سوی دیگر مشخص گردید، افزایش جابه‌جایی در ترکیب‌های رنگی مرتبط با مقدار قیر مصرفی در این نمونه‌ها است. به طوری که با افزایش درصد قیر مورد نیاز، این قیر به‌عنوان یک روان‌کننده عمل نموده و باعث کاهش مقاومت برشی در مخلوط می‌شود.

• در تعیین مشخصه‌های رنگی نمونه‌ها مشخص گردید، استفاده از TiO_2 در مقادیر ۱ تا ۳ درصد بر ترکیب‌های آبی و قرمز مناسب بوده و استفاده بیش از ۳ درصد TiO_2 منجر به تغییر محسوس در نتایج رنگ‌سنجی نخواهد شد. همچنین مقدار بیشتر از آن مطابق با آزمایش‌های عملکردی در این گروه‌ها توصیه نمی‌شود. این در حالی است که مقدار مناسب TiO_2 برای ترکیب‌های رنگی زرد، ۱ درصد بوده و پس از آن تغییرات قابل‌توجه نیست.

۶. پی‌نوشت

1. Slurry seal
2. Spectrophotometer
3. Thermochromic
4. Wet cohesion
5. Wet track abrasion
6. Loaded wheel- sand adhesion
7. Loaded wheel- displacement
8. Chroma
9. Hoe

۷. مراجع

– Abdi, J. (2021). Synthesis of Zeolitic imidazolate framework-8 based magnetic nanocomposite incorporated with silver nanoparticles for efficient removal of organic pollutants from wastewater. *Journal of Separation Science and Engineering*, 12(2), 81-93.

– Al-Shamsi, K., & Hassan, H. F. (2018). Binder Contribution to Cracking of a Lightly Trafficked Asphalt Pavement Made with Clear Binder. *International Journal of Engineering and Technology*, 10(5).

و تأیید کننده این است که رفتار الاستیک قیر اصلاح شده با رنگدانه‌ها افزایش یافته است.

• در آزمایش چسبندگی مرطوب ترکیب‌های $SSR1$ و $SSR2$ دارای بیشترین مقدار گشتاور پیچشی (متناظر با چسبندگی) بوده و بعد از آن ترکیب‌های حاوی فیلر طبیعی، پودر زرد و پودر آبی در رتبه‌های بعدی قرار داشته‌اند. به طوری که ترکیب‌های رنگی قرمز موجب افزایش چسبندگی تا میزان ۱۲ درصد می‌شود.

• در آزمایش سایش در شرایط مرطوب مشخص گردید در همه نمونه‌ها، افزایش درصد تیتانیوم دی‌اکسید و کاهش قیر باقی‌مانده باعث افت عملکرد در مقابل سایش شده و خرابی رطوبتی تشدید می‌شود. همچنین مخلوط $SSR1$ عملکرد سایشی بهتری در مقایسه با سایر مخلوط‌ها داشته است. از طرفی افزایش درصد قیر در نمونه‌های رنگی دارای تأثیر متفاوت بوده است. بنابراین توصیه می‌شود برای افزایش مقاومت در برابر عریان شدگی، مقدار مناسب قیر با توجه به نوع ترکیب در نظر گرفته شود.

• در آزمایش تعیین پتانسیل قیرزدگی مخلوط‌ها معلوم گردید که نمونه‌ها در قیر ۷/۵ و ۸/۵ درصد به ترتیب دارای کمترین و بیشترین مقدار قیرزدگی هستند. همچنین در میان نمونه‌ها بهترین عملکرد را مخلوط‌های قرمز رنگ با ترکیب رنگی $SSR1$ و $SSR2$ با مقدار چسبندگی ماسه نزدیک به هم و اختلاف ناچیز داشته و نسبت به نمونه شاهد (SSN) به ترتیب به مقدار ۱۲/۱ و ۵/۶ درصد موجب ارتقاء مقاومت در برابر قیر زدگی شدند. در مجموع این نتایج حاکی از آن است که می‌توان با انتخاب ترکیب مناسب از رنگدانه‌ها و درصد مناسب از قیر امولسیون، مقدار قیر زدگی را به حداقل رساند.

• در آزمایش چرخ بارگذاری - تغییر شکل مشخص شد استفاده از نمونه‌های رنگی $SSR1$ و $SSR2$ نسبت به نمونه شاهد (SSN) به ترتیب به مقدار ۱۱/۷ و ۵/۲ درصد در جابه‌جایی عمودی و به میزان ۱۳/۲ و ۷/۹ درصد در جابه‌جایی

- waste eggshells and rice husks. *PeerJ Physical Chemistry*, 3, e17.
- Choudhary, J., Kumar, B., & Gupta, A. (2020). Utilization of solid waste materials as alternative fillers in asphalt mixes: A review. *Construction and Building Materials*, 234, 117271.
- Goel, V., Mishra, S., Sharma, C., Sarangi, B., Aggarwal, S., Agnihotri, R., & Kotnala, R. (2018). A non-destructive FTIR method for the determination of ammonium and sulfate in urban PM 2.5 samples. *Mapan*, 33, 209-215.
- Grilli, A., Bocci, M., Virgili, A., & Conti, C. (2020). Mechanical Characterization and Chemical Identification of Clear Binders for Road Surface Courses. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 4930646. doi:10.1155/2020/4930646
- Hainin, M. R., Rusbintardjo, G., Hameed, M. A. S., Hassan, N. A., & Yusoff, N. I. M. (2014). Utilisation of steel slag as an aggregate replacement in porous asphalt mixtures. *Jurnal Teknologi (Sciences and Engineering)*, 69(1), 67-73.
- Hatami, L., & Jamshidi, M. (2016). Application of SBR-included pre-milled colored paste as a new approach for coloring self-consolidating mortars (SCMs). *Cement and Concrete Composites*, 65, 110-117. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.10.015>
- Hatami, L., & Jamshidi, M. (2021). Effects of type and duration of pigment milling on mechanical and colorimetric properties of colored self compacting mortars (CSCM). *Journal of Building Engineering*, 35, 102006. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.102006>
- Almadwi, F. S., & Assaf, G. J. (2021). Effects of Brick Powder on the Properties of Asphalt Mixes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(1), 04020429. doi:doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003531
- 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.
- Autelitano, F. (2021). Color durability of pigmented slurry surfacing after artificial aging tests simulating weathering and traffic. *Transportation Research Procedia*, 55, 1155-1162. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.086>
- Autelitano, F., & Giuliani, F. (2019). Daytime and nighttime color appearance of pigmented asphalt surface treatments. *Construction and Building Materials*, 207, 98-107. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.100>
- Bahçeli, S., Güleç, G., Erdoğan, H., & Söğüt, B. (2016). Micro-Raman and FT-IR spectroscopic studies of ceramic shards excavated from ancient Stratonikeia city at Eskişehir village in West-South Turkey. *Journal of Molecular Structure*, 1106, 316-321.
- Bo, W., Liu, J., Peng, W., Peng, W., & Yu, B. (2020). Properties and Characterization of Temperature-Responsive Asphalt by Using Thermochromic Powder. *Journal of Testing and Evaluation*, 49(5), 3646-3664. doi:10.1520/JTE20200276
- Bwatanglang, I. B., Magili, S. T., & Kaigamma, I. (2021). Adsorption of phenol over bio-based silica/calcium carbonate (CS-SiO₂/CaCO₃) nanocomposite synthesized from

- ISSA. (2017f). Trial mix procedure for slurry seal design. In Technical Bulletin 113: International Slurry Surfacing Association.
- ISSA. (2020). Recommended Performance Guideline for Micro Surfacing A143. In: International Slurry Surfacing Association.
- Izadi, A., Zalnezhad, M., Bozorgi Makerani, P., & Zalnezhad, H. (2022). Mix design and performance evaluation of coloured slurry seal mixture containing natural iron oxide red pigments. Road Materials and Pavement Design, 23(4), 907-924. doi:10.1080/14680629.2020.1860803
- Jalalian Khoshnood, A., Kamboozia, N., Ziari, H., & Zalnezhad, M. (2022). Evaluation of performance characteristics of polymer-modified slurry seal (PMSS) by replacing filler with ceramic waste powder. Road Materials and Pavement Design, 1-18. doi:10.1080/14680629.2022.2117639
- Jiang, Y., Deng, C., Chen, Z., & Tian, Y. (2020). Evaluation of the cooling effect and anti-rutting performance of thermally resistant and heat-reflective pavement. International Journal of Pavement Engineering, 21(4), 447-456. doi:10.1080/10298436.2018.1483506
- Keymanesh, M. R., Ziari, H., Zalnezhad, H., & Zalnezhad, M. (2021). Mix design and performance evaluation of microsurfacing containing electric arc furnace (EAF) steel slag filler. Construction and Building Materials, 269, 121336. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121336>
- Lakkakula, J. R., Kurapati, R., Tynga, I., Abrahamse, H., Raichur, A. M., & Krause, R. W. M. (2016). Cyclodextrin grafted calcium carbonate vaterite particles: efficient system for tailored release of hydrophobic anticancer or
- Hatami, L., Jamshidi, M., & Yavari, M. (2023). Improving mechanical/colorimetric properties of self-compacting mortar using an intensively colored-nanoparticle containing polymeric paste. Journal of Building Engineering, 66, 105841. doi:<https://doi.org/10.1016/j.job.2023.105841>
- Hesami, E. (2014). Characterisation and modelling of asphalt mastic and their effect on workability. KTH Royal Institute of Technology.
- Hwidi, R. S., Izhar, T. N. T., & Saad, F. N. M. (2018). Characterization of limestone as raw material to hydrated lime. Paper presented at the E3S Web of Conferences.
- 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.

- Soenen, H., & Redelius, P. (2014). The effect of aromatic interactions on the elasticity of bituminous binders. *Rheologica Acta*, 53(9), 741-754.
- Taherkhani, H., & Bayat, R. (2020). Investigating the properties of asphalt concrete containing recycled brick powder as filler. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1-11.
doi:10.1080/19648189.2020.1806932
- 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.
- Wozuk, A., Wróbel, M., Bandura, L., & Franus, W. (2020). Brick Debris Dust as an Ecological Filler and Its Effect on the Durability of Asphalt Mix. *Materials*, 13(21), 5023.
- Xing, X., Pei, J., Li, R., & Tan, X. (2019). Effect and mechanism of calcium carbonate whisker on asphalt binder. *Materials Research Express*, 6(5), 055306.
- 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.
- Zhang, J., Guo, J., Li, T., & Li, X. (2010). Chemical surface modification of calcium carbonate particles by maleic anhydride grafting polyethylene wax. *International Journal of Green Nanotechnology: Physics and Chemistry*, 1(2), P65-P71.
- hormone drugs. *RSC advances*, 6(106), 104537-104548.
- Li, L., Zhang, H., & Chen, Z. (2018). Effect of thermochromic materials on physical and aging properties of SBS modified asphalt. *Petroleum Science and Technology*, 36(24), 2119-2124.
doi:10.1080/10916466.2018.1533863
- Michalica, P., Kazatchkov, I. B., Stastna, J., & Zanzotto, L. (2008). Relationship between chemical and rheological properties of two asphalts of different origins. *Fuel*, 87(15-16), 3247-3253.
- Nasrekani, A. A., Nakhaei, M., Naderi, K., Fini, E., & Aflaki, S. (2017). Improving moisture sensitivity of asphalt concrete using natural bitumen (Gilsonite). Paper presented at the Proc., Transportation Research Board 96th Annual Meeting.
- Rezaei Lori, A., Bayat, A., & Azimi, A. (2021). Influence of the replacement of fine copper slag aggregate on physical properties and abrasion resistance of pervious concrete. *Road Materials and Pavement Design*, 22(4), 835-851. doi:10.1080/14680629.2019.1648311
- Shaygan, S., Izadi, A., & Zalnezhad, M. (2022). Performance and environmental assessment of microsurfacing mixture using the granulated Blast-Furnace Slag Powder (GBSP) as potential recycled filler. *Construction and Building Materials*, 359, 129502.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129502>
- Skaf, M., Manso, J. M., Aragón, Á., Fuente-Alonso, J. A., & Ortega-López, V. (2017). EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use. *Resources, Conservation and Recycling*, 120, 176-185.
doi:10.1016/j.resconrec.2016.12.009

– Ziari, H., Zalnezhad, M., Ali Ziari, M., & Nasiri Amiri, E. (2022). Substitution of the natural aggregate filler by coal waste powder (CWP) in microsurfacing surface treatment: Mix design and performance evaluation. *Construction and Building Materials*, 354, 129132.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129132>

– 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.

ارزیابی اسلاری سیل رنگی حاوی رنگدانه طبیعی و قیر امولسیون: مطالعه آزمایشگاهی عملکرد و مشخصه‌های رنگ‌سنجی

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



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



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

