

بررسی تأثیر استفاده از پسماند صنعتی مس در عملکرد آسفالت حفاظتی لایه نازک

علی زال نژاد، دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد

تهران جنوب

سید عظیم حسینی*، دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد

تهران جنوب

رضا شیرین آبادی، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی معدن- مکانیک سنگ، دانشگاه

آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب

محمد امامی کورنده، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد

تهران جنوب

Email: seyed.azim.hosseini@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۴ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۵

چکیده

تقاضا برای استفاده از پسماندهای صنعتی به دلیل اثرات زیست‌محیطی و محدودیت منابع طبیعی به میزان قابل توجهی افزایش یافته است. یکی از این پسماندها که مشکلات زیست‌محیطی را به همراه داشته، پسماند مس (مس‌بار) (CW) است. این ماده به‌عنوان مواد زائد طبقه‌بندی می‌شود. از این جهت، باعث مشکلات زیست‌محیطی، به‌ویژه دفع پسماند، می‌شود. هدف اصلی این مطالعه، بررسی کاربرد CW در مخلوط آسفالت حفاظتی در مقایسه با سنگدانه معدنی (MA) است. برای این منظور، آزمایش‌های چسبندگی مرطوب، سایش در شرایط مرطوب، بارگذاری چرخ- جابه‌جایی و بارگذاری چرخ- چسبندگی ماسه در پنج ترکیب مختلف شامل CW0+MA100، CW10+MA90، CW20+MA80، CW30+MA70 و CW40+MA60، بر اساس وزن کل سنگدانه، انجام شده است. بر اساس نتایج، مخلوط CW30+MA70 با ۸ درصد قیر باقیمانده، چسبندگی مرطوب، سایش، جابه‌جایی عمودی و جانی را به ترتیب در حدود ۲۳، ۲۲، ۳۹ و ۳۳ درصد بهبود داده است. از مهمترین دلایل جایگزینی سنگدانه توسط مس‌بار، تیزگوشگی و درصد زیاد آهن و سیلیس می‌باشد. به همین دلیل، مطابق آنالیز واریانس، مس‌بار نقش مؤثرتری در چسبندگی و جابه‌جایی مخلوط‌های آسفالتی نسبت به قیر باقیمانده داشته است.

واژه‌های کلیدی: پسماند مس، قیر باقیمانده، چسبندگی، عریان شدگی، جابه‌جایی.

۱. مقدمه

در سال‌های گذشته، مسائل مربوط به محیط‌زیست مورد توجه دولت‌ها قرار گرفته است. میزان محصولاتی که به‌عنوان پسماند صنعتی تولید می‌شوند در حال افزایش بوده و دفع آن‌ها به‌عنوان مواد ضایعاتی، مشکلاتی را برای محیط‌زیست به‌وجود آورده است. پسماند مس^۱ (مس‌باره) از مواد صنعتی بازیافتی به‌شمار می‌رود که سالانه به مقدار قابل توجهی در حین فرآیند تولید مس استخراج می‌شود. برای تولید یک تن مس، حدود سه تن مس‌باره به‌عنوان ماده فرعی تولید می‌شود و در مقیاس جهانی سالانه حدود ۲۴/۶ میلیون تن مس‌باره تولید می‌شود (میتون و ناراسیمهان، ۲۰۱۶؛ آددیران و همکاران، ۲۰۲۱). بر اساس گزارش‌های رسمی، میزان تولید این محصول در کشور ایران ۳۶۰ هزار تن در سال است. این تولید سالانه باعث افزایش تعداد و حجم محل‌های دفن زباله می‌شود. بنابراین، با توجه به مشکلات زیست‌محیطی و کمبود اراضی، دفع این سرباره‌ها توصیه نمی‌شود (نجیمی و همکاران، ۲۰۱۱؛ میرحسینی و همکاران، ۲۰۱۷). به دلیل تولید زیاد مس‌باره و کمبود منابع طبیعی تجدیدناپذیر، استفاده مجدد از این محصول در صنعت روسازی، یکی از راه‌های مؤثر در مدیریت دفع پسماند صنعتی است. در نتیجه، برخی از محققان، استفاده از مس‌باره در مخلوط‌های آسفالتی را به‌عنوان یک راه‌حل مؤثر در کاهش حجم انباشت زباله پیشنهاد داده‌اند. در این تحقیقات، استفاده از مس‌باره به‌عنوان بخشی از سنگدانه، خواص مکانیکی و دوام را بهبود می‌بخشد (راپوسیراس و همکاران، ۲۰۱۶؛ راپوسیراس و همکاران، ۲۰۲۱؛ هو و همکاران، ۲۰۲۲).

یکی از انواع آسفالت‌های مورد استفاده در روسازی، اسلاری‌سیل^۲ با مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی است که به‌عنوان روکش سطحی، طول عمر روسازی‌ها را افزایش می‌دهد (دونگ و همکاران، ۲۰۱۸؛ ثقفی و

همکاران، ۲۰۱۹). اسلاری‌سیل مخلوطی از سنگدانه خوب‌دانه‌بندی شده، قیر امولسیون، آب و فیلر معدنی، با نسبت وزنی مشخص است که برای به حالت اول برگرداندن بافت سطحی، محافظت پیشگیرانه روسازی، پر کردن ترک‌ها، بهبود مقاومت در برابر لغزش و آب‌بندی سطحی، برای جلوگیری از نفوذ رطوبت و هوا به روسازی، استفاده می‌شود (حاج‌الی و همکاران، ۲۰۱۳). با این وجود، در صورتی که در انتخاب مصالح دقت کافی صورت نگیرد خرابی‌های رایج مثل قیرزدگی، شیارشدگی، عریان‌شدگی و شن‌زدگی رخ می‌دهد. از این جهت، یکی از پارامترهای مهم که باید با دقت در مخلوط اسلاری‌سیل انتخاب شود سنگدانه است زیرا بیش از ۸۰ درصد وزن مخلوط را تشکیل می‌دهد. سنگدانه در مخلوط‌های اسلاری‌سیل تأثیر به‌سزایی در حفظ و ارتقای شاخص خدمت‌رسانی روسازی‌ها دارد. استفاده از سنگدانه‌های تیز گوشه با دانه‌بندی مناسب، قدرت روسازی را در برابر بارهای ترافیکی افزایش می‌دهد. به‌طور مثال، برای اجرای اولین پروژه آسفالت حفاظتی در تگزاس آمریکا، از مصالح سنگی مرغوب ایالت میزوری استفاده شد (نگی، ۱۹۸۸؛ عمران خان و عبدالوهاب، ۱۹۹۸؛ زال‌نژاد و حسامی، ۲۰۲۰). مس‌باره به دلیل تیزگوشگی و ساختار چندوجهی، می‌تواند جایگزین مناسبی به‌عنوان سنگدانه در مخلوط‌های آسفالتی در نظر گرفته شود.

زیاری و همکاران (۲۰۱۹) تأثیر جایگزینی سنگدانه‌های سنگ آهک توسط مس‌باره در مقادیر صفر، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد را بر عملکرد آسفالت نیمه‌گرم بررسی کردند. در این پژوهش، مقدار بهینه مس‌باره از نظر پایداری مارشال، مقاومت در برابر شیارشدگی، مدول برجهندگی و انرژی شکست برای مقاومت در برابر ترک، ۲۰ درصد توصیه شده است. علاوه بر این، این درصد مس‌باره به میزان قابل توجهی حساسیت رطوبت را با

²- Slurry seal

¹- Copper waste (CW)

جایگزین کردن فیلرهای پودر سنگ آهک با پودر مس باره، در نسبت‌های مختلف، مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، آزمون‌های مقاومت کششی غیرمستقیم، مدول برجهندگی و خستگی در چهار گروه مخلوط آسفالت گرم حاوی ۶ درصد پودر سنگ، ۴ درصد پودر سنگ + ۲ درصد پودر مس باره، ۲ درصد پودر سنگ + ۴ درصد پودر مس باره و ۶ درصد پودر مس باره، نسبت به وزن کل مصالح، انجام گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده، با افزایش مقدار پودر مس باره، خواص مکانیکی آسفالت گرم بهبود یافت. کومار (۲۰۱۳) به بررسی استفاده از مس باره به عنوان بخشی از ریزدانه در تولید روسازی بتنی پرداخت. با جایگزین کردن مس باره، مقاومت فشاری ۲۸ روزه روسازی بتنی تغییر محسوسی نکرد، ولی مقاومت خمشی ۲۸ روزه افزایش یافت. همچنین، میزان انقباض ناشی از خشک شدن بتن با افزایش مقدار مس باره کم شد. وی استفاده از ۴۰ درصد مس باره را توصیه کرده است.

تأثیر مهم مس باره در بسیاری از انواع آسفالت مورد مطالعه قرار گرفته است. اما تا کنون تحقیقی در مورد اثربخشی مس باره در مخلوط‌های آسفالت حفاظتی لایه نازک، از جمله اسلاری سیل، انجام نشده است. نوآوری مورد استفاده در این پژوهش، جایگزین کردن سنگدانه توسط مس باره در آسفالت اسلاری سیل است. پژوهش حاضر تلاش دارد تا با استفاده از این نوآوری سبب ارتقاء کیفیت آسفالت حفاظتی و کاهش مواد ضایعاتی مس باره گردد. لذا، این پژوهش با مجموعه آزمایش‌های میکروسکوپی و آزمایش‌های عملکردی شامل چسبندگی مرطوب، سایش رطوبتی، چسبندگی ماسه، جابه‌جایی افقی و عمودی، عملکرد آسفالت حفاظتی حاوی مس باره را بررسی می‌کند.

توجه به نتایج آزمایش نسبت مقاومت کششی بهبود می‌بخشد. پاندهیر و همکاران (۲۰۰۵) خواص مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی حاوی مس باره (تا ۳۰ درصد ریزدانه) را مورد مطالعه قرار دادند. گزارش شده است که استفاده از مس باره به عنوان ریزدانه در مخلوط‌های مختلف آسفالت، قفل و بست خوبی را فراهم نموده و در نهایت خواص حجمی و مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی را بهبود می‌بخشد. در دیگر پژوهش، حسن حسام و الجابری (۲۰۱۱) استفاده از مس باره به عنوان بخشی از ریزدانه (تا ۴۰ درصد) را در آسفالت گرم بررسی کردند. اگرچه مقاومت کششی غیرمستقیم با افزایش مس باره کاهش یافت اما نسبت مقاومت کششی در مقایسه با مخلوط شاهد بیشتر بود. مطابق این نتایج، مس باره جایگزین مناسبی به جای سنگدانه‌های ریزدانه طبیعی در مخلوط‌های آسفالتی است. شارما و همکاران (۲۰۲۱)، عملکرد آسفالت ماکادم با دانه‌بندی توپر حاوی صفر، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد مس باره را از طریق آزمایش‌های مدول برجهندگی، نسبت مقاومت کششی، خزش دینامیک و مقاومت در برابر خستگی مورد بررسی قرار دادند. بر اساس بررسی‌های آزمایشگاهی، نتیجه گرفته شد که ریزدانه می‌تواند تا ۱۵ درصد با مس باره در آسفالت ماکادم متراکم جایگزین شده، بدون آن‌که اثر منفی بر مقاومت و دوام مخلوط آسفالتی داشته باشد. بهنود و همکاران (۲۰۱۵) مس باره و سنگدانه بتن بازیافتی را به عنوان جایگزین بخشی از سنگدانه‌ها در مخلوط‌های بازیافتی سرد استفاده کردند. در این پژوهش، آزمایش‌های استحکام مارشال، مقاومت کششی غیرمستقیم، مدول برجهندگی، حساسیت به رطوبت و آزمایش خزش دینامیک برای ارزیابی خصوصیات مکانیکی مخلوط‌ها انجام شد. مشخص شد که مخلوط‌های حاوی مس باره به دلیل قفل و بست بهتر و خواص فیزیکی و مکانیکی برتر، نتایج بهتری داشته است. مدرس و علی‌نیا بنگر (۲۰۱۹) آسفالت گرم را توسط

۲. مواد و مصالح

۱-۲. مصالح سنگی و مس باره

محدوده دانه‌بندی در اندازه صفر تا ۵ میلی‌متر بوده که در جدول ۱ قابل مشاهده است. مس باره مورد استفاده در این پژوهش به صورت وزنی جایگزین بخشی از مصالح سنگی شده است. جزئیات نام‌گذاری مخلوط‌های ساخته شده و ویژگی سنگدانه^۱ و مس باره مورد استفاده در این پژوهش، به ترتیب در جداول ۲ و ۳ نشان داده شده است. مطابق جدول ۳، مس باره به دلیل تیزگوشگی زیاد، زاویه اصطکاک بزرگ‌تری نسبت به سنگدانه طبیعی دارد.

در این پژوهش، مصالح سنگی کارخانه چالدران مازندران و مس باره کارخانه مس سرچشمه کرمان مورد استفاده واقع شده است. از نظر دانه‌بندی، دانه‌بندی نوع II برای ساخت مخلوط‌های اسلاری سیل استفاده گردید که مطابق با دستورالعمل ISSA A105 است (ISSA A105, 2020).

جدول ۱. دانه‌بندی مصالح سنگی اسلاری سیل

درصد عبور کرده از الک		اندازه الک
محدوده نوع II دستورالعمل ISSA A105	حد وسط دانه‌بندی نوع II دستورالعمل ISSA A105	
۱۰۰-۹۰	۹۵	۴/۷۵ میلی‌متر (شماره ۴)
۹۰-۶۵	۷۷/۵	۲/۳۶ میلی‌متر (شماره ۸)
۷۰-۴۵	۵۷/۵	۱/۱۸ میلی‌متر (شماره ۱۶)
۵۰-۳۰	۴۰	۶۰۰ میکرون (شماره ۳۰)
۳۰-۱۸	۲۴	۳۰۰ میکرون (شماره ۵۰)
۲۱-۱۰	۱۵/۵	۱۵۰ میکرون (شماره ۱۰۰)
۱۵-۵	۱۰	۷۵ میکرون (شماره ۲۰۰)

جدول ۲. جزئیات مخلوط‌های مورد مطالعه در این پژوهش

نوع مخلوط	درصد مس باره (بر حسب وزن کل سنگدانه)	درصد سنگدانه (بر حسب وزن کل سنگدانه)
CW0	۰	۱۰۰
CW10	۱۰	۹۰
CW20	۲۰	۸۰
CW30	۳۰	۷۰
CW40	۴۰	۶۰

جدول ۳. خصوصیات مصالح سنگی

آزمایش‌ها	استاندارد	سنگدانه	مس باره	مشخصات مطابق ISSA A105
وزن مخصوص (gr/cm ³)	ASTM C128	۲/۶۵	۳/۵۷	-
درصد جذب آب	ASTM C127	۱/۴۷	۱/۲۶	-
ارزش ماسه‌ای مصالح ریزدانه و خاک‌ها	ASTM D2419	۸۲	۷۱	حداقل ۴۵٪

¹ - Mineral aggregate (MA)

سلامت مصالح با سولفات سدیم (%)	ASTM C88	۲/۱	۰/۹	حداکثر ۱۵٪
مقاومت سایشی در ماشین لس آنجلس (%)	ASTM C131	۲۰/۸	۱۵/۲	حداکثر ۳۵٪
زاویه اصطکاک داخلی	ASTM D7181	۴۲	۵۱	-

۲-۲. قیر امولسیون کاتیونی

نژاد و حسامی، ۲۰۲۰؛ زیاری و همکاران، ۲۰۲۰؛ کی-منش و همکاران، ۲۰۲۱)، قیر به مقدار ۵۸ درصد در دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس با محلول صابونی حاوی آب، اسید HCl و امولسیفایر در دستگاه امولسیون ساز آزمایشگاهی با سرعت ۲۸۴۰ دور بر دقیقه مورد اختلاط قرار گرفت. ویژگی‌های این قیر امولسیون پلیمری در جدول ۴ ارائه شده است.

در این تحقیق، برای تهیه قیر امولسیون کاتیونی، از قیر با رده نفوذ ۶۰-۷۰ (شرکت نفت پاسارگاد، ایران) و امولسیفایر کاتیونی (CECA، فرانسه) استفاده گردید. مطابق استاندارد ASTM D2397 و پژوهش‌های صورت گرفته توسط دیگر محققان (ASTM D2397، ۲۰۱۷؛ زال

جدول ۴. مشخصات قیر امولسیونی کاتیونی

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

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

۲-۳. سیمان پرتلند و آب

در این پژوهش، از سیمان پرتلند به میزان یک درصد به عنوان عامل چسبندگی بین مصالح سنگی و تسریع زمان گیرش و عمل آوری در مخلوط‌های آسفالتی استفاده گردید. همچنین، به منظور بهبود اندود، پوشش و کارایی مخلوط‌ها، آب فاقد املاح و مواد مضر نظیر سولفات‌ها و نمک‌ها به کار گرفته شد. لازم به ذکر است که آب مورد استفاده در این پژوهش دارای درجه اسیدی/قلیایی ۷ بود.

۳. برنامه آزمایشگاهی و روش انجام

آزمایش‌های آسفالتی

۳-۱. برنامه آزمایشگاهی

در بخش اول آزمایش‌ها، آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM^۱) و آزمایش فلورسانس اشعه ایکس (XRF^۲) برای مقایسه سطحی و شناسایی اکسیدهای فلزی و اجزای تشکیل دهنده مصالح انجام شد. سپس در فرایند طرح اختلاط نمونه‌های آسفالت

^۱ - Field Emission Scanning Electron Microscopy

^۲ - X-Ray Fluorescence

جابه‌جایی با دستگاه چرخ بارگذاری شده، مطابق دستورالعمل ISSA A105 با رعایت مقادیر مجاز جدول ۶ انجام شده است. لازم به ذکر است که مقدار بهینه قیر مطابق دستورالعمل ISSA TB111 توسط نتایج آزمایش سایش در شرایط مرطوب و آزمایش چسبندگی ماسه مشخص می‌شود (ISSA, 2017b).

حفاظتی، مقادیر اولیه قیر باقی‌مانده، فیلر معدنی و آب نسبت به وزن خشک مصالح سنگی مطابق جدول ۵ تعیین می‌گردد. در ادامه، برای دستیابی به طرح اختلاط مناسب و ارزیابی عملکرد مخلوط‌های آسفالت حفاظتی، آزمایش چسبندگی مرطوب، آزمایش سایش در شرایط مرطوب، آزمایش چسبندگی ماسه و ارزیابی میزان

جدول ۵. حدود مواد تشکیل‌دهنده آسفالت حفاظتی (ISSA A105, 2020)

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

جدول ۶. مقادیر مجاز آزمایش‌های آسفالت حفاظتی (ISSA A105, 2020)

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

۲-۳. آزمایش‌ها

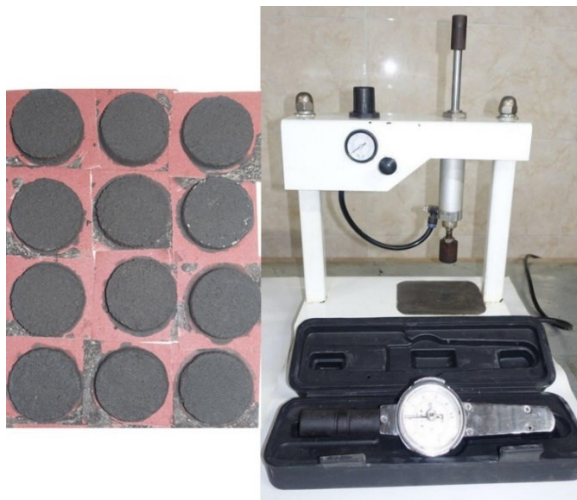
۱-۲-۳. آزمایش چسبندگی مرطوب

مقدار چسبندگی اولیه و زمان عمل‌آوری جهت بازگشایی ترافیک با استفاده از آزمایش چسبندگی مرطوب مطابق دستورالعمل ISSA TB139 تعیین گردید (ISSA, 2017e). این آزمایش شامل ساخت مخلوط و اندازه‌گیری گشتاور آن بعد از ۳۰ و ۶۰ دقیقه عمل‌آوری در دمای ۲۵ درجه سلسیوس با استفاده از دستگاه آزمایش چسبندگی نشان داده شده در شکل ۱ است. مطابق دستورالعمل، حداقل مقادیر تعیین‌شده چسبندگی جهت سنجش زمان ترافیک برای بازگشایی برای زمان‌های ۳۰ و ۶۰ دقیقه به ترتیب ۱۲ و ۲۰ کیلوگرم- سانتی‌متر مربع است.

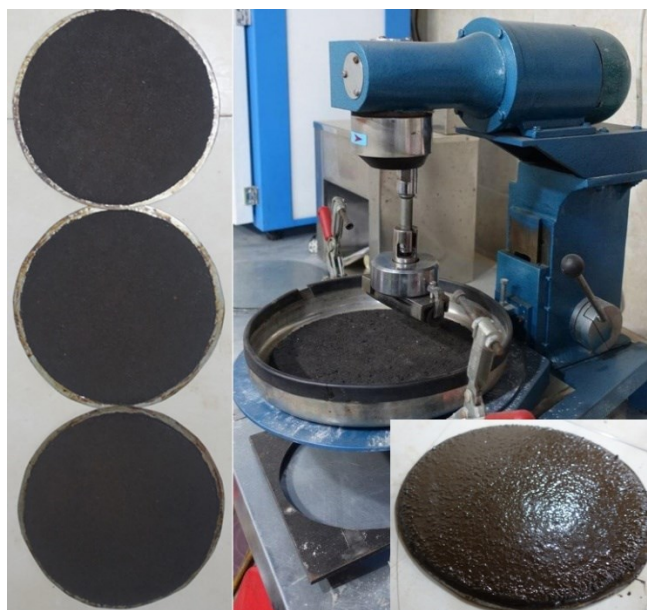
۲-۲-۳. آزمایش سایش در شرایط مرطوب

از دستگاه آزمایش سایش در شرایط مرطوب مطابق شکل ۲، جهت تعیین حداقل مقدار قیر باقی‌مانده و ارزیابی مقاومت در برابر سایش، برای جلوگیری از خرابی شن‌زدگی، مطابق دستورالعمل ISSA TB100 استفاده گردید (ISSA, 2017a). در این آزمایش، مخلوط آسفالتی به ضخامت ۶ میلی‌متر و قطر ۲۸۰ میلی‌متر در دمای ۶۰ درجه سلسیوس عمل‌آوری می‌شود. مخلوط عمل‌آوری شده به مدت یک ساعت در آب ۲۵ درجه سلسیوس غوطه‌ور می‌گردد. سپس، نمونه آسفالتی، به روش چرخشی، با استفاده از یک نوار لاستیکی دوار، تحت عمل سایش در شرایط مرطوب به مدت ۳۰۰ ثانیه قرار می‌گیرد. نمونه سایش یافته تا رسیدن به وزن ثابت خشک

می شود. مقدار از دست رفتگی سنگدانه (مقاومت سایش رطوبتی) مطابق رابطه (۱) تعیین می گردد.



شکل ۱. دستگاه آزمایش چسبندگی و نمونه های آن



شکل ۲. دستگاه آزمایش سایش در شرایط مرطوب و نمونه های آن

۳-۲-۳. آزمایش چسبندگی ماسه و ارزیابی میزان جابه جایی توسط دستگاه چرخ بارگذاری شده در این پژوهش، از دستگاه بارگذاری چرخ مطابق شکل ۳، برای آزمایش چسبندگی ماسه و ارزیابی مقدار جابه-جایی افقی و عمودی استفاده گردید. آزمایش چسبندگی

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

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

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

همچنین، در آزمایش تعیین مقدار جابه‌جایی با استفاده از چرخ بارگذاری مطابق دستورالعمل ISSA TB147، نمونه‌های عمل‌آوری شده تحت ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری چرخ ۵۶۷ کیلوگرمی متراکم شدند (ISSA, 2017d). عرض و ارتفاع نمونه در مسیر چرخ، قبل و بعد از تراکم، جهت تعیین میزان جابه‌جایی افقی و عمودی اندازه‌گیری می‌گردد. در نهایت، میزان جابه‌جایی‌های افقی و عمودی مطابق روابط (۳) و (۴) تعیین می‌گردد. مقدار حداکثر جابه‌جایی افقی و عمودی مطابق استاندارد به ترتیب ۵ و ۱۰ درصد است.

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

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

که، VD_{ba} عمق جابه‌جایی عمودی (میلی‌متر)، VD_a ضخامت نمونه قبل از تراکم (میلی‌متر)، VD میزان جابه‌جایی عمودی (%). LD_b عرض نمونه قبل از تراکم (میلی‌متر)، LD_a عرض نمونه بعد از تراکم (میلی‌متر) و LD میزان جابه‌جایی جانبی (%). است.

ماسه مطابق دستورالعمل ISSA TB109، جهت تعیین حداکثر قیر و میزان مقاومت مخلوط در مقابل خرابی قیرزدگی تحت بار ترافیک سنگین به‌کار می‌رود (ISSA, 2017c). در این آزمایش، نمونه‌ها تحت ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری چرخ ۵۶۷ کیلوگرمی، متراکم می‌گردند. سپس، نمونه وزن شده و وزن اندازه‌گیری شده ثبت می‌گردد. مقداری تعیین شده از ماسه اتاوا با دانه‌بندی مشخص در گرمخانه با دمای ۸۲ درجه سلسیوس قرار گرفته و سپس ماسه داغ به‌صورت یکنواخت روی نمونه پخش می‌شود. در این حالت، بارگذاری به میزان ۱۰۰ سیکل، مشابه حالت قبل، برای تراکم نمونه انجام می‌گردد. در ادامه، نمونه از جای مورد نظر خارج شده و سپس ماسه‌هایی که به سطح نمونه نچسبیده‌اند با ضرباتی آرام جدا می‌شوند. نمونه دوباره وزن شده و ثبت می‌گردد. اختلاف بین دو وزن اندازه‌گیری شده به‌عنوان مقدار ماسه‌ای که چسبیده است، گزارش می‌گردد. بدین ترتیب، در این شیوه، مقدار قیر موجود در مخلوط به‌صورت غیرمستقیم اندازه‌گیری می‌شود (ISSA, 2017c). رابطه (۲) برای محاسبه میزان قیرزدگی (چسبندگی ماسه) هر یک از مخلوط‌ها استفاده می‌شود.

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



شکل ۳. دستگاه آزمایش چرخ بارگذاری و نمونه‌های آن

۴. نتایج و بحث

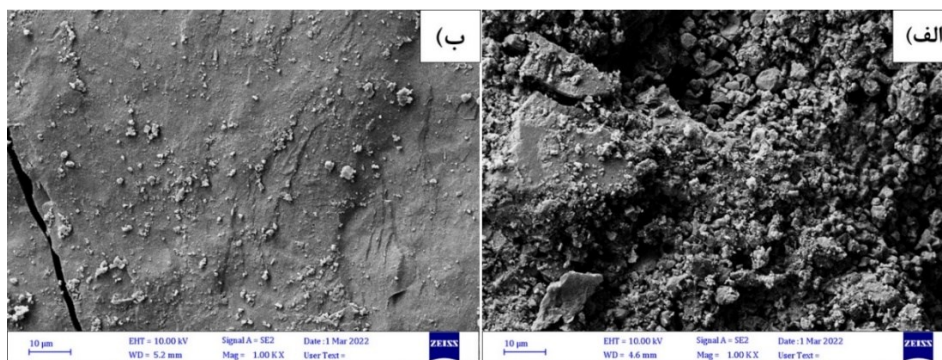
۴-۱. مطالعات ریزساختاری

آنالیز XRF در جدول ۷ نشان می‌دهد که SiO_2 ، Fe_2O_3 و Al_2O_3 اجزای اصلی مس‌باره هستند که به ترتیب به میزان ۵۳/۶، ۲۴/۷ و ۳/۷ درصد بیشتر از مصالح سنگی است. در واقع، SiO_2 و Al_2O_3 چسبندگی قیر به سنگدانه در مخلوط‌های آسفالتی را افزایش می‌دهند. از این جهت، سختی و استحکام مکانیکی مخلوط‌ها را بهبود می‌دهند (مونیاندی و همکاران، ۲۰۱۳؛ شر تارکن و لیائو، ۲۰۲۲). همچنین، Fe_2O_3 موجود در مصالح معدنی نقش مؤثری

در بهبود خواص الکتریکی و مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی ایفا می‌کند (عربانی و میرعبدالعظیمی، ۲۰۱۱؛ اولاه و همکاران، ۲۰۲۱). از سوی دیگر، مطابق با تصویرهای FESEM مس‌باره و سنگدانه در شکل ۴، ذرات سنگدانه نسبت به مس‌باره دارای شکلی نامنظم و سطحی زبر است که این امر می‌تواند خاصیت جذب و چسبندگی بهتری را به قیر به همراه داشته باشد. بنابراین، جایگزینی مس‌باره نیابستی به صورت کامل با سنگدانه انجام شود تا بتوان با ترکیب ویژگی‌های سنگدانه با سطح زبر و مس‌باره تیز گوشه، مخلوط آسفالتی با کیفیت مورد نظر ساخته شود.

جدول ۷. ترکیب شیمیایی سنگدانه و مس‌باره

SO ₃	Cu	MnO	K ₂ O	TiO ₂	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	نوع مواد
۰/۳۸	-	۰/۰۳	۰/۳۱	۰/۲۱	۰/۰۵	۱/۲۷	۷۵/۳۷	۱۳/۰۹	۱/۳۱	۷/۱۸	سنگدانه
۲/۳۱	۰/۵۷	۰/۰۸	۱/۴۷	۰/۵۶	۰/۶۷	۵۴/۸۲	۱/۲۰	۱/۰۷	۵/۰۳	۳۱/۸۶	مس‌باره



شکل ۴. عکس‌های FESEM: الف) سنگدانه و ب) مس‌باره

۴-۲. نتایج عملکرد مخلوط‌های آسفالت حفاظتی

لایه نازک

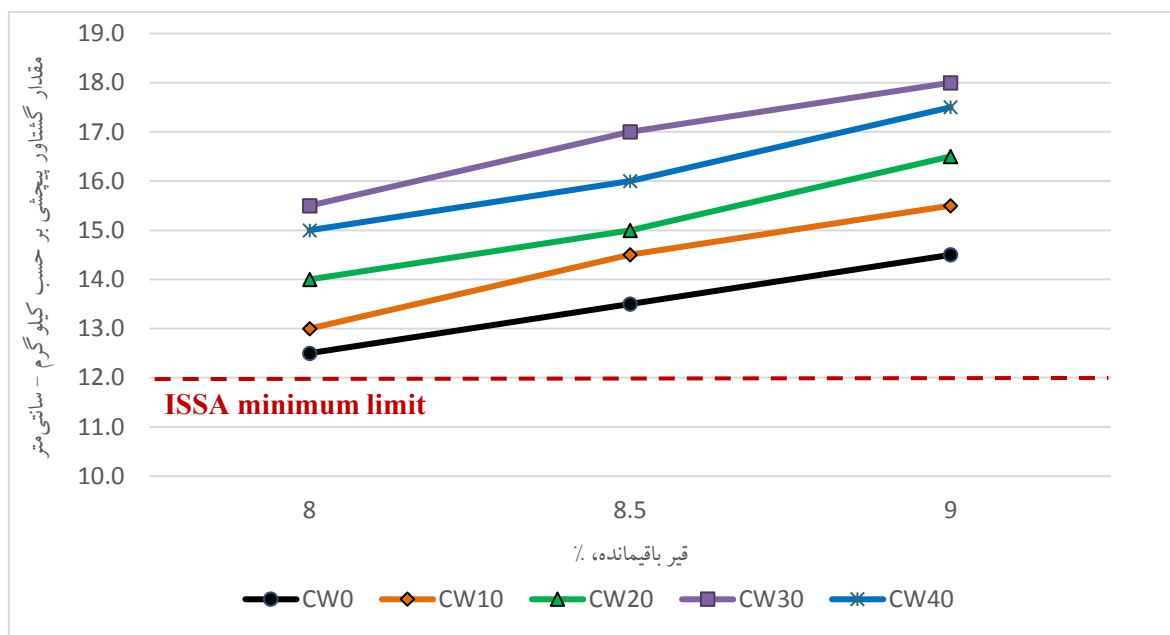
۴-۲-۱. آزمایش چسبندگی مرطوب

جهت بررسی گیرش و مقاومت لازم جهت بازگشایی ترافیک در زمان‌های ۳۰ و ۶۰ دقیقه، مقدار مقاومت چسبندگی مرطوب مخلوط‌های حاوی درصد‌های مختلف مس‌باره تعیین شده است. مطابق شکل‌های ۵ و ۶، مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۸ درصد قیر باقیمانده، حداقل مقاومت لازم چسبندگی مرطوب در زمان‌های ۳۰

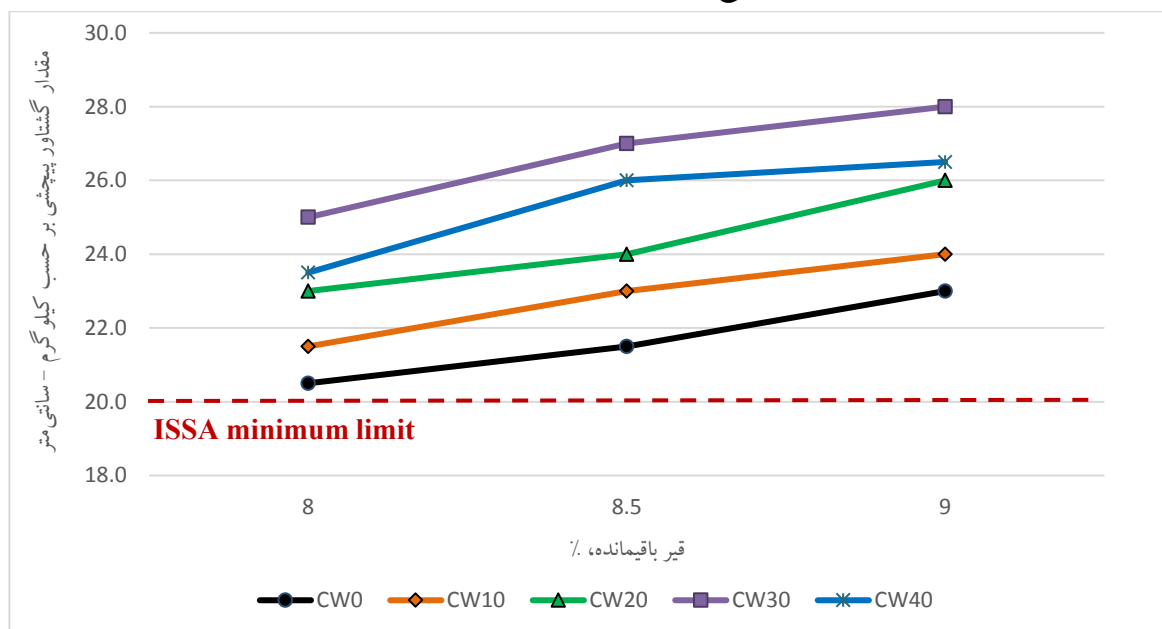
و ۶۰ دقیقه را کسب کرده‌اند. با افزایش درصد قیر از ۸ به ۹ درصد، مقاومت در برابر چسبندگی بهبود یافته است. از سوی دیگر، از منظر مقدار مس‌باره، مقاومت و گیرش لازم جهت بازگشایی ترافیک نمونه‌های اصلاح‌شده با مس‌باره از نمونه شاهد بیشتر بوده است. به عنوان نمونه، در قیر باقی‌مانده ۸ درصد، مخلوط‌های CW20، CW10، CW30 و CW40 نسبت به نمونه شاهد (CW0) به ترتیب موجب افزایش چسبندگی در مدت‌زمان ۳۰ دقیقه به میزان ۴، ۱۲، ۲۴ و ۲۰ درصد و در مدت‌زمان یک

مطابق این آنالیز، مقادیر Al_2O_3 و SiO_2 ، Fe_2O_3 موجود در مس باره بیشتر از مصالح سنگی است که با ایجاد خاصیت چسبندگی بیشتر، مصالح سنگی را با پیوندهای قوی تری در کنار هم نگه داشته است.

ساعت به میزان ۵، ۱۲، ۲۲ و ۱۵ درصد شده است. در مجموع، بیشترین مقدار گشتاور پیچشی (متناظر با چسبندگی) در مقادیر قیر ۸، ۸/۵ و ۹ درصد، متعلق به نمونه حاوی ۳۰ درصد مس باره بوده است. نتایج آزمایش چسبندگی با نتایج آنالیز XRF مس باره نیز مطابقت دارد.



شکل ۵. نتایج آزمایش چسبندگی مرطوب در ۳۰ دقیقه



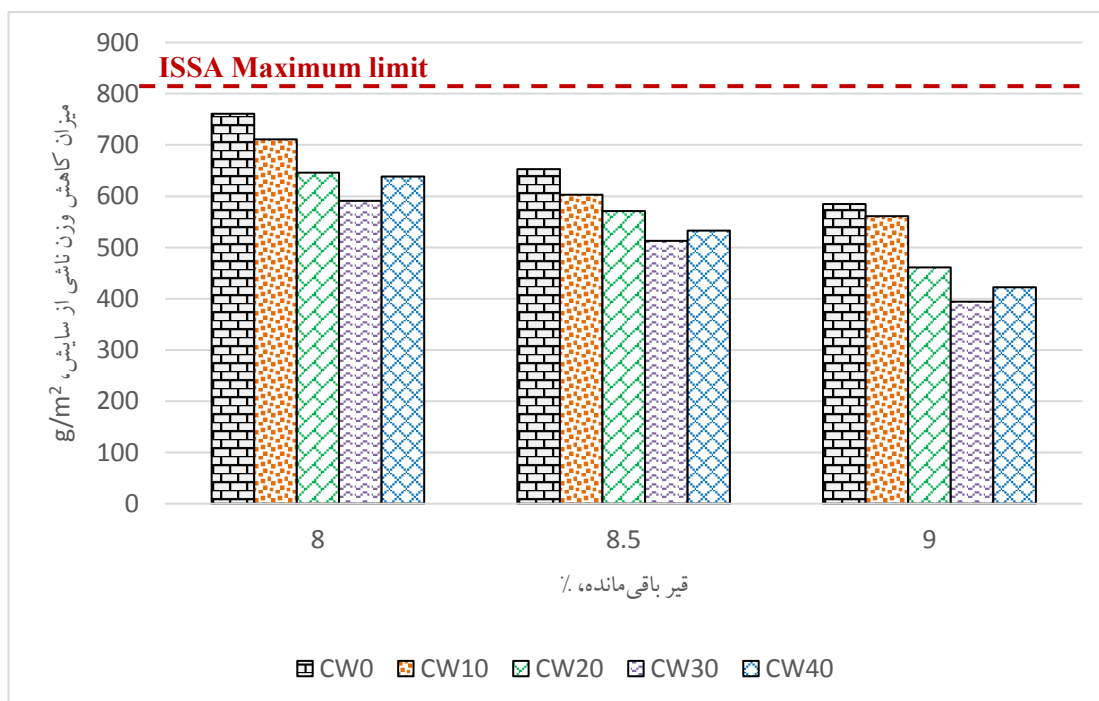
شکل ۶. نتایج آزمایش چسبندگی مرطوب در ۶۰ دقیقه

۴-۲-۲. آزمایش سایش در شرایط مرطوب

در شکل ۷، نتایج آزمایش سایش در شرایط مرطوب در مدت زمان یک ساعت غوطه‌وری جهت بررسی حساسیت رطوبتی و تعیین حداقل قیر مورد نیاز مخلوط‌های آسفالتی مطابق دستورالعمل ISSA TB100 نشان داده شده است. نتایج این شکل نشان می‌دهد که همه مخلوط‌های اصلاح شده با مس‌باره در محدوده مجاز استاندارد (حداکثر سایش ۸۰۷ گرم بر متر مربع) قرار دارند.

مطابق شکل ۷، افزایش درصد مس‌باره باعث کاهش از دست‌رفتگی سنگدانه در مخلوط‌های آسفالتی شده است. به‌طور مثال، در ۸ درصد قیر باقیمانده، مخلوط‌های CW10، CW20، CW30 و CW40 به ترتیب به مقدار ۷، ۱۵، ۲۲ و ۱۶ درصد، عملکرد سایش نمونه شاهد (CW0) را بهبود داده‌اند. از سوی دیگر، افزایش درصد قیر، اثر مثبتی بر عملکرد سایشی همه مخلوط‌های آسفالتی داشته است. به‌طوری که کمترین مقدار از دست‌رفتگی سنگدانه

متعلق به مخلوط‌های حاوی ۹ درصد قیر باقیمانده است. مطابق این شکل، نمونه CW30 در همه درصدهای قیر، به‌ویژه در قیر باقیمانده ۹ درصد، عملکرد سایشی بهتری نسبت به سایر مخلوط‌ها داشته است. آپازا آپازا و همکاران (۲۰۲۱) نیز نشان دادند که ضایعات سنگ آهن حاوی درصد زیاد آهن (Fe) و سیلیس (Si) به‌عنوان جایگزین بخشی از سنگدانه، سبب بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در برابر سایش رطوبتی در مدت زمان یک ساعت شده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که مخلوط حاوی مس‌باره به دلیل درصد بیشتر آهن و سیلیس از اتصال و چسبندگی مناسبی با قیر برخوردار بوده و همچنین به لحاظ فیزیکی به دلیل تیزگوشه بودن موجب درگیری و قفل و بست شدن ذرات به یکدیگر شده و باعث شده تا ذرات در شرایط مرطوب در برابر سایش از خود مقاومت خوبی نشان دهند (کی-منش و همکاران، ۲۰۲۱). البته بایستی مقدار بهینه مس‌باره به‌منظور به حداقل رساندن پدیده عریان‌شدگی تعیین گردد.



شکل ۷. نتایج آزمایش سایش در شرایط مرطوب در یک ساعت برای هر یک از مخلوط‌های اسلاری سیل

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

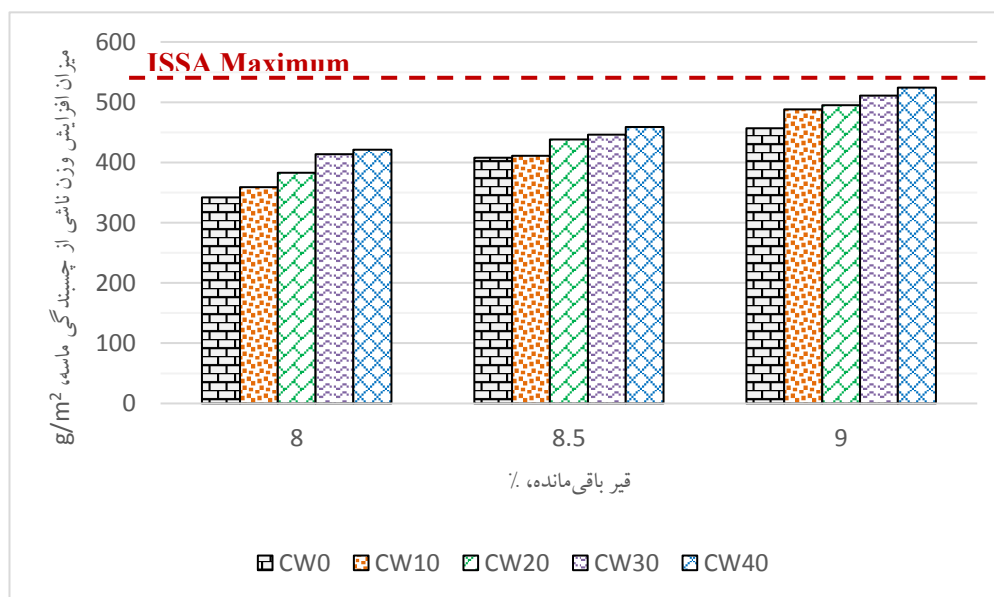
ماسه

مس باره رابطه مستقیم دارد. لذا، در صورت استفاده از مس باره، بهتر است مقدار قیر مخلوطها کاهش یابد.

همانطور که پیشتر اشاره شد، مقدار قیرزدگی مخلوطهای آسفالت حفاظتی با آزمایش چرخ بارگذاری شده- چسبندگی ماسه مطابق دستورالعمل ISSA TB109 قابل ارزیابی است. مطابق نتایج نمودار شکل ۸، افزایش مس باره، مقدار چسبندگی ماسه را نسبت به نمونه شاهد افزایش می دهد. به طور مثال، در قیر ۸ درصد، مقدار چسبندگی در نمونه های CW10، CW20، CW30 و CW40 نسبت به نمونه شاهد (CW0) به ترتیب ۵، ۱۲، ۲۱ و ۲۳ درصد افزایش یافته است. ولی با این وجود، مقدار چسبندگی ماسه در مخلوطهای حاوی مس باره از حد مجاز آیین نامه فراتر نمی رود. افزایش مقدار قیرزدگی ناشی از افزایش سرباره ها و ضایعات بازیافتی در مخلوطهای آسفالتی در دیگر پژوهش ها نیز اشاره شده است (آپازا آپازا و همکاران، ۲۰۲۱؛ کی منش و همکاران، ۲۰۲۱). نکته دیگری که از این شکل دریافت می شود آن است که با افزایش قیر از ۸ به ۹ درصد، قیرزدگی همه مخلوطها به صورت غیرخطی افزایش می یابد. بنابراین، به طور کلی، قیرزدگی مخلوطها با مقدار درصد قیر و

۴-۲-۴. تعیین مقدار بهینه قیر باقیمانده

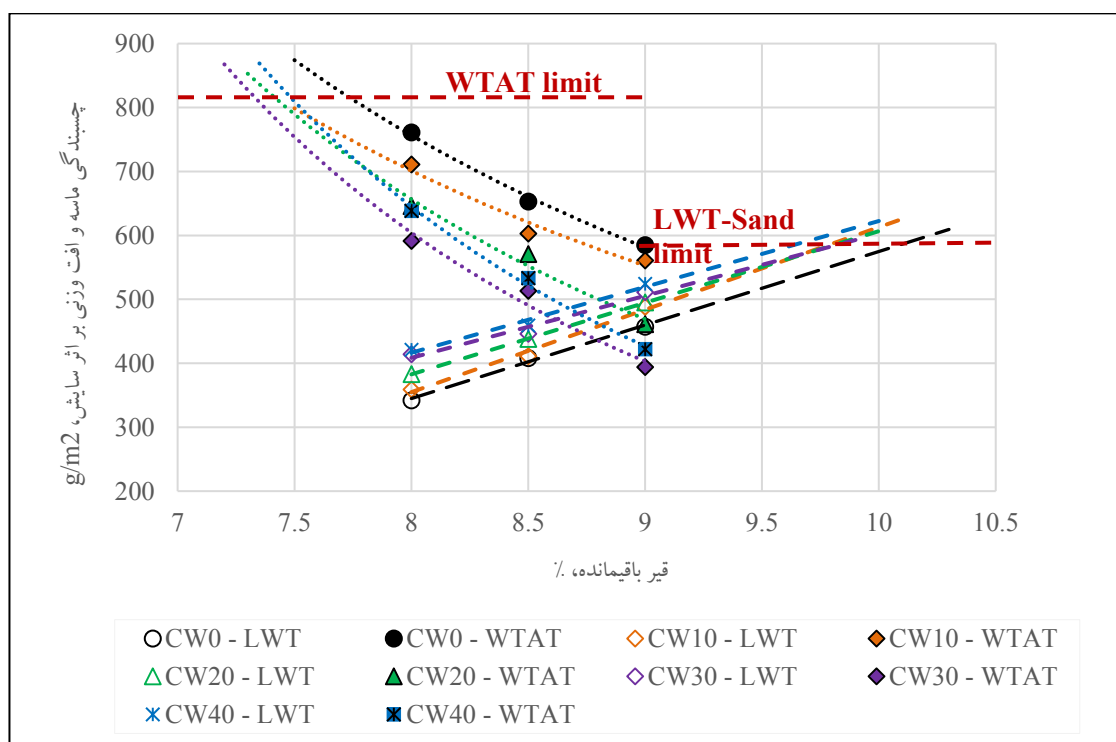
با بررسی نتایج آزمایش های چرخ بارگذاری شده - چسبندگی ماسه و سایش در شرایط مرطوب، محدوده مجاز قیر باقیمانده و مقدار بهینه آن مطابق ISSA TB111 به دست می آید (ISSA, 2017b). نمودار شکل ۹، حاصل تلفیق آزمایش چرخ بارگذاری- چسبندگی ماسه و آزمایش سایش در شرایط مرطوب است. البته، مقادیر عددی این محدوده مجاز و بهینه قیر باقیمانده به صورت جداگانه در جدول ۸ ارائه شده است. این نتایج نشان داد که با افزایش مقدار مس باره، محدوده مجاز و درصد قیر بهینه کاهش می یابد. به طوری که مقدار قیر بهینه مخلوطهای CW10، CW20، CW30 و CW40 نسبت به نمونه شاهد (CW0) به ترتیب ۰/۹، ۱/۴، ۳/۱ و ۶/۱ درصد کاهش یافته است. مطابق این جدول، کمترین مقدار قیر بهینه متعلق به مخلوطهای اصلاح شده با سرباره CW30 و CW40 است. کاهش مقدار قیر بهینه در مخلوطهای حاوی مس باره به دلیل تیزگوشگی و درصد بالای آهن و سیلیس سرباره مس است.



شکل ۸. چسبندگی ماسه (پتانسیل قیرزدگی) مخلوطهای اسلاری سیل در آزمایش چرخ بارگذاری- چسبندگی ماسه

جدول ۸. محدوده مجاز قیر باقی مانده و درصد بهینه آن برای مخلوط‌ها

نوع مخلوط	حداقل مقدار قیر باقیمانده به دست آمده از آزمایش سایش (%)	حداکثر مقدار قیر باقیمانده به دست آمده از چسبندگی ماسه (%)	دامنه قابل قبول قیر باقیمانده (%)	مقدار بهینه قیر باقیمانده (%)
CW0	۷/۷۸	۱۰/۳۳	۱۰/۳۳- ۷/۷۸	۹/۰۶
CW10	۷/۳۵	۹/۸۵	۹/۸-۸۵/۱۱	۸/۹۸
CW20	۷/۴۴	۹/۸۰	۹/۸-۸/۰۶	۸/۹۳
CW30	۷/۳۸	۹/۶۵	۹/۷-۶۵/۹۱	۸/۷۸
CW40	۷/۵۲	۹/۳۸	۹/۳۸- ۷/۶۴	۸/۵۱



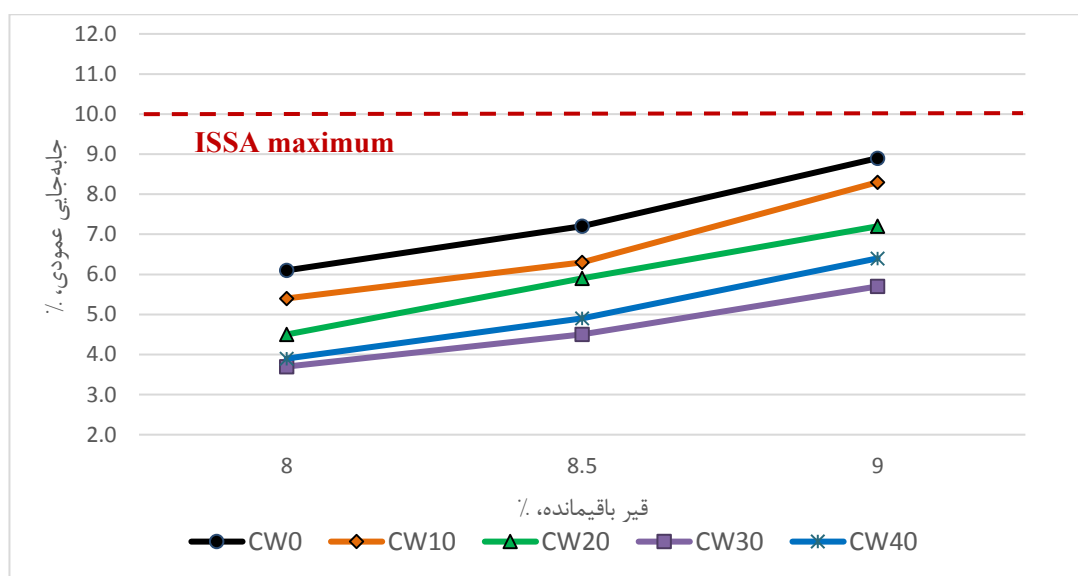
شکل ۹. ترکیب نتایج آزمایش سایش در شرایط مرطوب در مدت زمان یک ساعت و آزمایش چرخ بارگذاری شده- چسبندگی ماسه

درصد به ۹ درصد این نرخ جابه‌جایی به ۲۳ درصد رسیده است. این بدان معنا است که تعیین میزان قیر مناسب برای کاهش میزان جابه‌جایی‌ها امری لازم و ضروری است. همچنین، از منظر مس‌باره، با افزایش میزان مس‌باره تا ۳۰ درصد، از جابه‌جایی عمودی و جانبی کاسته شده، ولی پس از آن با افزایش مس‌باره از ۳۰ درصد به ۴۰ درصد، جابه‌جایی مخلوط‌ها افزایش پیدا می‌کند. بنابراین، تعیین مقدار بهینه مس‌باره نیز همانند مقدار قیر مناسب برای کاهش میزان جابه‌جایی‌ها امری ضروری است. با این وجود، نمونه‌های حاوی مس‌باره عملکرد بهتری نسبت

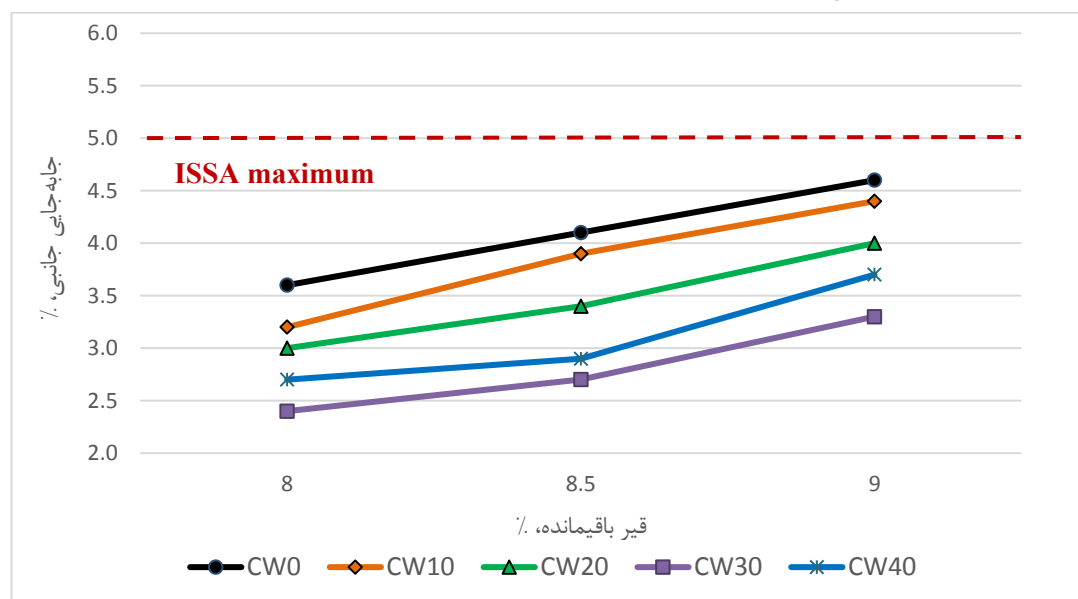
۴-۲-۵. آزمایش چرخ بارگذاری شده- جابه‌جایی مقاومت مخلوط‌های آسفالت حفاظتی در برابر جابه‌جایی ناشی از بارگذاری ترافیک با استفاده از آزمایش چرخ بارگذاری شده مطابق دستورالعمل ISSA TB147 در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. از نظر قیر باقیمانده، افزایش آن از ۸ درصد تا ۹ درصد باعث افزایش جابه‌جایی عمودی و افقی مخلوط‌ها می‌شود. مطابق این نتایج، جابه‌جایی افقی و عمودی مخلوط‌ها با افزایش قیر از ۸ درصد به ۸/۵ درصد به‌طور میانگین ۱۸ درصد رشد داشته است. این در حالی است که با افزایش قیر از ۸/۵

از جابه‌جایی هستند، می‌توان پس از تأمین قیر کافی، احتمال وقوع این نوع خرابی را با افزودن مس‌بار به مقدار بهینه، به میزان مؤثری کاهش داد. زیاری و همکاران (۲۰۱۹) مس‌بار را تا ۴۰ درصد به‌عنوان سنگدانه در آسفالت نیمه‌گرم جایگزین کرده‌اند. مطابق این پژوهش، جایگزینی مس‌بار تا مقدار بهینه، سبب بهبود مقاومت شیارشدگی در آسفالت نیمه‌گرم می‌شود که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد.

به نمونه شاهد داشته‌اند. به‌عنوان نمونه، در قیر باقی‌مانده ۸ درصد، مخلوط‌های CW0، CW20، CW30 و CW40 نسبت به نمونه شاهد CW0، موجب بهبود عملکرد جابه‌جایی عمودی به ترتیب به میزان ۱۲، ۲۶، ۳۹ و ۳۶ درصد و بهبود عملکرد جابه‌جایی افقی به ترتیب به میزان ۱۱، ۱۷، ۳۳ و ۲۵ درصد شده‌اند. در واقع، تیزگوشگی بیشتر مس‌بار نسبت به سنگدانه، منجر به افزایش اصطکاک و در نتیجه مقاومت زیادتر در برابر جابه‌جایی شده است. لذا، در مخلوط‌هایی که مستعد خرابی ناشی



شکل ۱۰. میزان جابه‌جایی عمودی مخلوط‌ها در درصدهای مختلف قیر



شکل ۱۱. میزان جابه‌جایی افقی مخلوط‌ها در درصدهای مختلف قیر

۵. تحلیل آماری

مس باره در آزمایش چسبندگی ۳۰ و ۶۰ دقیقه و آزمایش جابه‌جایی عمودی و جانبی، عامل تأثیرگذارتری نسبت به درصد قیر باقی‌مانده بوده است. این موضوع از پارامتر Partial eta squared در تحلیل واریانس قابل مشاهده است که به ترتیب مقادیر ۹۵/۸ و ۹۵/۲، ۹۴/۹ و ۹۱/۵ درصد را به دلیل مقدار مس باره در مخلوط کسب کردند. بنابراین، در این آزمایش‌ها، بهبود نوع مخلوط با استفاده از جایگزین کردن بخشی از سنگدانه توسط مس باره، منجر به نتایج بهتری نسبت به تغییر مقدار قیر باقیمانده خواهد شد. این در حالی است که مقدار قیر باقی‌مانده در آزمایش سایش در شرایط مرطوب و آزمایش چسبندگی ماسه عامل تأثیرگذارتری نسبت به نوع مخلوط بوده است که به ترتیب مقادیر ۹۸/۴ و ۹۷/۶ درصد را کسب کردند.

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مخلوط‌های آسفالت حفاظتی حاوی صفر، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد مس باره به صورت وزنی جایگزین مصالح سنگی شده است. در این راستا، ابتدا مشخصات فیزیکی و شیمیایی با استفاده از آزمایش‌های XRF و FESEM و سپس ویژگی‌های گیرش، سایش، قیرزدگی و جابه‌جایی به ترتیب با آزمایش‌های چسبندگی مرطوب، سایش در شرایط مرطوب، چرخ بارگذاری شده- چسبندگی ماسه و چرخ بارگذاری شده- جابه‌جایی ارزیابی شدند. در نهایت، خصوصیات مکانیکی و عملکردی مخلوط‌های اصلاح‌شده با مس باره، توسط نرم‌افزار SPSS تحت آنالیز واریانس قرار گرفتند. بررسی و تحلیل نتایج آزمایش‌های انجام شده به صورت زیر جمع‌بندی می‌شود:

- نتایج آزمایش چسبندگی مرطوب در زمان‌های ۳۰ و ۶۰ دقیقه نشان داد که با افزایش مس باره، به دلیل درصد زیاد SiO_2 ، Fe_2O_3 و Al_2O_3 ، مقدار چسبندگی مخلوط‌های آسفالتی افزایش خواهد یافت. در این راستا، مخلوط حاوی ۳۰ درصد مس باره با افزایش

نتایج به دست آمده از خصوصیات عملکردی آسفالت حفاظتی اسلاری سیل شامل چسبندگی مرطوب، سایش در شرایط مرطوب، چرخ بارگذاری شده- چسبندگی ماسه و چرخ بارگذاری شده- جابه‌جایی، با استفاده از آنالیز واریانس مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. نتایج آنالیز واریانس با استفاده از تجزیه و تحلیل دو عاملی در سطح اطمینان ۹۵ درصد به منظور بررسی اهمیت اثرات افزودن مس باره و درصد قیر باقی‌مانده بر خصوصیات عملکردی مخلوط‌های اسلاری سیل با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شده است. به منظور انجام آنالیز واریانس، در ابتدا کنترل نرمال بودن داده‌ها به کمک آزمون کولموگروف- اسمیرنوف بررسی شده، و سپس تحلیل روی داده‌های نرمال انجام شده است. نتایج میزان تأثیرگذاری افزودن مس باره و درصد قیر باقی‌مانده بر عملکرد مخلوط آسفالتی اسلاری سیل در جدول ۹ قابل مشاهده است. فاکتور اول شامل سه درصد قیر باقی‌مانده یعنی ۸، ۸/۵ و ۹ درصد و فاکتور دوم شامل پنج مخلوط یعنی CW0+MA100 ، CW10+MA90 ، CW20+MA80 و CW30+MA70 و CW40+MA60 است. بر این اساس، فرض H_0 به معنی عدم وجود اثر معنی‌دار متغیر عامل (مستقل) بر متغیر پاسخ بوده و در صورت رد آن، فرض H_1 به معنی وجود اثر معنی‌دار متغیر عامل بر متغیر پاسخ تأیید می‌شود. این موضوع در رابطه (۵) ارائه شده است.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$$

$$H_1: \exists i, j, s, t. u_i \neq u_j \quad (i, j = 1, 2, \dots)$$

مطابق نتایج حاصل از تحلیل واریانس در خصوص تأثیر درصد قیر باقی‌مانده و مس باره بر خصوصیات اسلاری سیل، مقدار p مخلوط‌ها کمتر از ۰/۰۵ بود که نشان‌دهنده آن است که قیر باقیمانده و مس باره، تأثیر قابل توجهی بر تمام آزمایش‌های انجام شده از قبیل چسبندگی مرطوب و چرخ بارگذاری شده- چسبندگی ماسه دارند.

می‌گردد. به طوری که مخلوط‌های حاوی ۳۰ و ۴۰ درصد مس‌بار به بهترین عملکرد سایشی را داشته‌اند. در واقع، مس‌بار به دلیل تیز گوشه بودن و درصد زیاد آهن و سیلیس، اتصال قوی‌تری بین مصالح سنگی ایجاد می‌کند که به تبع آن، باعث کاهش ازدست‌رفتگی سنگدانه در مخلوط‌های آسفالتی می‌شود.

چسبندگی در حدود ۲۳ درصد بیشتر از مخلوط شاهد، بیشترین مقدار چسبندگی نسبت به سایر نمونه‌ها در همه درصد‌های قیر باقیمانده داشته است. مطابق آزمایش سایش در شرایط مرطوب، افزایش مقدار قیر باقیمانده از ۸ تا ۹ درصد و همچنین مس‌بار از صفر تا ۴۰ درصد سبب کاهش افت وزنی و در نتیجه بهبود عملکرد سایشی مخلوط‌های آسفالتی

جدول ۹. نتایج آنالیز واریانس مخلوط‌های حاوی مس‌بار

Source of variation	Type III sum of squares	df	Mean square	F	P-value	Partial eta squared
(a) Cohesion at 30 minutes						
Corrected Model	109.126a	14	7.795	81.954	0.000	0.975
Intercept	10402.881	1	10402.881	109376.084	0.000	1.000
bitumen	43.200	2	21.600	227.105	0.000	0.938
blend type	65.055	4	16.264	170.996	0.000	0.958
bitumen * blend type	0.871	8	0.109	1.144	0.364	0.234
Error	2.853	30	0.095			
Total	10514.860	45				
Corrected Total	111.979	44				
(b) Cohesion at 60 minutes						
Corrected Model	203.500	14	14.536	60.734	0.000	0.966
Intercept	26281.250	1	26281.250	109810.237	0.000	1.000
bitumen	59.200	2	29.600	123.677	0.000	0.892
blend type	141.000	4	35.250	147.284	0.000	0.952
bitumen * blend type	3.300	8	0.412	1.724	0.134	0.315
Error	7.180	30	0.239			
Total	26491.930	45				
Corrected Total	210.680	44				
(c) WTAT						
Corrected Model	433112.512a	14	30936.608	226.291	0.000	0.991
Intercept	14943055.688	1	14943055.688	109303.708	0.000	1.000
bitumen	256638.016	2	128319.008	938.613	0.000	0.984
blend type	168418.512	4	42104.628	307.982	0.000	0.975
bitumen * blend type	8055.984	8	1006.998	7.366	0.000	0.663
Error	4101.340	30	136.711			
Total	15380269.540	45				
Corrected Total	437213.852	44				
(d) LWT-Sand adhesion						
Corrected Model	120902.990a	14	8635.928	111.391	0.000	0.981
Intercept	8596314.614	1	8596314.614	110879.811	0.000	1.000
bitumen	93229.867	2	46614.934	601.264	0.000	0.976
blend type	25891.854	4	6472.964	83.492	0.000	0.918
bitumen * blend type	1781.268	8	222.659	2.872	0.017	0.434
Error	2325.847	30	77.528			
Total	8719543.450	45				
Corrected Total	123228.836	44				
(e) LWT-Vertical displacement						
Corrected Model	101.810a	14	7.272	64.673	0.000	0.968
Intercept	1822.777	1	1822.777	16210.466	0.000	0.998
bitumen	66.819	2	33.410	297.121	0.000	0.896
blend type	28.945	4	7.236	64.355	0.000	0.949
bitumen * blend type	6.045	8	0.756	6.720	0.000	0.642
Error	3.373	30	0.112			
Total	1927.960	45				
Corrected Total	105.183	44				
(f) LWT-Lateral displacement						
Corrected Model	18.079a	14	1.291	41.807	0.000	0.951
Intercept	539.414	1	539.414	17463.050	0.000	0.998

bitumen	7.788	2	3.894	126.072	0.000	0.894
blend type	10.030	4	2.508	81.180	0.000	0.915
bitumen * blend type	0.260	8	0.033	1.054	0.420	0.219
Error	0.927	30	0.031			
Total	558.420	45				
Corrected Total	19.006	44				

مس باره نسبت به سنگدانه، سبب افزایش اصطکاک بین مصالح سنگی و در نتیجه بهبود عملکرد مخلوط‌های اصلاح‌شده نسبت به نمونه شاهد می‌شود.

• نتایج آنالیز واریانس نشان می‌دهد که قیر باقیمانده و مس باره به علت مقدار p کمتر از ۰/۰۵ از پارامترهای تأثیرگذار بر خصوصیات عملکردی آسفالت حفظاتی اسلاری سیل می‌باشند. بر طبق این نتایج، مس باره نقش مؤثرتری در مقدار چسبندگی و جابه‌جایی مخلوط‌ها دارد. ولی از سوی دیگر، مقدار قیر باقیمانده در مقدار سایش و چسبندگی ماسه تأثیرگذارتر می‌باشد.

• بر اساس این نتایج، با توجه به مسائل زیست‌محیطی و بهبود ویژگی‌های عملکردی مخلوط‌های آسفالت حفظاتی لایه نازک اسلاری سیل، استفاده از مس باره به‌عنوان بخشی از سنگدانه در این نوع آسفالت توصیه می‌گردد.

• مطابق آزمایش تعیین حداکثر قیر به‌وسیله چرخ بارگذاری- چسبندگی ماسه، با افزایش درصد قیر باقیمانده و مس باره، میزان جذب ماسه و در نتیجه پتانسیل قیرزدگی مخلوط‌ها افزایش می‌یابد. البته مقدار چسبندگی ماسه یا قیرزدگی همه مخلوط‌ها در محدوده مجاز آیین‌نامه بوده است. از سوی دیگر، از تلفیق نمودارهای سایش و چسبندگی ماسه، قیر بهینه مخلوط‌های اصلاح‌شده از مخلوط شاهد کمتر است. در نتیجه، مخلوط‌های حاوی مس باره در مقدار قیر کمتری به کیفیت مناسب جهت مقاومت در برابر قیرزدگی می‌رسند.

• مطابق آزمایش چرخ بارگذاری- جابه‌جایی، با کاهش درصد قیر باقیمانده از ۹ به ۸ و افزایش مس باره از صفر تا ۴۰ درصد، عملکرد جابه‌جایی افقی و عمودی مخلوط‌ها بهبود داده می‌شود. به‌طوری که نمونه‌های ۳۰ و ۴۰ درصد کمترین مقدار جابه‌جایی افقی و عمودی را داشته‌اند. در واقع، تیزگوشگی بیشتر

۷. مراجع

- Adediran, A., Lemougna, P. N., Yliniemi, J., Tanskanen, P., Kinnunen, P., Roning, J. and Illikainen, M. 2021. "Recycling glass wool as a fluxing agent in the production of clay- and waste-based ceramics". J. Clean. Prod., 289: 125673. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125673>
- Apaza Apaza, F. R., Rodrigues Guimarães, A. C., Marcos Vivoni, A. and Schroder, R. 2021. "Evaluation of the performance of iron ore waste as potential recycled aggregate for micro-surfacing type cold asphalt mixtures". Constr. Build. Mater., 266: 121020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121020>
- Arabani, M. and Mirabdolazimi, S. M. 2011. "Experimental investigation of the fatigue behaviour of asphalt concrete mixtures containing waste iron powder". Mater. Sci. Eng.: A, 528(10): 3866-3870. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.01.099>
- Behnood, A., Modiri Gharehveran, M., Gozali Asl, F. and Ameri, M. 2015. "Effects of copper slag and recycled concrete aggregate on the properties of CIR mixes with bitumen emulsion, rice husk ash, Portland cement and fly ash". Constr. Build. Mater., 96: 172-180. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.021>
- D2397, A. 2017. "Standard specification for cationic emulsified asphalt". ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Dong, Q., Chen, X., Huang, B. and Gu, X. 2018. "Analysis of the influence of materials and construction practices on slurry seal performance using LTPP data". J. Transport. Eng., Part B: Pavements, 144(4): 04018046. <https://doi.org/10.1061/JPEODX.0000069>

7. Hajj Elie, Y., Loria Luis, G., Sebaaly Peter, E., Cortez, E. and Gibson, S. 2013. "Effective timing for two sequential applications of slurry seal on asphalt pavement". *J. Transport. Eng.*, 139(5): 476-484. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000521](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000521)
8. Hassan Hossam, F. and Al-Jabri, K. 2011. "Laboratory evaluation of hot-mix asphalt concrete containing copper slag aggregate". *J. Mater. Civ. Eng.*, 23(6): 879-885. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000246](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000246)
9. Hu, C., Li, P., Zhu, Y., Zhao, Q. and Zhang, H. 2022. "Experimental study on microwave absorption properties of HMA containing copper slag". *Constr. Build. Mater.*, 341: 127850. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127850>
10. Imran Khan, M. and Al-Abdul Wahhab, H. I. 1998. "Improving slurry seal performance in Eastern Saudi Arabia using steel slag". *Constr. Build. Mater.*, 12(4): 195-201. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(98\)00005-1](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(98)00005-1)
11. ISSA. 2017a. "Laboratory test method for wet track abrasion of slurry surfacing systems". Technical Bulletin 100: International Slurry Surfacing Association.
12. ISSA. 2017b. "Outline guide design procedure for slurry seal". Technical Bulletin 111: International Slurry Surfacing Association.
13. ISSA. 2017c. "Test method for measurement of excess asphalt in bituminous mixtures by use of a loaded wheel tester and sand adhesion". Technical Bulletin: International Slurry Surfacing Association.
14. ISSA. 2017d. "Test method for measurement of stability and resistance to compaction, vertical and lateral displacement of multilayered fine aggregate cold mixes". Technical Bulletin 147: International Slurry Surfacing Association.
15. ISSA. 2017e. "Test method to classify emulsified asphalt/aggregate mixture systems by modified cohesion tester measurement of set and cure characteristics". Technical Bulletin: International Slurry Surfacing Association.
16. ISSA A105. 2020. "Recommended performance guideline for emulsified asphalt slurry seal". International Slurry Surfacing Association.
17. Keymanesh, M. R., Ziari, H., Zalnezhad, H. and Zalnezhad, M. 2021. "Mix design and performance evaluation of microsurfacing containing electric arc furnace (EAF) steel slag filler". *Constr. Build. Mater.*, 269: 121336. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121336>
18. Kumar, B. 2013. "Properties of pavement quality concrete and dry lean concrete with copper slag as fine aggregate". *Int. J. Pavement Eng.*, 14(8): 746-751. <https://doi.org/10.1080/10298436.2012.729059>
19. Mirhosseini, S. R., Fadaee, M., Tabatabaei, R. and Fadaee, M. J. 2017. "Mechanical properties of concrete with Sarcheshmeh mineral complex copper slag as a part of cementitious materials". *Constr. Build. Mater.*, 134: 44-49. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.024>
20. Mithun, B. M. and Narasimhan, M. C. 2016. "Performance of alkali activated slag concrete mixes incorporating copper slag as fine aggregate". *J. Clean. Prod.*, 112: 837-844. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.026>
21. Modarres, A. and Alinia Bengar, P. 2019. "Investigating the indirect tensile stiffness, toughness and fatigue life of hot mix asphalt containing copper slag powder". *Int. J. Pavement Eng.*, 20(8): 977-985. <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1373390>
22. Muniandy, R., Aburkaba, E. and Taha, R. 2013. "Effect of mineral filler type and particle size on the engineering properties of stone mastic asphalt pavements". *J. Eng. Res.*, 10(2): 13-32. <https://doi.org/10.24200/tjer.vol10iss2pp13-32>
23. Nagi, G. A. 1988. "Evaluation of slurry seal performance in the eastern province of Saudi Arabia". Doctoral Dissertation, College of Design and Built Environment, Department of Civil and Environmental Engineering, KFUPM.
24. Najimi, M., Sobhani, J. and Pourkhorshidi, A. R. 2011. "Durability of copper slag contained concrete exposed to sulfate attack". *Constr. Build. Mater.*, 25(4): 1895-1905. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.067>
25. Pundhir, N. K. S., Kamaraj, C. and Nanda, P. K. 2005. "Use of copper slag as construction material in bituminous pavements". *J. Sci. Industrial Res.*, 64: 997-1002.
26. Raposeiras, A. C., Vargas-Cerón, A., Movilla-Quesada, D. and Castro-Fresno, D. 2016. "Effect of copper slag addition on mechanical behavior of asphalt mixes containing reclaimed asphalt pavement". *Constr. Build. Mater.*, 119: 268-276. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.081>
27. Raposeiras, A. C., Movilla-Quesada, D., Muñoz-Cáceres, O., Andrés-Valeri, V. C. and Lagos-Varas, M. 2021. "Production of asphalt mixes with copper industry wastes: Use of copper slag as raw material replacement". *J. Environ. Manag.*, 293: 112867. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112867>

28. Saghafi, M., Tabatabaee, N. and Nazarian, S. 2019. "Performance evaluation of slurry seals containing reclaimed asphalt pavement". *Transport. Res. Record*, 2673(1): 358-368. <https://doi.org/10.1177/0361198118821908>
29. Sharma, D. K., Swami, B. L. and Vyas, A. K. 2021. "Performance evaluation of hot mix asphalt containing copper slag". *Mater. Today: Proc.*, 38: 1241-1244. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.557>
30. Sherre Tarekegn, K. and Liao, M. C. 2022. "Characteristics of recycled mineral fillers and their effects on the mechanical properties of hot-mix asphalt when used as limestone filler replacements". *J. Mater. Civ. Eng.*, 34(1): 04021395. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004033](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004033)
31. Ullah, S., Yang, C., Cao, L., Wang, P., Chai, Q., Li, Y., . . . Zhang, B. 2021. "Material design and performance improvement of conductive asphalt concrete incorporating carbon fiber and iron tailings". *Constr. Build. Mater.*, 303: 124446. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124446>
32. Zalnezhad, M. and Hesami, E. 2020. "Effect of steel slag aggregate and bitumen emulsion types on the performance of microsurfacing mixture". *J. Traffic Transport. Eng.*, 7(2): 215-226. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.12.005>
33. Ziari, H., Moniri, A., Imaninasab, R. and Nakhaei, M. 2019. "Effect of copper slag on performance of warm mix asphalt". *Int. J. Pavement Eng.*, 20(7): 775-781. <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1339884>
34. Ziari, H., Keymanesh, M. R. and Zalnezhad, H. 2020. "Effect of emulsifying agent on rheological properties of bitumen emulsion modified with different techniques of adding SBR latex polymer". *Road Mater. Pavement Des.*, 1-17. <https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1835695>