

# تأثیر استفاده از مصالح سنگی سرباره‌ای در مخلوط‌های دوغاب قیری حاوی رنگدانه‌های اکسید آهن

حسن زیاری<sup>۱\*</sup>، مهدی زال نژاد<sup>۲</sup>، محمدعلی زیاری<sup>۳</sup>

۱-پروفسور، دانشکده مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۲-دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۳-دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران

Email: H.Ziari@iust.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۲

## چکیده

یکی از شیوه‌های کارآمد در بحث ایمنی ترافیک و نگهداری پیشگیرانه رویه‌های آسفالتی، استفاده به موقع از اسلاری سیل رنگی است. این مطالعه باهدف امکان‌سنجی و تأثیر استفاده از سرباره فولاد-قوس الکتریکی جایگزین مصالح سنگی طبیعی در طرح اختلاط اسلاری سیل برای سنجش عملکرد آن انجام شده است. در این خصوص، در مرحله اول ویژگی‌های مصالح سنگی و سرباره فولاد بررسی شد. در مرحله بعد برای تحلیل عملکرد مخلوط‌های اسلاری سیل، از ۵ ترکیب متفاوت شامل ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد سرباره فولاد بر اساس وزن کل سنگدانه، استفاده شد. ارزیابی و مقایسه نمونه‌های آسفالتی با آزمایش‌های چسبندگی مرطوب (در زمان‌های ۳۰ و ۶۰ دقیقه)، سایش در شرایط مرطوب (در مدت زمان یک ساعت) و چرخ بارگذاری شده-چسبندگی ماسه و چرخ بارگذاری شده و میزان جابه‌جایی مطابق با آیین‌نامه ASTM D3910 صورت گرفت. نتایج نشان داد که نمونه‌های حاوی سرباره فولاد، سبب ارتقاء عملکرد اسلاری سیل می‌شوند. همچنین در میان نمونه‌های آسفالتی، مخلوط حاوی ۴۰ درصد سرباره فولاد دارای مناسب‌ترین عملکرد بوده به طوری که نسبت به نمونه اصلاح نشده (شاهد) سبب افزایش چسبندگی در مدت زمان ۳۰ و ۶۰ دقیقه به ترتیب به میزان ۲۷/۸ و ۳۷/۳ درصد و کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط به میزان ۴۷/۷ درصد و کاهش میزان جابه‌جایی عمودی در برابر بارگذاری ترافیکی به میزان ۵۰/۸ درصد گردید. مخلوط حاوی ۴۰ درصد سرباره فولاد در مقایسه با نمونه شاهد دارای ۱/۹ درصد قیر امولسیون بیشتر جهت رسیدن به چسبندگی مناسب در زمان مشخص است.

**واژگان کلیدی:** آزمایش چرخ بارگذاری شده، اسلاری سیل رنگی، سرباره فولاد، چسبندگی، حساسیت رطوبتی.

## ۱- مقدمه

سنگ‌دانه‌های طبیعی باکیفیت مناسب در دسترس نبوده، بلکه معدن‌های مصالح طبیعی نیز محدود شده است. این موضوع باعث کمبود مصالح و افزایش هزینه پروژه‌های راه‌سازی شده است [1, 2]. همه‌ساله، مقدار بسیاری از پسماندهای جامد

به واسطه استخراج مصالح طبیعی نگرانی‌های زیست‌محیطی مانند تولید گردوغبار، از بین رفتن چشم‌انداز طبیعی و جنگل‌زدایی بوجود آمده است. در بسیاری از مناطق،

اکوسیستم موجود می‌شود [12]. به‌کارگیری مقدار بهینه از مواد ضایعاتی به‌عنوان بخشی از مصالح سنگی علاوه بر سودمند بوده برای محیط‌زیست، می‌تواند در عملکرد مخلوط‌های آسفالتی نیز دارای تأثیر مثبت باشد [12]. در این زمینه تحقیقاتی توسط پژوهشگران در به‌کارگیری از سرباره فولاد انجام شده است.

در مطالعه‌ای از لیو و همکاران [13]، به ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره فولاد در مقایسه با دیگر مصالح پرداخته شد. نتایج نشان داد که قطبیت بالاتر و اجزای قلیایی فراوان سرباره فولاد به اتصال قوی‌تری منجر شده و تمایل به کاهش حساسیت به رطوبت دارد. به طوری‌که چسبندگی سرباره فولاد به مخلوط آسفالتی به ترتیب ۱۳۷/۵۸، ۱۲۰/۳۹ و ۳۷/۰۶ درصد بیشتر از گرانیت، بازالت و سنگ آهک است. در پژوهشی از ونگ و شن [14]، حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با پودر لاستیک حاوی سرباره فولاد در سیکل‌های چندانگانه انجماد و ذوب مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس، آزمایش انجماد-ذوب و آزمایش انرژی شکست و ریزساختار در سطح مشترک بین سنگدانه و قیر مورد برای ارزیابی پایداری رطوبت مخلوط‌ها مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که اثر قلیایی و ساختار متخلخل سرباره فولاد اثر مطلوبی بر عملکرد چسبندگی دارد. آسیب چسبندگی بین سنگدانه‌ها و سپس آسیب چسبندگی سنگدانه-قیر به ترتیب به عنوان عامل اصلی و ثانویه در یک محیط انجماد-ذوب چندانگانه است. در نهایت پیشنهاد شد افزودن ۱۰۰ درصد سرباره فولاد و قیر اصلاح شده با پودر لاستیک بیشترین تأثیر را در بهبود مقاومت طولانی‌مدت مخلوط‌های آسفالتی در برابر رطوبت خواهد داشت. در تحقیقی ویژگی‌های مکانیکی روکش آسفالتی لایه نازک حاوی مصالح آسفالت بازیافتی و سرباره‌های فولادی به‌منظور برآورده کردن الزام EN 13108، توسط پازینی و همکاران [15] مورد سنجش و طراحی قرار گرفت. مخلوط‌های لایه نازک با توجه به نوع قیر (قیرهای اصلاح‌شده با SBS) و الیاف (طبیعی/مصنوعی) متفاوت بودند. نتایج این تحقیق نشان داد که حضور سنگدانه‌های بازیافتی و سرباره فولاد بر کارایی و عملکرد

صنعتی تولیدشده که نه‌تنها حجم زیادی از زمین را اشغال کرده بلکه باعث بسیاری از مشکلات زیست‌محیطی می‌شوند [3]. این پسماندها شامل: پسماندهای صنعتی مانند انواع سرباره‌ها، خاکستر بادی، پسماندهای شهری و خانگی مانند پسماندهای شیشه، خرده‌های پلاستیک، پسماند معادن مانند انواع زغال‌سنگ و پسماندهای عملیات ساخت و تخریب مانند بتن‌ها و آسفالت‌های بازیافتی، دسته‌بندی شوند [4]. یکی از راه‌های مورد استفاده از سرباره فولاد استفاده از آن در آسفالت حفاظتی اسلاری‌سیل رنگی است. حین سال‌های گذشته، اسلاری‌سیل به عنوان شیوه‌ای تأثیرگذار و کارآمد در نگهداری پیشگیرانه روسازی‌ها با پذیرش گسترده‌ای روبرو شده است [5]. مخلوط اسلاری‌سیل رنگی به‌عنوان یک اقدام مهم ایمنی راه برای بهبود خوانایی و دید جاده در نظر گرفته شده و در عین حال موجب زیباسازی فضای شهری می‌شود. در این راستا، استفاده از روکش‌های رنگی در جاده‌ها یا فضاهای عمومی، به ویژه در مناطق شهری، در ۲۰ سال گذشته در سراسر جهان به‌طور مداوم افزایش یافته است. افزودن رنگدانه‌ها یکی از راه‌های ایجاد اسلاری‌سیل رنگی است [6]. کاربرد اسلاری‌سیل رنگی موجب حفاظت و به تأخیر انداختن فرآیند تخریب روسازی‌ها، آب‌بندی سطح جاده، درزگیری ترک‌های غیرفعال جاده، ارتقای مقاومت لغزندگی و اصلاح سطح روسازی می‌شود. اسلاری‌سیل رنگی حاوی قیر امولسیون کاتیونی، مصالح سنگی خوب دانه‌بندی شده، آب و فیلرهای معدنی فعال (اغلب سیمان) است [7، 8]. در میان اجزا تشکیل‌دهنده، سنگدانه، به عنوان جزئی از مخلوط آسفالتی دارای نقش قابل‌توجهی در مشخصات عملکردی مخلوط آسفالتی است. تغییرات در مقدار و نوع سنگدانه بر ویژگی‌های مخلوط آسفالتی تأثیرگذار است [9، 10]. استفاده سرباره فولاد به‌عنوان بخشی از سنگ‌دانه در طرح اختلاط، به‌طور قابل‌توجهی باعث کم شدن آلاینده‌های محیط‌زیست در فرآیند ساخت‌وساز می‌شود [11]. به این دلیل که مصالح طبیعی به واسطه استخراج از معادن سطح زمین، برداشت‌شده و در مخلوط بکار برده می‌شوند. استخراج بی‌رویه مصالح طبیعی متداول باعث مشکلاتی از قبیل از بین رفتن پوشش گیاهی، پایین آمدن سطح آب زیرزمینی و اختلال در

استقامت مارشال، مدول برجهندگی در ۲۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت کششی غیرمستقیم و حساسیت رطوبتی انجام پذیرفت. نتایج در این پژوهش نشان داد که مخلوط آسفالتی گرم حاوی سرباره فولادی دارای پیرشدگی کمتری نسبت به نمونه شاهد دارای مصالح آهکی است. همچنین معلوم شد، جایگزینی سنگدانه‌های معدنی با سرباره فولاد موجب افزایش استقامت مارشال، سفتی، مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم می‌شود.

### هدف و نوآوری تحقیق

تأثیر مهم سرباره فولاد در مخلوط‌های آسفالتی گرم مورد تحقیق و پژوهش واقع شده است اما تحقیقات محدودی در مورد تأثیر آن در مخلوط‌های سرد آسفالتی به ویژه اسلاری‌سیل، انجام شده است. یکی از اهداف این تحقیق ارائه آسفالت حفاظتی است که از نظر مدیریت تعمیر و نگهداری و صرف انرژی گزینه‌ای مقرون‌به‌صرفه در نظر گرفته شده و می‌تواند راه حلی مناسب برای مدیریت پسماند باشد. پس در این تحقیق با ساخت نمونه‌هایی از مخلوط اسلاری‌سیل رنگی، به بررسی اثر افزودن درصد‌های مختلف سرباره فولاد بر خواص این نوع از آسفالت، پرداخته شد. برای این منظور، ابتدا ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی مصالح سنگی و سرباره فولاد مورد تحقیق و سنجش واقع شد. سپس برای تعیین مشخصات عملکردی مخلوط‌های اسلاری‌سیل، ۵ ترکیب متفاوت سرباره فولاد جایگزین سنگدانه تهیه شد. مقایسه نمونه‌ها با آزمایش‌های چسبندگی سایش در شرایط مرطوب و چرخ بارگذاری شده مطابق با دستورالعمل ISSA A105 و استاندارد ASTM D3910 انجام شد. اهداف این تحقیق به صورت جزئی‌تر به شرح زیر است:

- ۱- بررسی تأثیر سرباره فولاد به عنوان سنگدانه بر عملکرد اسلاری‌سیل رنگی از قبیل چسبندگی، پتانسیل قیرزدگی، مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی و بارگذاری ترافیکی
- ۲- تجزیه و تحلیل اثر درصد قیر امولسیون کاتیونی بر چسبندگی بین قیر و سنگدانه، زمان‌گیرش و عمل‌آوری، قیرزدگی، مقاومت در برابر سایش و بارگذاری ترافیکی

مکانیکی دو مخلوط از نظر مقاومت کششی، شیارشدگی و حساسیت به رطوبت تأثیر منفی ندارد. همچنین از این میان، مخلوط با قیر شاهد و الیاف مصنوعی دارای عملکرد مکانیکی مناسب‌تری بودند. پاتاک و همکاران [16]، در پژوهشی به بررسی خواص مکانیکی مخلوط اصطکاکی با دانه‌بندی باز حاوی سرباره فولاد در درصدها ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ به‌عنوان درشت‌دانه پرداختند. عملکرد مکانیکی مخلوط‌ها از نظر مقاومت در برابر شیار شدگی، پتانسیل ترک‌خوردگی، عمر خستگی و خواص مدول ارزیابی شد. نتایج آزمایش نشان داد که استفاده از سرباره فولاد نه تنها عملکرد مخلوط‌های آسفالتی را از نظر مقاومت در برابر شیارشدگی، پتانسیل ترک‌خوردگی و خواص مدول بهبود بخشید، بلکه عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی را نیز افزایش داد. در مطالعه‌ای از گلی [17]، امکان‌سنجی استفاده از مصالح سرباره فولاد در مخلوط آسفالتی گرم مورد بررسی واقع شد. مقاومت شیار، پایداری مارشال، حساسیت به رطوبت، مدول ارتجاعی و عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی معمولی حاوی مصالح آسفالت بازیافتی و سرباره برای ارزیابی عملکرد مکانیکی با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج نشان داد جایگزینی سنگدانه اصلی با مصالح آسفالت بازیافتی یا سرباره فولاد موجب بهبود پایداری مارشال، استحکام کششی و مقاومت در برابر شیار مخلوط آسفالتی می‌شود. ژائو و همکاران [18] به ارزیابی آزمایشگاهی مخلوط‌های آسفالتی معمولی و با استخوان‌بندی سنگدانه‌های حاوی سنگدانه‌های گرانیتی و سرباره فولاد پرداختند. ارزیابی مخلوط‌ها به‌واسطه پایداری مارشال، مدول دینامیکی، حساسیت رطوبتی، مقاومت در برابر شیارشدگی ترک‌خوردگی انجام شد. نتایج نشان داد که عملکرد هر دو مخلوط حاوی سنگدانه‌های گرانیتی و سرباره فولاد مانند پایداری در دمای بالا و مقاومت در برابر ترک در دمای پایین افزایش می‌یابد. با این حال، با توجه به ویژگی‌های سرباره فولاد، مقاومت طولانی‌مدت آسیب رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی بیشتر از دیگر مخلوط‌های آسفالتی گزارش شد. در پژوهشی از مسعودی و همکاران [19] پیرشدگی بلندمدت مخلوط آسفالتی گرم حاوی سرباره فولادی کوره قوس الکتریک ارزیابی شد. برای این منظور آزمایش‌های

تعیین مقدار مناسب قیر امولسیون و سربراه فولاد در مخلوط اسلاری سیل رنگی برای دستیابی به مقاومت و عملکرد مناسب

## ۲- مواد و مصالح

### مصالح سنگی

در این تحقیق سنگدانه‌های کوهی (کارخانه چالدران، مازندران) در اندازه ۰-۵ میلی‌متر، مصالح سربراه فولاد کوره قوس الکتریکی (کارخانه فولاد مبارکه، اصفهان) به عنوان جایگزین بخشی از سنگدانه و رنگدانه قرمز به عنوان جایگزین فیلر استفاده شد. 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 کمتر، در مکان‌های مسکونی و شهری مناسب است. مشخصات مصالح سنگی در جدول (۲) ارائه شده است. همچنین تصاویر میکرو ساختاری و ترکیب شیمیایی سنگدانه و پودر سربراه فولاد پس از انجام آزمایش به ترتیب در جدول (۳) و شکل (۱) ارائه شده است. بر اساس انجام تحلیل طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس (XRF)، همان‌طور که از نتایج جدول (۳) مشخص است، پودر سربراه دارای مقدار قابل توجهی از اکسید کلسیم به میزان ۵۷/۲ درصد نسبت به مصالح معدنی و رنگدانه قرمز حاوی ۶۹/۳ اکسید آهن است. چسبندگی سنگدانه‌ها به قیر با ویژگی قلیایی آن یعنی نرخ

سنگدانه بررسی می‌شود. پس، نسبت بالای  $CaO/SiO_2$  برای سربراه فولاد، نشان‌دهنده قلیایی‌تر بودن این نوع مصالح بوده و عاملی برای چسبندگی بهتر به قیر است. بنابراین سربراه‌های فولاد استفاده شده در این تحقیق خاصیت بازی داشته که در تقابل با قیری با خاصیت اسیدی بالاتر، پیوند قوی را تشکیل خواهند داد. در شکل (۱)، آنالیز سطح مصالح طبیعی و سربراه فولاد با میکروسکوپ الکترونی روبشی (FESEM) مورد سنجش واقع شد. بر این اساس، مصالح سربراه فولاد شکل (۱-ب) دارای شکل زاویه‌ای، سطحی زبرتر و خلل و فرج بیشتر نسبت به مصالح طبیعی است (شکل ۱-الف). این موضوع بیانگر آن است که سربراه فولاد می‌تواند چسبندگی بهتری را با قیر به همراه داشته باشد.

جدول ۱. محدوده دانه‌بندی مخلوط‌های اسلاری سیل رنگی

Sieve size, mm	Passing by weight of total aggregate, %	
	Type II gradation	Selected gradation
4.785	90 - 100	100
2.360	65 - 90	72
1.180	45 - 70	46
0.600	30 - 50	30
0.300	18 - 30	21
0.150	10 - 21	16
0.075	5-15	10

Table 1. Gradation range of colored slurries mixtures

جدول ۲. مشخصات فیزیکی مصالح سنگی

Tests	Standard	Natural aggregates	Steel Slag aggregates	ISSA A105 Specification
Specific gravity, $gr/cm^3$	ASTM C128	2.65	3.57	-
Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregates	ASTM D419	65%	76%	45% Minimum
Soundness of Aggregates by Use of $Na_2SO_4$	ASTM C88	2.1%	0.96	15% Maximum
Los Angeles abrasion	ASTM C131	20.8%	15.2%	35% Maximum

Table 2. Physical characteristics of aggregates

جدول ۳. ترکیب شیمیایی مصالح با تحلیل XRF

Material type	$Fe_2O_3$	MgO	CaO	$Al_2O_3$	$SiO_2$	$K_2O$	$TiO_2$	$Na_2O$	MnO	L.O.I
Natural aggregate	3.2	1.1	21.4	13.1	51.6	3.1	0.5	2.8	0.4	2.1
Steel slag	16.4	7.5	57.2	2.8	12.7	0.7	0.29	0.3	0.2	1.2
Red pigment	69.3	1.6	2.6	1.6	16.5	0.6	900 ppm	-	0.4	1.1

Table 3. Chemical composition of material by XRF analysis

شکل ۱. تصاویر میکروسکوپی: الف. مصالح طبیعی و ب. سرباره فولاد

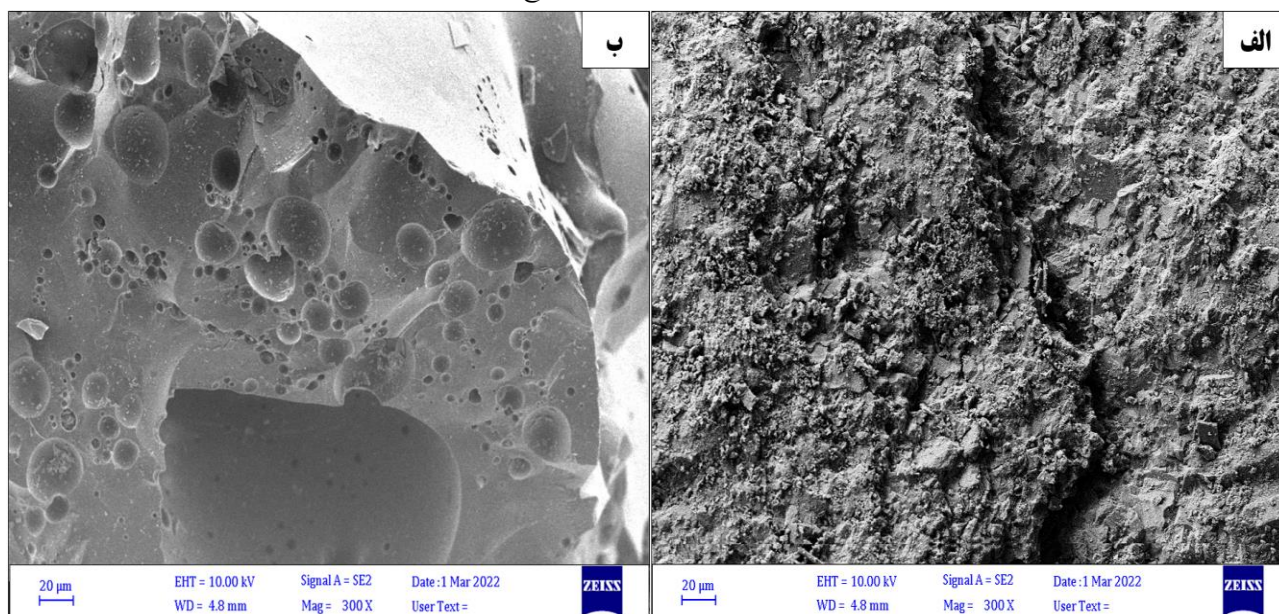


Fig. 1. Microscopic images: a. natural aggregates and b. steel slag

جدول ۴. مشخصات قیر امولسیون کاتیونی دیر شکن

Specification	Value	Standard	ISSA criteria
Viscosity (Saybolt Furol) @ 25°C, sec	AASHTO T59	24	20-100
Sieve test, %	ASTM D244	0.01	Max 0.1%
Coating test, %	AASHTO T59	99	-
Particle charge	AASHTO T59	Positive	Positive
Storage stability of asphalt emulsion (24-h), %	ASTM D6930	0.3	Max 1%
Distillation of emulsified asphalt, weight of the mass (%)	D7497 ASTM	60	Min 57%
Test on asphalt emulsion obtained by ASTM D7497			
Softening point of asphalt by ring and ball test, °C	ASTM D36	57	-
Penetration grade (@ 25°C, 100g, 5s), 0.1 mm	ASTM D5	63	40-90

Table 4. Specifications of cationic slow setting asphalt emulsion

ویژگی‌های قیر امولسیون کاتیونی تولیدی در جدول (۴) ارائه شده است.

### سیمان پرتلند و آب

فیلرهای فعال در آسفالت سرد باعث به حداقل رساندن جدایی مصالح سنگی از یکدیگر شده و منجر به افزایش چسبندگی مخلوط می‌شود. در این مطالعه، سیمان پرتلند به مقدار ۱ درصد در مخلوط‌های اسلاری سیل مورد استفاده واقع شد. منظور از آب، آبی است که به هنگام هم زدن به مخلوط اضافه شده و موجب بهبود کارایی و پوشش بهتر مصالح می‌شود [21]. آب استفاده شده در تمامی نمونه‌ها، آب شرب با درجه اسیدی/قلیایی ۷/۳ است.

### قیر امولسیون

برای ساخت نمونه‌های اسلاری سیل، قیر امولسیون کاتیونی بر اساس استاندارد ASTM D3910 مورد استفاده قرار گرفت. برای تولید قیر امولسیون کاتیونی، 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 ۶۰ 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 [20]. همچنین



## ۳- طرح اختلاط و آزمایش‌ها

## طرح اختلاط

سرباره فولاد مورد استفاده در این پژوهش به صورت وزنی بر اساس وزن کل سنگدانه جایگزین بخشی از مصالح سنگی شده است. همچنین ۱۰ درصد پودر رنگدانه قرمز (اکسید آهن) جایگزین فیلر مصالح سنگی (مصالح عبوری از الک ۰/۰۷۵ میلی‌متر) برای مخلوط‌های اسلاری سیل رنگی شد. جزئیات نام‌گذاری مخلوط‌ها و روند پژوهش به ترتیب در جدول (۵) و شکل (۲) نشان داده شده است. طراحی اسلاری سیل و آزمون‌های مرتبط با آن در آیین‌نامه ASTM D3910 ارائه شده است. در طراحی مخلوط اسلاری سیل بعد از انتخاب قیر امولسیون و مصالح مناسب، آزمون‌ها بر اساس دستورالعمل ISSA A105 روی مصالح صورت گرفته و حدود مجاز مشخصات موردبررسی واقع می‌شوند. پس از برآورده شدن لزوم، طرح اختلاط و سنجش عملکرد نمونه‌ها با آزمایش‌های زمان اختلاط، چسبندگی مرطوب، سایش در شرایط مرطوب، چرخ بارگذاری شده - چسبندگی ماسه و چرخ بارگذاری شده

- جابه‌جایی با انجام می‌شود [22]. در مشخص نمودن میزان بهینه قیر امولسیون و تعیین کمترین و بیشترین آن به ترتیب از نتایج آزمایش‌های سایش در شرایط مرطوب و آزمایش چرخ بارگذاری شده-چسبندگی ماسه استفاده می‌شود. بر اساس دستورالعمل JSSA A105، اگر مقدار بیشترین و کمترین قیر کمتر از ۳ درصد باشد، مقدار بهینه قیر امولسیون متوسط مقدار بیشترین و کمترین است. اگر اختلاف بین بیشترین و کمترین قیر بیشتر از ۳ درصد باشد، مقدار بهینه قیر امولسیون در وسط دامنه ۳ درصدی از بیشترین حدود تعیین شده برای قیر است [23].

جدول ۵. رده‌بندی مخلوط‌های اسلاری سیل

Mix name	Steel slag content, %	Natural aggregate content, %
SS0	0	100
SS10	10	90
SS20	20	80
SS30	30	70
SS40	40	60

Table 5. Classification of colored slurry mixtures

شکل ۲. روند پژوهش

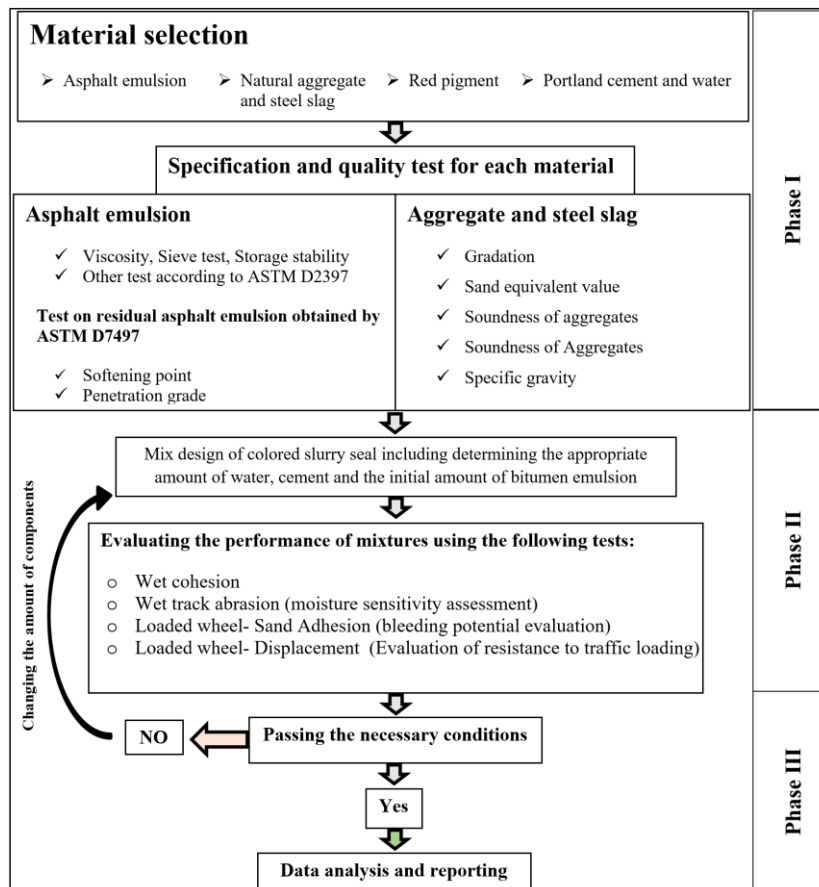


Fig. 2. Research process

## آزمایش زمان اختلاط

آزمایش زمان اختلاط (ISSA TB113) اولین مرحله در طراحی مخلوط و شامل اختلاط مصالح سنگدانه، فیلر، آب و قیر امولسیون کاتیونی است [24]. در آسفالت حفاظتی اسلاری سیل ضروری است زمان اختلاط کافی و مناسب تعیین شده تا از شکست زودهنگام قیر امولسیون جلوگیری شود [25]. مدت زمان شکستن نمونه در اثر اختلاط به عنوان زمان اختلاط معرفی شده که باید کمتر از ۱۸۰ ثانیه باشد [24].

## آزمایش چسبندگی مرطوب

آزمایش چسبندگی مرطوب (ISSA TB139) مخلوطها، برای تعیین چسبندگی اولیه و عمل آوری، با اندازه گیری در زمانهای مختلف برای تعیین کمترین زمان مناسب بازگشایی ترافیک، بر روی مخلوطهای اسلاری سیل انجام می شود [26]. مخلوط آسفالتی مناسب برای قرارگیری در ترافیک عبوری، مطابق نتایج به دست آمده در مدت زمان ۳۰ و ۶۰ دقیقه برای کسب حداقل میزان چسبندگی به ترتیب ۱۲ و ۲۰ کیلوگرم- سانتی متر، انتخاب می شود [26].

## آزمون تعیین افت وزنی مخلوطها به واسطه سایش در شرایط مرطوب

در این آزمون (مطابق با ISSA TB100) برای جلوگیری از وقوع خرابی شن زدگی، 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 می شود [27]. مقدار از دست رفتگی سنگدانه (مقاومت سایش رطوبتی) مطابق رابطه ۱ تعیین می شود.

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

در رابطه (۱)، WTAT شاخص سایش برحسب  $g/m^2$ ،  $m_a$  و  $m_b$  به ترتیب وزن نمونه قبل و بعد از سایش بر حسب گرم و A مساحت قسمت سایش یافته بر حسب مترمربع است.

## آزمون چرخ بارگذاری شده - چسبندگی ماسه

این آزمون (مطابق با ISSA TB109) برای اندازه گیری حداکثر قیر برای جلوگیری از خرابی قیر زدگی مخلوطهای اسلاری سیل است. در این آزمایش مخلوطها هنگام ۱۰۰۰

سیکل با چرخ بارگذاری ۵۶/۷ کیلوگرمی متراکم شده و در مرحله بعد، ماسه اتاوا با دمای ۸۲ درجه سانتی گراد روی نمونه در محل شیار ایجاد شده به صورت یکنواخت، پخش می شود. در این حالت مشابه حالت قبل برای تراکم نمونه ۱۰۰ سیکل بارگذاری انجام می شود. اختلاف بین وزنهای اندازه گیری شده، به عنوان مقدار ماسه ای که چسبیده است، گزارش می شود [28]. رابطه (۲) برای محاسبه میزان قیر زدگی (چسبندگی ماسه) هریک از مخلوطها استفاده می شود.

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

در رابطه (۲)، SA شاخص چسبندگی ماسه برحسب  $g/m^2$ ،  $G_a$  و  $G_b$  به ترتیب وزن خشک نمونه بعد از ۱۰۰۰ و ۱۰۰ سیکل بارگذاری بر حسب گرم و A مساحت قسمت بارگذاری شده است.

## آزمایش سنجش تغییر شکل عمودی و جانبی مخلوط اسلاری سیل تحت چرخ بارگذاری شده

آزمایش ارزیابی میزان تغییر مکان عمودی و جانبی با چرخ بارگذاری شده (ISSA TB147)، ویژگیهای تغییر شکل مخلوط را تحت بار ترافیک شبیه سازی شده نشان می دهد. در این پژوهش مخلوط با استفاده از چرخ ۵۶/۷ کیلوگرم طی ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری متراکم می شود. تغییر شکل های جانبی و عمودی نمونهها نباید به ترتیب از ۵ و ۱۰ درصد بیشتر شود [29]. تصویری از مخلوطها و دستگاهها در شکل (۳) نشان داده شده است. در نهایت میزان جابه جایی های افقی و عمودی مطابق روابط ۳ و ۴ تعیین می شود.

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

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

در رابطه (۳)، VD شاخص میزان جابه جایی عمودی بر حسب درصد،  $VD_{ba}$  عمق جابه جایی عمودی به میلی متر و  $VD_a$  ضخامت نمونه قبل از تراکم به میلی متر است. به دنبال آن در رابطه (۴)، LD شاخص میزان جابه جایی جانبی بر حسب درصد،  $LD_b$  عرض نمونه قبل از تراکم به میلی متر و  $LD_a$  عرض نمونه بعد از تراکم به میلی متر است.

شکل ۳. دستگاه‌های آزمایش و نمونه‌های ساخته شده



Fig. 3. Test devices and manufactured samples

جدول ۶. نتایج آزمایش زمان اختلاط

Mixture type	SS0			SS10			SS20			SS30			SS40		
Residual bitumen content, %	8	8.5	9	8	8.5	9	8	8.5	9	8	8.5	9	8	8.5	9
Water content, %	10	10	9	9.5	9.5	9	9	8.5	8	9	8	8	8	8	8
Mixing time, s	181	186	185	186	186	183	185	184	184	187	184	182	182	184	185

Table 6. Mixing time test results

است. با توجه به نتایج بدست آمده، تمامی نمونه‌ها در مدت‌زمان ۳۰ و ۶۰ دقیقه به ترتیب گیرش و مقاومت لازم برای بازگشایی ترافیک را بدست آورده و نمونه SS40 در میزان قیر باقی‌مانده ۹ درصد، نسبت به سایر نمونه‌ها، دارای بیشترین مقدار گشتاور پیچشی (متناظر با چسبندگی) است. در مجموع نتایج نشان‌دهنده آن است که نمونه‌های حاوی سرباره فولاد، بیشترین مقدار چسبندگی را در درصد قیر ۹ بدست آورده‌اند. به شکلی که نمونه‌های SS40 و SS30 در میزان قیر باقی‌مانده ۸ تا ۹ درصد، دارای بیشترین میزان چسبندگی نسبت به دیگر نمونه‌ها هستند. به‌عنوان نمونه در قیر باقی‌مانده ۹ درصد، مخلوط‌های SS10، SS20، SS30 و SS40 نسبت به نمونه شاهد (SS0) به ترتیب موجب افزایش چسبندگی به قیر در مدت‌زمان ۳۰ دقیقه به میزان ۱۳، ۲۱، ۲۵ و ۲۸ درصد و در مدت‌زمان ۱ ساعت به میزان ۱۶، ۲۷، ۳۶ و ۳۷ درصد شده است. در مخلوط SS0 و SS10 در مدت‌زمان ۱ ساعت با رشد میزان قیر از ۸ به ۸/۵ درصد، چسبندگی به بیشترین میزان

#### ۴- نتایج و بحث

##### آزمایش زمان اختلاط

در جدول (۶) مقادیر اولیه قیر امولسیون در سه سطح، مقادیر مناسب سیمان و آب اضافه شده به مخلوط، تعیین شده است. زمان اختلاط حداقل ۱۸۰ ثانیه مطابق ISSA TB113 برای هریک از نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف از سرباره فولاد و قیر امولسیون، مورد بررسی واقع شد. نتایج این آزمایش نشان داد با افزایش درصد سرباره فولاد، مقدار آب برای دستیابی به زمان اختلاط تا حدود مجاز دستورالعمل ISSA کاهش یافت. جذب آب بالای مصالح طبیعی نسبت به سرباره فولاد به دلیل خصوصیات فیزیکی و جنس مصالح سنگی بوده که بر ویژگی‌های مخلوط تأثیرگذار بوده که باعث کاهش کارایی و مصرف بیشتر آب در انواع مخلوط‌های آسفالتی می‌شود.

##### آزمایش چسبندگی مرطوب

نمودار (۴ و ۵) نشان‌دهنده نتایج آزمایش چسبندگی مرطوب در زمان‌های ۳۰ و ۶۰ دقیقه نمونه‌های اسلاری سیل رنگی



فولاد قسمت قابل توجهی از ترکیب شیمیایی آن را اکسید کلسیم تشکیل داده است. چسبندگی سنگدانه‌ها به قیر با ویژگی قلیایی آن یعنی نرخ  $CaO/SiO_2$  سنگدانه بررسی می‌شود. پس، نسبت بالای  $CaO/SiO_2$  برای سرباره فولاد، نشان‌دهنده قلیایی‌تر بودن این نوع مصالح بوده و عاملی برای چسبندگی بهتر به قیر با خاصیت اسیدی است. از سوی دیگر بر اساس تصاویر FESEM، تیز گوشه بودن سرباره فولاد و زاویه اصطکاک بالای این مواد نسبت به مصالح طبیعی، منجر به قفل و بست خوب سنگدانه‌ها نسبت به یکدیگر شده و باعث استحکام بیشتر و چسبندگی بهتر سنگدانه‌ها و قیر با یکدیگر می‌شود. نتایج چسبندگی مناسب سرباره فولاد با قیر، با پژوهش دیگر پژوهشگران همخوانی دارد [30-32].

### آزمون سایش در شرایط مرطوب

نتایج آزمایش نمونه‌ها در مدت‌زمان ۱ ساعت غوطه‌وری در آب در نمودار (۶) ارائه شده است. مطابق با محدوده مشخص شده در ISSA TB100 مبنی بر بیشترین سایش ۸۰۷ گرم بر مترمربعی، همه مخلوط‌ها در محدوده مجاز دستورالعمل قرار دارند. با توجه به گراف ۶، در همه مخلوط‌ها، افزایش درصد سرباره فولاد و مقدار قیر باقی‌مانده باعث ارتقاء عملکرد در مقابل سایش و خرابی رطوبتی می‌شود. همچنین مخلوط SS40 عملکرد سایشی مناسب‌تری نسبت به سایر نمونه‌ها در درصد‌های مختلف از قیر داشته است. برای نمونه در قیر باقیمانده ۹ درصد، نمونه‌های SS10، SS20، SS30 و SS40 نسبت به نمونه شاهد (SS10) به ترتیب به مقدار ۱۱/۳، ۳۰/۴، ۴۳/۲ و ۴۷/۷ درصد موجب ارتقاء بهبود عملکرد سایش شده‌اند. به طوری که کمترین مقدار افت وزنی در نمونه‌ها در ۹ درصد قیر باقی‌مانده متعلق به نمونه SS40 با عدد ۲۹۶ گرم بر مترمربع است و پس از آن نمونه‌های SS30، SS20 و SS10 با مقدار سایش به ترتیب ۳۲۱/۵، ۳۹۴/۴ و ۵۰۲/۵ گرم بر مترمربع در رتبه‌های بعدی قرار دارند. از این‌رو می‌توان این‌طور فهمید که جایگزینی سرباره فولاد ضایعاتی، باعث ارتقاء عملکرد حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها می‌شود. موضوع دیگر که در نمودار قابل مشاهده است نرخ رشد مقاومت در برابر سایش (مقاومت در برابر خرابی رطوبتی) بوده که در درصد‌های

رسیده و آن‌گاه با افزایش مجدد مقدار قیر به ۸/۵ درصد، میزان چسبندگی کاهش می‌یابد.

شکل ۴. نتایج آزمایش چسبندگی مرطوب در ۳۰ دقیقه

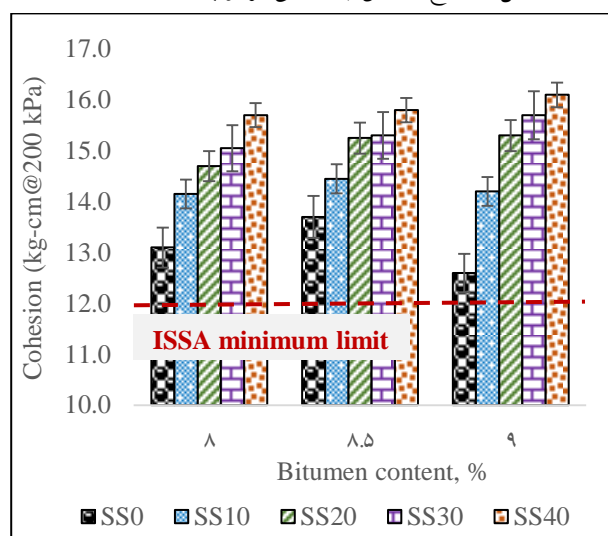


Fig. 4. The results of wet cohesion test in 30 minutes

شکل ۵. نتایج آزمایش چسبندگی مرطوب در ۶۰ دقیقه

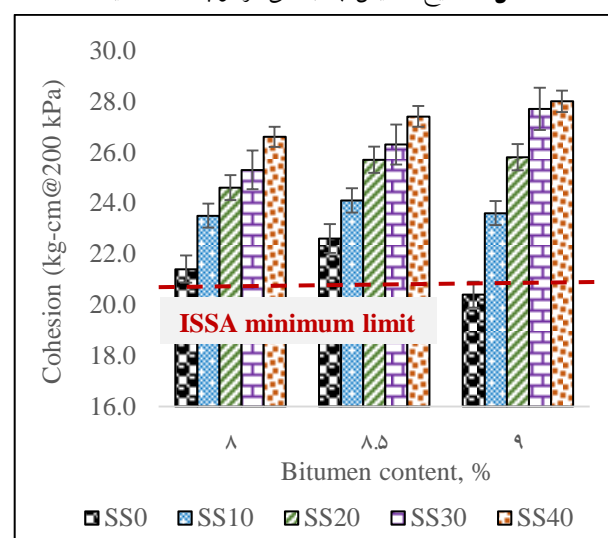


Fig. 5. The results of wet cohesion test in 60 minutes

بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش درصد قیر تا میزان مشخص، چسبندگی در مخلوط‌های SS10 و SS0 افزایش یافته و سپس با افزایش بیشتر مقدار قیر امولسیون و به دنبال آن افزایش زمان عمل‌آوری، میزان چسبندگی کاهش خواهد یافت. این در حالی است که افزایش میزان سرباره فولاد و مقدار قیر در مخلوط‌های حاوی سرباره فولاد، باعث افزایش چسبندگی مخلوط‌ها شده است. بر اساس آنالیز XRF سرباره

پایدارتر می‌شود. این موضوع باعث شده تا مقاومت در برابر سایش نمونه‌های اصلاح شده، بیشتر شود. در پژوهش‌های پیشین از پژوهشگران نیز این موضوع مورد تأیید قرار گرفته است [19, 30, 33].

### آزمایش چرخ بارگذاری شده - چسبندگی ماسه

نتایج آزمایش بارگذاری چرخ-چسبندگی ماسه (ارزیابی پتانسیل قیر زدگی) برای مخلوط‌های آسفالتی اسلاری سیل در ادامه در نمودار (۷) ارائه شده است. همان‌طور که از نتایج دریافت می‌شود افزایش درصد قیر منجر به افزایش قیر زدگی مخلوط‌ها (جذب ماسه) می‌شود. همچنین افزایش سرباره فولاد، مقدار قیر زدگی (چسبندگی ماسه) را نسبت به نمونه شاهد کاهش می‌دهد. به طوری‌که همه نمونه‌ها در قیر ۸ و ۹ درصد به ترتیب دارای کمترین و بیشترین مقدار قیر زدگی هستند. برای نمونه در قیر ۹ درصد، مقدار جذب ماسه در نمونه‌های SS10، SS20، SS30 و SS40 نسبت به نمونه شاهد (SS0) به ترتیب ۵/۸، ۱۴/۸، ۲۰/۱ و ۲۳/۷ درصد کاهش یافته است.

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

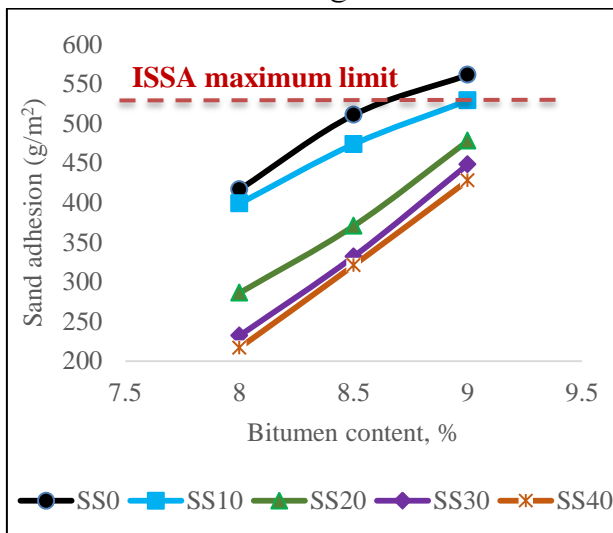


Fig. 7. Sand adhesion (bleeding potential) of colored slurry seal in the loading wheel test - sand adhesion

البته، روند افزایش قیر زدگی مخلوط‌ها در همه درصد‌های قیر از ۸ تا ۹ تکرار شده است. ولی با این وجود، با توجه به محدودیت مشخص شده در دستورالعمل ISSA، مقدار قیر

متفاوت از قیر مخلوط‌های اسلاری سیل ثابت نیست. به عنوان در نمونه‌های SS0 و SS10 با افزایش درصد قیر از ۸ به ۸/۵ درصد کاهش وزن در برابر سایش، با نرخ تقریباً ثابتی کاهش می‌یابد. این در حالی است که در مخلوط‌های SS20، SS30 و SS40 نرخ کاهش افت وزنی نمونه‌ها از قیر باقیمانده ۸ به ۹ درصد نسبت به نمونه‌های SS0 و SS10 بیشتر است. در نتیجه می‌توان با انتخاب درصد مناسب از سرباره فولاد و قیر باقیمانده، پدیده عریان شدگی را به حداقل رساند. از آنجا که عریان شدگی به دلیل پیوند ضعیف بین مصالح سنگی و قیر است، در صورتی که مصالح سنگی و قیر بتوانند پیوند قوی‌تری باهم ایجاد کنند، احتمالاً وقوع پدیده عریان شدگی کاهش می‌یابد.

شکل ۶. نتایج مقدار افت وزنی نمونه‌های اسلاری سیل رنگی

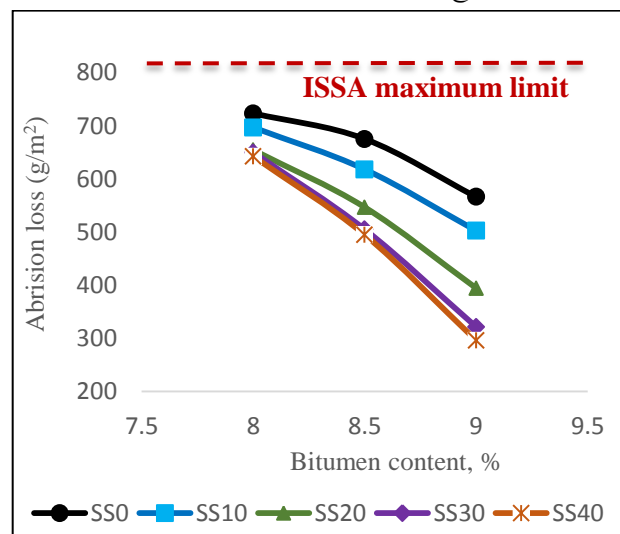


Fig. 6. The results of the weight loss of colored slurry seal

به‌طور کلی مشخصات سطح و تخلخل برای برهم کنش قیر-سنگدانه مهم هستند. حساسیت رطوبتی پایین مشاهده شده در مخلوط شاهد به دلیل ماهیت بین مولکولی الکترواستاتیک و در عین حال پیوند ضعیف قیر و سنگدانه‌های سیلیسی نسبت به دیگر مخلوط‌ها است. از آنجایی که قطبیت آب بیشتر از چسباننده قیری است، وجود آب موجب جدایی مولکول‌های قیر از سطح مصالح خواهد شد. از آنجا که سرباره فولاد از چسبندگی مناسب با قیر برخوردار بوده و همچنین دارای سطحی زبر، سخت و گوشه‌دارتر است قفل و بست بهتری بین سنگدانه‌ها ایجاد می‌نماید و باعث به وجود آمدن ترکیبی

سرباره فولاد تا ۲۰ درصد جابه‌جایی عمودی و جانبی کاسته شده است که تا ۴۰ درصد این روند بهبود پیدا کرده است. به‌طور خلاصه این نتایج نشان داد که مخلوط‌های SS 30 و SS 40 به ترتیب بهترین عملکرد را در میزان جابه‌جایی عمودی و افقی ناشی از شیار داشته‌اند. اگرچه فاصله مقادیر تغییر شکل این مخلوط‌ها (SS 30 و SS 40) قابل توجه نیست. به‌طور مثال در قیر ۹ درصد، مطابق نمودار جابه‌جایی افقی نمونه‌های SS10، SS20، SS30 و SS40 نسبت به نمونه SS0 به اندازه ۲۷، ۴۴/۴، ۴۷/۶ و ۵۰/۸ درصد کاهش داشته است. از سوی دیگر، مطابق نمودار افزایش سرباره فولاد در مخلوط‌های SS10، SS20، SS30 و SS40، در درصد قیر باقیمانده ۹ درصد، در مقایسه با نمونه شاهد به ترتیب موجب کاهش جابه‌جایی عمودی به مقدار ۸/۹، ۲۲/۲، ۳۵/۶ و ۴۰/۰ درصد شده است. درنهایت این نتایج گواه آن است که افزایش سرباره فولاد، سبب بهبود عملکرد آسفالت حفاظتی در برابر بارگذاری ترافیکی می‌شود. در حالت کلی با افزایش درصد قیر در مخلوط‌ها، قیر اضافی در فضای بین دانه‌ای به عنوان روان‌کننده عمل کرده و در نتیجه عمق شیار افزایش می‌یابد. درحالی‌که سرباره‌ها با تخلخل بالاتر می‌توانند قیرهای آزاد را در مخلوط به دلیل پر شدن حفرات با قیر به قیر سازه‌ای تبدیل کرده و باعث ساخت مخلوطی با ساختاری مستحکم‌تر و درنهایت مقاوم‌تر در برابر خرابی‌های شیارشدگی شوند [36, 37]. شکل ظاهری سرباره‌ها نیز روی عمق شیارشدگی و تغییر شکل‌های دائمی نیز تأثیر می‌گذارند [38]. سرباره فولاد به دلیل ساختار نامنظم و تیز گوشه بودن و زاویه اصطکاک داخلی بالا و قفل و بست بهتر سنگدانه‌ها باهم که از دلایل اصلی مقاومت در برابر شیارشدگی در مخلوط‌های آسفالتی با ضخامت کم است، باعث افزایش مقاومت برشی مخلوط و کاهش عمق شیار می‌شوند [39]. به‌طور خلاصه در مخلوط‌هایی که مستعد خرابی شیارشدگی هستند، می‌توان پس از تأمین قیر کافی، احتمال وقوع خرابی شیارشدگی را با افزودن سرباره فولاد ضایعاتی به مقدار ۳۰ تا ۴۰ درصد، به میزان مؤثری کاهش داد که این موضوع به دلیل شکل‌گیری ماستیک قوی‌تر و قفل و بست بهتر مصالح سنگی است. این موضوع با پژوهش دیگر محققین در مطالعات گذشته همخوانی دارد [33, 40].

زدگی مخلوط‌های اصلاح شده با سرباره فولاد از حدود مجاز آیین‌نامه تجاوز نکرده است. نکته دیگری که از گراف‌ها دریافت می‌شود، با افزایش قیر از ۸ به ۹ درصد، قیر زدگی همه مخلوط‌ها به‌صورت تقریباً خطی (با یک شیب تقریباً ثابت) افزایش می‌یابد. بنابراین، قیر زدگی مخلوط‌ها با مقدار درصد قیر و سرباره فولاد رابطه مستقیم دارد، پس در صورت استفاده از سرباره فولاد، بهتر است از درصد بالا برای جلوگیری از خرابی قیر زدگی استفاده نمود. دلیل این امر آن است که به بافت نامنظم سرباره، سطح مخصوص بالا و خلل و فرج بالاتر نسبت به سنگدانه طبیعی، جذب قیر در مخلوط حاوی سرباره، بالاتر رفته که باعث کاهش قیر زدگی در هر سه سطح به ویژه در قیرهای با درصد بالا می‌شود. این موضوع در تحقیقات دیگر پژوهشگران نیز اشاره شده است [34, 35].

### تعیین میزان تغییر شکل عمودی و جانبی مخلوط با آزمایش چرخ بارگذاری شده

نتایج این آزمایش از دو منظر مقدار قیر باقیمانده و مقدار درصد سرباره فولاد جایگزین در مخلوط‌ها قابل بررسی است که در شکل‌های (۸ و ۹) ارائه شده است. مطابق نتایج، مقدار قیر باقیمانده و سرباره فولاد بر عملکرد جابه‌جایی مخلوط‌ها مؤثر است. از منظر قیر باقی مانده، افزایش قیر باقیمانده از ۸ به ۸/۵ درصد در مخلوط‌های SS0 و SS10، ابتدا باعث کاهش جابه‌جایی شده و سپس با افزایش قیر از ۸/۵ به ۹ درصد، باعث افزایش جابه‌جایی عمودی و افقی مخلوط‌ها می‌شود. این در حالی است که در نمونه‌های SS20، SS30 و SS40 با افزایش قیر از ۸ به ۹ درصد، مقدار جابه‌جایی‌های عمودی و جانبی روندی کاهشی داشته است. این بدان معنا است مشخص شدن مقدار مناسب از قیر برای کاهش میزان جابه‌جایی‌ها امری لازم است. از منظر میزان سرباره، نمونه‌های حاوی سرباره فولاد در تمامی مخلوط‌ها، عملکرد بهتری از نمونه شاهد در همه جابه‌جایی‌های افقی و عمودی داشته‌اند. به طوری‌که با افزایش میزان سرباره فولاد، جابه‌جایی عمودی و جانبی کاهش یافته و کمترین میزان جابه‌جایی مربوط به نمونه‌های SS30 و SS40 است. با توجه به نتایج به دست آمده در درصد قیر باقی مانده ۸/۵ و ۹ درصد، مخلوط‌های حاوی ۰ و ۱۰ درصد سرباره تفاوت محسوسی در عمق شیار باهم نداشته‌اند ولی با افزایش

شکل ۹. مقدار تغییرشکل جانبی نمونه‌های اسلاری سیل رنگی

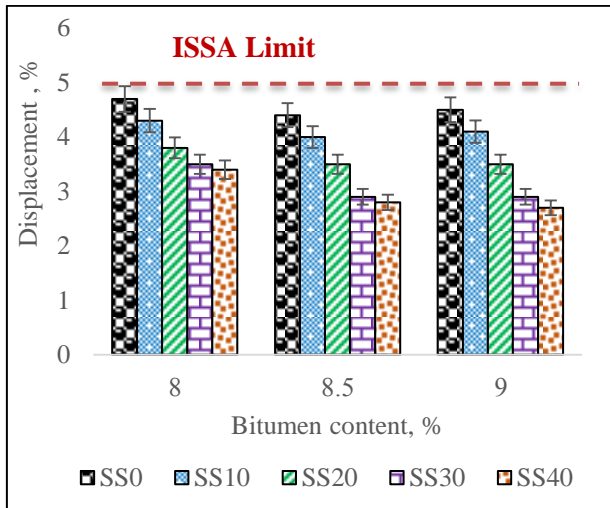


Fig. 9. The amount of lateral deformation of colored slurry seal samples

شکل ۸. مقدار تغییرشکل عمودی نمونه‌های اسلاری سیل رنگی

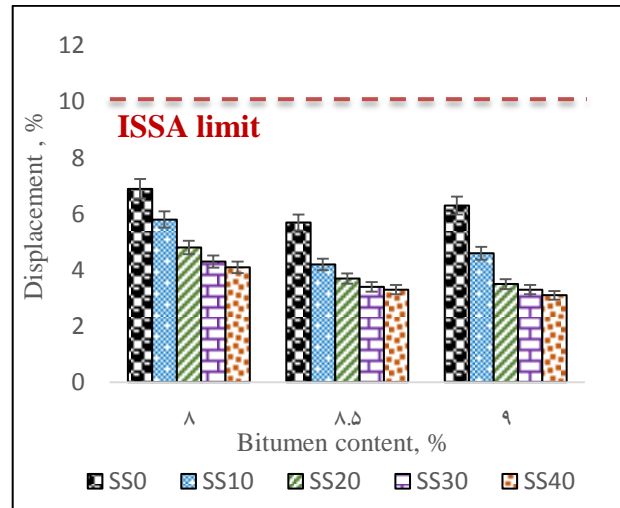


Fig. 8. The amount of vertical deformation of colored slurry seal samples

جدول ۷. محدوده مجاز قیر باقی مانده و درصد بهینه آن برای نمونه‌های اسلاری سیل

Mixture type	Minimum amount of residual bitumen, (%)	Maximum amount of residual bitumen, (%)	Acceptable range of residual bitumen, (%)	Optimal amount of residual bitumen, (%)
SS0	12.5	14.3	12.5-14.3	13.4
SS10	12.5	15.2	12.5-15.2	13.8
SS20	12.5	15.9	12.9-15.9	14.4
SS30	12.5	16.5	13.5-16.5	15.0
SS40	12.5	16.8	13.8-16.8	15.3

Table 7. Classification of colored slurry mixtures

شکل ۱۰. ترکیب نتایج آزمون‌های سایش در شرایط مرطوب و چرخ بارگذاری شده-چسبندگی ماسه

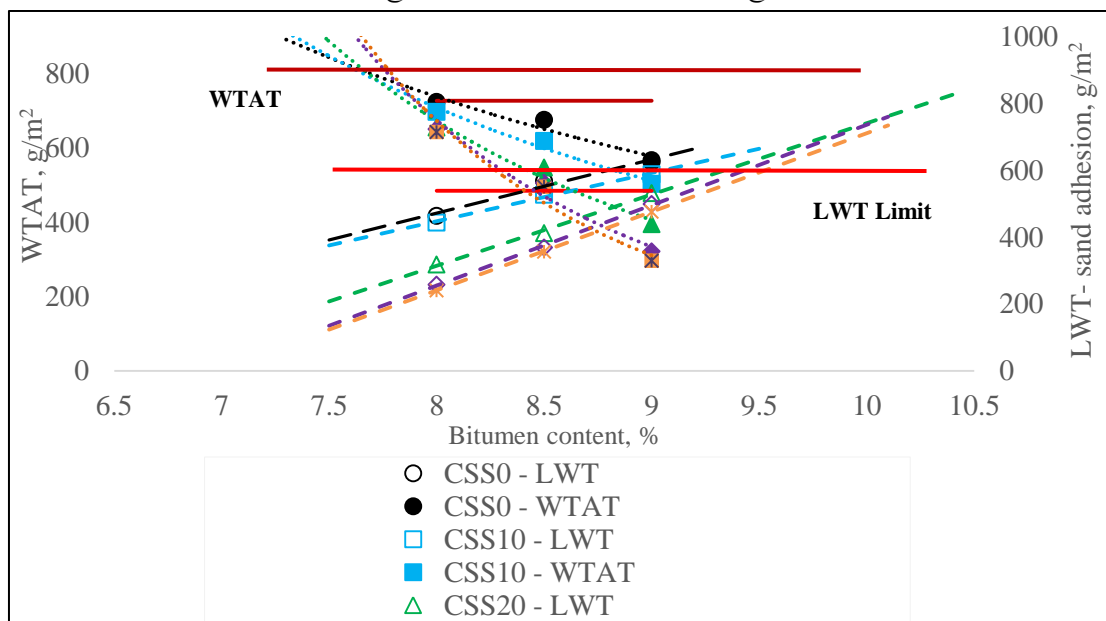


Fig. 10. Combination of results of wet track abrasion test and loaded wheel-sand adhesion test

## تعیین کردن محدوده مجاز و بهینه قیر امولسیون

محدوده مجاز قیر امولسیون و مقدار بهینه آن از طریق رسم نتایج آزمون‌های سایش در شرایط مرطوب و چرخ بارگذاری شده - چسبندگی ماسه و تلفیق نمودارهای این دو آزمون مشخص می‌شوند. در ترکیب دو نمودار، نتایج آزمایش سایش مرطوب به صورت نمودارهای توابع توانی و نتایج آزمایش ماسه چسبیده به صورت یک نمودار خطی ارائه می‌شوند [22-24]. محدوده مجاز قیر امولسیون برای تمامی مخلوط‌ها در جدول (۷) ارائه شده است.

در شکل (۱۰) برای هریک از مخلوط‌های SS0، SS10، SS20، SS30 و SS40 نتایج و نمودار آزمایش‌های سایش در شرایط مرطوب و چرخ بارگذاری - چسبندگی ماسه ارائه شده است همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، مقدار بهینه قیر امولسیون نمونه‌های آسفالتی حاوی سرباره فولاد در مقایسه با نمونه شاهد افزایش یافته است. به طوری که درصد قیر امولسیون بهینه نمونه‌های 0، SS20، SS30 و SS40 به ترتیب به مقدار ۰/۴، ۱/۰، ۱/۶ و ۱/۹ درصد نسبت به مخلوط شاهد کمتر بوده است. به‌طور کلی، تفاوت‌های قابل‌توجه در بافت، شکل و تخلخل بین سرباره فولاد و سنگدانه‌های معمولی دلیل‌های قیر بهینه بالاتر به دست آمده برای مخلوط‌های حاوی سرباره فولاد است. این امر باعث افزایش قابل‌توجه میزان قیر بهینه جهت پوشش سطح سنگدانه‌ها خواهد شد.

## ۵- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی به‌کارگیری سرباره فولاد در طرح اختلاط اسلاری سیل رنگی برای سنجش عملکرد آن پرداخته شد. در این راستا، ابتدا مشخصات فیزیکی و شیمیایی سرباره فولاد و مصالح طبیعی با آزمایش‌های XRF و FESEM-EDS مورد بررسی قرار گرفته و سپس به‌منظور ارزیابی عملکرد مخلوط‌ها، از ۵ ترکیب مختلف حاوی صفر، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد سرباره فولاد جایگزین مصالح سنگی بر اساس وزن کل سنگدانه استفاده شد. ارزیابی نمونه‌ها به واسطه آزمایش‌های چسبندگی مرطوب، چرخ بارگذاری شده و سایش در شرایط مرطوب مطابق با دستورالعمل ASTM D3910 انجام شد. نتایج آزمایش‌های انجام شده به‌طور خلاصه در ادامه ارائه شده است:

مطابق با تحلیل نتایج آزمایش XRF، مصالح سرباره فولاد دارای مقادیر بالای CaO است. نسبت بالای  $CaO/SiO_2$  برای سرباره فولاد، نشان‌دهنده قلیایی‌تر بودن این نوع مصالح بوده و عاملی برای چسبندگی بهتر به قیر است. بنابراین سرباره‌های فولاد استفاده شده در این تحقیق خاصیت بازی داشته که در تقابل با قیری با خاصیت اسیدی بالاتر، پیوند قوی را تشکیل خواهند داد. علاوه بر این، تصاویر FESEM نشان می‌دهد که سرباره فولاد به دلیل سطوح چندوجهی، زبر و تخلخل بالا، ویژگی‌های عملکردی مانند چسبندگی و مقاومت در برابر بارهای ترفیکی را بهبود می‌بخشد. همچنین جذب قیر را در مخلوط‌های اسلاری سیل رنگی افزایش می‌دهد.

بر اساس نتایج آزمایش‌های عملکردی اسلاری سیل رنگی، مخلوط‌های حاوی ۴۰ درصد سرباره فولاد باعث افزایش چسبندگی، کاهش جابجایی عمودی و کاهش پتانسیل قیرزدگی به ترتیب به میزان ۳۷، ۴۰ و ۲۳/۷ شده است. همچنین افزایش درصد قیر در مخلوط‌های حاوی درصد بالای سرباره فولاد، در افزایش میزان جابه‌جایی نسبت به مخلوط شاهد تأثیری کمتری داشته است. پس برای کاهش مقدار جابه‌جایی‌ها و بهبود عملکرد در چسبندگی و قیرزدگی، مشخص نمودن میزان قیر مناسب امری ضروری است. در آزمایش تعیین حساسیت رطوبتی با WTAT مشخص شد که با جایگزینی سرباره فولاد با مصالح طبیعی تا ۴۰ درصد سبب ارتقاء عملکرد در مقابل خرابی رطوبتی می‌شود. بنابراین با توجه مسائل زیست‌محیطی و محدودیت‌های منابع طبیعی توصیه می‌شود که سرباره فولاد در مخلوط اسلاری سیل رنگی تا میزان ۴۰ درصد جایگزین مصالح طبیعی شده تا چسبندگی مناسب بین مصالح مخلوط آسفالت رنگی حاصل شده و مقاومت آن در برابر حساسیت رطوبتی، بارگذاری ترفیک و قیر زدگی بهبود یابد.

## ۶- اعلام تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ نوع تعارض منافی وجود ندارد

## ۷- مراجع

1. Pattanaik ML, Choudhary R, Kumar B, Kumar A. Mechanical properties of open graded friction course mixtures with different contents of electric arc furnace steel slag as an alternative aggregate from steel



15. Pazzini M, Tarsi G, Tataranni P, Lantieri C, Dondi G. Mechanical Characterization of Thin Asphalt Overlay Mixtures with 100% Recycled Aggregates. *Materials* [Internet]. 2023; 16(1).
16. Pathak S, Choudhary R, Kumar A, Kumar B. Mechanical Properties of Open-Graded Asphalt Friction Course Mixtures with Basic Oxygen Furnace Steel Slag as Coarse Aggregates. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2023;35(4):04023036.
17. Goli A. The study of the feasibility of using recycled steel slag aggregate in hot mix asphalt. *Case Studies in Construction Materials*. 2022;16:e00861.
18. Zhao X, Sheng Y, Lv H, Jia H, Liu Q, Ji X, et al. Laboratory investigation on road performances of asphalt mixtures using steel slag and granite as aggregate. *Construction and Building Materials*. 2022;315:125655.
19. Masoudi S, Abtahi SM, Goli A. Evaluation of electric arc furnace steel slag coarse aggregate in warm mix asphalt subjected to long-term aging. *Construction and Building Materials*. 2017;135:260-6.
20. Ziari H, Mahdizadeh MJ, Zalnezhad M. Experimental Performance Evaluation of Microsurfacing Surface Treatment Containing Polypropylene Fibers. *Quarterly Journal of Transportation Engineering*. 2021:-.
21. Wang A, Shen S, Li X, Song B. Microsurfacing mixtures with reclaimed asphalt pavement: Mix design and performance evaluation. *Construction and Building Materials*. 2019;201:303-13.
22. Keymanesh MR, Ziari H, Zalnezhad H, Zalnezhad M. Mix design and performance evaluation of microsurfacing containing electric arc furnace (EAF) steel slag filler. *Construction and Building Materials*. 2020;269:121336.
23. Zalnezhad M, Hesami E. Effect of steel slag aggregate and bitumen emulsion types on the performance of microsurfacing mixture. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2020;7(2):215-26.
24. ISSA. Trial mix procedure for slurry seal design. *Technical Bulletin 113: International Slurry Surfacing Association*; 2017.
25. Esfahani MA, Khatayi A. Effect of type and quantity of emulsifier in bitumen polymer emulsion on microsurfacing performance. *International Journal of Pavement Engineering*. 2020:1-15.
26. ISSA. Test method to classify emulsified asphalt/aggregate mixture systems by modified cohesion tester measurement of set and cure characteristics. *Technical Bulletin: International Slurry Surfacing Association*; 2017.
27. ISSA. Test Method for Wet Track Abrasion of Slurry Surfacing Systems. *Technical Bulletin: International Slurry Surfacing Association*; 2017.
28. ISSA. Test Method for Measurement of Excess Asphalt in Bituminous Mixtures by Use of a Loaded Wheel Tester and Sand Adhesion. *Technical Bulletin: International slurry surfacing association*; 2017.
29. ISSA. Test method for measurement of stability and resistance to compaction, vertical and lateral displacement of multilayered fine aggregate cold mixes. *industries. Road Materials and Pavement Design*. 2021;22(2):268-92.
30. Chen S-H, Lin D-F, Luo H-L, Lin Z-Y. Application of reclaimed basic oxygen furnace slag asphalt pavement in road base aggregate. *Construction and Building Materials*. 2017;157:647-53.
31. Dulaimi A, Shanbara HK, Al-Rifaie A. The mechanical evaluation of cold asphalt emulsion mixtures using a new cementitious material comprising ground-granulated blast-furnace slag and a calcium carbide residue. *Construction and Building Materials*. 2020;250:118808.
32. Puligilla S, Mondal P. Role of slag in microstructural development and hardening of fly ash-slag geopolymer. *Cement and concrete Research*. 2013;43:70-80.
33. Jalalian Khoshnood A, Kamboozia N, Ziari H, Zalnezhad M. Evaluation of performance characteristics of polymer-modified slurry seal (PMSS) by replacing filler with ceramic waste powder. *Road Materials and Pavement Design*. 2022:1-18.
34. Autelitano F, Giuliani F. Daytime and nighttime color appearance of pigmented asphalt surface treatments. *Construction and Building Materials*. 2019;207:98-107.
35. Takamura K, James A. 13 - Paving with asphalt emulsions. In: Huang S-C, Di Benedetto H, editors. *Advances in Asphalt Materials*. Oxford: Woodhead Publishing; 2015. p. 393-426.
36. Dong Q, Chen X, Huang B, Gu X. Analysis of the Influence of Materials and Construction Practices on Slurry Seal Performance Using LTPP Data. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*. 2018;144(4):04018046.
37. Choudhary J, Kumar B, Gupta A. Evaluation of engineering, economic and environmental suitability of waste filler incorporated asphalt mixes and pavements. *Road Materials and Pavement Design*. 2021;22(sup1):S624-S40.
38. Keymanesh MR, Ziari H, Zalnezhad H, Zalnezhad M. Mix design and performance evaluation of microsurfacing containing electric arc furnace (EAF) steel slag filler. *Construction and Building Materials*. 2021;269:121336.
39. Robinson Jr GR, Menzie WD, Hyun H. Recycling of construction debris as aggregate in the Mid-Atlantic Region, USA. *Resources, Conservation and Recycling*. 2004;42(3):275-94.
40. Choudhary J, Kumar B, Gupta A. Utilization of solid waste materials as alternative fillers in asphalt mixes: A review. *Construction and Building Materials*. 2020;234:117271.
41. Liu J, Wang W, Wang Y, Zhou X, Wang S, Liu Q, et al. Towards the sustainable utilization of steel slag in asphalt pavements: A case study of moisture resistance and life cycle assessment. *Case Studies in Construction Materials*. 2023;18:e01722.
42. Wang W, Shen A. Moisture Damage Characterization of Rubber-Modified Asphalt Mixture Containing Waste Steel Slag under Multiple Freeze&#x2013;Thaw Cycles. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2023;35(2):04022409.

35. Chen M, Lin J, Wu S. Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture. *Construction and building materials*. 2011;25(10):3909-14.
36. Mogawer WS, Stuart KD. Effects of mineral fillers on properties of stone matrix asphalt mixtures. *Transportation Research Record*. 1996;1530(1):86-94.
37. Wang H, Al-Qadi IL, Faheem AF, Bahia HU, Yang S-H, Reinke GH. Effect of mineral filler characteristics on asphalt mastic and mixture rutting potential. *Transportation Research Record*. 2011;2208(1):33-9.
38. Melotti R, Santagata E, Bassani M, Salvo M, Rizzo S. A preliminary investigation into the physical and chemical properties of biomass ashes used as aggregate fillers for bituminous mixtures. *Waste management*. 2013;33(9):1906-17.
39. Rondón-Quintana HA, Ruge-Cárdenas JC, Farias MMd. Behavior of hot-mix asphalt containing blast furnace slag as aggregate: Evaluation by mass and volume substitution. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2019;31(2):04018364.
40. Pasetto M, Baldo N. Mix design and performance analysis of asphalt concretes with electric arc furnace slag. *Construction and Building Materials*. 2011;25(8):3458-68.
- Technical Bulletin: International Slurry Surfacing Association; 2017.
30. Goli H, Latifi M, Sadeghian M. Moisture characteristics of warm mix asphalt containing reclaimed asphalt pavement (RAP) or steel slag. *Materials and Structures*. 2022;55(2):53.
31. Alinezhad M, Sahaf A. Investigation of the fatigue characteristics of warm stone matrix asphalt (WSMA) containing electric arc furnace (EAF) steel slag as coarse aggregate and Sasobit as warm mix additive. *Case Studies in Construction Materials*. 2019;11:e00265.
32. Pathak S, Choudhary R, Kumar A. Investigation of Moisture Damage in Open Graded Asphalt Friction Course Mixtures with Basic Oxygen Furnace Steel Slag as Coarse Aggregate under Acidic and Neutral pH Environments. *Transportation Research Record*. 2020;2674(8):887-901.
33. Kumar H, Varma S. A review on utilization of steel slag in hot mix asphalt. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2021;14(2):232-42.
34. Rondón-Quintana HA, Ruge-Cárdenas JC, Patiño-Sánchez DF, Vacca-Gamez HA, Reyes-Lizcano FA, Muniz de Farias M. Blast furnace slag as a substitute for the fine fraction of aggregates in an asphalt mixture. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2018;30(10):04018244.

# Effect of Using Steel Slag Aggregate in Slurry Seal Mixtures Containing Iron Oxide Pigments

Hassan Ziari <sup>\*1</sup>, Mahdi Zalnezhad<sup>2</sup> and Mohammad Ali Ziari<sup>3</sup>

1- Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Narmak, Tehran, Iran

2- Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Narmak, Tehran, Iran

3- Department of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Email<sup>\*</sup>; *h.ziari@iust.ac.ir*

## Abstract

An efficient approach to road safety coupled with preventive maintenance of asphalt pavements is the application of colored slurry seal, as it improves the road visibility while enhancing the aesthetic aspects of the urban space. Around the globe, application of colored surface treatments on roads has witnessed a growth in recent years, especially in urban areas. This study aims at investigating the feasibility and effectiveness of using electric-arc furnace steel slag as an alternative to natural aggregates in the colored slurry seal mixture design followed by a performance assessment of the resultant mixture. For this purpose, first, characteristics of the aggregate and steel slag were investigated. Next, performance of the designed slurry seal mixture was assessed by testing five different mixtures containing the slag at 0, 10, 20, 30 and 40 wt.%. Evaluation and comparison of the asphalt specimens were performed by conducting 30- and 60-min wet cohesion tests, 60-min wet track abrasion test, loaded wheel-sand adhesion test, and loaded wheel-displacement test according to ASTM D3910. Based on the XRF results, the considered steel slag powder contained a significant amount of calcium oxide (~ 57% of natural aggregate). The high CaO/SiO<sub>2</sub> ratio for the steel slag indicates its alkalinity, which suggests its improved adhesion to bitumen thanks to its rather acidic nature. According to FESEM results, the steel slag material was found to be composed of particles of angular geometry with a rougher surface and higher porosity than natural aggregates, further indicating better slag-bitumen adhesion. Performance assessments indicated superior performance of the steel slag-containing specimens of colored slurry seal. Among the studied mixtures, the one with 40 wt.% steel slag exhibited the best performance, as shown by 27.8 and 37.3% increase in the mixture cohesion upon 30- and 60-min wet cohesion tests, respectively, as compared to the control specimen. Furthermore, 47.7% lower moisture sensitivity and 50.8% and 40% smaller vertical and lateral displacements, respectively, were observed for the slag-containing mixture. The bleeding potential of the mixtures decreased with increasing the steel slag dosage from 0 to 40 wt.%, so that the mixture containing steel slag at 40 wt.% exhibited 23.7% lower bleeding potential. Trying to optimize the asphalt emulsion dosage, it was figured out that the optimal content of asphalt emulsion increases with the added content of steel slag to the mixture. Accordingly, the mixture containing steel slag at 40 wt.% required 1.9% more asphalt emulsion to achieve a given cohesion level within a certain time. Based on the results of this research, in order to improve performance characteristics of colored slurry seal mixtures while observing environmental obligations, it is recommended to use steel slag as an alternative to natural aggregates in this type of surface treatment. Therefore, according to the environmental issues and the limitations of natural resources, it is recommended that steel slag be replaced by natural aggregates up to 40% in the colored slurry mixture. By replacing steel slag, proper adhesion and cohesion between asphalt mixture materials is achieved and its resistance to moisture sensitivity, traffic loading and bleeding is improved.

**Keywords:** Loaded Wheel test, Colored slurry seal, Steel slag, Cohesion, Moisture susceptibility