

## ارزیابی آزمایشگاهی عملکرد آسفالت حفاظتی میکروسرفیسینگ رنگی حاوی رنگدانه‌های قرمز اکسید آهن

امیر ایزدی\*، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه غیرانتفاعی شمال، آمل  
پوریا بزرگی ماکرانی، کارشناس ارشد راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شمال، آمل  
مهدی زال‌نژاد، دانشجوی دکتری گرایش راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و  
صنعت ایران، تهران

حسین زال‌نژاد، دانشجوی دکتری گرایش راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور تهران

Email: amirizadi60@gmail.com

دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۲۲ - پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۲۵

### چکیده

از آنجایی که میکروسرفیسینگ یکی از روش‌های مهم در نگهداری پیشگیرانه راه‌ها محسوب می‌شود، برای ادارات راه و شهرسازی این موضوع مهم است که این نوع آسفالت حفاظتی طوری طراحی شود که دارای عملکرد مناسب و بیشترین عمر بهره‌وری باشد. در این تحقیق، نوع خاصی از این آسفالت سرد که با استفاده از مصالح رنگی معدنی ساخته می‌شود، مورد بررسی دقیق‌تر قرار گرفت. هدف از این پژوهش امکان‌سنجی به‌کارگیری رنگدانه قرمز اکسید آهن در طرح اختلاط میکروسرفیسینگ جهت تغییر رنگ این نوع آسفالت و ارزیابی عملکرد آن است. در این راستا، ابتدا مشخصات فیزیکی و شیمیایی مصالح سنگی و رنگدانه ارزیابی شد و سپس به‌منظور ارزیابی عملکرد مخلوط میکروسرفیسینگ حاوی رنگدانه، از چهار ترکیب مختلف حاوی صفر، ۳، ۶ و ۹ درصد رنگدانه، هر کدام در سه سطح متفاوت از قیر امولسیون، استفاده گردید. نتایج طراحی حاکی از آن بود که مخلوط‌های حاوی رنگدانه قرمز اکسید آهن، الزام‌های آیین‌نامه ISSA A143 را برآورده کرده و همچنین مخلوط حاوی ۹٪ رنگدانه اکسید آهن دارای بهترین عملکرد در میان مخلوط‌ها بوده است. همچنین، مشخص گردید که این مخلوط نسبت به نمونه شاهد دارای ۱/۱ درصد قیر امولسیون بیشتر به‌منظور دستیابی به چسبندگی مناسب در زمان مشخص است. نتایج آزمایش‌های دیگر روی نمونه‌ها نشان داد که مخلوط‌های رنگدانه قرمز اکسید آهن به دلیل برخورداری از خواص مکانیکی، شیمیایی و فیزیکی مطلوب، سازگاری بسیار مناسبی با قیر امولسیون داشته و مخلوط حاوی ۹٪ رنگدانه اکسید آهن موجب بهبود عملکرد میکروسرفیسینگ شامل افزایش چسبندگی در مدت زمان ۳۰ و ۶۰ دقیقه به ترتیب به میزان ۴۱/۶ و ۲۱/۷ درصد، افزایش مقاومت در برابر سایش به میزان ۲۷/۹۲ درصد و کاهش جابه‌جایی عمودی به میزان ۵۲/۵ درصد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آسفالت حفاظتی رنگی، رنگدانه غیرآلی اکسید آهن، میکروسرفیسینگ



سایر مصالح رنگی که روی سطح راه پخش می‌شوند و نقش روسازی رنگی را بازی می‌کنند، می‌شوند (FHWA، ۲۰۱۳). یکی از راه‌های اجرای آسفالت رنگی، به‌کارگیری فناوری آسفالت‌های حفاظتی بادوام از قبیل میکروسرفیسینگ رنگی است. مخلوط‌های میکروسرفیسینگ شامل مصالح ۱۰٪ شکسته با دانه‌بندی مشخص، قیر امولسیون کاتیونی اصلاح شده با پلیمر، آب، فیلرهای معدنی و افزودنی‌های شیمیایی برای کنترل زمان شکست است (ISSA، ۲۰۱۰؛ براوتون و همکاران، ۲۰۱۲). فناوری آسفالت‌های حفاظتی رنگی در ساخت روسازی به خاطر فواید آن در اقتصاد و در بازگشایی سریع ترافیک گسترش یافته است و از مزایای آن می‌توان به ضخامت کم و ساخت سریع اشاره کرد. علاوه بر این، می‌توان آن را مستقیماً در آسفالت‌های جدید یا آسفالت موجود استفاده کرد. بنابراین، نیاز به بررسی فن استفاده از این نوع آسفالت بسیار ضروری است (شو و همکاران، ۲۰۱۸). آسفالت‌های حفاظتی، همچون میکروسرفیسینگ رنگی، به دلیل ترکیب مواد تشکیل‌دهنده آن‌ها به‌عنوان یک نوع میکروسرفیسینگ خاص در نظر گرفته می‌شود که رنگ و ویژگی‌های متفاوتی از میکروسرفیسینگ معمولی دارند. میکروسرفیسینگ رنگی یک سیستم رویه با اصطکاک زیاد است که برای استفاده در آسفالت و روکش‌های بتونی مناسب است. یکی از راه‌های ایجاد میکروسرفیسینگ رنگی، افزودن مستقیم رنگدانه به آن است (کوتر، ۲۰۱۸؛ تنگ و همکاران، ۲۰۱۸؛ اُلتیانو و گیلیانی، ۲۰۱۹). معمولاً رنگدانه‌ها یا پیگمان‌ها طبق استاندارد DIN 55944 به دو طبقه کلی پیگمان‌های معدنی (طبیعی) و پیگمان‌های آلی (معمولاً مصنوعی) تقسیم‌بندی می‌گردند (DIN، ۲۰۱۱). پیگمان‌های آلی تنوع ساختاری به مراتب بیشتری از پیگمان‌های معدنی دارند. این نوع پیگمان‌ها، در مقایسه با پیگمان‌های معدنی، قدرت پوشش‌دهی کمتری داشته و اغلب مقاومت حرارتی و مقاومت کافی در برابر عوامل جوی

## ۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، مخلوط‌های آسفالت رنگی به‌طور فزاینده‌ای در جاده‌ها یا فضاهای عمومی، بخصوص در مناطق شهری، مورد استفاده قرار گرفته‌اند (پیرارد و همکاران، ۲۰۱۶ a؛ تنگ و همکاران، ۲۰۱۸؛ اُلتیانو و گیلیانی، ۲۰۱۹). از منظر ترافیکی، آسفالت‌های رنگی به‌عنوان تکمیل‌کننده پیام تابلوها و علامت‌گذاری‌های خیابان‌ها محسوب شده و نقش آن‌ها بهبود ایمنی استفاده‌کنندگان از جاده با بهبود دید و خوانایی در جاده‌ها است (دستری و همکاران، ۲۰۱۵؛ نائوس و وُسکیلن، ۲۰۱۶؛ تنگ و همکاران، ۲۰۱۶). بدین‌صورت، امروزه رویه‌های رنگی آسفالتی و رنگ‌ها به‌عنوان یکی از تجهیزات مهم ایمنی در بحث‌های مدیریت ترافیک مطرح هستند و استفاده از آن‌ها به‌عنوان یکی از روش‌های مؤثر، همواره در میان مهندسين و طراحان تسهیلات ترافیکی مطرح بوده است (روس و همکاران، ۲۰۰۴؛ اُلتیانو و گیلیانی، ۲۰۱۹). به‌طور خلاصه، زیباسازی فضای شهر، کاهش خطرات احتمالی و افزایش ضریب ایمنی جاده‌ها، ساخت گذرگاه عابرین پیاده، ساخت میانه راه، جزایر ترافیکی، خطوط ویژه و اعلام برخی از پیام‌ها در بزرگراه‌ها و آزادراه‌ها، از عمده کاربری‌های آسفالت‌های رنگی است (تنگ و همکاران، ۲۰۱۶؛ پیرارد و همکاران، ۲۰۱۶ a؛ لو و همکاران، ۲۰۱۷؛ نینگ و هوان، ۲۰۱۷؛ کوتر، ۲۰۱۸؛ تنگ و همکاران، ۲۰۱۸؛ اُلتیانو و گیلیانی، ۲۰۱۹). با توجه به آنچه که بیان شده است، محققان و تولیدکنندگان در حال توسعه آسفالت رنگی برای پوشش سطح روسازی‌ها هستند (لویسون و همکاران، ۲۰۰۷؛ سینفا و همکاران، ۲۰۰۷).

بر اساس تعریف اداره کل فدرال بزرگراه‌های ایالات متحده آمریکا، روسازی‌های رنگی شامل طیف وسیعی از روسازی‌ها شامل آسفالت رنگی، بتن رنگی و

همکاران، ۲۰۱۵؛ لو و همکاران، ۲۰۱۷). در سال‌های اخیر نیز مطالعاتی در زمینه‌ی ارتقاء عملکرد آسفالت حفاظتی میکروسرفیسینگ انجام شده است. در پژوهشی، پورسلطانی و حسامی (۲۰۱۸) استفاده از مقادیر مختلف خرده آسفالت در طراحی مخلوط میکروسرفیسینگ را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش، ابتدا ترکیب مناسب اختلاط مصالح برای نمونه‌های حاوی ۴۳، ۶۹ و ۹۵ درصد خرده آسفالت و نمونه‌های حاوی ۱۰۰٪ سنگدانه‌ی تازه تعیین و سپس آزمایش‌های طراحی اولیه‌ی مخلوط میکروسرفیسینگ روی آن‌ها انجام شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که گرچه نمونه‌های حاوی خرده آسفالت معیارهای آیین‌نامه را برآورده می‌کنند اما در مقایسه با نمونه‌های حاوی سنگدانه‌ی تازه، نیاز به اندکی قیر بیشتر برای به‌دست آوردن به‌هم پیوستگی کافی در مدت زمان مشخص شده دارند. همچنین، از میان نمونه‌های حاوی خرده آسفالت، نمونه‌ی دارای ۶۹٪ خرده آسفالت عملکرد بهتری را از خود نشان داد. در مطالعه‌ی دیگر، زال‌نژاد و حسامی (۲۰۲۰) به ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر استفاده از سرباره فولاد بر مشخصات آسفالت حفاظتی میکروسرفیسینگ پرداختند. در این تحقیق از مصالح ۱۰۰٪ سیلیسی به‌عنوان مخلوط شاهد استفاده شد. سپس، سرباره فولاد در مقادیر ۴۲/۵، ۶۱ و ۱۰۰ درصد جایگزین سنگدانه‌های مخلوط شاهد گردید. مخلوط‌های میکروسرفیسینگ توسط آزمایش‌های چسبندگی در ۳۰ و ۶۰ دقیقه، سایش در شرایط مرطوب در مدت زمان یک ساعت و میزان جابه‌جایی عمودی و جانبی با چرخ بارگذاری شده بررسی گردیدند. نتایج آزمایش‌های چسبندگی و سایش در شرایط مرطوب حاکی از آن بود که مخلوط‌های حاوی مصالح سرباره فولاد نسبت به مخلوط شاهد، به‌دلیل برخورداری از خواص مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی مطلوب، موجب بهبود عملکرد میکروسرفیسینگ می‌شود. همچنین، در آزمایش تعیین میزان جابه‌جایی با چرخ بارگذاری شده،

از خود نشان نمی‌دهند. در کنار این عوامل، گرانی این نوع پیگمان‌ها نیز سبب گردیده است که در تولید آسفالت رنگی کاربرد نداشته باشند. لذا، در جایی که به آسفالت رنگی نیاز است، باید از مصالح و مواد رنگی پایدار، به‌صورت یکنواخت استفاده شود تا کارایی پیام‌های تابلوهای ترافیکی و علامت‌گذاری‌های خیابان‌ها و مزایای بالقوه آن افزایش یابد. بنابراین، برای تهیه آسفالت‌های رنگی از پیگمان‌های معدنی و عموماً طبیعی استفاده شده چرا که هزینه آن‌ها کم و قدرت پوشش‌دهی آن‌ها قابل قبول است. پیگمان‌های معدنی نظیر اکسید آهن، اکسید کروم، اکسید تیتانیوم و پیگمان‌های ترکیبی نظیر کبالت آبی، ترکیبات مناسبی برای رنگی کردن آسفالت هستند. رنگدانه‌های معدنی مانند اکسید آهن قرمز و اکسید کروم سبز از رایج‌ترین رنگدانه‌های مصرفی و پایدار در برابر حرارت و با ثبات رنگی مناسب هستند (آتلیتانو و گیلیانی، ۲۰۱۹).

از سوی دیگر، باید به نقش رنگدانه‌ها و تأثیر آن‌ها بر طرح اختلاط مخلوط آسفالتی نیز توجه داشت. رنگدانه‌ها اجزایی اضافی هستند که بر خواص مکانیکی قیر و مخلوط تأثیر قابل توجهی خواهند داشت. در حقیقت، رنگدانه‌ها به دلیل نوع دانه‌بندی و اندازه آنها به‌عنوان بخشی از ریزدانه‌های آسفالت محسوب می‌شوند و عملاً 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 تغییرشکل دائمی داشته باشد و همچنین کارپذیری مخلوط را نیز مختل ننماید (جیانگ و همکاران، ۲۰۱۸). لذا، از آنجایی که نوع ماده سازنده رنگ و میزان پایداری آن روی مشخصات مکانیکی آسفالت حفاظتی اثر دارد، برای به‌دست آوردن مخلوط‌های آسفالت رنگی با کیفیت مطلوب، توجه ویژه‌ای به طراحی مخلوط و عملکرد مکانیکی آن نیاز است (لی و همکاران، ۲۰۰۳؛ لین و لو، ۲۰۰۴؛ آنرل و تارو، ۲۰۱۱؛ دستری و

کمترین میزان جابه‌جایی در مخلوط حاوی ۶۱٪ سرباره فولاد مشاهده شد، که نسبت به نمونه شاهد موجب کاهش جابه‌جایی عمودی و جانبی به ترتیب به میزان ۴۵/۶۵ و ۳۵ درصد گردید. در دیگر تحقیق، اوتادی و تن‌زاده (۲۰۱۸) به ارزیابی آزمایشگاهی میکروسرفیسینگ اصلاح‌شده با نانو مواد و الیاف پلی‌اتیلن پرداختند. مواد افزودنی شامل ۴٪ نانوسیلیکا و ۳٪ نانورس بوده که بر اساس درصد وزن قیر باقی‌مانده به قیر امولسیون اضافه گردید. علاوه بر آن، الیاف پلی‌اتیلن بر اساس وزن خشک سنگدانه به مقدار ۴٪ با مخلوط آسفالتی ترکیب شد. طراحی مناسب مخلوط بر اساس آزمایش‌های چرخ بارگذاری شده، سایش در شرایط مرطوب و چسبندگی مرطوب انجام شد. در این پژوهش، مشخص گردید که اضافه شدن نانوسیلیکا بعد از شکست قیر امولسیون، موجب افزایش چسبندگی قیر امولسیون و مخلوط آسفالتی به ترتیب به میزان ۸ و ۵ درصد شده است. از سوی دیگر، نانورس موجب افزایش ۱۲ درصدی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر سایش گردید. همچنین، افزودن فیبر به مخلوط‌ها موجب کاهش جابه‌جایی به میزان ۲۷٪ در مخلوط‌ها شد.

لذا، در این تحقیق، با ساخت نمونه‌های کوچک-مقیاس از آسفالت‌های رنگی، به بررسی اثر افزودن درصدهای مختلف پیگمان اکسید آهن بر خواص آسفالت حفاظتی میکروسرفیسینگ در طرح مخلوط این نوع آسفالت پرداخته شده است. در این راستا، ابتدا مشخصات فیزیکی و شیمیایی مصالح سنگی و رنگدانه مورد ارزیابی قرار گرفته و سپس به‌منظور ارزیابی عملکرد مخلوط میکروسرفیسینگ حاوی رنگدانه، چهار ترکیب مختلف حاوی صفر، ۳، ۶ و ۹ درصد رنگدانه، در سه سطح متفاوت از قیر امولسیون، تهیه شد. سنجش نمونه‌های آسفالتی به‌واسطه آزمایش‌های چسبندگی، چرخ بارگذاری شده و سایش در شرایط مرطوب مطابق با دستورالعمل ISSA A143 انجام شد.

## ۲. مواد و مصالح

مخلوط میکروسرفیسینگ شامل مصالح ۱۰۰٪ شکسته با دانه‌بندی مشخص، قیر امولسیون کاتیونی اصلاح شده با پلیمر، آب، فیلر معدنی و در صورت لزوم افزودنی‌های شیمیایی برای کنترل زمان شکست است. هر کدام از مواد بایستی دارای الزامات مشخص مطابق با ISSA A143 بوده که در ادامه به توضیح هر یک از آن‌ها پرداخته می‌شود (ISSA, ۲۰۱۰؛ ASTM, ۲۰۱۸).

### ۱-۲. سنگدانه و رنگدانه قرمز

در این پژوهش، از مصالح سنگی کوهی در اندازه ۰-۵ میلی‌متر و فیلر رنگدانه قرمز استفاده شده است. مشخصات سنگدانه‌های مصرفی پس از آزمایش مطابق با جدول ۱ است. همچنین، ترکیب شیمیایی سنگدانه و رنگدانه قرمز اکسید آهن پس از انجام آزمایش XRF<sup>۱</sup> به شرح جدول ۲ است. همان‌طور که از نتایج جدول ۲ مشخص است، رنگدانه قرمز مورد استفاده در این پژوهش حاوی اکسید آهن به میزان تقریبی ۶۹٪ است. در مخلوط‌های میکروسرفیسینگ، دانه‌بندی‌های نوع II و III مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این پژوهش، از دانه‌بندی نوع II به دلیل کاربرد درون‌شهری آسفالت سرد رنگی مطابق جدول ۳ استفاده شده و محدوده دانه‌بندی مورد استفاده طبق حدود بالا و پایین دستورالعمل ISSA A143 است.

<sup>۱</sup> - X-Ray Fluorescence



جدول ۱. خصوصیات مصالح معدنی

محدودیت بر اساس دستورالعمل ISSA A143	نتیجه	استاندارد	آزمایش
-	۲/۶۳	ASTM C127	وزن مخصوص حقیقی درشت‌دانه (gr/cm <sup>3</sup> )
-	۲/۶۴	ASTM C128	وزن مخصوص حقیقی ریزدانه (gr/cm <sup>3</sup> )
-	۲/۷۱	ASTM C127	وزن مخصوص ظاهری درشت‌دانه (gr/cm <sup>3</sup> )
-	۲/۷۳	ASTM C128	وزن مخصوص ظاهری ریزدانه (gr/cm <sup>3</sup> )
-	۱/۱۱	ASTM C127	درصد جذب آب درشت‌دانه
-	۱/۳۷	ASTM C128	درصد جذب آب ریزدانه
حداقل ۰.۴۵٪	۰.۶۷٪	ASTM D2419	ارزش ماسه‌ای مصالح ریزدانه و خاک‌ها
حداکثر ۰.۱۵٪	۰.۲٪	ASTM C88	سلامت مصالح با سولفات سدیم
حداکثر ۰.۳۵٪	۰.۲۶٪	ASTM C131	مقاومت سایشی در ماشین لس‌آنجلس

جدول ۲. ترکیب شیمیایی سنگدانه و رنگدانه اکسید آهن

BaO	SrO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MnO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	نوع مواد
-	۰.۲۲٪	-	۰.۱۷٪	-	-	۴.۹۷٪	۳۰۰ ppm	۰.۸۶٪	۸۹.۹۰٪	۱.۱۲٪	۱.۰۳٪	۰.۲۷٪	مصالح کوهی
۰.۳۶٪	۵۰۰ ppm	۵۰۰ ppm	۹۰۰ ppm	۰.۵۵٪	۰.۵۸٪	۱۶.۰۴٪	۰.۳۴٪	۱.۶۱٪	۲.۳۹٪	۱.۵۶٪	۶۹.۲٪	-	رنگدانه قرمز

جدول ۳. دانه‌بندی مصالح سنگی میکروسرفیسینگ

درصد حدود رواداری نسبت به دانه‌بندی کارگاهی	درصد عبور کرده از الک		اندازه الک
	نوع II محدوده	نوع II مورد استفاده	
	آیین‌نامه ISSA	در این پژوهش	
±۵	۱۰۰-۹۰	۱۰۰	۴/۷۵ میلی‌متر (شماره ۴)
±۵	۹۰-۶۵	۷۲	۲/۳۶ میلی‌متر (شماره ۸)
±۵	۷۰-۴۵	۴۶	۱/۱۸ میلی‌متر (شماره ۱۶)
±۵	۵۰-۳۰	۳۰	۶۰۰ میکرون (شماره ۳۰)
±۵	۳۰-۱۸	۲۱	۳۰۰ میکرون (شماره ۵۰)
±۴	۲۱-۱۰	۱۶	۱۵۰ میکرون (شماره ۱۰۰)
±۳	۱۵-۵	۱۰	۷۵ میکرون (شماره ۲۰۰)

۲-۲. قیر امولسیون اصلاح شده با پلیمر

در این تحقیق، قیر امولسیون CSS-1h مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور ساخت قیر امولسیون CSS-1h، قیر ۶۰-۷۰ تهیه شده از شرکت نفت پاسارگاد به مقدار ۶۰٪ در دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس با ۴۰٪ محلول سوپ حاوی آب، اسید

ارزیابی آزمایشگاهی عملکرد آسفالت حفاظتی میکروسرفیسینگ رنگی حاوی رنگدانه‌های قرمز اکسید آهن

HCl، امولسیفایر کندشکن CSS و ۳٪ پلیمر بر اساس وزن جامد قیر در دستگاه امولسیون‌ساز آزمایشگاهی شرکت عمارت گستر پیشگامان نوین واقع در شهرستان آمل، مطابق شکل ۱، با سرعت ۲۸۴۰ rpm مورد اختلاط و امولسیون‌سازی قرار گرفت. مشخصات قیر امولسیون پلیمری مصرفی پس از آزمایش در این پژوهش مطابق با جدول ۴ است.



شکل ۱. دستگاه امولسیون‌ساز آزمایشگاهی شرکت عمارت گستر پیشگامان نوین

### ۳-۲. فیلر فعال معدنی

برای فیلرها از مواد مختلفی می‌توان استفاده نمود از جمله سیمان پرتلند، آهک هیدراته شده و میکروسیلیس. فیلر معدنی برای تسریع زمان گیرش و عمل‌آوری و بالا بردن چسبندگی بین مصالح سنگی در میکروسرفیسینگ است (زال‌نژاد و حسامی، ۲۰۲۰). در این پژوهش، از سیمان پرتلند نوع ۲ شرکت سیمان فیروزکوه مطابق مشخصات ارائه شده در جدول ۵ استفاده گردید.

### ۴-۲. آب

آب مورد استفاده در میکروسرفیسینگ فاقد املاح مضر نظیر نمک‌ها و سولفات‌ها است. هدف از اضافه کردن آب، بهبود اندود، پوشش و کارایی مخلوط است (یوهانس، ۲۰۱۴؛ زال‌نژاد و حسامی، ۲۰۲۰). آب مصرفی در این پژوهش، برای رسیدن به کارایی مطلوب، آب شرب بوده که در تمامی مخلوط‌های میکروسرفیسینگ مورد استفاده واقع شد.



جدول ۴. مشخصات قیرهای امولسیون کنشکن اصلاح شده با پلیمر مورد استفاده در این پژوهش

آزمایش	روش آزمایش	نتیجه آزمایش
	AASHTO T59	کندروانی سی بولت- فورل در دمای °C ۲۵، ثانیه ۲۷
	ASTM D6930	نشست (پایداری) در انبار کردن قیر امولسیون، ۲۴ ساعت، % ۰/۴
	ASTM D7497	تقطیر قیر امولسیون، درصد جرم وزنی ۶۳
	ASTM D244	الک، % ۰/۰۴
	AASHTO T59	اندود، % ۹۰
	AASHTO T59	بار ذرات مثبت
آزمایش‌های روی قیر باقی‌مانده از تقطیر قیر امولسیون		
	ASTM D36	نقطه نرمی قیر با آزمایش حلقه و گلوله، °C ۶۴*
	ASTM D5	درجه نفوذ در °C ۲۵، ۱۰۰ گرم، ۵ ثانیه ۶۱*
	ASTM D113	قابلیت کشش در دمای °C ۲۵، سانتی‌متر +۱۰۰

\* قیر پایه‌ی مورد استفاده برای امولسیون‌سازی از نوع ۶۰-۷۰ با نقطه نرمی ۵۴ و درجه نفوذ ۶۵ بوده است.

جدول ۵. مشخصات فیزیکی و مکانیکی سیمان نوع ۲ (شرکت تولیدی سیمان فیروزکوه، ۱۳۹۹)

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

### ۳. روش طرح اختلاط و آزمایش‌ها

#### ۳-۱. طرح اختلاط

در این مطالعه، رنگدانه قرمز به صورت مازاد و برحسب درصد خشک وزنی کل سنگدانه به مقدار صفر، ۳، ۶ و ۹ درصد، هر کدام در سه سطح مختلف از قیر امولسیون به‌عنوان فیلر، به مخلوط‌های میکروسرفیسینگ اضافه گردید. درجه‌بندی سنگدانه‌ها برای هر یک از مخلوط‌های آسفالتی در جدول ۶ مشخص شده است. برنامه آزمایشگاهی برای این پژوهش به سه قسمت اصلی تقسیم می‌شود که در شکل ۲ قابل مشاهده است. در طراحی مخلوط‌های میکروسرفیسینگ، پس از

انتخاب مصالح سنگی و قیر امولسیون مناسب، آزمایش‌های لازم مطابق با دستورالعمل ISSA A143 روی مصالح انجام گرفته و بایستی الزامات مربوط به آن را برآورده سازند. سپس، برای دستیابی به طرح اختلاط مناسب و ارزیابی عملکرد مخلوط میکروسرفیسینگ، مطابق با دستورالعمل ISSA A143 آزمایش‌های زمان اختلاط، چسبندگی مربوط، سایش در شرایط مرطوب، تعیین حداکثر قیر به وسیله چرخ بارگذاری شده - چسبندگی ماسه و ارزیابی میزان جابه‌جایی عمودی با چرخ بارگذاری شده انجام می‌شود (ISSA، ۲۰۱۰؛ ASTM، ۲۰۱۸؛ زال نژاد و حسامی، ۲۰۲۰). لازم به ذکر است که مقدار بهینه قیر امولسیون توسط نتایج آزمایش سایش در شرایط مرطوب<sup>۱</sup> و آزمایش تعیین حداکثر قیر با چرخ بارگذاری شده و چسبندگی ماسه<sup>۲</sup> مشخص می‌شود. روش تعیین درصد بهینه قیر امولسیون در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به محدودیت‌های مشخص شده برای حداقل و حداکثر قیر، اگر اختلاف بین حداقل و حداکثر قیر بیشتر از ۳٪ باشد، مقدار بهینه قیر امولسیون در وسط دامنه ۳ درصدی از بیشترین مقدار محدودیت است. همچنین، اگر مقدار حداقل و حداکثر قیر کمتر از ۳٪ باشد، مقدار بهینه قیر امولسیون با توجه به محدودیت حداقل و حداکثر قیر، وسط دامنه مذکور انتخاب می‌گردد (زال نژاد و حسامی، ۲۰۲۰). مقادیر مجاز هر یک از آزمایش‌ها مطابق با جدول ۷ است.

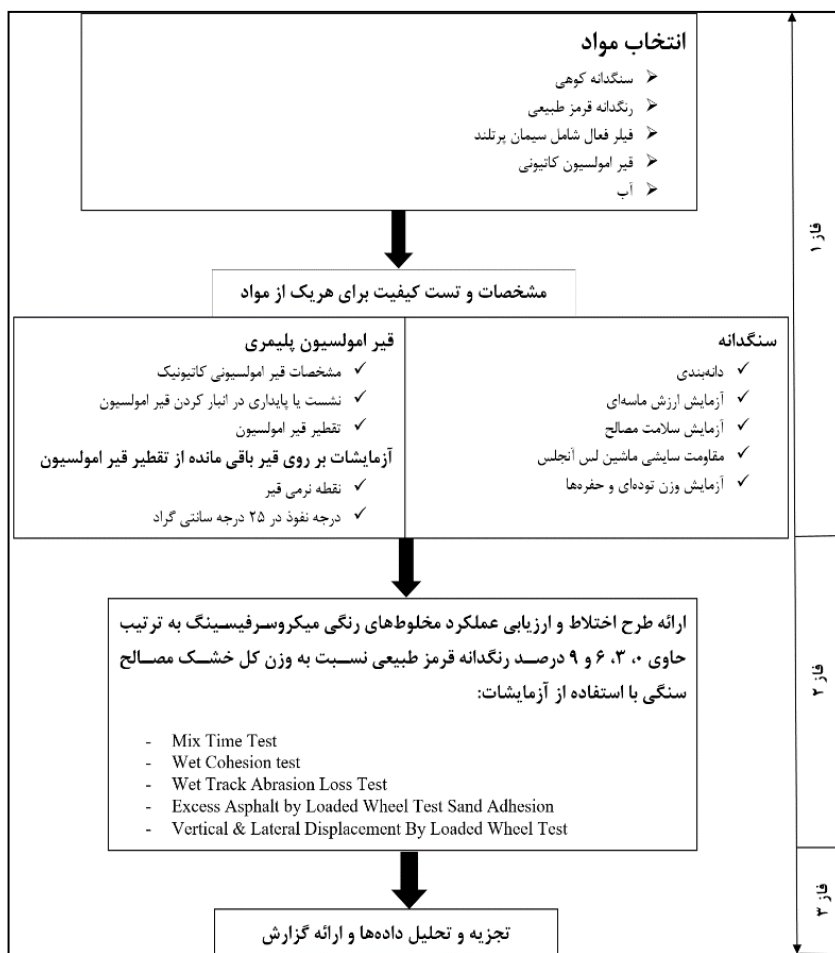
---

1- Wet track abrasion test

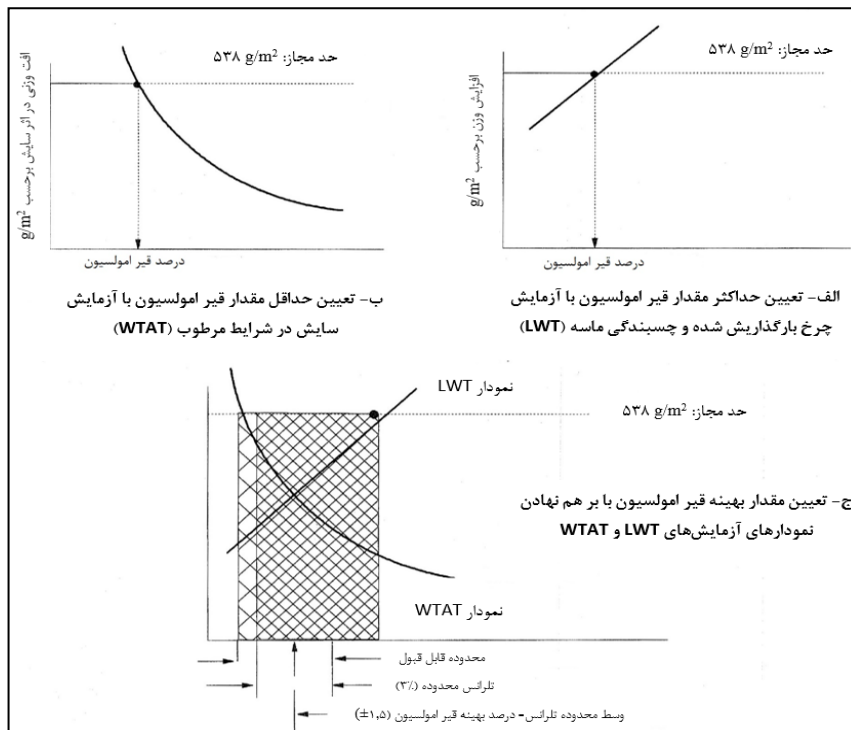
2- Excess asphalt by loaded wheel test sand adhesion

جدول ۶. درجه‌بندی مخلوط‌های میکروسرفیسینگ حاوی درصد‌های مختلف رنگدانه قرمز طبیعی

نوع مخلوط	ترکیب مصالح
A	مخلوط حاوی صفر درصد رنگدانه اکسید آهن نسبت به وزن کل خشک مصالح سنگی
B	مخلوط حاوی ۳ درصد رنگدانه اکسید آهن نسبت به وزن خشک مصالح سنگی
C	مخلوط حاوی ۶ درصد رنگدانه اکسید آهن نسبت به وزن خشک مصالح سنگی
D	مخلوط حاوی ۹ درصد رنگدانه اکسید آهن نسبت به وزن خشک مصالح سنگی



شکل ۲. روند طرح اختلاط و ارزیابی عملکرد مخلوط‌های میکروسرفیسینگ حاوی رنگدانه قرمز



شکل ۳. نمودارهای سه گانه تعیین درصد بهینه قیر امولسیون پلیمری (ISSA TB 111, ۲۰۱۷؛ زال نژاد و حسامی، ۲۰۲۰)

جدول ۷. مقادیر مجاز آزمایش‌های میکروسرفیسینگ (ISSA, ۲۰۱۰)

شماره استاندارد	مقدار	آزمایش
TB 113	حداقل ۱۲۰ ثانیه	زمان اختلاط
TB 139	حداقل ۱۲ کیلوگرم - سانتی متر	چسبندگی مرطوب در ۳۰ دقیقه
	حداقل ۲۰ کیلوگرم - سانتی متر	چسبندگی مرطوب در ۶۰ دقیقه
TB 109	حداکثر ۵۳۸ گرم بر متر مربع	تعیین حداکثر قیر با چرخ بارگذاری شده و چسبندگی ماسه
TB 100	حداکثر ۸۰۷ گرم بر متر مربع	افت سایش در شرایط مرطوب ۶ روز
TB 147	حداکثر ۱۰ درصد	تغییر مکان عمودی (چرخ بارگذاری شده)
	حداکثر ۵ درصد	تغییر مکان افقی (چرخ بارگذاری شده)

### ۳-۲. آزمایش‌ها

#### ۳-۲-۱. آزمایش زمان اختلاط

آزمایش زمان اختلاط مخلوط میکروسرفیسینگ یکی از آزمایش‌های مهم برای طراحی و تعیین نسبت‌های مناسب است. آزمایش زمان اختلاط شامل اختلاط نسبت‌هایی از سنگدانه، فیلر، آب و امولسیون است (ISSA, ۲۰۱۷ e؛ پورصولتی و حسامی، ۲۰۱۸؛ زال نژاد و حسامی، ۲۰۲۰). حدود مواد تشکیل دهنده میکروسرفیسینگ در جدول ۸ نشان داده شده است. در این آزمایش، ۲۰۰ گرم از سنگدانه مورد نظر تا رطوبت کمتر از ۱٪ خشک شده و درصدهای مختلفی از فیلر سیمان به آن اضافه می‌گردد. سپس، آب و قیر امولسیون به سنگدانه‌ها و فیلر معدنی اضافه گردیده و به مدت ۳۰ ثانیه در دمای ۲۵ درجه سلسیوس مخلوط می‌گردد. در پایان ۳۰ ثانیه اختلاط، نیمی از مخلوط برداشته شده و روی تکه کاغذی پخش می‌شود. نصف دیگر تا مدت زمانی که مخلوط آسفالت سفت گردیده و قیر امولسیون بشکند مخلوط می‌گردد. مدت زمان

شکستن مخلوط در اثر اختلاط و هم زدن تحت عنوان زمان اختلاط معرفی می‌شود. همچنین، مخلوط پخش شده روی کاغذ به صورت دوره‌ای با انگشت تحت تماس قرار می‌گیرد تا زمانی که مخلوط میکروسرفیسینگ سفت شده و دیگر تحت اثر انگشت تغییر شکل ندهد. مدت زمانی که طول می‌کشد را زمان گیرش نامند (ISSA, 2017e).

جدول ۸. حدود مواد تشکیل دهنده میکروسرفیسینگ (ISSA, 2010)

مواد تشکیل دهنده	حدود پیشنهادی
قیمر باقی مانده	۵/۵ تا ۱۰/۵ درصد نسبت به وزن خشک مصالح سنگی
فیلر معدنی	صفر تا ۳ درصد نسبت به وزن خشک مصالح سنگی
میزان پلیمر	۳٪ بر اساس وزن قیمر
آب	به میزان لازم برای ایجاد غلظت مناسب در مخلوط

### ۲-۲-۳. آزمایش چسبندگی مرطوب

آزمایش چسبندگی مرطوب جهت تعیین چسبندگی اولیه، مقاومت در برابر ترافیک و زمان عمل‌آوری مخلوط مطابق با دستورالعمل ISSA TB 139 انجام می‌شود (ISSA, 2017d). عمل‌آوری کلی نمونه میکروسرفیسینگ زمانی کامل می‌شود که چسبندگی بین اجزای سنگدانه پدیدار شود. دستگاه آزمایش چسبندگی برای اندازه‌گیری زمان عمل‌آوری به کار می‌رود. به بیان دیگر، یک مخلوط مناسب بر اساس نتایج به دست آمده پس از ۳۰ و ۶۰ دقیقه عمل‌آوری در دمای اتاق (۲۵ درجه سلسیوس) در نظر گرفته می‌شود. حداقل مقادیر برای این آزمایش عبارتند از: ۱۲ کیلوگرم- سانتی‌متر برای ۳۰ دقیقه و ۲۰ کیلوگرم- سانتی‌متر برای ۶۰ دقیقه. مقدار متناظر با ۳۰ دقیقه به منظور ارزیابی خاصیت شکنندگی قیمر امولسیون و ۶۰ دقیقه برای ارزیابی زمان ترافیک جهت بازگشایی آن به کار گرفته می‌شود.

برای انجام این آزمایش، مخلوط‌ها در قالب حلقه‌ای متناسب با دانه‌بندی نوع II به ارتفاع ۱۰ و قطر ۶۰ میلی‌متر ریخته شده و مرکز به مرکز یک پوشش نمدی در دمای اتاق قرار داده می‌شوند. هنگامی که نمونه‌ها به اندازه کافی سفت شدند، قالب دور نمونه‌ها برداشته می‌شود. پس از حاصل شدن گیرش نمونه‌ها، در زمان‌های ذکر شده، در دستگاه چسبندگی قرار گرفته و آزمایش پیچش روی آن‌ها انجام می‌گیرد. لازم به ذکر است که فشاری که از طریق سیلندر دستگاه روی نمونه وارد می‌شود برابر با ۲۰۰ کیلوپاسکال است. نتیجه این آزمایش، رسم نمودار چسبندگی- زمان است که در حقیقت مخلوط‌های سریع‌شکن و کندشکن و نیز مناسب برای سرعت ترافیک زیاد و کم مشخص می‌شود (ISSA, 2017d).

### ۳-۲-۳. آزمایش سایش در شرایط مرطوب

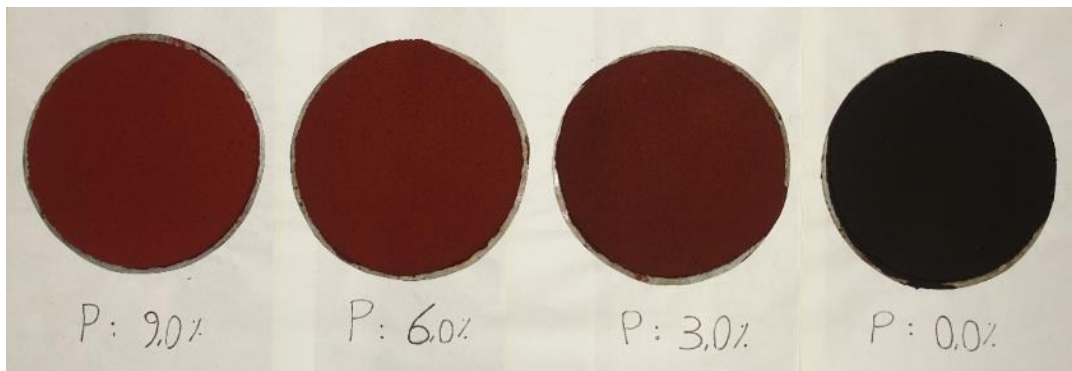
آزمایش سایش در شرایط مرطوب به منظور ارزیابی مقاومت در برابر شن‌زدگی میکروسرفیسینگ، اندازه‌گیری کیفیت پوشش مخلوط میکروسرفیسینگ تحت شرایط سایشی مرطوب و تعیین حداقل مقدار قیمر امولسیون مورد نیاز جهت جلوگیری از بروز خرابی شن‌زدگی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. به صورت کلی‌تر، در این آزمایش، ضمن آن‌که چگونگی سایش، گسیختگی و چرخش ترافیک روی سطح روسازی در حضور آب و پدیده‌های عریان‌شدگی سنگدانه‌ها در شرایط ترمزگیری و انحراف خودرو شبیه‌سازی شده، مقدار از دست رفتن سنگدانه نمونه‌های ساخته شده، بعد از سایش با لوله لاستیکی نیز مشخص می‌شود. در این آزمایش، یک نمونه عمل‌آوری شده از آسفالت حفاظتی ریزدانه با ضخامت ۶ و قطر ۲۸۰ میلی‌متر برای مدت زمان ۶ روز در آب ۲۵ درجه سلسیوس غوطه‌ور می‌گردد. سپس، با یک نوار لاستیکی ۲/۳

ارزیابی آزمایشگاهی عملکرد آسفالت حفاظتی میکروسرفیسینگ رنگی حاوی رنگدانه‌های قرمز اکسید آهن

کیلوگرمی به مدت ۵ دقیقه در شرایط غوطه‌وری در آب به روش چرخشی تحت عمل سایش قرار می‌گیرد. در نهایت، نمونه سایش یافته در دمای ۶۰ خشک و سپس توزین می‌شود (ISSA, 2017 b). دستگاه آزمایش سایش در شرایط مرطوب و نمونه‌های آن، به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. برای مخلوط‌های میکروسرفیسینگ دستورالعمل ISSA A143 حداکثر افت وزنی ناشی از سایش را در ۶ روز به ۸۰۷ گرم بر متر مربع محدود می‌کند.



شکل ۴. نمایی از دستگاه آزمایش WTAT



شکل ۵. نمایی از نمونه‌های ساخته شده آزمایش سایش در شرایط مرطوب

### ۴-۲-۳. آزمایش تعیین حداکثر قیر به وسیله چرخ بارگذاری شده و چسبندگی ماسه

در آزمایش تعیین حداکثر قیر به وسیله چرخ بارگذاری شده و چسبندگی ماسه، مقدار قیر مورد نیاز جهت جلوگیری از خرابی قیرزدگی اندازه‌گیری می‌گردد. به‌طور خلاصه، در این آزمایش، مخلوط با استفاده از ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری چرخ ۵۶۷ کیلوگرمی متراکم می‌گردد. سپس، مخلوط وزن شده و وزن اندازه‌گیری شده ثبت می‌گردد. مقدار ۲۰۰ گرم ماسه اتاوا با دانه‌بندی مشخص و نوار فلزی به میزان ۸۲ درجه سلسیوس در آن قرار گرفته و سپس به‌صورت یکنواخت روی نمونه قرار داده می‌شود. در این حالت، بارگذاری به مدت ۱۰۰ سیکل مشابه حالت قبل جهت تراکم نمونه انجام می‌گردد. در ادامه، نمونه از جای مورد نظر خارج شده و جدا می‌گردد. سپس ماسه‌هایی که به سطح نمونه نچسبیده‌اند با ضرباتی آرام جدا می‌گردند. نمونه دوباره وزن شده و ثبت می‌گردد. اختلاف بین وزن اندازه‌گیری شده و وزن اولیه پس از ۱۰۰۰ سیکل تراکم به‌عنوان مقدار ماسه‌ای که چسبیده است، گزارش می‌گردد. بدین ترتیب، در این روش، به‌صورت غیرمستقیم،

ارزیابی آزمایشگاهی عملکرد آسفالت حفاظتی میکروسرفیسینگ رنگی حاوی رنگدانه‌های قرمز اکسید آهن

مقدار قیر موجود در مخلوط اندازه‌گیری می‌شود (ISSA, 2017 b). نمایی از دستگاه این آزمایش در شکل ۶ نشان داده شده است.

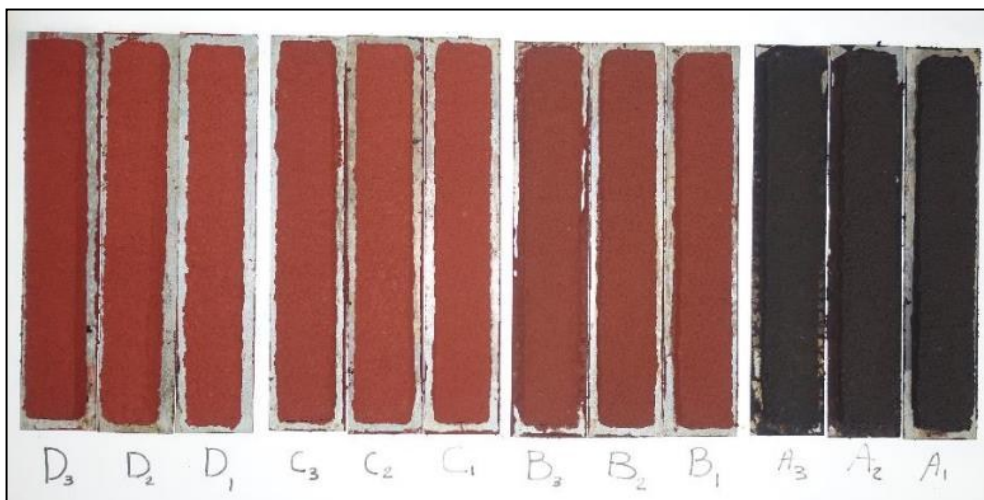


شکل ۶. دستگاه چرخ بارگذاری

### ۳-۲-۵. آزمایش ارزیابی جابه‌جایی با استفاده از چرخ بارگذاری شده

از آنجایی که میکروسرفیسینگ برای پر نمودن محل شیار در روسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد، لذا بایستی مقاومت کافی در مقابل تغییر شکل عمودی و جانبی را دارا باشد. آزمایش ارزیابی میزان جابه‌جایی عمودی با چرخ بارگذاری شده، ویژگی‌های تغییر شکل مخلوط را تحت بار ترافیک غلتشی شبیه‌سازی شده نتیجه می‌دهد. در این پژوهش، مطابق با دانه‌بندی نوع III، قالب ۱۲/۷ میلی‌متری انتخاب شده و مخلوط با استفاده از ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری چرخ ۵۶۷ کیلوگرمی متراکم گردید. عرض نمونه، قبل و بعد از تراکم با ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری، در مسیر چرخ و در وسط طول نمونه اندازه‌گیری می‌گردد. تغییر مکان عمودی و افقی نمونه‌ها بایستی به ترتیب از ۱۰٪ و ۵٪ تجاوز نماید (ISSA, 2017 c).

نمایی از نمونه‌های آزمایش چرخ بارگذاری شده در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷. تصویری از نمونه‌های ساخته شده LWT

## ۴. نتایج و بحث

### ۴-۱. آزمایش زمان اختلاط

در جدول ۹، مقادیر مناسب سیمان و آب و مقادیر اولیه قیر امولسیون در سه سطح مطابق با دستورالعمل ISSA A143 مشخص گردیده است. در این آزمایش، برای هر یک از مخلوط‌های حاوی درصد‌های مختلف از قیر امولسیون، حداقل زمان اختلاط ۱۲۰ ثانیه مورد بررسی واقع شده است. نتایج حاصل از آزمایش در جدول ۹ ارائه شده است. همان‌طور که در جدول مشخص شده است، با افزایش درصد فیلر رنگی اکسید آهن برای رعایت شدن محدودیت آیین‌نامه‌ای و افزایش زمان اختلاط، درصد آب افزایش یافت. لازم به ذکر است که مطابق با مراجع دیگر، رنگدانه‌ها وقتی بدون جایگزین به مخلوط مانند بتن اضافه می‌شوند سبب کاهش کارایی آن مخلوط می‌شوند. بنابراین، افزایش درصد آب برای افزایش زمان اختلاط برای مخلوط‌های میکروسرفیسینگ منطقی به نظر می‌رسد (بروس و لائو، ۱۹۹۲؛ لی و همکاران، ۲۰۰۵؛ کوتاتکوا و ریترومن، ۲۰۱۴).

جدول ۹. آزمایش زمان اختلاط برای مخلوط‌های میکروسرفیسینگ

نوع مخلوط	درصد فیلر رنگی	درصد قیر باقی‌مانده	درصد آب	حداقل زمان اختلاط بر حسب ثانیه طبق ISSA A143	زمان اختلاط به دست آمده
A	صفر	۸	۷/۵	۱۲۰	۱۲۹
			۶/۵	۱۲۰	۱۳۰
			۸/۵	۱۲۰	۱۲۸
B	۳	۸	۷/۵	۱۲۰	۱۲۶
			۷/۵	۱۲۰	۱۲۷
			۸/۵	۱۲۰	۱۲۸
C	۶	۸	۷/۵	۱۲۰	۱۲۹
			۸/۵	۱۲۰	۱۲۶
			۸/۵	۱۲۰	۱۲۸
D	۹	۸	۷/۵	۱۲۰	۱۲۵
			۹	۱۲۰	۱۲۷
			۸/۵	۱۲۰	۱۲۸

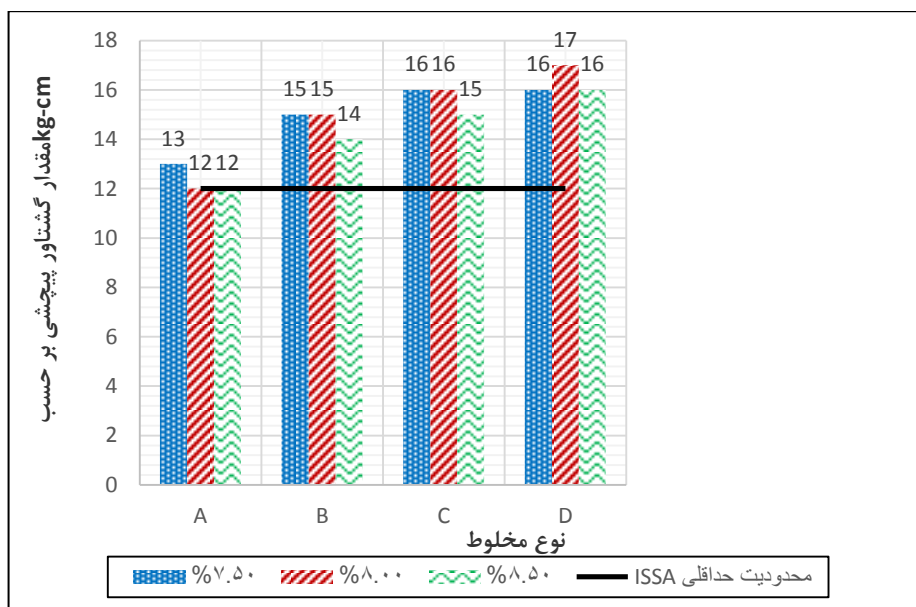
### ۴-۲. آزمایش چسبندگی مرطوب

نتایج آزمایش چسبندگی مرطوب در زمان‌های ۳۰ و ۶۰ دقیقه برای مخلوط‌های آسفالتی در سه سطح از قیر باقی‌مانده، در ادامه در شکل‌های ۸ و ۹ ارائه شده است. با توجه به نمودارها و نتایج حاصله، تمامی مخلوط‌ها با توجه به دستورالعمل ISSA A143 گیرش و مقاومت لازم برای بازگشایی ترافیک به ترتیب در مدت زمان ۳۰ دقیقه و یک ساعت را کسب کرده و نمونه D دارای بیشترین مقدار چسبندگی نسبت به سایر مخلوط‌ها است. به عنوان نمونه، در قیر باقی‌مانده ۸/، مخلوط‌های B، C و D نسبت به نمونه شاهد A به ترتیب موجب افزایش چسبندگی به قیر در مدت زمان ۳۰ دقیقه به میزان ۲۵، ۳۳/۳ و ۴۱/۶ درصد و در مدت زمان یک ساعت به میزان ۱۳/۰۴، ۱۷/۳۹، ۲۱/۷ درصد شده‌اند. در مدت زمان یک ساعت، در مخلوط‌های C و D (به ترتیب مخلوط با رنگدانه‌های ۶٪ و ۹٪) با افزایش قیر از ۷/۵ به ۸ درصد،

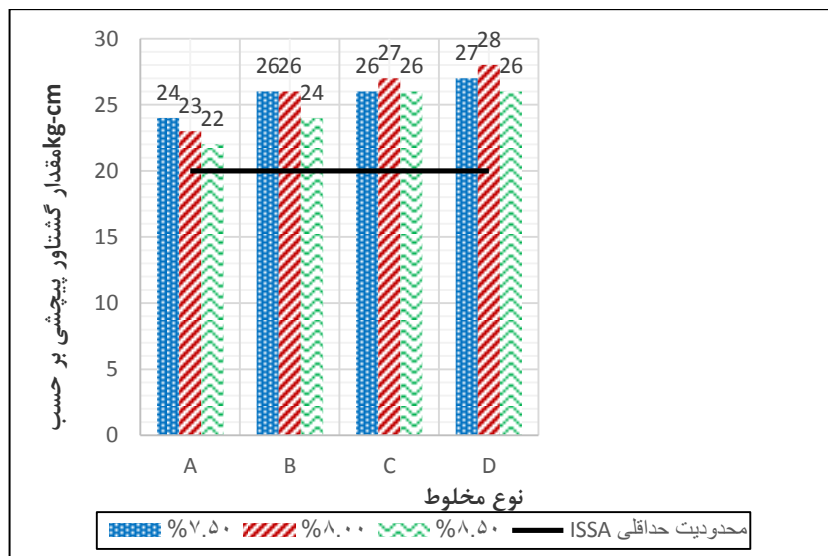


چسبندگی به بیشترین مقدار در مقایسه با دیگر مخلوط‌ها رسیده و سپس با افزایش قیر به ۸/۵ درصد، مقدار چسبندگی کاهش می‌یابد.

بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش درصد قیر تا مقدار معینی، چسبندگی در این نمونه‌ها افزایش یافته و سپس با افزایش بیشتر مقدار قیر امولسیون و به تبع آن افزایش زمان عمل‌آوری، مقدار چسبندگی کاهش خواهد یافت. نمونه‌های A و B، بیشترین مقدار چسبندگی را قیر ۷/۵ درصد به دست آورده‌اند. از آنجا که کاهش مقدار رنگدانه به صفر و ۳ درصد، مقدار مصالح کل مخلوط و به تبع آن مقدار قیر امولسیون درصد قیر باقی‌مانده ۷/۵، ۸ و ۸/۵ درصد کاهش یافته است، بنابراین، این می‌تواند عاملی باشد که درصد قیر متناسب با بیشترین چسبندگی، کاهش پیدا کند. این نتیجه با پژوهش‌های دیگر مراجع که اثر پیگمان سبب افزایش چسبندگی در ملات و بتن خودتراکم می‌شود، متناسب است (لوپز و همکاران، ۲۰۰۹؛ کورینالدسی و همکاران، ۲۰۱۲).



شکل ۸. نتایج آزمایش چسبندگی در ۳۰ دقیقه برای یک از مخلوط‌های میکروسرفیسینگ

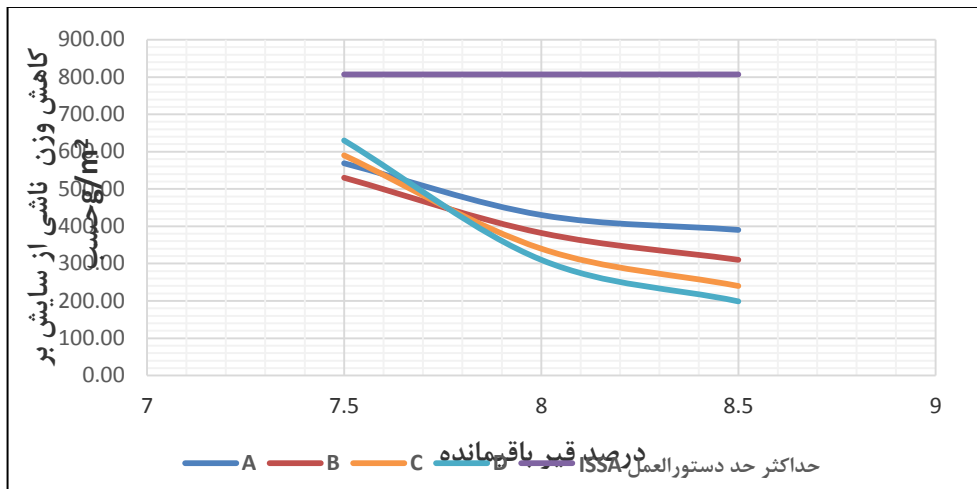


شکل ۹. نتایج آزمایش چسبندگی در ۶۰ دقیقه برای یک از مخلوط‌های میکروسرفیسینگ

#### ۳-۴. آزمایش سایش در شرایط مرطوب

نتایج آزمایش سایش در شرایط مرطوب در زمان شش روز برای مخلوط‌های آسفالتی در شکل ۱۰ ارائه شده است. با توجه به نتایج حاصله، در قیر باقی‌مانده ۸ و ۸/۵ درصد، مخلوط‌های حاوی رنگدانه دارای افت وزنی به مراتب کمتری نسبت به مخلوط شاهد بوده‌اند. به طوری که اختلاف مقدار هدرروی سنگدانه‌ها در آزمایش سایش برای مخلوط‌های B، C و D در مقدار قیر باقی‌مانده ۸/۵٪ نسبت به مخلوط A (مخلوط شاهد) به ترتیب ۴۸/۱، ۹۰/۲ و ۱۲۰/۱ گرم بر متر مربع بوده است که با افزایش مقدار قیر باقی‌مانده به ۸/۵ درصد، این اختلاف‌ها به ترتیب به ۸۰/۱، ۱۵۰/۲ و ۱۹۱/۵ گرم بر متر مربع افزایش یافت. بنابراین، با توجه به روند کاهش اختلاف هدرروی سنگدانه‌ها، افزایش قیر برای مخلوط‌های حاوی رنگدانه مطلوب است که این روند کاهش قیر ۸/۵ درصد نسبت به قیر ۷/۵ درصد نیز قابل مشاهده است. نکته‌ی دیگری که در این نمودار حائز اهمیت است، در قیر ۷/۵ درصد مخلوط‌های دارای مقدار رنگدانه ۶ و ۹ درصد سایش بیشتری نسبت به نمونه شاهد داشته‌اند. این نشان‌دهنده آن است که تأمین قیر باید متناسب با نوع مخلوط و فیلر لحاظ شده و درصد مناسب برایشان انتخاب گردد. بدین معنا که در مخلوط‌هایی که مستعد شن‌زدگی هستند، می‌توان پس از تأمین قیر کافی، احتمال وقوع خرابی شن‌زدگی را کاهش داد. به‌عنوان نمونه، در قیر باقی‌مانده ۸/۵٪، مخلوط‌های B، C و D نسبت به نمونه شاهد A به ترتیب موجب افزایش مقاومت در برابر سایش به میزان ۱۱/۱۹، ۲۰/۹۷ و ۲۷/۹۲ درصد شده است.

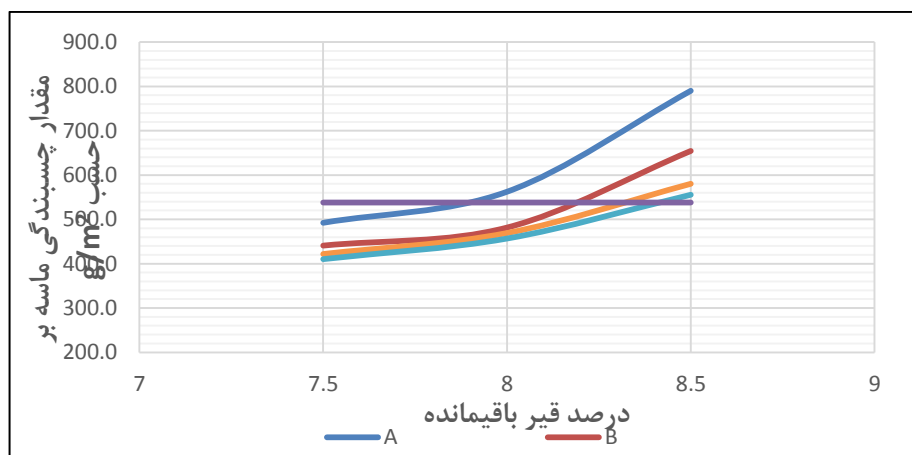
از سوی دیگر، از آنجایی که کاهش افت وزنی نشان‌دهنده عملکرد بهتر است، در مقایسه مخلوط‌های حاوی رنگدانه در قیر ۷/۵ درصد، به ترتیب مخلوط‌های B، C و D دارای بهترین عملکرد بوده‌اند. ولی با افزایش قیر به ۸ و ۸/۵ درصد به ترتیب مخلوط‌های D، C و B دارای بهترین عملکرد بوده‌اند. بنابراین، با افزایش مقدار رنگدانه به ۶ و ۹ درصد بایستی مقدار قیر نیز متناسباً افزایش یابد. همچنین، نرخ کاهش وزن ناشی از سایش با افزایش درصد قیر باقی‌مانده همراه با افزایش درصد فیلر، روندی افزایشی داشته است. به طوری که نرخ کاهش وزن در قیر باقی‌مانده ۸/۵ درصد نسبت به ۸/۸٪ برای مخلوط‌های A، B، C و D نسبت به مقدار اولیشان به ترتیب ۹/۳، ۱۸/۸، ۲۹/۴ و ۳۵/۹ درصد بوده است. بنابراین، افزایش فیلر نرخ کاهش وزن ناشی از سایش را بهبود می‌دهد. این موضوع به این دلیل است که به علت خاصیت جذب آب پیگمان (رنگدانه)، درصد قیر امولسیون بیشتر موجب پیوستگی بهتر و بیشتر مصالح نسبت به هم خواهد شد. یا به عبارت دیگر، درصد‌های کم قیر امولسیون، مخلوط خشک خواهد بود. همچنین، این نتایج با نتایج دیگر تحقیقات که بعضی از رنگدانه‌ها سبب مقاومت سایش بهتری در بتن می‌شود شباهت دارد (کوتاتکوا و ریترومن، ۲۰۱۴). همچنین، از آنجایی که پیگمان سبب بهبود دوام از قبیل کاهش خزش، تخلخل و انقباض در بتن می‌شود، بنابراین می‌توان در تحقیقات آینده، اثر پیگمان در دوام آسفالت را مورد بررسی قرار داد (کمالی برنارد، ۲۰۱۱؛ ژانگ و لی، ۲۰۱۱؛ آرس و همکاران، ۲۰۱۴)..



شکل ۱۰. نتایج آزمایش سایش در شرایط مرطوب در شش روز برای هر یک از مخلوط‌های میکروسرفیسینگ

#### ۴-۴. آزمایش تعیین حداکثر قیر به وسیله چرخ بارگذاری شده و چسبندگی ماسه

نتایج این آزمایش برای مخلوط‌های آسفالتی به شرح شکل ۱۱ است. با افزایش فیلر رنگی به ۳٪، مقدار حداکثر قیر ۰/۴ درصد افزایش یافت. ولی زمانی که مقدار فیلر رنگی به ترتیب به ۶ و ۹ درصد رسید، در حداکثر مقدار قیر اختلاف چندانی میان مخلوط‌های حاوی رنگدانه حاصل نشد. این نشان‌دهنده آن است که افزایش مقدار رنگدانه تا ۳٪ سبب افزایش زیاد مقدار قیر شده و نیازی به افزایش قیر برای رنگدانه‌های با مقدار بیشتر نخواهد بود. نتایج دیگری که از این شکل استنتاج می‌شود این است که با افزایش قیر و کاهش فیلر، قیرزدگی مخلوط‌ها افزایش پیدا می‌کند. به طوری که در قیر باقی‌مانده ۸٪، مخلوط بدون فیلر از حدود آیین‌نامه عدول کرده و برای قیر ۸/۵ درصد علی‌رغم اینکه همه مخلوط‌ها از حدود مجاز دستورالعمل خارج شده‌اند، ولی مخلوط با مقدار رنگدانه بیشتر، کمتر مستعد قیرزدگی شده است. به عنوان مثال، برای قیر ۸/۵ درصد، مقدار چسبندگی ماسه با افزایش مقدار رنگدانه از ۳ به ۹ درصد، به ترتیب به ۶۵۴/۳، ۵۸۰/۲ و ۵۵۵/۶ کاهش یافته است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که قیرزدگی را می‌توان با افزایش فیلر کاهش داد. مضاف بر اینکه آستانه حداکثر قیر نیز در مخلوط‌ها افزایش می‌یابد.



شکل ۱۱. حداکثر قیر در مخلوط‌های میکروسرفیسینگ به وسیله آزمایش چرخ بارگذاری و چسبندگی ماسه

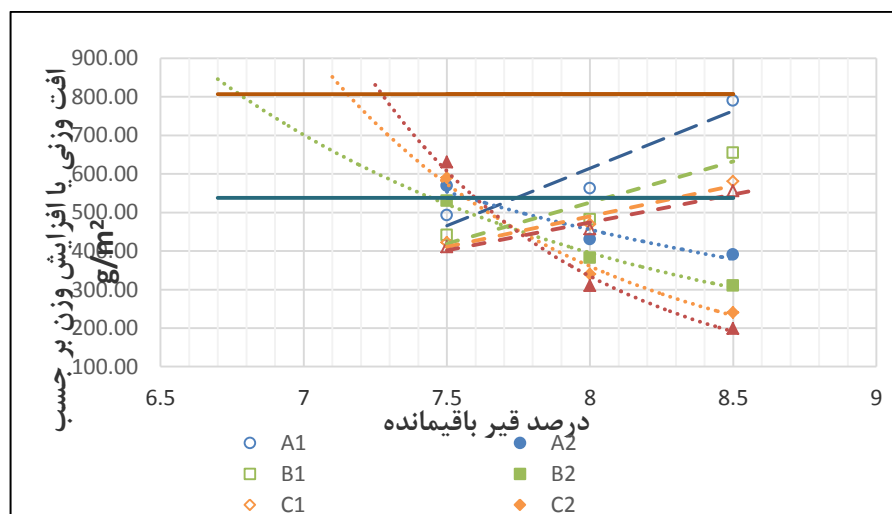
## ۴-۵. تعیین مقدار بهینه قیر امولسیون مخلوط‌های میکروسرفیسینگ

با توجه به آنچه در بخش‌های قبل بیان شد، مقدار بهینه‌ی قیر امولسیون از طریق رسم نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های سایش مرطوب و مقدار حداکثر قیر به‌وسیله چرخ بارگذاری شده و چسبندگی ماسه و تلفیق نمودار این دو آزمایش به‌دست می‌آید. در تلفیق دو نمودار، نتایج آزمایش ماسه چسبیده به‌صورت یک نمودار خطی و نتایج آزمایش سایش مرطوب به‌صورت نمودارهای توابع توانی نشان داده می‌شوند (براونتون و لی، ۲۰۱۲؛ زال نژاد و حسامی، ۲۰۲۰). درصد بهینه قیر امولسیون اصلاح شده با پلیمر برای تمامی مخلوط‌ها در جدول ۱۰ و شکل ۱۲ ارائه شده است. در شکل ۱۲، برای هر یک از مخلوط‌های A، B، C و D اندیس‌های ۱ و ۲ به ترتیب نشان‌دهنده نتایج و نمودار آزمایش چرخ بارگذاری- چسبندگی ماسه و آزمایش سایش در شرایط مرطوب است.

با توجه نتایج به‌دست آمده، با افزایش فیلر، مقدار حداقل و حداکثر قیر باقی مانده افزایش می‌یابد. در این راستا، حداقل مقدار قیر بهینه ناشی از آزمایش سایش با شیب بیشتری افزایش می‌یابد، زیرا همان‌طور که قبلاً گفته شد، نرخ کاهش وزن ناشی از سایش با افزایش درصد قیر باقی مانده همراه با افزایش درصد فیلر روندی افزایشی داشته است. در مقابل نیز حداکثر قیر باقی مانده ناشی از آزمایش چرخ بارگذاری شده و چسبندگی ماسه با شیب کمتر افزایش می‌یابد. همان‌طور که از نتایج مشخص است، درصد بهینه قیر امولسیون مخلوط‌های آسفالتی حاوی رنگدانه قرمز اکسید آهن نسبت به مخلوط شاهد افزایش داشته است. به‌طوری که مقدار بهینه قیر امولسیون مخلوط‌های B، C و D به ترتیب به مقدار ۰/۴۴، ۰/۹۱ و ۱/۱ درصد نسبت به مخلوط A (مخلوط شاهد) بیشتر بوده است.

جدول ۱۰. محدوده مجاز قیر باقی مانده و درصد بهینه آن برای مخلوط‌هایی با قیر امولسیونی CSS

نوع مخلوط	حداقل مقدار قیر امولسیون به‌دست آمده از آزمایش سایش (%)	حداکثر مقدار قیر امولسیون به‌دست آمده از چسبندگی ماسه (%)	دامنه قابل قبول قیر امولسیون (%)	مقدار بهینه قیر امولسیون (%)
A	۱۰/۶۹	۱۲/۴۲	۱۰/۶۹ - ۱۲/۴۲	۱۱/۵۶
B	۱۰/۹۴	۱۳/۰۷	۱۰/۹۴ - ۱۳/۰۷	۱۲/۰۰
C	۱۱/۵۵	۱۳/۴۰	۱۲/۵۵ - ۱۳/۴۰	۱۲/۴۷
D	۱۱/۷۶	۱۳/۵۵	۱۱/۷۶ - ۱۳/۵۵	۱۲/۶۶



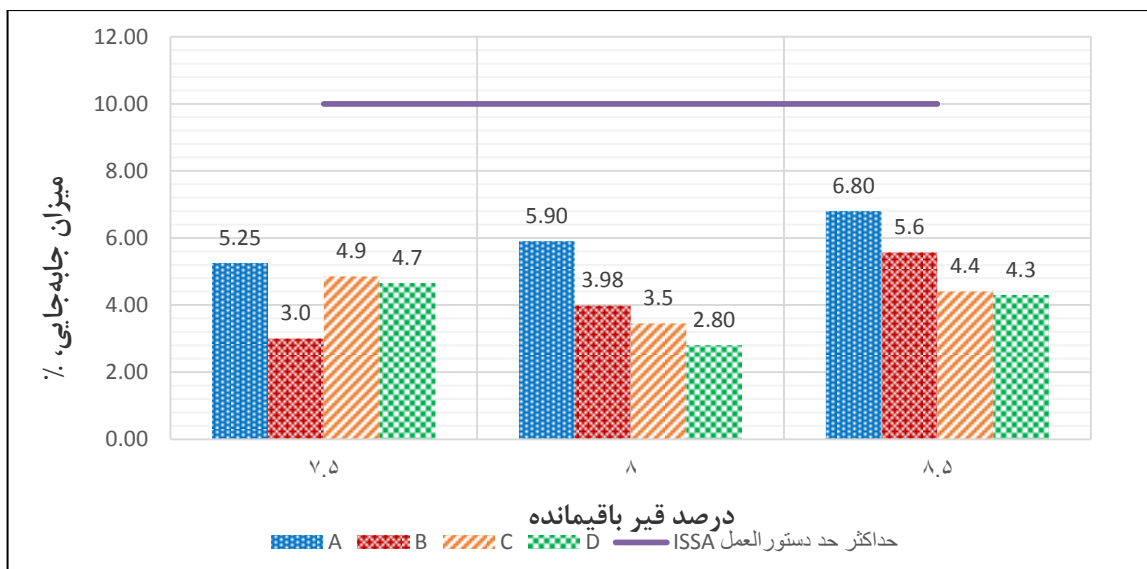
شکل ۱۲. ترکیب نتایج آزمایش سایش در شرایط مرطوب در مدت شش روز و آزمایش چرخ بارگذاری شده-چسبندگی ماسه

#### ۴-۶. آزمایش تعیین میزان جابه‌جایی با چرخ بارگذاری شده

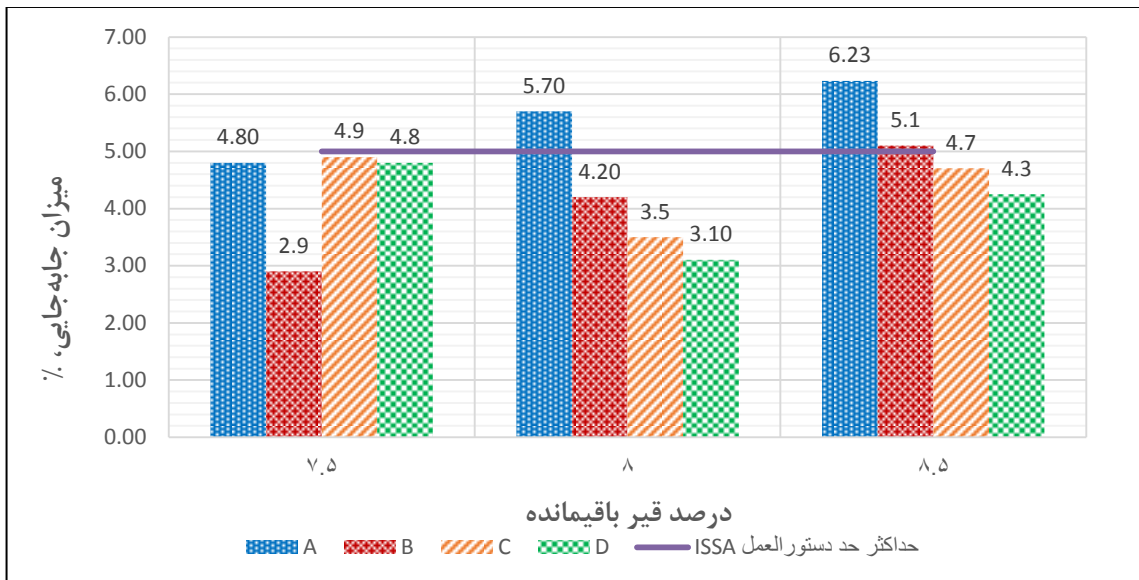
نتایج حاصل از این آزمایش برای مخلوط‌های میکروسرفیسینگ در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب برای ارزیابی تغییر شکل‌های عمودی و جانبی نشان داده شده است. نتایج این آزمایش از دو منظر مقدار قیر امولسیون و فیلر در مخلوط‌ها قابل بررسی است:

از منظر قیر امولسیون در مخلوط A و B، با افزایش قیر باقی‌مانده، مقدار جابه‌جایی‌ها بیشتر شده ولی در مخلوط B و C، همان‌طور که مشاهده می‌شود ابتدا میزان جابه‌جایی در قیر باقی‌مانده ۷/۵ به ۸ درصد کاهش و سپس از قیر باقی‌مانده ۸ به ۸/۵ درصد افزایش یافته و روندی مشابه با نمونه‌های A و B دارد. این بدان معنا است که در مخلوط‌های B و C افزایش قیر تا حد معینی در ابتدا باعث چسبندگی مناسب و حفظ سنگدانه‌ها در مخلوط شده و سپس با افزایش مقدار قیر مورد نیاز و افزایش سطح پوشش بیشتر سنگدانه، باعث بالا رفتن میزان تغییر شکل در برابر بارگذاری ترافیک شده است. بنابراین، تعیین میزان قیر مناسب برای کاهش میزان جابه‌جایی‌ها امری لازم و ضروری است.

از منظر میزان فیلر، با توجه به نتایج حاصله در تمامی مخلوط‌های درصد قیر باقی‌مانده ۸ و ۸/۵ درصد، با افزایش میزان فیلر از جابه‌جایی عمودی و جانبی کاسته شده است. ولی در قیر باقی‌مانده ۷/۵ درصد به علت ناکافی بودن مقدار قیر برای مخلوط‌های با فیلر ۶ و ۹ درصد (C و D) نتیجه عکس حاصل شد. با این وجود، تمامی جابه‌جایی‌ها از مخلوط شاهد در این درصد قیر کمتر بوده است. بدین معنا که در مخلوط‌هایی که مستعد شیارشدگی هستند، می‌توان پس از تأمین قیر کافی، احتمال وقوع خرابی شیارشدگی را با افزایش فیلر کاهش داد. به‌عنوان نمونه، برای قیر باقی‌مانده ۸/۵٪، مخلوط‌های B، C و D نسبت به نمونه شاهد به ترتیب موجب کاهش جابه‌جایی عمودی به میزان ۳۲/۵، ۴۰/۷ و ۵۲/۵ درصد شده است. بنابراین، با توجه به نتایج حاصله، رنگدانه‌ها در سختی آسفالت مؤثر هستند. این نتیجه متناسب با نتایج تحقیقات سایر پژوهشگران است (پیرارد و همکاران، ۲۰۱۶ b).



شکل ۱۳. میزان جابه‌جایی عمودی مخلوط‌ها در درصدهای مختلف از قیر باقی‌مانده



شکل ۱۴. میزان جابه‌جایی جانبی مخلوط‌ها در درصدهای مختلف از قیر باقی مانده

## ۵. نتیجه‌گیری

با بررسی و تحلیل نتایج آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه، به‌طور خلاصه می‌توان نتایج را به‌صورت زیر جمع‌بندی نمود:

- در آزمایش زمان اختلاط، مشخص شد که افزایش درصد فیلر رنگی نیازمند آب بیشتری برای رسیدن به کارایی مد نظر بوده، و لذا درصد آب بیشتری برای برآورده ساختن الزامات احتیاج است.
- در آزمایش چسبندگی مرطوب در زمان‌های ۳۰ و ۶۰ دقیقه، مشخص شد که تمامی مخلوط‌ها گیرش و مقاومت لازم برای بازگشایی ترافیک به ترتیب در مدت زمان ۳۰ دقیقه و یک ساعت را کسب کرده‌اند. مخلوط‌های حاوی فیلر معدنی رنگی دارای گشتاور پیچشی و چسبندگی بیشتری نسبت به نمونه شاهد بوده و در تمامی نمونه‌ها با افزایش درصد قیر تا مقدار معینی، چسبندگی در آن‌ها افزایش یافته و سپس با افزایش بیشتر مقدار قیر امولسیون و به‌تبع آن افزایش زمان عمل‌آوری، مقدار چسبندگی کاهش خواهد یافت.
- در آزمایش سایش در شرایط مرطوب، مشخص گردید که با افزایش درصد قیر امولسیون میزان افت وزنی کمتری را در نمونه‌ها مشاهده کرده و مخلوط‌های حاوی رنگدانه قرمز در درصدهای زیاد قیر امولسیون دارای افت وزنی به مراتب کمتری نسبت به مخلوط شاهد بودند. به عبارتی، با افزایش فیلر معدنی رنگی و به همراه آن افزایش قیر امولسیون، مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر پدیده‌های عریان‌شدگی افزایش خواهد یافت. به‌صورت خلاصه، رنگدانه‌ها سبب مقاومت سایش بهتری در آسفالت می‌شوند. ولی با افزایش مقدار رنگدانه بیش از حد معین، باید مقدار قیر نیز متناسباً افزایش یابد.
- با توجه نتایج آزمایش تعیین حداکثر قیر به‌وسیله چرخ بارگذاری و چسبندگی ماسه، معلوم گردید که با افزایش درصد قیر امولسیون در مخلوط‌های آسفالتی، میزان چسبندگی ماسه و به‌تبع آن پتانسیل قیرزدگی مخلوط‌ها افزایش پیدا می‌کند. همچنین، با افزایش میزان رنگدانه از صفر به ۹٪، پتانسیل قیرزدگی مخلوط‌ها کاهش یافت.
- با توجه به آزمایش تعیین میزان تغییر شکل مخلوط‌ها به‌وسیله دستگاه بارگذاری چرخ، مشخص گردید که مخلوط شاهد دارای عملکرد ضعیف‌تری نسبت به مخلوط‌های حاوی رنگدانه بوده و در بعضی موارد از محدودیت‌های

آیین‌نامه‌ای تجاوز کرده است. همچنین، مشاهده شد که در مخلوط‌های حاوی ۶ و ۹ درصد رنگدانه، افزایش قیر تا حد معینی، در ابتدا باعث چسبندگی مناسب و حفظ سنگدانه‌ها در مخلوط شده و سپس با افزایش مقدار قیر مورد نیاز و افزایش سطح پوشش بیشتر سنگدانه، باعث بالا رفتن میزان تغییرشکل در برابر بارگذاری ترافیک خواهد شد. بنابراین، در مخلوط‌های حاوی فیلر رنگی، تعیین میزان قیر مناسب برای کاهش میزان تغییرشکل در برابر بارگذاری ترافیک امری لازم و ضروری است. به‌صورت کلی‌تر، در مخلوط‌هایی که مستعد شیارشدگی هستند، می‌توان احتمال وقوع خرابی شیارشدگی را با افزایش فیلر و تعیین مقدار قیر امولسیون مناسب کاهش داد.

- در تعیین درصد بهینه قیر امولسیون، مخلوط‌های آسفالتی حاوی فیلر رنگی نسبت به نمونه شاهد دارای افزایش درصد بهینه قیر امولسیون بودند. همچنین، مشخص شد که بیشترین درصد قیر امولسیون مربوط به مخلوط حاوی ۹٪ رنگدانه است.

## ۶. تشکر و قدردانی

بدین وسیله مراتب سپاس خود را از تلاش و زحمات ارزشمند شرکت عمارت گستر پیشگامان نوین در زمینه انجام آزمایش‌های مخلوط‌های میکروسرفیسینگ و پیشبرد اهداف این پژوهش تقدیم می‌داریم. از درگاه ایزد منان دوام، عزت، سلامت و موفقیت روزافزون را برای تمامی افراد آن مسئلت داریم.

## ۷. مراجع

- زال نژاد، م. و حسامی، ا. ۱۳۹۸. "ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر استفاده از سرباره فولاد بر مشخصات آسفالت حفاظتی میکروسرفیسینگ". مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۱۶(۱): ۳۵-۳۰.
- شرکت تولیدی سیمان فیروزکوه. ۱۳۹۹. "سیمان پرتلند تپ ۲". برگرفته از لینک [www.fikcc.com](http://www.fikcc.com)
- Ali, H. and Mohammadafzali, M. 2014. "Asphalt surface treatment practice in southeastern United States". Technical Report, Louisiana Transportation Research Center.
- Annerel, E. and Taerwe, L. 2011. "Methods to quantify the colour development of concrete exposed to fire". Constr. Build. Mater., 25(10): 3989-3997. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.033.
- Ares, M. Z., González, E. V., Gómez, A. T. and Fernández, J. 2014. "An easy method to estimate the concentration of mineral pigments in colored mortars". Dyes Pigm., 101: 329-337.
- ASTM D6372. 2018. "Standard practice for design, testing, and construction of microsurfacing". West Conshohocken, PA.
- Autelitano, F. and Giuliani, F. 2019. "Daytime and nighttime color appearance of pigmented asphalt surface treatments". Constr. Build. Mater., 207: 98-107. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.02.100.
- Broughton, B. and Lee, S. J. 2012. "Microsurfacing in Texas". Report No. FHWA/TX-12/0-6668-1, Texas A & M University System.
- Broughton, B., Lee, S. J. and Kim, Y. J. 2012. "30 years of microsurfacing: A review". ISRN Civ. Eng., 2012: 279643. doi:10.5402/2012/279643.
- Bruce, S. and Rowe, G. 1992. "The influence of pigments on mix designs for block paving units". Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Concrete Block Paving.
- Corinaldesi, V., Monosi, S. and Ruello, M. L. 2012. "Influence of inorganic pigments' addition on the performance of coloured SCC". Constr. Build. Mater., 30: 289-293.
- Destrée, A., Piérard, N. and Vanelstraete, A. 2015. "Development of a test method to determine the colour durability of coloured bituminous mixtures". Road Mater. Pavement Design, 16: 170-186. doi:10.1080/14680629.2015.1029670.
- ISSA. 2010. A143-"Recommended performance guideline for micro surfacing".
- ISSA. 2017a. "Outline guide design procedure for slurry seal". Technical Bulletin 111, International Slurry Surfacing Association.
- ISSA. 2017b. Test method for measurement of excess asphalt in bituminous mixtures by use of a loaded wheel tester and sand adhesion". Technical Bulletin 109, International Slurry Surfacing Association.

- ISSA. 2017c. "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. 2017d. "Test method to classify emulsified asphalt/aggregate mixture systems by modified cohesion tester measurement of set and cure characteristics". Technical Bulletin 139, International Slurry Surfacing Association.
- ISSA. 2017e. "Trial mix procedure for slurry seal design". Technical Bulletin 113, International Slurry Surfacing Association.
- Jiang, Y., Deng, C., Chen, Z. and Tian, Y. 2018. "Evaluation of the cooling effect and anti-rutting performance of thermally resistant and heat-reflective pavement". *Int. J. Pavement Eng.*, 1-10. doi:10.1080/10298436.2018.1483506.
- Johannes, P. T. 2014. "Development of an improved mixture design framework for slurry seals and micro-surfacing treatments. The University of Wisconsin, Madison, WI.
- Kamali-Bernard, S. 2011. "Permeability and mechanical properties of Portland cement mortars made by colored mineral oxides". Proceedings INVACO2, 23-25 Nov., Rabat, Maroc.
- Kawther, K. 2018. "Colored asphalt and street print are decorating paving in public spaces". The MATEC Web of Conferences. doi: 10.1051/mateconf/20120201003.
- Kořátková, J. and Reiterman, P. 2014. "Coloured concrete with focus on the properties of pigments". *Adv. Mater. Res.*, 1054: 248-253.
- Lee, H. S., Lee, J. Y. and Yu, M. Y. 2003. "Influence of iron oxide pigments on the properties of concrete interlocking blocks". *Cement Concrete Res.*, 33(11): 1889-1896. doi:10.1016/S0008-8846(03)00209-6.
- Lee, H. S., Lee, J. Y. and Yu, M. Y. 2005. "Influence of inorganic pigments on the fluidity of cement mortars". *Cement Concrete Res.*, 35(4): 703-710.
- Levinson, R., Akbari, H. and Reilly, J. C. 2007. "Cooler tile-roofed buildings with near-infrared-reflective non-white coatings". *Build. Environ.*, 42(7): 2591-2605. doi: 10.1016/j.buildenv.2006.06.005.
- Lin, D. F. and Luo, H. L. 2004. "Fading and color changes in colored asphalt quantified by the image analysis method". *Constr. Build. Mater.*, 18(4): 255-261. doi:10.1016/j.conbuildmat.2004.01.004.
- López, A., Tobes, J., Giaccio, G. and Zerbino, R. 2009. "Advantages of mortar-based design for coloured self-compacting concrete". *Cement Concrete Compos.*, 31(10): 754-761.
- Luo, R., Zhang, K., Xu, W. and Feng, G. 2017. "Quantification of the tyre-track resistance of coloured asphalt mixtures". *Road Mater. Pavement Design*, 18(4): 817-832. doi:10.1080/14680629.2016.1194881
- Naus, R. and Voskuilen, J. 2016. "Light coloured asphalt". 6<sup>th</sup> Eurasphalt and Eurobitume Congress, Prague, Czech Republic.
- Ning, S. and Huan, S. 2017. "Experimental study on color durability of color asphalt pavement. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. doi:10.1088/1757-899x/207/1/012104.
- Otadi, A. and Tanzadeh, J. 2018. "Testing and evaluating the effect of adding fibers and nanomaterials on improving the performance properties of thin surface asphalt". *J. Test. Eval.*, 47(1). doi:10.1520/JTE 20170409.
- Piérard, N., De Visscher, J., Vansteenkiste, S. and Vanelstraete, A. 2016a. "Coloured asphalt pavements: Mix design and laboratory performance testing". Dordrecht.
- Piérard, N., De Visscher, J., Vansteenkiste, S. and Vanelstraete, A. 2016b. "Coloured asphalt pavements: Mix design and laboratory performance testing. 8<sup>th</sup> RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials.
- Poursoltani, M. and Hesami, S. 2018. "Performance evaluation of microsurfacing mixture containing reclaimed asphalt pavement". *Int. J. Pavement Eng.*, <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1551544>.
- Roess, R. P., Prassas, E. S. and McShane, W. R. 2004. "Traffic engineering". 3<sup>rd</sup> Ed., Pearson/Prentice Hall, New Jersey.
- Standard, G. N. 2011. "Colouring materials- Classification according to coloristic and chemical aspects (DIN 55944)". German Institute for Standardisation.
- Synnefa, A., Santamouris, M. and Apostolakis, K. 2007. "On the development, optical properties and thermal performance of cool colored coatings for the urban environment". *Solar Energy*, 81(4): 488-497. doi:10.1016/j.solener.2006.08.005.
- Tang, X., Tan, X., Hu, X., Hu, Y. and Liu, C. 2016. "Preparation and performance of warm mix colored asphalt modified by oxidized polyethylene wax". *International Forum on Energy, Environment and Sustainable Development*.
- Tang, P., Mo, L., Pan, C., Fang, H., Javilla, B. and Riara, M. 2018. "Investigation of rheological properties of light colored synthetic asphalt binders containing different polymer modifiers". *Constr. Build. Mater.*, 161: 175-185. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.098.



- Xu, W., Luo, R., Zhang, K., Feng, G. and Zhang, D. 2018. "Experimental investigation on preparation and performance of clear asphalt". *Int. J. Pavement Eng.*, 19(5): 416-421. doi:10.1080/10298436.2017.1402602.
- Zalnezhad, M. and Hesami, E. 2020. "Effect of steel slag aggregate and bitumen emulsion types on the performance of microsurfacing mixture". *J. Traffic and Transport. Eng.* doi: 10.1016/j.jtte.2018.12.005.
- Zhang, M. H. and Li, H. 2011. "Pore structure and chloride permeability of concrete containing nanoparticles for pavement". *Constr. Build. Mater.*, 25(2): 608-616.