

ارزیابی تاثیر سرباره کوره آهن‌گدازی در خصوصیات مقاومتی و لغزندگی نمونه‌های آسفالتی و رزینی

مقاله علمی-پژوهشی

محمودرضا کی‌منش، دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام‌نور، تهران، ایران
حمید جهانیان*، دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام‌نور، تهران، ایران
ذوالفقار زارعی، استادیار، گروه مهندسی عمران، مرکز میمند، واحد فیروزآباد، دانشگاه آزاد اسلامی، فیروزآباد، ایران
محمود عامری، استاد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: jahanian61@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۵

صفحه ۲۶۴-۲۵۵

چکیده

سرباره کوره آهن‌گدازی بخشی از محصولات فرعی و جانبی صنعت تولید فولاد بوده که همزمان با تهیه فولاد، انباشته شده و به عنوان مصالح دور ریز، دفع یا دپو می‌شوند. این سرباره، ترکیبی غیر فلزی حاوی سیلیکات کلسیم، منیزیم، منگنز، اکسید آهن و کلسیم می‌باشد. در این مقاله اثر استفاده از سرباره در خصوصیات مقاومتی مخلوط آسفالتی و همچنین خصوصیات اصطکاکی آن با استفاده از دستگاه آونگ انگلیسی مورد بررسی قرار گرفته است. از طرفی نمونه‌هایی از سنگدانه‌های آهکی و سرباره با استفاده از قالب مخصوص تهیه گردید و خواص صیقلی شدن سنگدانه‌ها با استفاده از دستگاه صیقل‌دهنده مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است. ارزیابی خصوصیات مقاومتی نیز شامل بررسی استحکام مارشال و ارزیابی پتانسیل شیارشدگی و استفاده از آزمایش خزش دینامیکی با دستگاه UTM بوده است. نتایج این پژوهش نشان دهنده افزایش دو برابری پتانسیل مقاومت در برابر شیارشدگی و افزایش بیش از ۲۰ درصدی در مقاومت لغزندگی نمونه‌های آسفالتی حاوی مصالح سرباره است. همچنین افت ناچیز در صیقلی شدن سطح سنگدانه‌های سرباره (۳ درصد در حالت مرطوب) نسبت به مصالح آهکی (۶۰ درصد در حالت مرطوب) مشاهده گردید.

واژه‌های کلیدی: سرباره کوره آهن‌گدازی، استحکام شیارشدگی، مقاومت لغزندگی، دستگاه UTM، آونگ انگلیسی

۱- مقدمه

سرباره، لایه‌های اکسید شده، ورق‌های پوسته شده و لجن می‌باشد. در این بین سرباره صنایع فولادسازی بر اساس نوع و نحوه فرآوری و تولید به چند دسته تقسیم‌بندی می‌شوند. طبق گزارش انجمن بزرگراه‌های ایالتی آمریکا (FHWA, 2016)، از مهم‌ترین تولیدات سرباره می‌توان به سرباره کوره الکتریکی، کوره شعله‌ای و سرباره کوره کانورتور را می‌توان نام برد. سرباره کوره کانورتور

در گذشته عمده محصولات جانبی در هنگام فرآیند ذوب آهن و تولید فولاد به عنوان مواد زائد دفع و دور ریخته می‌شد. استفاده از این مصالح در سه دهه اخیر با رویکرد حفظ قوانین محیط زیست و به عنوان مصالح کمکی در پروژه‌های عمرانی به ویژه در مناطقی که تولید آن در دسترس می‌باشد، مقبولیت روزافزون یافته است. برخی محصولات فرعی ذوب آهن و تولید فولاد، شامل غبار،

ارزیابی استفاده از مصالح و افزودنی‌های گوناگون و اثر آن بر خصوصیات مکانیکی و عملکردی مخلوط‌های آسفالتی، توسط محققان و پژوهشگران از گذشته تا حال همواره در حال انجام بوده است. در این تحقیقات برخی ویژگی‌های مثبت استفاده از سرباره کوره آهن‌گدازی به عنوان مصالح جایگزین در مخلوط آسفالت متخلخل، شامل مقاومت بالا در برابر جریان‌شدگی و لغزندگی و همچنین استحکام بالای این مصالح مورد تاکید قرار گرفته شده است. مطابق تحقیقات انجام پذیرفته در ارتباط با مقاومت لغزندگی روسازی آسفالتی و مسائل مرتبط با ایمنی تردد، به طور کلی عوامل موثر در احتمال بروز لغزش یا سرخوردگی وسایل نقلیه به شرح ذیل عنوان شده است (Bazlamit and Reza.; Fwa, 2006):

- بافت ریز و درشت مصالح سنگی و سطح روسازی
 - تغییرات فصلی، دمایی و ماندگاری یا حضور فیلم آب بر روی سطح رویه
 - حضور مواد آلاینده یا زائد در سطح روسازی (از قبیل حضور روغن و سوخت وسایل نقلیه، قیرزدگی، ذرات لاستیک و گرد و غبار)
 - ترافیک، وضعیت لاستیک و ترمز وسایل نقلیه، خصوصیات جاده (نظیر شیب طولی و عرضی) و ...
- در هر صورت هر یک از عوامل فوق اثرات متفاوتی می‌تواند بر مقاومت لغزندگی روسازی داشت باشد. نکته قابل توجه این است که معمولاً در شرایط سطح خشک و بدون حضور رطوبت معمولاً ضریب اصطکاک کافی بین لاستیک وسایل نقلیه و سطح روسازی برقرار است و در صورت وجود اندکی رطوبت، احتمال افزایش لغزندگی و سرخوردن وسایل نقلیه به شدت افزایش می‌یابد. همانطور که عنوان شد از عوامل موثر در مقاومت لغزندگی، بافت و خصوصیات زبری مصالح و روسازی است که مقادیر زبری بر اساس دامنه طول موج نقاط برجستگی موجود در بافت روسازی در تحقیقات موسسه پیارک موجود است (Wambold et al., 1995). بر اساس پژوهش‌ها و مقالات قبلی، بافت ریز و بافت درشت در مقاومت لغزندگی روسازی موثر می‌باشد. لازم به توضیح است که بافت ریز به خصوصیات میکروسکوپی و کانی‌های تشکیل دهنده سنگ وابسته بوده و عامل ایجاد اصطکاک بین لاستیک و سطح روسازی است. همچنین بافت درشت روسازی به ابعاد و

یا کوره آهن‌گدازی از جمله مصالحی است که می‌تواند به عنوان سنگدانه و مصالح کمکی (جایگزین) در پروژه‌های عمرانی و به ویژه در تولید مخلوط آسفالتی از آن بهره جست. به عنوان مثال در آمریکا ۳۰ تا ۵۰ درصد (Dong & Chen, 2022) و در کشور چین ۸ درصد سرباره تولید شده در پروژه‌های راه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است (Gan et al., 2022). استحکام و دوام این مصالح و همچنین اثرات مثبت آن در افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی و روکش‌های حفاظتی و همچنین افزایش مقاومت در برابر لغزندگی برای مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۵۰ درصد سنگدانه از نوع سرباره آهن در برخی تحقیقات مورد بررسی و تاکید قرار گرفته شده است (Ji et al.; 2023 Gan et al., 2022). از طرفی در منابع اشاره شده است که در حدود ۲۵ درصد تصادفات در شرایط بارندگی و سطح خیس به دلیل عدم کفایت روسازی در برابر لغزندگی می‌باشد، که این امر اهمیت وجود اصطکاک کافی روسازی و مصالح مورد استفاده در آن را بیش از پیش نمایان می‌سازد و مبنای اهمیت انجام این تحقیق قرار گرفته است. در این تحقیق برای بررسی خصوصیات مکانیکی، مقاومتی مخلوط آسفالتی و ارزیابی خصوصیات اصطکاک سنگدانه‌های مصالح سرباره آهن‌گدازی، نمونه‌های آسفالتی با درصد‌های مختلف و ترکیبی از مصالح آهکی و سرباره با استفاده از دستگاه متراکم‌کننده ژیراتوری موجود در دانشگاه علم و صنعت ایران تهیه گردید و پتانسیل مقاومت در برابر شیارشدگی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه UTM ارزیابی شد. همچنین قابلیت صیقلی شدن یا مقاومت بافت ریز سنگدانه‌ها در برابر سایش با استفاده از ماشین صیقل‌دهنده (به مدت ۶ ساعت) با ساخت نمونه‌هایی با قالب مخصوص و چسب رزینی مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که نتایج این پژوهش مؤید تاثیر مثبت استفاده از سرباره در افزایش مقاومت مکانیکی و مقاومت در برابر شیارشدگی و همچنین دوام این سنگدانه‌ها در برابر سایش بوده است. مطابق یافته‌های این تحقیق نرخ افزایش در خصوصیات مکانیکی و فیزیکی مخلوط آسفالتی با افزایش درصد استفاده از سرباره در مخلوط با نرخ افزایش در مقاومت لغزندگی نمونه‌های آسفالتی متفاوت می‌باشد.

آسفالت از نوع SMA) مقاومت در برابر لغزندگی مخلوط SMA برای نمونه‌هایی که ۳۰ درصد مصالح آهکی با سرباره آهن جایگزین شده است، بیشترین مقدار را دارد. طبق تحقیق (Gan et al., 2022)، نمونه‌های آسفالتی حاوی ۵۰ درصد سرباره بیشترین میزان مقاومت در برابر لغزندگی را نشان داده است.

۳-اهداف تحقیق

دو هدف اصلی مدنظر این تحقیق می‌باشد. بخش اول مربوطه به بررسی خصوصیات مکانیکی و مقاومتی نمونه‌های آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف سرباره کوره آهن‌گدازی جایگزین با مصالح سنگدانه آهکی با استفاده از آزمایشات مرسوم مقاومت مارشال و پتانسیل شیارشدگی با استفاده از تست خزش دستگاه UTM است. بخش دوم تحقیق حاضر شامل ارزیابی و مقایسه مقاومت در برابر لغزندگی نمونه‌های آسفالتی حاوی سرباره و نحوه صیقلی شدن نمونه‌های ساخته شده با دو نوع مصالح سنگی آهکی و سرباره در قالب مخصوص با چسب رزین می‌باشد.

۳-۱-برنامه آزمایشگاهی

در این پژوهش دو نوع سنگدانه آهکی از نوع شکسته کوهی از معدن سربندان دماوند و سرباره کوره آهن‌گدازی کوره کانورتور کارخانه ذوب‌آهن اصفهان و قیر عملکردی از نوع PG 69-24 پالایشگاه تهران استفاده شد. نتایج آزمایشات مصالح که در آزمایشگاه قیر و آسفالت انجام گرفته است، در جدول شماره ۱ نشان داده شده است.

متوسط فواصل بین سنگدانه‌ها در سطح روسازی وابسته بوده و عامل زهکشی مناسب و تخلیه آب ناشی از بارندگی بین لاستیک و سطح رویه است. در حقیقت تامین بافت درشت روسازی در جلوگیری از وقوع پدیده آب‌لغزی (هیدروپلانینگ) بسیار موثر خواهد بود (Asi, 2005). از طرفی در برخی از تحقیقات عنوان شده است که عدد مقاومت لغزندگی به تغییرات فصلی نیز وابسته بوده و عدد لغزندگی با توجه به تغییرات دما در فصول مختلف با فرض یکسان بودن سایر شرایط، عدد متفاوتی را نشان خواهد داد. نتایج این تحقیقات عدد مقاومت لغزندگی در پاییز و زمستان را بیشتر از فصول بهار و تابستان نشان می‌دهد (Giles et al., 1964). در منابع مورد بررسی، اشاره شده است که مقاومت در برابر لغزندگی و سر خوردن وسیله نقلیه با کاهش دمای هوا، افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج این تحقیق رابطه بین لغزندگی و دما به طور خطی و مستقیم می‌باشد (Bazlamit and Reza, 2005). علاوه بر موارد فوق، محققان دیگری گزارش داده‌اند که عدد مقاومت لغزندگی به سرعت انجام آزمایش و درجه حرارت محیط در لحظه آزمایش نیز بستگی دارد. به عبارت دیگر، اصطکاک یا مقاومت لغزندگی برای سطح روسازی با دانه‌بندی کوچکتر (لایه توپکا) با سرعت‌های پایین و دمای بالاتر، کاهش بیشتری نسبت به انجام آزمایش با سرعت بالاتر را نشان می‌دهد (Flintsch, 2005). مطابق تحقیقات (Asi, 2005)، در بررسی اثر میزان سرباره به عنوان جایگزین مصالح آهکی بر مقاومت لغزندگی انواع نمونه‌های آسفالتی (شامل نمونه‌های آسفالتی تهیه شده با درصد قیر مختلف، نمونه تهیه شده با طرح اختلاط روسازی برتر و نمونه

جدول ۱. مشخصات فیزیکی سنگدانه‌های مصرفی

سرباره		مصالح آهکی		آزمایش
		ریزدانه	درشت‌دانه	
-	۲۲/۵	-	۲۵/۳	سایش لس‌آنجلس (درصد)
-	۶/۲۶	-	۱۰/۵	ارزش ضربه‌ای مصالح (درصد)
۳/۲	۱/۶۹	۲/۱	۰/۶۷	جذب آب (درصد)
-	۹۲	-	۹۷	درصد شکستگی در دو وجه
۲/۹۳	۳/۴۷	۲/۳۲	۲/۵۹	وزن مخصوص واقعی (گرم بر سانتی متر مکعب)

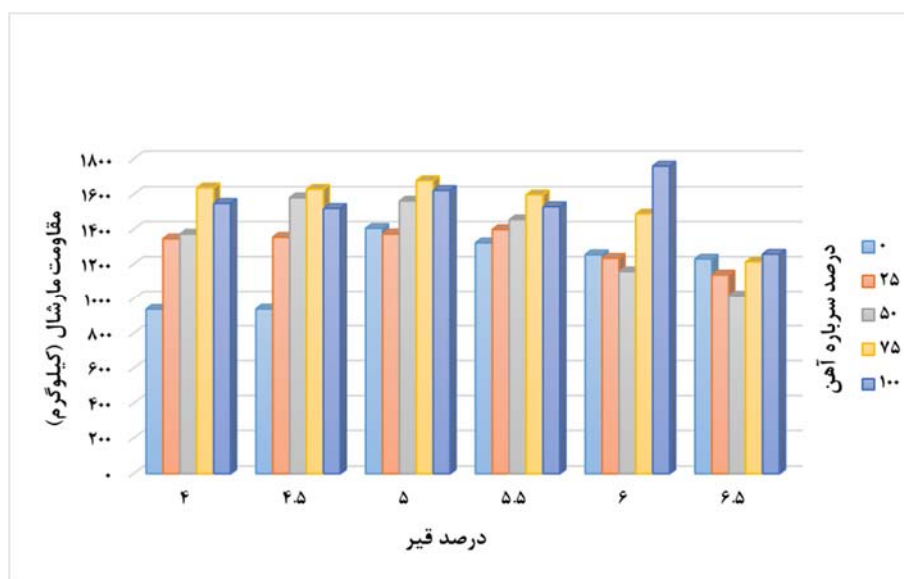
تهیه نمونه مارشال

به هر طرف و دانه بندی پیوسته شماره ۵ آیین نامه روسازی راه های آسفالتی ایران) به کار گرفته شد. نتایج استقامت مارشال برای هر یک از نمونه های آزمایشگاهی در جدول شماره ۲ ارائه و در شکل شماره ۱ ترسیم شده است.

برای تعیین درصد قیر بهینه مخلوط آسفالتی شامل مصالح آهکی و سرباره و همچنین تاثیر استفاده از سنگدانه سرباره (با درصدهای ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ از کل مصالح سنگی مخلوط) در میزان استحکام و مقاومت نمونه ها نسبت به نمونه شاهد (نمونه شماره ۱)، طرح اختلاط مارشال (با فرض شرایط ترافیک سنگین و ۷۵ ضربه چکش

جدول ۲. نتایج استقامت مارشال نمونه های حاوی سرباره آهن (مقادیر بر حسب کیلوگرم)

درصد قیر						درصد سرباره	شماره نمونه
۶/۵	۶	۵/۵	۵	۴/۵	۴		
مقاومت مارشال (کیلوگرم)							
۱۲۳۱	۱۲۵۵	۱۳۲۳	۱۴۰۶	۹۳۹	۹۳۸	۰	۱
۱۱۳۹	۱۲۳۵	۱۳۹۹	۱۳۷۴	۱۳۵۵	۱۳۴۶	۲۵	۲
۱۰۱۷	۱۱۵۸	۱۴۵۵	۱۵۶۲	۱۵۸۱	۱۳۷۳	۵۰	۳
۱۲۱۴	۱۴۸۹	۱۵۹۸	۱۶۷۹	۱۶۳۰	۱۶۳۸	۷۵	۴
۱۲۵۸	۱۷۶۲	۱۵۳۰	۱۶۲۳	۱۵۲۰	۱۵۴۹	۱۰۰	۵



شکل ۱. نمودار نتایج استقامت مارشال بر حسب درصد قیر و درصد استفاده از سرباره آهن در مخلوط آسفالتی

و تعیین شد. لازم به توضیح است که پس از تعیین درصد قیر بهینه، ساخت نمونه های اصلی با درصد قیر بهینه برای انجام آزمایشات خزش دینامیکی و مقاومت لغزندگی توسط دستگاه ژیراتوری انجام گردید. با توجه نتایج جدول ۲ مشاهده می شود که استقامت مارشال

بر اساس روش طرح اختلاط مارشال و پس از ترسیم نمودارهای استقامت، عدد روانی، وزن مخصوص، درصد فضای خالی مخلوط و درصد فضای خالی سنگدانه، درصد قیر بهینه به ترتیب برای نمونه های شماره ۱ الی ۵ برابر با ۵/۶، ۵/۵، ۵/۵، ۵/۶ و ۵/۹ محاسبه

- سرعت دوران اهرم ورزدهنده (چکش) ۳۰ دور در دقیقه.
- زاویه دوران چکش ۱/۲۵ درجه.

آزمایش تست خزش دینامیکی

بررسی عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر شیارشدگی از اهداف اصلی آزمایش خزش دینامیکی محسوب می‌شود. در این آزمایش که با استفاده از دستگاه UTM بر روی نمونه‌های آسفالتی انجام شده است، نمودار مقادیر کرنش تجمعی در طی سیکل‌های بارگذاری و استراحت ترسیم می‌شود.

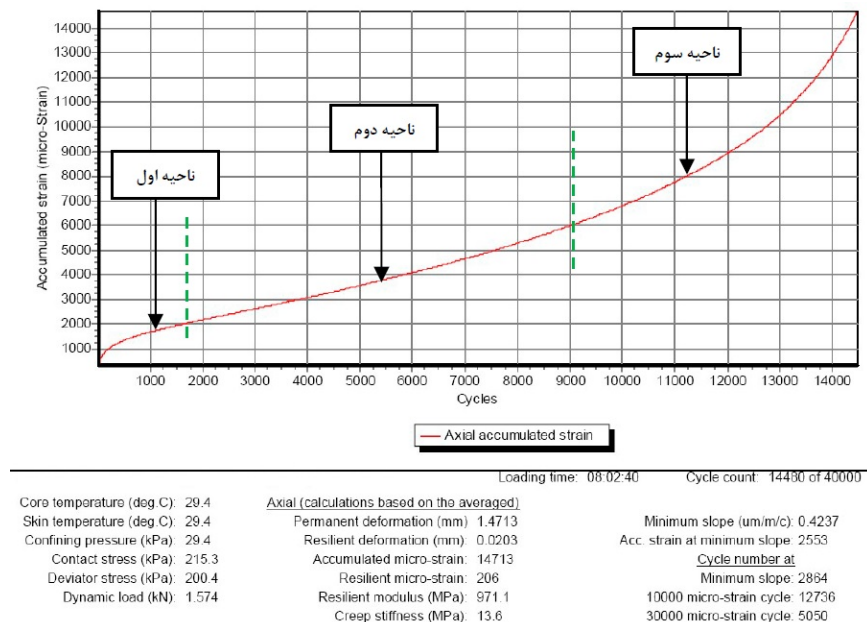
هرچند که به طور مستقیم نمی‌توان عمق شیار را به دلیل عدم محصور شدن نمونه‌ها در مقایسه با شرایط واقعی تعیین کرد، ولیکن با توجه به تغییرات منحنی کرنش نسبت به ترافیک (تعداد سیکل‌های بارگذاری و استراحت) در سه ناحیه رفتار مخلوط با تغییر شیب منحنی مذکور (نقاط عطف) مطابق شکل شماره ۲، پتانسیل شیارشدگی نمونه‌ها بر اساس نظریه ویتزاک قابل مقایسه می‌باشد. بر اساس این استدلال، عدد روانی هر مخلوط به معنی تعداد سیکل مجاز بر بارگذاری بوده که بعد از آن مخلوط در ناحیه تسلیم و شیارشدگی قرار می‌گیرد.

و وزن مخصوص برای نمونه‌های حاوی سرباره افزایش قابل توجهی نسبت به نمونه‌های آسفالتی تهیه شده با مصالح آهکی دارند. با مقایسه اعداد استقامت مارشال این نمونه‌ها با حداقل استقامت توصیه شده توسط آیین‌نامه طراحی روسازی راه‌ها (به میزان ۸۰۰ کیلوگرم)، مشخص می‌شود که این مخلوط‌ها استقامت بیشتری خواهند داشت.

تهیه نمونه ژیراتوری

نمونه‌های مخلوط آسفالتی برای بررسی پتانسیل شیارشدگی با استفاده از دستگاه ژیراتوری دانشگاه علم و صنعت ایران در قالب با قطر ۱۰ سانتیمتر و برای ارزیابی مقاومت در برابر لغزندگی در قالب به قطر ۱۵ سانتیمتر تهیه گردید. انتخاب قالب ۱۵ سانتیمتری (۶ اینچ) برای آزمایش با دستگاه آونگ انگلیسی به دلیل حداقل طول مورد نیاز برای عبور کفشک لاستیکی پاندول به میزان $\pm 0/2$ ۱۲/۵ سانتی‌متر بوده است. شرایط تراکم مخلوط آسفالتی در نرم‌افزار اختصاصی دستگاه متراکم‌کننده چرخشی بر اساس شرایط زیر انتخاب گردید:

- فشار یا انرژی تراکم ۶۰۰ کیلوپاسکال.



شکل ۲. تغییرات کرنش دائم تجمعی نسبت به تعداد سیکل‌های بارگذاری

روانی بین نمونه‌ها، بیشترین سیکل بارگذاری تا لحظه رسیدن به ناحیه تسلیم برای مخلوط آسفالتی ساخته شده با مصالح سرباره می‌باشد. بنابراین تاثیر مثبت و قابل توجه بیش از ۷۰ الی ۸۰ درصد افزایش به ترتیب برای نمونه‌های حاوی ۵۰ درصد و ۱۰۰ درصد سرباره مشاهده گردید.

در شکل شماره ۳ نتایج عدد روانی آزمایش خزش دینامیکی برای نمونه‌های آسفالتی با سنگدانه آهکی (نمونه شاهد)، مخلوط آسفالتی حاوی ۵۰ درصد سرباره (جایگزین مصالح آهکی) و نمونه آسفالتی با ۱۰۰ درصد سرباره کوره آهن‌گدازی نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، با مقایسه عدد



شکل ۳. نتایج آزمایش خزش دینامیکی با دستگاه UTM (برحسب تعداد سیکل بارگذاری تا لحظه رسیدن به ناحیه تسلیم)

آزمایش مقاومت لغزندگی نمونه‌های آسفالتی

دانه‌بندی پیوسته شماره ۵ از نشریه شماره ۲۳۴ تهیه شد. سپس برای اندازه‌گیری میانگین عدد آونگ انگلیسی برای هر نمونه، پنج بار کفشک لاستیکی دستگاه از روی نمونه‌ها در حالت سطح خیس مطابق شکل شماره ۴ عبور داده شد.

نمونه‌های آسفالتی برای ارزیابی مقاومت لغزندگی در قالب‌های به قطر ۱۵ سانتی‌متر ارتفاع ۵ سانتی‌متر با دستگاه مترکم‌کننده ژیراتوری با درصد قیر بهینه بدست آمده از روش طرح اختلاط مارشال انتخاب گردید. به ازای هر درصد وزنی سرباره (۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد جایگزین مصالح آهکی) دو نمونه مطابق



شکل ۴. انجام آزمایش مقاومت لغزندگی با دستگاه آونگ انگلیسی بر روی نمونه‌های آسفالتی

قرائت عدد آونگ انگلیسی به ازای درصدهای مختلف سرباره آهن ارائه شده است.

لازم به ذکر است که به دلیل الزام تصحیح دما بر روی عدد آونگ انگلیسی مطابق استاندارد ASTM E-303 دمای آزمایش در هر قرائت ثبت و تصحیح لازم انجام پذیرفت. در جدول شماره ۳ نتایج

جدول ۳. نتایج قرائت عدد آونگ انگلیسی نمونه‌های آسفالتی حاوی سرباره آهن

متوسط عدد BPN (تصحیح شده دما ۱۵ درجه سانتی‌گراد)	متوسط عدد آونگ انگلیسی (BPN)	شماره نمونه	درصد سنگدانه سرباره در نمونه آسفالتی
۶۸	۶۷	۱	۰
	۷۰	۲	
۸۳	۸۳	۱	۲۵
	۸۴	۲	
۸۱/۵	۷۸	۱	۵۰
	۸۶	۲	
۸۵	۸۳	۱	۷۵
	۸۸	۲	
۸۸	۸۸	۱	۱۰۰
	۸۹	۲	

لغزندگی و نامناسب بودن شرایط سطح از لحاظ ایمنی بسیار بیشتر از مخلوط آسفالتی حاوه سرباره می‌باشد.

آزمایش ارزش صیقلی شدن نمونه‌های رزینی

از دیگر برنامه‌های آزمایشگاهی مربوط به مقاومت لغزندگی، بررسی اثر صیقلی شدن بافت سطحی سنگدانه‌های سرباره در مقایسه با مصالح آهکی بوده است. در واقع نحوه عملکرد بافت ریز سنگدانه‌ها با انجام آزمایش صیقلی دادن با دستگاه مخصوص صیقل دهنده مصالح (APM) مطابق شکل شماره ۵ است.

همانطور که در جدول شماره ۳ می‌توان مشاهده نمود، تمامی اعداد آونگ انگلیسی در محدوده مجاز و قابل قبول (عدد آونگ برابر ۶۵) در مقاطع حساس و مهم جاده از لحاظ لغزندگی (نظیر میادین و تقاطعات) می‌باشد. نکته قابل توجه نزدیک بودن عدد مقاومت لغزندگی نمونه آسفالتی ساخته شده با مصالح آهکی و بدون افزودن سرباره به عدد مجاز مورد اشاره است. از طرفی در نمونه‌های حاوی سرباره، حداقل ۲۰ درصد افزایش در مقادیر BPN مشاهده می‌شود. لذا بدیهی است با گذشت زمان و عبور ترافیک از روسازی آسفالتی با شرایط مشابه، احتمال افت عدد



شکل ۵. دستگاه صیقل دهنده مصالح (APM)

با توجه به اینکه ضریب اصطکاک در حالت سطح خیس ملاک و معیار مقاومت در برابر لغزندگی می‌باشد و بافت ریز سنگدانه‌ها نیز یکی از عوامل تأمین کننده این مقاومت محسوب می‌شود، لذا بر اساس نتایج آزمایش بر روی نمونه‌های رزینی مشاهده می‌شود که در حالت مرطوب بودن سطح سنگدانه‌ها، ۶۸ درصد کاهش در عدد BPN مصالح آهکی پس از سایش با دستگاه صیقلی دهنده به وقوع می‌پیوندد. در حالی که افت عدد آونگ انگلیسی برای نمونه‌های رزینی ساخته شده با مصالح سرباره ناچیز و در حدود ۳ درصد می‌باشد. این امر نشان‌دهنده مقاومت بالا و استحکام قابل قبول بافت ریز مصالح سرباره آهن در برابر لغزندگی و صیقلی شدن آنها است.

برای این منظور ۸ نمونه از مصالح سنگی (شامل ۴ نمونه سرباره و ۴ نمونه سنگدانه آهکی) بر طبق استاندارد ASTM D-3319 با استفاده از قالب مخصوص با کمک چسب رزینی تهیه گردید. سپس قالب‌های رزینی در چرخ دستگاه قرار داده شد و به مدت ۶ ساعت طبق استاندارد مورد اشاره در معرض سایش چرخ دستگاه (به همراه پاشش ریزدانه مخصوص برای ایجاد ساینده‌گی بر روی سنگدانه‌ها) قرار گرفتند. در نهایت آزمایش آونگ انگلیسی بر روی نمونه‌های صیقل داده شده مطابق شکل شماره ۶ قبل و بعد از سایش توسط دستگاه انجام گردید. متوسط نتایج قرائت‌ها در جدول شماره ۴ ارائه شده است.



شکل ۶. انجام آزمایش لغزندگی بر روی نمونه‌های رزینی

جدول ۴. نتایج قرائت عدد آونگ انگلیسی بر روی نمونه‌های قالب رزینی

نوع مصالح نمونه رزینی	قبل از صیقل (سطح خشک)	قبل از صیقل (سطح مرطوب)	بعد از صیقل (سطح مرطوب)
آهکی	۸۱	۴۷	۳۲
سرباره آهن	۸۷	۵۶	۵۴

۵- نتیجه‌گیری

-استفاده از مصالح سرباره آهن‌گدازی جایگزین سنگدانه‌های آهکی، نشان داده است که استقامت مارشال و در نتیجه پایداری مخلوط آسفالتی افزایش قابل توجه خواهد داشت.

بر اساس داده‌های حاصل از انجام آزمایش‌های مختلف بر روی نمونه‌های حاوی سرباره در مخلوط آسفالتی و همچنین نمونه‌های رزینی، اهم نتایج این تحقیق بدین شرح است.

-نتایج آزمایش صیقل پذیری نمونه‌های رزینی حاوی سنگدانه‌های آهکی نشان دهنده افت عدد آونگ انگلیسی به میزان بیش از ۶۰ درصد (در حالت مرطوب) پس از سایش مصالح با دستگاه APM بوده است، بافت ریز مصالح سرباره آهن افت بسیار ناچیز (۳ درصد در حالت مرطوب) پس از سایش را نشان داده است. -به طور کلی این پژوهش آزمایشگاهی نشان دهنده اثرات مثبت و چشمگیر در خصوصیات مقاومتی و لغزندگی مخلوط‌های تهیه شده با سنگدانه‌های سرباره آهن می‌باشد. از طرفی استفاده از چنین محصولات فرعی که طی مراحل تولید فولاد به دور ریخته می‌شوند می‌تواند علاوه بر ایجاد منافع اقتصادی در پروژه‌های راهسازی در مجاورت منابع تولید آن، باعث کاهش آلودگی زیست محیطی ناشی از تولید زباله‌های صنعتی نیز گردد.

-انجام آزمایش پتانسیل شیارشدگی با استفاده از آزمایش خزش دینامیکی با دستگاه UTM موید افزایش استحکام شیارشدگی مخلوط‌های حاوی سرباره آهن نسبت به نمونه‌های بتن آسفالتی معمولی می‌باشد. بر اساس نتایج آزمایش خزش دینامیکی، ورود مخلوط به ناحیه تسلیم به عنوان معیاری برای مقایسه مقاومت شیارشدگی برای نمونه‌های حاوی ۱۰۰ درصد سرباره از ۴۵۰۰ سیکل به بیش از ۲ برابر (نزدیک به ۹۱۰۰ سیکل) افزایش داشته است. -بر اساس نتایج اندازه‌گیری مقاومت لغزشی با دستگاه آونگ انگلیسی برای نمونه‌های آسفالتی حاوی سرباره، افزایش حداقل ۲۰ درصدی در عدد آونگ انگلیسی مشاهده گردید.

۶- مراجع

doi: 10.1061/ (ASCE) 0733-94x (2005)131:6(470)

- Fwa, T. F. (2006). *The Handbook of Highway Engineering*, Taylor and Francis Group, LLC, FL.

- Wambold, J. C., Antle, C. E., Henry, and Rado, z. (1995). International PIARC (Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance, *Association Internationale Permanente des Congres de la Route*, Paris, France.

-Asi I. M. (2005). Evaluating Skid Resistance of Different Asphalt Concrete Mixes. *Building and Environment*, 42(2007): 325-329.

doi: 10.1016/j. buildenv

- Giles, C. G., Sabey, B. E., and Corder, K.H. F. (1964). Development and Performance of the Portable Skid Resistance Tester. *Road Research Technical Paper Number 66*, London.

- Flintsch, G. W., Luo, Y., Al-Qadi, I. L. (2005). Analysis of the Effect of pavement Temperature on the Frictional Properties of Flexible Pavement surfaces. TRB Annual Meeting. *Transportation Research Board of the National Academies*, Washington, D.C.

- FHWA Report, (2016). User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction, *FHWA-RD-97-148*.

- Qiao Dong, Xueqin Chen, (2022). Recycling and applications of steel slag aggregates, Chapter Book, *Handbook of Sustainable Concrete and Industrial Waste Management*, Woodhead Publishing.

- Youwei Gan, Chuangmin li, Wang Ke, Qin hao Deng, Ting Yu, (2022). Study on pavement performance of steel slag mixture based on surface treatment, *Case Studies in Construction Materials 16*, Elsevier.

doi: 10.1016/j.cscm. 2022.e01131

- Kuo Ji, Changchun Shi, Jing Jiang, Yaogang Tian, Xiaowei Zhou, Rui Xiong, (2023). Determining the Long-Term Skid Resistance of Steel Slag Asphalt Mixture Based on the Mineral Composition of Aggregates, Polymer, *MDPI Journal*.

doi: 10.3390/polym15040807

- Bazlamit, S. and Reza, F. (2005). Changes in Asphalt Friction Components and Adjustment Number for Temperature. *The Journal of Transportation Engineering*, ASCE 2005.

Evaluate Using Steel Slag Aggregate on the Mechanical and Frictional Properties of Asphalt and Resin Specimens

*Mahmoudreza Keymanesh, Associate Prof, Department of Civil Engineering,
Payame Noor University, Tehran, Iran.*

*Hamid Jahanian, Ph.D., Student, Department of Civil Engineering,
Payame Noor University, Tehran, Iran.*

*Zolfaghar Zarei, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Meymand Center,
Firoozabad Branch, Islamic Azad University, Firoozabad, Iran.*

*Mahmoud Ameri, Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science
and Technology (IUST), Tehran, Iran.*

E-mail: jahanian61@gmail.com

Received: June 2024- Accepted: September 2024

ABSTRACT

Steel slag aggregate is by product material which was produced by the steelmaking industry, in large quantities in Iran and usually withdrawn from iron making factories. This material contains calcium silicate, manganese, magnesium, iron oxide and calcium. This paper evaluates the effect of steel slag aggregate on the frictional properties of asphalt mixtures using British Pendulum apparatus. On the other hand, few special aggregate samples such as lime stone and steel slag were produced by resin glue with special mold and then subjected to the polishing effect using accelerated polishing machine (APM) for exploring micro texture of those aggregates. Evaluating mechanical properties of asphalt samples done by Marshall Stability and rutting susceptibility using dynamic creep test through the UTM machine. Test results show a positive effect (about 20%) in BPN when adding steel slag as a replacement of lime stone aggregate. Also, potential rutting resistance of steel slag asphalt mixtures increased and finally, better resistance on polishing the surface of steel slag aggregate compared to lime stone was shown.

Keywords: Steel Slag; Rutting Resistance; Skid Resistance; UTM, British Pendulum