

کاربرد سرباره فولاد به عنوان سنگدانه در صنعت راهسازی

مقاله پژوهشی

مهدی زال‌نژاد، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران
ابراهیم حسامی*، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Hesami@KTH.se

دریافت: ۹۹/۰۳/۱۸ - پذیرش: ۹۹/۰۷/۰۴

صفحه ۱۳۴-۱۱۹

چکیده

با توجه به رشد فناوری انواع وسایل نقلیه و افزایش روزافزون آن‌ها در شبکه حمل‌ونقل، توسعه کمیت و کیفیت راه‌ها اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. یکی از روش‌های بهبود و ارتقای مقاومت روسازی‌ها، استفاده از مصالح مرغوبی همچون سرباره فولاد است که موجب افزایش باربری و افزایش عمر روسازی‌ها خواهد شد. سرباره‌های فولاد، محصول جانبی تولید کارخانه‌های فولاد هستند که اغلب به صورت دیو و توده‌های عظیمی در اطراف این کارخانه‌ها انباشته می‌شوند. در طول سال‌ها تحقیقات گسترده‌ای در سطح جهان جهت مصرف این ماده انجام و زمینه‌های متعددی برای این منظور پیشنهاد شده است. یکی از این زمینه‌ها که می‌تواند در حجم زیادی از سرباره‌های فولاد را مورد استفاده قرار دهد، استفاده به عنوان مصالح سنگی در تولید آسفالت است. بدین علت که خواص فیزیکی، اصطکاکی و دوام سرباره فولاد عملکرد بسیار خوبی در مقاومت لغزشی روسازی آسفالتی و جلوگیری از شکل‌گیری برخی خرابی‌ها از قبیل شیارشدگی، عریان‌شدگی و صیقلی شدن سنگدانه‌های آسفالت دارد. در پژوهش حاضر علاوه بر بررسی خواص مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی سرباره فولاد به عنوان جایگزین مصالح سنگی در روسازی‌های آسفالتی، به کاربرد سرباره فولاد در راهسازی از جمله اساس و زیراساس، مخلوط‌های آسفالتی به همراه نتایج آخرین تحقیقات اشاره شده است.

واژه‌های کلیدی: جایگزین سنگدانه، سرباره فولاد، محیط‌زیست، مصالح مناسب روسازی

۱- مقدمه

است که موجب افزایش باربری روسازی‌ها خواهد شد. مصالح سنگی تقریباً ۸۵ الی ۹۰ درصد وزن مخلوط‌های آسفالتی را تشکیل داده و از این‌رو خواص فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی آن‌ها تأثیر مهمی بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی خواهد داشت (Wang, 2016). از دیگر سو مسائل اقتصادی و صرف هزینه با توجه به ابعاد گسترده پروژه‌های راهسازی از مهم‌ترین رویکردهای مهندسی است. حجم بسیار زیاد مصالح سنگی مورد نیاز برای احداث جاده‌ها تاکنون عمدتاً از کوه‌ها و یا بستر رودخانه‌ها تأمین گردیده که در صورت تداوم این امر می‌تواند خطرات جدی برای محیط‌زیست در بر داشته باشد. استفاده از مواد ارزان‌تر و در عین حال مقاوم که بتوانند جایگزین مصالح آسفالت باشد نه تنها به کاهش مستقیم هزینه‌ها کمک می‌کند بلکه با افزایش

گسترده‌ی راه‌ها، یکی از مظاهر توسعه‌یافتگی در هر کشوری محسوب می‌شود. با توجه به رشد فناوری انواع وسایل نقلیه و افزایش روزافزون آن‌ها به شبکه حمل‌ونقل، توسعه کمیت و کیفیت راه‌ها اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند (Robati, Carter, and Perraton, 2015). با در نظر گرفتن تعداد، وزن و ابعاد وسایل نقلیه، باید راه‌ها به گونه‌ای طراحی و ساخته شوند که با توجه به ظرفیت باربری‌شان توانایی پاسخگویی به نیازهای جدید را داشته باشند. به همین علت ساخت راه‌های با عمر مفید بیشتر، بهبود عملکرد روسازی در شرایط اقلیمی نامناسب و ترافیکی سنگین در درازمدت و افزایش مقاومت در برابر لغزندگی، از اهداف عمده طراحان راه و مهندسان راهسازی است. یکی از روش‌های بهبود و ارتقای مقاومت روسازی‌ها، استفاده از مصالح مرغوب‌تر

شکسته است (Gupta and Kneller, 1993). همچنین از دیگر ویژگی‌های این مصالح، بافت سطحی زبر و مقاومتی بالا در برابر سایش است. از این رو می‌توان از آن در ساخت آسفالت روسازی‌های مناطقی همچون پارکینگ‌ها، نواحی نزدیک چهارراه‌ها و یا قوس‌های افقی که در معرض سایش هستند استفاده کرد (Asi, 2007). بر اساس تحقیقات می‌توان از مصالح درشت‌دانه سرباره فولاد به همراه سنگدانه‌های طبیعی در مخلوط‌های آسفالتی استفاده کرد که از جمله محاسن این کاربرد می‌توان به افزایش دوام اصطکاکی سطح جاده، افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل و کاهش معیبهایی همچون عریان‌شدگی و قیرزدگی اشاره کرد (Golalipour et al., 2012; Gransberg, 2010; Wang, 2016). به‌طور کلی میزان تولید زیاد، قیمت ارزان، هزینه‌های نگهداری و انبارداری بالا و نیز کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی از عوامل مؤثر در تمایل به استفاده مجدد سرباره‌ها است (Ameri, Hesami, and Goli, 2013). جایگزینی سرباره‌ها به‌جای سنگدانه‌های طبیعی نه تنها مشکل دپو کردن را برای کارخانه‌های فولادسازی به حداقل می‌رساند بلکه از دیدگاه زیست‌محیطی نیز بسیار ارزشمند است زیرا با بازیابی ضایعات صنعتی و استفاده از آن به‌جای منابع طبیعی علاوه بر کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی، کمک زیادی به حفظ و نگهداری منابع طبیعی غیرقابل جایگزین می‌نماید. چه‌بسا در بسیاری از مناطق که دسترسی به مصالح طبیعی ممکن نبوده و منابع قرضه مصالح سنگی موجود محدود است، بکارگیری سرباره علاوه بر جلوگیری از بروز خسارات جبران‌ناپذیر زیست‌محیطی منجر به کاهش هزینه‌های ساخت می‌گردد (Chaurand et al., 2007).

امروزه در دنیا تحقیقات گسترده‌ای برای بازیافت سرباره‌ها انجام شده که منجر به طرح راهکارهایی برای بازیابی و کاربرد آن‌ها در بسیاری از پروژه‌ها گردیده است. از این موارد می‌توان به استفاده در سیمان سرباره‌ای، به‌عنوان سنگدانه در بتن، راه‌سازی و روسازی راه، خاکریز، بالاست و مواد پرکننده محل قرضه اشاره کرد. ولی عمده‌ترین کاربرد سرباره استفاده در راه‌سازی به‌عنوان لایه‌های اساس و زیراساس و یا به‌عنوان سنگدانه در روسازی بتنی و آسفالتی است (Wang, 2016). در سال‌های اخیر با توجه به مزایای استفاده از سرباره، میزان مصرف و بازیابی سرباره‌ها رشد چشمگیری داشته است به‌طوری که کشور چین از ۱۷ میلیون

طول عمر روسازی به پایین آمدن هزینه‌های تعمیر و نگهداری نیز منجر می‌شود. از این موارد جایگزین می‌توان به سرباره‌های فولاد که محصول جانبی و دورریز کارخانه‌های ذوب فلزات می‌باشند، اشاره کرد (Huang, Bird, and Heidrich, 2007). سرباره فولاد محصول جانبی کارخانه‌های فولادسازی است که در مرحله آخر تولید فولاد به شکل مذاب از پاتیل‌ها خارج شده و پس از سرد شدن بدون داشتن کاربرد مشخصی در محوطه کارخانه‌های فولادسازی رها می‌شود. تقریباً به ازای تولید یک تن فولاد حدود ۱۵۰ تا ۲۰۰ کیلوگرم سرباره فولاد تولید می‌شود (Dong, 1999). در صورت عدم توانایی صنایع فولادی در بازیابی و استفاده از این محصولات، با توجه به حجم تولید بالای آن‌ها، این محصولات از نظر آلاینده‌گی مشکلات زیادی را ایجاد می‌کنند. از جمله محصولات فرعی تولید آهن و فولاد، سرباره، گردوغبار، لجن و پوسته‌های اکسیدی هستند که در میان این محصولات، ساماندهی سرباره به سبب میزان تولید بسیار بیشتر در مقایسه با سایر محصولات جانبی نیاز به توجه بیشتری دارد. علاوه بر اشغال فضای بسیار زیادی از محوطه کارخانه، به دلیل حضور برخی فلزات سنگین درون ترکیبات این محصول، آب‌شستگی سرباره فولاد می‌تواند برای منابع آب زیرزمینی خطرناک باشد (Yildirim and Prezzi, 2009). این تهدید جدی زیست‌محیطی منجر شده که مهندسان محیط‌زیست و عمران به بررسی ویژگی‌های این محصول به‌عنوان سنگدانه در کاربردهای عمرانی به‌ویژه راه‌سازی بپردازند. روش ذوب کردن و نحوه سرد کردن سرباره از جمله عواملی هستند که در سرباره خواص متفاوتی ایجاد می‌کنند و با توجه به خواص متفاوت آن‌ها، زمینه استفاده از آن‌ها نیز با هم فرق خواهد کرد. بر همین اساس سرباره‌ها با توجه به کوره‌های ذوب به دسته‌های مختلف تقسیم می‌شوند. معروف‌ترین سرباره‌ها، سرباره کوره فولادی و سرباره کوره آهن‌گدازی است. سرباره کوره آهن‌گدازی دارای خواص پوزولانی است و به همین دلیل از آن می‌توان به‌عنوان جایگزین درصدی از سیمان در ساخت بتن استفاده نمود؛ اما سرباره‌های کوره فولادی این چنین نیستند و از آن‌ها می‌توان به‌عنوان سنگدانه در صنعت استفاده کرد. سرباره فولاد دارای ویژگی‌های فیزیکی بسیار مناسبی از جمله وزن مخصوص و مقاومت سایشی بالا، شکل گوشه‌دار، مکعبی و

آذرین دارد را به وجود می‌آورد (Hunt and Boyle, 2000)

۲-۱- انواع سرباره‌های فولادی

سرباره‌های فولادی در یکی از سه نوع کوره زیر تولید می‌شوند:

۱. کوره قوس الکتریکی ۱
۲. کوره اکسیژن - بازی ۲
۳. کوره شعله‌ای ۳

در انواع مختلف کوره‌ها روش گرمایش و ذوب شبیه به هم هستند و تفاوت جزعی بین کوره‌های فولاد وجود دارد. در کوره شعله‌ای، سنگ آهک همراه با آهن‌قراضه اضافه می‌گردد و ۵ تا ۱۴ ساعت طول می‌کشد تا ۳۰۰ تن فولاد تولید شود. درحالی‌که در کوره اکسیژن- بازی تهیه همین مقدار فولاد ۴۵ دقیقه زمان لازم است. کوره نوع سوم قوس الکتریکی است که دارای الکتروده‌های گرافیتی برای تولید گرماس (National Slag Association, 1998).

کوره اکسیژن- بازی و کوره قوس الکتریکی دو روش اصلی مورد استفاده به‌منظور تولید آهن خالص و فولاد می‌باشند. در روش کوره اکسیژن- بازی بایستی اکسیژن به درون دریاچه‌های فولادسازی دمیده شود. در صورتی‌که در روش کوره قوس الکتریکی از جریان ولتاژ بالا به‌منظور ذوب کردن آهن استفاده می‌شود. در هر دو روش از روی آهن ذوب شده بایستی کربن، سیلیکون و بسیار عناصر غیر نیاز دیگر در فولاد زدوده شود. در این فرایند آهک به‌عنوان نوعی سیال اضافه می‌گردد تا با مواد غیرضروری موجود در سنگ آهن ترکیب شده و آن‌ها را از فولاد ذوب شده جدا کند (Australasian Slag Association, 1993).

اغلب صنایع تولید فولاد در جهان، بر اساس فناوری کوره اکسیژن- بازی عمل می‌کنند. در ایران در صنایع تولید فولاد، از هر دو فناوری کوره اکسیژن- بازی و کوره قوس الکتریکی استفاده می‌شود (Monshi and Asgarani, 1999). در ادامه به توضیح دو نوع متداول از روش‌های تولید فولاد پرداخته می‌شود.

تن سرباره تولید خود، نزدیک به ۸۰ درصد آن را به‌طور کامل مصرف کرده و فقط ۲۰ درصد آن را انباشته و نگهداری می‌کند (Xue et al., 2006). بنابراین با توجه به روند رو به رشد صنعت فولاد و دپوی چند میلیون تنی سرباره‌ها در کارخانه‌های فولادسازی که مشکلات بسیاری را برای این کارخانه‌ها بوجود آورده است، در کنار محدود بودن مصالح سنگی طبیعی و دیگر ملاحظات زیست‌محیطی، فرآوری و بازیافت سرباره‌ها و ارائه راهکارهای مناسب جهت استفاده از آن از اهمیت بسزایی برخوردار خواهد بود و برای دستیابی به این اهداف پروژه‌های علمی و تحقیقاتی توجه روزافزون و ویژه‌ای را می‌طلبد.

۲-۲- معرفی سرباره فولاد

سرباره فولاد در حقیقت سنگدانه مصنوعی سخت، متراکم، مقاوم در برابر ساییدگی، تمیز و تقریباً سیاه‌رنگ است که از محصولات فرعی کارخانه‌های فولادسازی بوده و از فرایند ذوب فولاد بدست می‌آید. سرباره‌های ذوب شده در کوره به درون یک محوطه باز ریخته می‌شوند تا به حالت جامد تبدیل شوند (Hunt and Boyle, 2000). مشخصات فیزیکی این ماده مانند دانسیته، تخلخل و اندازه‌ی ذرات از سرعت و روش خنک‌سازی سرباره و نیز ترکیبات شیمیایی آن متأثر می‌گردد به‌عنوان مثال خنک‌سازی سرباره با استفاده از آب، سرباره‌ای با میزان تخلخل بالاتر و مقاومت سایش کمتر در مقایسه با سرباره سرد شده با هوا ایجاد می‌کند (National Slag Association, 1998). ترکیبات سرباره شامل اکسید کلسیم، سیلیکات، آهن، آلومینیوم و منیزیم است. بعد از جامد شدن سرباره‌ها، اندازه این قطعات فولادی به حدود یک متر می‌رسد. این سنگ‌های بزرگ را توسط گلوله‌های فولادی سنگین که از ارتفاع ۵/۴ متری توسط جرثقیل‌های مغناطیسی رها می‌شوند، خرد کرده و روی سرنده‌های بزرگی ریخته و آن را می‌لرزاند. دانه‌های ریزتر عبور کرده و مانده‌های روی الک را دوباره به همین روش خرد کرده تا دانه‌بندی مورد نظر تأمین شود. سرباره تولید شده از کوره‌های فولادسازی معمولاً در هوای آزاد سرد شده و یک ماده سنگی جامد را که در ظاهر خواصی مشابه با سنگ

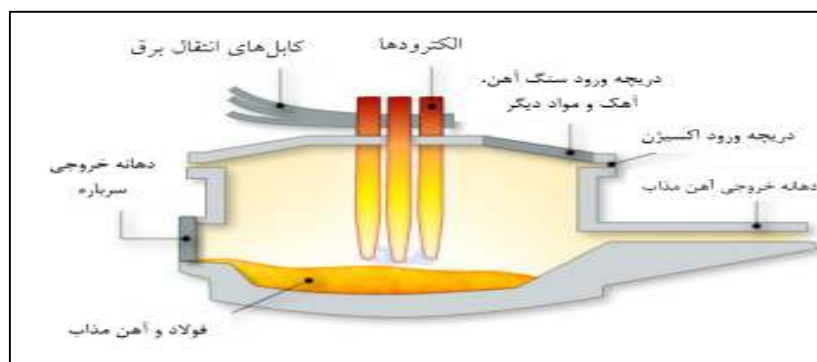
۲-۱-۱- سرباره کوره قوس الکتریکی

در این نوع کوره، آهن اسفنجی به همراه آهن قراضه ذوب و ضمن افزایش درجه خلوص فولاد پس از جدا کردن سرباره، مذاب باقی مانده در پاتیل های بزرگ به واحدهای ریخته گری منتقل می شوند. نمایی از این کوره در ۲-۱-۲- شکل انشان داده شده است (Sherwood, 1995).

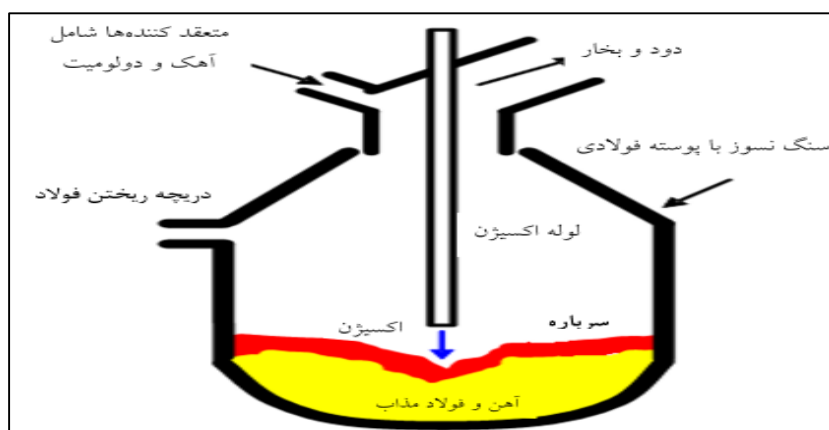
۲-۱-۲- سرباره کوره اکسیژن- بازی (کنورتور)

نظریه کاربرد اکسیژن تحت فشار روی فلز مذاب، با وجود سرباره توسط پرفسور روبرت دور^۴ سوئسی برای اولین بار مطرح گردید و یک کنورتور^۵ سه تنی آزمایشی برای این منظور در سال ۱۹۴۷ ساخته شد و در سال ۱۹۴۸، در حدود یک تن فولاد به این صورت تولید گردید. بر اساس این آزمایش، یک کنورتور دو تنی نیز در لینز^۶ واقع در اتریش ساخته شد و اولین فولاد محصول آن به شکل موفقیت آمیزی در ۲۵ ژوئن سال ۱۹۹۴ به دست آمد. در این روش گاز

اکسیژن تحت فشار، پس از عبور از داخل لوله ای که با آب سرد می شود، روی بار کنورتور وارد شده و آن را تصفیه می کند. لوله اکسیژن به حالت قائم، در داخل کنورتور تا فاصله معینی از سطح فلز مذاب پایین آورده می شود. فشار اکسیژن باعث نفوذ آن به داخل فلز مذاب و سرباره گردیده، آن را متلاطم می کند. ناخالصی های ایجاد شده با آهنی که به کنورتور اضافه می شود، ترکیب و سرباره ای را تشکیل می دهد که عامل اصلی جهت دفع گوگرد و فسفر موجود در فلز مذاب است. این سرباره به صورت کفی شکل در روی سطح فلز مذاب جمع می شود و سپس به کمک پاتیل حمل و درون حوضچه هایی تخلیه می شود که جهت خنک و سرد شدن آنها، بر رویشان آب پاشیده می شود (Cabrera, Moron, and Garcia, 2014). نمایی از این کوره در Error! Reference source not found. نشان داده شده است.



شکل ۱. کوره قوس الکتریکی (Kopeliovich, 2012b)



شکل ۲. کوره اکسیژن- بازی (کنورتور) (Kopeliovich, 2012a)

۳- بررسی خصوصیات و ویژگی‌های سرباره فولاد

۳-۱- مشخصات فیزیکی

را در قیاس با سایر مصالح نشان می‌دهد. همان‌طور که در بیان شده است، چگالی و وزن مخصوص ظاهری سرباره‌های فولاد بیشتر از دیگر مصالح است. این عامل به دلیل حضور اکسیدهای سنگین فلزی در ترکیبات آن‌ها بوده که موجب سنگین تر شدن آن‌ها نسبت به دیگر مصالح شده است (Wang, 2016).

مرکز مطالعات تورنرفایر بانک^۷ گزارش داده است که دانه‌های سرباره فولاد از لحاظ ظاهری تیز گوشه بوده و دارای سطحی با بافت زیر هستند (Chesner, Collins, and MacKay, 1998) این مصالح دارای وزن مخصوص بالا و درصد جذب آب محدود می‌باشند. ۱-۱- شکل ۱ جدول ۱ برخی خصوصیات فیزیکی این مصالح

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی مصالح سرباره فولادی (Australasian Slag Association, 1993)

مصالح طبیعی	سنگ بازالت	سرباره فولاد	خصوصیات
۲/۸ - ۲/۶	۲/۸	۳/۷ - ۳	چگالی حقیقی، (gr/cm^3)
۴ - ۱	۱,۹	حداکثر ۳	جذب آب، (%)
۱۸۰۰ - ۱۶۰۰	۱۵۲۰	۲۰۰۰ - ۱۷۰۰	وزن مخصوص، (Kg/m^3)
-	۲۸	۱۱ - ۵	ضریب تورق، %

۳-۲- خصوصیات مکانیکی

جایگزینی آن‌ها را امکان‌پذیر می‌سازد (Wang, 2016).
Error! Reference source not found.
 خصوصیات مکانیکی سرباره فولاد را در قیاس با مصالح طبیعی نشان می‌دهد.

سرباره‌های فولادسازی دارای خواص مکانیکی بسیار مناسبی نسبت به سنگدانه‌های معمولی است. شکل زاویه‌ای بسیار خوب، افت وزنی کم در مقابل عوامل جوی، مقاومت لغزشی، سختی و سایش بالا از یکسو و توان باربری بالا، مقاومت بالا در برابر فشار و ضربه از سوی دیگر شرایط

جدول ۲. مقایسه خصوصیات مکانیکی سرباره‌ها و مصالح طبیعی (Australasian Slag Association, 1993)

مصالح طبیعی	سرباره فولاد	خصوصیات
۲۰ - ۲۵	۱۳ - ۱۸	سایش لس آنجلس، %
۳ - ۵	۶ - ۷	سختی مور، %
<۵	<۱	سلامت، (%)

۳-۳- خصوصیات شیمیایی

می‌تواند موجب مشکلاتی در محصولات دارای سرباره فولاد شود و این یکی از دلایلی است که باعث شده، سرباره مصالحی مناسب برای استفاده در بتن دارای سیمان پرتلند و یا خاکریزهای متراکم در زیر دال‌های بتنی نباشد. برای رفع این مشکل می‌توان با انبار کردن سرباره‌ها در هوای آزاد به مدت چند ماه آن‌ها را در معرض رطوبت ناشی از بارش طبیعی قرار داده و یا به صورت مصنوعی روی آن‌ها آب پاشی

سنگدانه‌های سرباره فولاد در تماس با رطوبت معمولاً در اثر هیدراته شدن آهک آزاد و منیزیم، تمایل به انبساط و افزایش حجم دارند. این ویژگی به دلیل حضور آهک آزاد و اکسید منیزیم در سرباره فولادی است که در فرآیند تولید فولاد با ترکیبات سیلیکاتی وارد واکنش نشده‌اند و بنابراین در شرایط محیطی مرطوب می‌توانند هیدراته شده و تا ۱۰ درصد افزایش حجم پیدا کنند. این قابلیت بالقوه انبساطی

که در نتیجه به علت این امر (به علت کم بودن خاصیت پوزولانی و مشکلات آسیاب کردن سرباره‌ها) نمی‌توان از آن‌ها در صنعت سیمان استفاده نمود. با مقایسه مقدار گوگرد و آهک موجود در سرباره‌ها مشخص می‌شود که درصد گوگرد موجود در سرباره فولاد کمتر ولی آهک آن بیشتر است. که مورد دوم احتمال شکستگی آهک در سرباره فولاد را افزایش می‌دهد و در هنگام مصرف این نوع سرباره باید به آن توجه نمود. سرباره فولاد نسبت به سرباره کوره بلند به علت دانسیته بالاتر، استحکام و مقاومت بیشتر در برابر سایش، برای روکش‌های جاده‌ها مناسب‌تر می‌باشند.

کرد. منظور از این عمل، انجام فرآیند هیدراته شدن و منبسط شدن از بین بردن پتانسیل افزایش حجم سرباره‌ها قبل از استفاده آن‌ها به عنوان سنگدانه است تا از لحاظ شیمیایی، خنثی و پایدار شده باشند دوره زمانی که سرباره‌های فولادی باید در معرض هوای آزاد باشند بنا بر نوع آن متفاوت بوده و گاهی به ۱۸ ماه می‌رسد. (National Slag Association, 1998). در جدول ۳-۱-۱-۱ شکل ۱ جدول ۱ ترکیبات سرباره‌های فولاد و سرباره کوره بلند بیان گردیده است. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، برخلاف سرباره‌های آهن‌گدازی (کوره بلند)، سرباره‌های فولاد، حاوی اکسید سیلیسیم کم و اکسید آهن زیادی هستند.

جدول ۳. ترکیبات موجود در سرباره‌های مختلف (WSDOT, 2015)

سرباره BOF، %	سرباره EAF، %	سرباره کوره بلند، %	ترکیبات
۱۹-۱۰	۱۶-۱۴	۳۱-۴۵	SiO ₂
۳-۱	۸-۵	۱۷-۱۰	Al ₂ O ₃
۳۰-۵	۳۰-۵	۰,۱-۱	Fe
۵۲-۴۰	۲۸-۲۶	۳۴-۴۸	CaO
۱۰-۵	۱۰-۸	۱۵-۱	MgO
۱-۰,۵	۱-۰,۵	-	P ₂ O ₅
۸-۵	۴-۱	۱,۴-۰,۱	MnO
۱-۰	-	۱-۰,۶	K ₂ O
۱-۰	-	۰,۵-۰,۱	Na ₂ O
۲-۱	-	۳-۲	TiO ₂
<۰,۱	-	۲,۳-۰,۲	S

سرباره در واحدهای بزرگ فولادسازی به خودی خود یک تهدید زیست‌محیطی بالقوه محسوب می‌گردد. این موضوع از آن جهت حائز اهمیت است که دفع یا ذخیره‌سازی این حجم از سرباره مستلزم پیش‌بینی و آماده‌سازی سطح وسیعی از اراضی در بر گیرنده واحد فولادسازی است، درحالی‌که در بسیاری از مواقع محدودیت دسترسی به موقعیت و محل مناسب دفع ضایعات مذکور موجب تغییر کاربری زمین‌های کشاورزی و منابع طبیعی به‌منظور ذخیره‌سازی سرباره می‌گردد که خود از جهت تغییر چهره و ماهیت طبیعی، دارای عوارض نامناسبی است. از دیگر عوارض زیست‌محیطی سرباره تأثیرات احتمالی آن به واسطه وجود برخی از عناصر سنگین بر آب‌های زیرزمینی بوده که خود می‌تواند همراه با سایر عوامل جوی و محیطی نظیر باران‌های

۳-۴- خصوصیات حرارتی

سنگدانه‌های سرباره فولاد در مقایسه با سنگدانه‌های طبیعی متداول، به‌طور قابل ملاحظه‌ای گرما را بیشتر در خود حبس می‌کنند. این ویژگی می‌تواند در کارهای تعمیر و نگهداری رویه‌های آسفالتی در زمستان مزیت شمرده شود (وزارت راه و شهرسازی - پژوهشکده حمل و نقل، ۱۳۸۸).

۳-۵- تأثیرات زیست‌محیطی سرباره

توجه روزافزون به حفظ محیط‌زیست امروزه موجب گشته تا فرآیند و فناوری‌ها به‌گونه‌ای طراحی و مورد بهره‌برداری قرار گیرند تا از یکسو ضایعات و آلودگی‌های بر جای مانده به حداقل ممکن رسیده و از طرف دیگر نیز در مصرف منابع و انرژی صرفه‌جویی گردد. ظرفیت قابل ملاحظه تولید

مانند مقاومت برشی، مقاومت سایشی، نفوذپذیری، جذب آب و ... به طور کامل وابسته به نوع و جنس سنگدانه است. بنابراین، گاهی برای رسیدن به عملکرد مورد انتظار، مصالح سنگی طبیعی (از نظر ماهیت سنگدانه یا از لحاظ اقتصادی) مناسب نیستند و مصالح سنگی مصنوعی مانند سرباره فولاد می‌تواند جایگزین مناسبی باشند. به طور خلاصه استفاده مصالح سرباره موجب ایجاد تحول صنعتی و علمی در صنایع سیمان، بتن، راه‌سازی و آسفالت خواهد شد.

۵- کاربردهای رایج استفاده از سرباره فولاد

۵-۱- در ساخت بتن

سرباره‌ها با توجه به این‌که ارزش پوزولانی داشته باشند یا نه، در بتن به دو صورت مورد استفاده قرار می‌گیرند. سرباره‌ها اگر دارای خاصیت پوزولانی باشند به‌عنوان جایگزینی بخشی از سیمان استفاده می‌شوند در غیر این صورت از آن‌ها به‌عنوان سنگدانه در ساخت بتن می‌توان استفاده نمود.

۵-۲- ساخت آسفالت

امروزه اکثر جاده‌ها توسط مخلوط‌های آسفالتی پوشیده شده و بیش از ۹۰ درصد وزن مخلوط‌های آسفالتی را سنگدانه‌ها تشکیل می‌دهند. ساخت و نگهداری این جاده‌ها نیازمند مقادیر قابل توجهی مصالح سنگی است (Wu et al., 2007). مصالح مصنوعی و بازیافتی که به‌عنوان مصالح سنگی در روسازی به کار می‌روند بایستی همانند مصالح معمولی، استانداردهای قید شده در آیین‌نامه‌های روسازی را دارا باشند. به همین دلیل می‌توان از همان آزمایش‌ها برای تعیین خصوصیات مصالح بازیافتی استفاده کرد. عمده استفاده سرباره فولاد در لایه رویه روسازی‌های آسفالتی است. چرا که قیر ذرات سرباره فولادی را پوشش داده و مانع از عمل هیدراتاسیون اکسید کلسیم و اکسید منیزیم می‌شود. همچنین باعث بهبود خصوصیات اصطکاکی سطح رویه آسفالتی می‌شود. بنابراین سرباره فولادی می‌تواند به‌عنوان مصالح سنگی در بتن آسفالتی، مخلوط‌های آسفالت متخلخل، مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای، لایه‌های نازک آسفالتی، آسفالت سطحی و روکش آسفالت به کار رود

اسیدی، بافت خاک و ماهیت مواد تشکیل دهنده آن، همچنین عمق آب‌های زیرزمینی موجب تأثیر بر شبکه سطحی آب‌های پذیرنده در منطقه گردند. در این میان وجود ترکیب Cao آزاد در ساختار سرباره می‌تواند تحت تأثیر آب باران با سیلاب‌های محلی عاملی برای تغییر pH خاک آب‌های زیرزمینی شود که از این بعد حائز اهمیت است (Wang, 2016).

۴- دلایل کاربرد سرباره فولاد

مطالعات نشان می‌دهد مصرف سرباره در بسیاری از کشورهای جهان همچون آمریکا، انگلستان، استرالیا و بسیاری از کشورهای اروپایی به‌عنوان یک اصل زیست‌محیطی و اقتصادی پذیرفته شده و تقریباً به‌طور متوسط، دوسوم سرباره تولیدی در این کشورها بازیافت شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌عنوان نمونه انگلستان در حال حاضر به نرخ ۱۰۰ درصد از بازیافت مصالح سرباره فولادی دست پیدا کرده که ۹۸ درصد از این بازیافت به‌عنوان سنگدانه در بتن و آسفالت مورد استفاده قرار می‌گیرد (Huang, Bird, and Heidrich, 2007). تمایل برای بازیافت و استفاده از سرباره دلایل مختلفی دارد. این دلایل از سه جنبه زیست‌محیطی، فنی و اقتصادی قابل بررسی بوده که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود (Wang, 2016).

۴-۱- ملاحظات زیست‌محیطی

با پیشرفت سریع فناوری تولید فولاد و اهمیت زیاد این محصول، دولت‌ها تلاش زیادی برای افزایش تولید فولاد دارند. افزایش تولید فولاد باعث بوجود آمدن دپوهای عظیم از سرباره فولاد در نزدیکی کارخانه شده است. به‌طوری‌که گاهی وسعت دپوی فولاد از مساحت خود کارخانه بیشتر است. این انباشتگی سرباره و تأثیر آن بر محیط، به‌خصوص بر آب‌های زیرزمینی، خود سبب مشکلات زیست‌محیطی فراوانی شده است.

۴-۲- ملاحظات فنی

در سازه‌هایی که سنگدانه‌ها، بخش عمده مصالح را تشکیل می‌دهند (مثل سازه‌های بتنی یا راه)، طبعاً کیفیت عملکرد سازه با کیفیت سنگدانه‌ها ارتباط تنگاتنگی دارد. خصوصیتی

آمدن دانه‌ها. در این فرآیند، معمولاً ابتدا دانه‌های ریز از سطح راه کنده می‌شوند و سپس همان‌طور که فرسایش ادامه می‌یابد، دانه‌های بزرگ‌تر نیز از سطح آسفالت کنده شده و سطح راه، حالت زبر و ناهموار پیدا می‌کند. در نوعی دیگر از این عارضه، دانه‌های مصالح از لبه آسفالت پریده و فرسایش به سمت داخل عرض آسفالت گسترش می‌یابد (Roberts et al., 1991). با جایگزینی مصالح سرباره فولادی به جای مصالح سنگی، به سبب ایجاد قفل‌شدگی مناسب بین سنگدانه‌ها و تشکیل پیوند قوی‌تر با قیر، امکان بروز این عارضه کاهش پیدا می‌کند. در پاره‌ای از موارد برای ترمیم رویه فرسایش یافته از آسفالت‌های سطحی استفاده می‌شود که تحقیقات نشان‌دهنده کاربرد موفقیت‌آمیز استفاده از سرباره در این نوع آسفالت‌هاست (Wang, 2016).

۵-۲-۳- بوجود آمدن ترک‌های مختلف در آسفالت

در سطوح آسفالتی به صورت مختلف ترک عارض می‌شود. قفل و بست میان سنگدانه‌ها در آسفالت سرباره‌ای به سبب شکل منحصر به فرد دانه‌های آن به مراتب بهتر از آسفالت با مصالح معمولی عمل می‌کند. از این رو تغییر شکل در آسفالت کمتر است و لایه‌ها پس از تراکم، نشست کمتر و در عین حال مقاومت بیشتر دارند. همچنین در برابر سولفات‌ها و مواد شیمیایی بهتر از مصالح معمولی عمل نموده و به سبب مقاومت خوب در برابر ضربه، در مرحله ساخت آسفالت و نیز در اثر تراکم خرد نمی‌شود. از دیگر مزایای آن می‌توان به ارزش ماسه‌ای بالای آن اشاره نمود که مقدار بالای آن موجب پایداری بیشتر آسفالت ساخته شده با این مصالح به خصوص در حضور رطوبت و هنگام یخبندان (تورم بسیار کمتر) می‌شود. به‌طور کلی در آسفالت سرباره‌ای تعداد ترک‌ها و وسعت آن به علت وجود چنین ویژگی‌هایی کاهش می‌یابد (Wang, 2016).

۵-۲-۴- لغزندگی رویه آسفالت

مقاومت در برابر لغزندگی به‌عنوان نیرویی که در برابر سرخوردن لاستیک‌ها بر روی سطح روسازی، هنگامی که از چرخیدن لاستیک‌ها ممانعت می‌کند، تعریف می‌شود. آزمایش سایش بوسیله دستگاه لس‌آنجلس، میزان مقاومت در برابر سایش مصالح سنگی به کار رفته در آسفالت را مشخص می‌کند. هر چقدر نسبت سایش بیشتر باشد، سطح راه

(Asi, 2007). مطالعات نشان می‌دهد سرباره فولادی باعث بهبود برخی خصوصیات مخلوط آسفالت می‌شود. در واقع برخی آسیب‌های متداول در مخلوط‌های آسفالتی را کاهش می‌دهد. به همین جهت مناسب است در اینجا به چند مورد از آسیب‌های متداول آسفالت و نقش سرباره در کاهش این آسیب‌ها پرداخته شود.

۵-۲-۱- عریان‌شدگی^۷

اساساً مصالح راه‌سازی از نظر الکتریکی خنثی نیستند. به‌طور مثال شن و ماسه که اکثراً از جنس سیلیس می‌باشند، تمایل به بارهای مثبت نشان می‌دهند. یعنی خود دارای بارهای منفی هستند. از طرف دیگر قیر که شامل هیدروکربن‌های طویل است، حالت قطبی ضعیفی دارد و تمایل به بارهای منفی دارد. با این توضیحات می‌توان نتیجه گرفت که اتصال قیر- مصالح از نوع الکترواستاتیک است که در آن نیروهای جاذبه، ضعیف هستند. از آنجایی که آب قطبی‌تر از قیر است، با حضور آب در این سیستم، مولکول‌های قیر به راحتی کنار زده شده و آب با مصالح پیوند الکترواستاتیک قوی‌تری تشکیل می‌دهد و اصطلاحاً آسفالت عریان می‌شود. معمولاً وقتی که چسبندگی کافی بین قیر و مصالح ایجاد شد، این پیوند به‌آسانی از بین نمی‌رود، مگر در مواردی که مولکول آب به اتصال قیر و مصالح نفوذ نموده و آن را از بین ببرد (نویخت و دیگران، ۱۳۹۵). از مطالب گفته‌شده دو نتیجه مهم حاصل می‌گردد:

اول این که اگر مصالح مورد استفاده آغشته به آب باشند، غیرممکن است که قیر معمولی بتواند در سطح مصالح، جایگزین آب گردد و دوم اینکه چنانچه مصالح با قیر پوشیده باشند، ممکن است آب بتواند اتصال مذبور را بر هم بزند. علت پدیده عریان‌شدگی، پیوند ضعیف بین قیر و مصالح سنگی است. بنابراین در صورتی که مصالح سنگی به کار رفته در آسفالت بتوانند با قیر پیوند محکم‌تری ایجاد کنند، عریان‌شدگی دیرتر اتفاق می‌افتد. سرباره فولاد دارای خاصیت بازی است و از این رو با قیر که به‌صورت نسبی خاصیت اسید دارد، ترکیب مقاومی در برابر نفوذ آب ایجاد می‌کند و لذا آسفالت در برابر پدیده عریان‌شدگی و همچنین عوامل قلیایی مقاوم‌تر خواهد بود (Huang et al., 2007).

۵-۲-۲- هوازدگی و دانه‌دانه شدن^۸

هوازدگی و دانه‌دانه شدن عبارت‌اند از سائیده شدن سطح روسازی ناشی از، از بین رفتن چسبنده‌ی قیری و از جا در

واحد، به ترتیب بیشترین و کمترین افت عدد آونگی^{۱۱} را داشته و ارزش صیقلی سنگ برای این دو نوع سنگ به ترتیب ۷، ۳۹ و ۵۲،۷ گزارش شده است (Hosking, 1976).

۵-۲-۵- شیارشدگی

در آسفالت‌های حفاظتی به دلیل نقش تعیین‌کننده سنگدانه‌ها در شیارشدگی درحالی‌که مصالح تشکیل‌دهنده آسفالت مقاومت کافی نداشته باشند و یا مصالح سنگی به‌خوبی با یکدیگر قفل و بست نشوند، در مواقعی از سال که هوا گرم است، در اثر عبور اتومبیل‌ها، به‌خصوص اتومبیل‌های سنگین، این خرابی در قسمت‌های از آسفالت سطح راه اتفاق می‌افتد. این مشکل در محل توقف خودروهای سنگین مثل ایستگاه‌های اتوبوس و یا نزدیک تقاطع‌ها مشهودتر است. سنگدانه سرپاره به سبب مقاومت فشاری مناسب، نیروهای وارده از چرخ را بهتر تحمل می‌کند. همچنین این سنگدانه‌ها به دلیل ماهیت تیز گوشه و زبر با هم قفل و بست می‌شوند و تغییر شکل در سطح آسفالت کمتر خواهد بود (Hunt and Boyle, 2000).

۶- مروری بر پژوهش‌های صورت گرفته در

ارتباط با سرپاره

در دهه‌های اخیر بسیاری از کشورها تحقیقات گسترده‌ای بر روی سرپاره‌ها و کاربردشان انجام داده‌اند. در این قسمت به‌طور اجمالی به تعدادی از آخرین مقالات چاپ شده همراه با نتایج آن اشاره می‌شود. زال‌نژاد و حسامی در سال ۱۳۹۷ در تحقیقی به ارزیابی تأثیر سرپاره فولاد بر عملکرد آسفالت حفاظتی میکروسرفیسینگ پرداختند. در این تحقیق از مصالح ۱۰۰ درصد سیلیسی به‌عنوان مخلوط شاهد استفاده شد و سپس سرپاره فولاد در درصدهای ۴۲،۵ درصد، ۶۱ درصد و ۱۰۰ درصد جایگزین سنگدانه‌های مخلوط شاهد گردید. مخلوط‌های میکروسرفیسینگ بواسطه آزمایش‌های چسبندگی در ۳۰ و ۶۰ دقیقه، سایش در شرایط مرطوب در مدت زمان ۱ ساعت، میزان جابه‌جایی عمودی و جانبی با چرخ بارگذاری شده مورد بررسی واقع شدند. نتایج آزمایش چسبندگی و آزمایش سایش در شرایط مرطوب حاکی از آن بود که مخلوط‌های حاوی مصالح سرپاره فولاد نسبت به

آسفالتی زودتر صیقلی می‌شود. از طرفی کم بوده این نسبت باعث صدمه به لاستیک خودروها می‌شود. بدیهی است که کاهش در مقدار مقاومت لغزندگی، باعث افزایش در نرخ تصادفات رانندگی بویژه در فصول مرطوب می‌شود. سالانه بیش از یک میلیون نفر در سراسر جهان، در اثر تصادفات رانندگی جان خود را از دست می‌دهند. اگرچه عمده این تصادفات ناشی از عامل انسانی است، لیکن وضعیت سطح رویه آسفالتی جاده‌ها نیز مؤثر است (Asi, 2007).

یکی از نواقص عمده سطوح آسفالتی به‌خصوص در مناطقی که جنس مصالح طبیعی سنگ آهک است، لغزنده بوده آن‌ها است (Manglorkar, Kandhal, and Parker, 1993). سرپاره‌های فولاد از جمله مصالحی هستند که از مقاومت لغزشی بالایی برخوردار بوده و می‌توان از آن‌ها در مخلوط‌های آسفالتی استفاده کرد (Baker, 1990). خواص فیزیکی و بافت سطحی سرپاره فولاد ضریب اصطکاک را در لایه رویه ایجاد می‌کند که عموماً بیشتر از سنگدانه‌های طبیعی است. ترکیب منحصر به فرد سرپاره فولاد که از ساختار ذره‌ای سخت تشکیل شده باعث به وجود آمدن پوشش سطحی روسازی با مقاومت لغزندگی بلندمدت نسبتاً خوبی می‌شود که معمولاً در مورد سنگدانه‌های طبیعی این‌طور نیست. تحقیقات انجام شده نشان داده است که نسبت سایش لس آنجلس سرپاره در حد مناسبی بوده، به‌طوری که علاوه بر افزایش عمر روسازی، مشکلی برای لاستیک خودروها بوجود نمی‌آورد (Wang, 2016). همچنین سایر تحقیقات از افزایش زبری سطح روسازی و کاهش طول خط ترمز حکایت دارد (Hunt and Boyle, 2000). یکی دیگر از شاخص‌های مطرح روسازی در این زمینه، میزان توانایی سنگدانه در برابر صیقلی شدن نام دارد که به نام ارزش صیقلی سنگ (PSV)^۹ معروف است. دانستن این شاخص در انتخاب رویه برای قسمت‌های مختلف راه، به‌ویژه قوس‌ها و تقاطع‌ها، نقش مهم و بسزایی دارد (ERGÜN and AGAR, 2000). این شاخص به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ویژگی سنگدانه‌ها برای استفاده در آسفالت‌های حفاظتی و لایه‌های رویه راه تشخیص داده شده است. در پژوهشی هشکینگ^{۱۱} (۱۹۷۶)، ارزش صیقلی ۲۰ نمونه سنگ را مورد بررسی قرار داد. از بین ۲۰ نمونه سنگ تهیه شده، سنگ آهکی با میانگین ۱۵ واحد و سرپاره با ۱

مخلوط شاهد به دلیل بر خورداری از خواص مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی مطلوب، موجب بهبود عملکرد میکروسرفیسینگ شامل افزایش چسبندگی قیر به مصالح سنگی و افزایش مقاومت در برابر سایش خواهد شد. همچنین در آزمایش تعیین میزان جابه‌جایی با چرخ بارگذاری شده کمترین میزان جابه‌جایی در مخلوط حاوی ۶۱ درصد سرباره فولاد مشاهده شده و نسبت به نمونه شاهد موجب کاهش جابه‌جایی عمودی و جانبی به ترتیب به میزان ۴۵،۶۵ درصد و ۳۵ درصد گردید (زال‌نژاد و حسامی، ۱۳۹۷). در پژوهشی دیگر در سال ۲۰۱۷ به ارزیابی پیرشدگی بلندمدت مخلوط آسفالتی گرم حاوی سرباره فولادی کوره قوس الکتریک توسط مسعودی و ابطحی پرداخته شد. در این تحقیق عملکرد بلندمدت مخلوط آسفالتی گرم حاوی سرباره کوره قوس الکتریک مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور آزمایش‌های استقامت مارشال، مدول برجهندگی در ۲۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت کششی غیرمستقیم و حساسیت رطوبتی انجام پذیرفت. در این آزمایش مشخص شد، جایگزینی سنگدانه‌های معدنی با سرباره فولاد موجب افزایش استقامت مارشال، سفتی، مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم می‌شود. همچنین دیگر نتایج در این پژوهش نشان داد که مخلوط آسفالتی گرم حاوی سرباره فولادی دارای پیرشدگی کمتری نسبت به نمونه شاهد دارای مصالح آهکی است از این رو استفاده از آن در مخلوط آسفالتی گرم پیشنهاد شده است (Masoudi, Abtahi, and Goli, 2017). همچنین فخری و احمدی در سال ۲۰۱۷ در تحقیقی به ارزیابی مقاومت شکست مخلوط آسفالتی حاوی سرباره فولاد و مصالح بازیافتی آسفالتی پرداختند. برای این منظور، ۵۷۶ نمونه خمشی نیم‌دایره‌ای با نسبت‌های مختلف از این دو ماده در دو مرحله پیری تهیه شده و تحت سیکل‌های ذوب و یخبندان قرار گرفتند. در ادامه نمونه‌ها تحت تیر خمشی سه نقطه‌ای در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد مورد آزمایش قرار گرفته و نرخ آزادسازی انرژی کرنشی بحرانی و شاخص انعطاف‌پذیری آن‌ها اندازه‌گیری شده و با یکدیگر مقایسه شد. نتایج نشان داد که سیکل‌های ذوب و یخبندان، پیری طولانی مدت و در نظر گرفتن مصالح RAP مقاومت شکستگی را کاهش داده، درحالی‌که استفاده

سرباره فولادی موجب افزایش آن می‌شود. علاوه بر آن ترکیب RAP موجب بهبود حساسیت رطوبتی شده درحالی‌که ترکیب سرباره فولاد آن را افزایش می‌دهد. به‌طور کلی در این مقاله مشخص شد که ترکیب هم‌زمان سرباره فولاد و RAP در بهبود مقاومت شکستگی و حساسیت رطوبتی می‌تواند مؤثر واقع شود (Fakhri and Ahmadi, 2017). در مطالعه‌ای گلی و حسامی در سال ۲۰۱۷ به بررسی رفتار مخلوط آسفالتی گرم حاوی سرباره فولاد پرداختند. در این پژوهش رفتار خستگی و شیارشدگی مخلوط به ترتیب بوسیله تیر خمشی چهار نقطه‌ای و آزمایش خزش دینامیکی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از سرباره فولادی به‌عنوان قسمت درشت‌دانه در مخلوط آسفالتی گرم موجب بهبود عملکرد آن شده و استفاده از آن به‌عنوان مخلوط مناسب، اقتصادی و سازگار با محیط‌زیست توصیه شده است (Goli, Hesami, and Ameri, 2017). در دیگر تحقیقات شیوچن و هسیووی در سال ۲۰۱۶ به بررسی مشخصات و عملکرد مخلوط آسفالتی حاوی سرباره فولاد پرداختند. در این پژوهش سرباره فولاد کوره اکسیژن-بازی (کنورتور) به‌جای سنگدانه‌های درشت‌دانه مورد ارزیابی آزمایشگاهی قرار گرفتند. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از سرباره فولاد در مخلوط آسفالتی موجب مقاومت بهتر در برابر تغییر شکل دائمی و آسیب ناشی از رطوبت می‌شود. همچنین آزمون‌های جاده‌ای بر روی سه نوع مخلوط آسفالتی شامل آسفالت ماستیکی درشت‌دانه با سرباره فولاد، آسفالت بتنی متراکم با سرباره فولاد و آسفالت بتنی متراکم با سنگدانه طبیعی انجام شد. از بین سه مخلوط، مخلوط آسفالتی ماستیک درشت‌دانه با سرباره فولادی دارای کمترین شیار بوده و همچنین کیفیت رانندگی و مشخصات اصطکاکی در بخش‌های با سرباره فولاد بسیار بهتر از بخش‌های ساخته شده با سنگدانه طبیعی بود. نتایج مطالعات میدانی نشان داد که سرباره فولاد می‌تواند به‌جای درشت‌دانه در مکان‌هایی انتظار ترافیک سنگین و یا مانورهای غیرمنتظره می‌رود، مورد استفاده قرار بگیرد. از آنجایی که در طی سه سال ترافیک بر روی بخش‌هایی که با آسفالت سرباره فولادی ساخته شده‌اند، مورد عبور و مرور قرار گرفت، هیچ نوع شیارشدگی، ترک و دیگر خرابی مهم و قابل توجهی در آن‌ها مشاهده نشد. در پایان در این پژوهش

شیارشدهگی شده است. همچنین افزودن سرباره فولاد به مخلوط اثرات ناچیزی در برابر ترک خستگی بالا به پایین و حساسیت رطوبتی دارد. در نهایت در این پژوهش استفاده از سرباره فولاد را در مناطقی که از لاستیک یخ شکن استفاده شده و موجب صیقلی شدن جاده و کاهش طول عمر روسازی می شود، توصیه می کند (Pasetto and Baldo, 2014). در پژوهشی دیگر امکان سنجی استفاده از سرباره فولاد BOF در مخلوط های آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه ای^{۱۴} توسط وو و همکارانش در سال ۲۰۰۷ انجام شد. نتایج این تحقیق نشان داد که می توان از سرباره فولاد به عنوان منبعی مناسب، مقرون به صرفه و کارا به عنوان سنگدانه در بتن آسفالتی استفاده کرد (Wu et al., 2007). آسی و همکارانش نیز در سال ۲۰۰۷ با انجام تحقیقی بر روی مخلوط های حاوی سرباره فولاد نشان دادند که جایگزین کردن ۳۰ درصد سرباره فولاد با سنگدانه های طبیعی بیشترین ضریب اصطکاک را برای مخلوط های آسفالتی در بر خواهد داشت همچنین مطالعات آن ها نشان داد که تا ۷۵ درصد از کل سنگدانه ها را می توان با سرباره فولاد جایگزین کرد (Asi, 2007).

در تحقیق دیگری که در سال ۲۰۱۱ توسط پاستو به منظور بررسی عملکرد مخلوط سرباره ای انجام شد، نمونه های سرباره ای رفتار بهتری در برابر تغییر شکل دائم از خود نشان داده و مدول سختی و مدول خستگی بالاتری داشتند (Pasetto and Baldo, 2011). نعمان علی و همکارانش در سال ۱۹۹۲ طی تحقیقاتی جامع در زمینه استفاده از سرباره فولادی در مخلوط آسفالتی از درصد های مختلفی سرباره در پنج مخلوط آسفالتی کردند و نتایج بدست آمده از آزمایش های صورت گرفته بر روی آن ها را با سه مخلوط آسفالتی که به طور متداول در کانادا استفاده می شد، مقایسه نمودند. این آزمایش ها شامل آزمایش مقاومت کشش غیرمستقیم، مدول برجهنگی، خزش، تغییر شکل دائمی، حساسیت در برابر رطوبت و خستگی می شدند و نتایج آزمایشگاهی نشان داد که مخلوط های آسفالتی دارای سرباره فولادی خواص و ویژگی های بهتری از خود در مقایسه با مخلوط آسفالتی متداول در روسازی نشان دادند بطوریکه مخلوط هایی که حاوی ۱۰۰ درصد سرباره فولادی بودند بالاترین مقاومت در برابر شیارشدهگی و ترک های ناشی از

استفاده از سرباره فولاد را به عنوان جایگزینی برای قسمت درشت دانه مخلوط های آسفالتی از نظر فنی مناسب دانستند (Chen and Wei, 2016). در پژوهشی دیگر توسط عامری و حسامی در سال ۲۰۱۳ به امکان سنجی استفاده از سرباره فولادی کوره قوس الکتریک (EAF) به جای سنگدانه آهکی در مخلوط آسفالتی نیمه گرم (WMA) پرداختند. در این مطالعه بافت سطحی هر دو سنگدانه آهکی و سرباره فولادی بوسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تخلخل و زبری سرباره فولادی بسیار بیشتر از سنگ آهک است. علاوه بر آن نتایج آزمایشگاهی نشان داد که استفاده از سرباره فولاد به عنوان درشت دانه در مخلوط آسفالتی گرم، استقامت مارشال، مدول برجهنگی، مقاومت کششی، مقاومت در برابر خرابی های رطوبتی و مقاومت در برابر شیارشدهگی را بهبود می بخشد. در پایان این مطالعه استفاده از این نوع سنگدانه را به عنوان درشت دانه در مخلوط آسفالتی گرم توصیه نمودند (Ameri et al., 2013). پاستو و بالدو در سال ۲۰۱۴ در تحقیقی به بررسی مقاومت شیارشدهگی آسفالت ماستیکی درشت دانه حاوی سرباره فولاد و خاکستر زغال سنگ پرداخته و آن را با سنگدانه های آهکی مورد مقایسه قرار دادند. مقاومت در برابر تغییر شکل مخلوط SMA بوسیله آزمایش بار محوری مکرر^{۱۲} و آزمایش رد چرخ^{۱۳} مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به مخلوط SMA ساخته شده با سنگدانه های طبیعی، استفاده از سرباره کوره قوس الکتریک تا ۴۰ درصد، موجب افزایش مقاومت در برابر شیارشدهگی است (Pasetto and Baldo, 2014). در گزارشی توسط ون و همکاران در سال ۲۰۱۴ به ارزیابی سرباره فولادی به عنوان سنگدانه در مخلوط آسفالتی داغ پرداخته شد. در طراحی این مخلوط از روش سوپریو استفاده شده و چهار درصد متفاوت (۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰) از سرباره فولاد در مخلوط مورد استفاده واقع شد. عملکرد مخلوط به طور جامع از لحاظ مدول دینامیکی، عدد جریان و خواص شکست در دمای متوسط و کم مورد ارزیابی قرار گرفته و آزمایش رد چرخ هامبورگ به منظور بررسی شیارشدهگی نیز بر روی مخلوط ها صورت گرفت. نتایج نشان داد که افزایش سرباره فولاد موجب افزایش ضریب اصطکاک بافت سطح، مقدار مدول دینامیکی، مقاومت در برابر ترک خوردگی حرارتی و مقاومت

سرباره می‌تواند استفاده از آن در این گونه روکش‌ها به‌عنوان سنگدانه باشد، در صورتی که این امر مهم انجام‌پذیر و عملی باشد، هم به حفظ منابع مصالح طبیعی کمک می‌کند و هم از آلودگی‌های زیست‌محیطی جلوگیری می‌شود.

۸- پی‌نوشت‌ها

1. Electric Arc Furnace (EAF)
2. Basic Oxygen Steel or Basic Oxygen Furnace (BOS or BOF)
3. Open Hearth Furnace (OHF)
4. Robert Durrer
5. Convertor
6. Linz
7. Turner Fairbank
8. Stripping
9. Raveling and Weathering
10. Polished Stone Value
11. Hoshking
12. Repeated Load Axial Test
13. Wheel Tracking Test
14. Stone Mastic Asphalt

۹- مراجع

زال‌نژاد، م.، حسامی، ا.، (۱۳۹۷)، "ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر استفاده از سرباره فولاد بر مشخصات آسفالت حفاظتی میکروسرفیسینگ"، مهندسی زیر ساخت‌های حمل و نقل.

اکرچی زاده، م.، منتظر، ش.، عالی زاده، ر.، چینی، م.، (۱۳۸۳)، "ارزیابی آزمایشگاهی مشخصات روبراه‌های فولادی برای استفاده به‌عنوان سنگدانه در ساخت روسازی آسفالتی"، دومین همایش قیر و آسفالت ایران، تهران، دانشکده فنی دانشگاه تهران.

عامری، م.، زارعی، ذ.، جهانیان، ح.، (۱۳۸۷)، "بررسی آزمایشگاهی اثر دانه بندی بر مقاومت لغزندگی بتن آسفالتی" چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، تهران، دانشگاه تهران.

نویخت، ش.، رضائی، س.، میرشکاریان بابکی، م.، خورده بینان، م.، (۱۳۹۵)، "تکنولوژی روسازی و مواد"، تهران، انتشارات بین‌المللی عصرقلم.

وزارت راه و شهرسازی، پژوهشکده حمل و نقل. (۱۳۸۸)، "بررسی علل بروز خرابی‌های زودرس روسازی‌های آسفالتی"، تهران.

-Ali, N. A., Chan, J. S. S., Papagiannakis, T., Theriault, E. G., and Bergan, A. T., (1992), "The use of steel slag in asphaltic concrete. In Effects of aggregates and mineral fillers on asphalt mixture performance", ASTM International.

دمای پایین را از خود نشان دادند (Ali, 1992). در انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران در سال ۱۳۸۳ به مطالعه خواص سرباره‌های فولاد مجتمع فولاد اهواز برای استفاده در روسازی آسفالتی پرداخته شده است. بر اساس نتایج این تحقیق، استفاده از سرباره موجب افزایش ۵۰ درصد مقاومت مارشال در روسازی آسفالتی می‌شود (شکرچی زاده و همکاران، ۱۳۸۳). عامری و همکارانشان در چند مقاله به بررسی تأثیر سرباره بر روی کاهش خرابی و ایمنی روسازی آسفالتی پرداخته‌اند. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که با افزایش درصد سرباره استحکام مخروط‌های آسفالتی در برابر شیارشدگی افزایش می‌یابد. همچنین در مقاله دیگری نیز به بررسی اثر استفاده از سرباره بر مقاومت لغزندگی روسازی آسفالتی پرداخته شده است. مقاومت لغزندگی یکی از پارامترهای مهم در ایمنی روسازی‌ها به‌شمار می‌رود که در این مقاله با انجام آزمایش‌های متعدد به این نتیجه رسیدند که استفاده از سرباره‌ها مقاومت لغزندگی را افزایش داده و موجب ایمن‌تر شدن روسازی آسفالتی می‌گردد (محمود عامری، ذوالفقار زارعی، حمید جهانیان، ۱۳۸۷).

۷- نتیجه‌گیری

در ایران به‌کارگیری سرباره به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان متداول است برای مثال شرکت سیمان سپاهان از آسیاب سرباره کوره آهن‌گدازی در ساخت سیمان استفاده می‌نماید، اما هنوز به‌کارگیری سرباره فولادی به‌عنوان سنگدانه چندان رایج نیست و به همین دلیل حجم بالایی از این نوع سرباره در کارخانه‌های ذوب‌آهن کشور وجود دارد که آن‌ها را در دپو سازی این سرباره‌ها دچار مشکل کرده است. دپوی سرباره‌ها علاوه بر این که هزینه‌های انبارداری و نگهداری گزافی را به کارخانه‌های ذوب‌آهن تحمیل می‌کند، موجب آلودگی‌های جدی در محیط‌زیست شده و حتماً باید به نحوی مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به توضیحات فوق و ضرورت استفاده از سرباره‌ها روشن می‌شود که باید تحقیقات بسیاری بر روی سرباره‌های موجود در کشور انجام گیرد و با توجه به خصوصیات آن‌ها، زمینه‌های مختلف برای استفاده از آن‌ها تعیین شود.

با توجه به ضرورت حفظ روسازی‌های کشور و استفاده از انواع آسفالت‌های حفاظتی، یکی از زمینه‌های کاربرد

- Golalipour, A., Jamshidi, E., Niazi, Y., Afsharikia, Z., and Khadem, M., (2012), "Effect of aggregate gradation on rutting of asphalt pavements", *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 53, pp.440–449.
- Goli, H., Hesami, S., and Ameri, M. (2017), "Laboratory Evaluation of Damage Behavior of Warm Mix Asphalt Containing Steel Slag Aggregates", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(6).
- Gransberg, D. D., (2010), "NCHRP Synthesis 411: Microsurfacing: a synthesis of highway practices", Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC.
<https://doi.org/10.17226/14464>.
- Gupta, J. D., and Kneller, W. A., (1993), "Precipitate potential of highway subbase aggregates", University of Toledo, Ohio Department of Transportation.
- Hosking, J. R., (1976), "Aggregates for skid-resistant roads", Report Number 693, Transport and Road Research Laboratory, Berkshire, United Kingdom.
- Huang, Y., Bird, R. N., and Heidrich, O., (2007b). "A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements. Resources", *Conservation and Recycling*, 52(1), pp.58–73.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.02.002>.
- Hunt, L., & Boyle, G., (2000), "steel slag in hot mix asphalt concrete", oregon department of Transportation.
- Kopeliovich, D. (2012a), "Basic Oxygen Furnace (BOF)", Retrieved from http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=basic_oxygen_furnace_bof.
- Kopeliovich, D., (2012b), "Electric Arc Furnace (EAF)", Retrieved from http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=electric_arc_furnace_eaf.
- Manglorkar, D., Kandhal, P., & Parker, F., (1993), "Evaluation of Limestone Coarse Aggregate in Asphalt Concrete Wearing Courses", Alabama Department of Transportation.
- Masoudi, S., Abtahi, S. M., and Goli, A., (2017), "Evaluation of electric arc furnace steel slag coarse aggregate in warm mix asphalt subjected to long-term aging",
-Ameri, M., Hesami, S., and Goli, H., (2013), "Laboratory evaluation of warm mix asphalt mixtures containing electric arc furnace (EAF) steel slag", *Construction and Building Materials*, 49, pp.611–617.
- Asi, I. M., (2007), "Evaluating skid resistance of different asphalt concrete mixes", *Building and Environment*, 42(1), pp.325–329.
- Australasian Slag Association, (1993), "A Guide to the Use of Slag in Roads", Road and Traffic Authority, Australia.
- Baker, R. F., (1990), "Asphalt Emulsion Slurry Seal and Wheelpath Inlay", ASTM International.
<https://doi.org/10.1520/STP23511S>
- Cabrera, C., Moron, C., and Garcia, A. (2014), "Learning Process of the Steel Use in Building Engineering Students", *American Journal of Educational Research*, 2(6), pp.366–371.
<https://doi.org/10.12691/education-2-6-6>.
- Chaurand, P., Rose, J., Briois, V., Olivi, L., Hazemann, J.-L., Proux, O., and Bottero, J.-Y., (2007), "Environmental impacts of steel slag reused in road construction: A crystallographic and molecular (XANES) approach", *Journal of Hazardous Materials*, 139(3), pp.537–542.
- Chen, J. S., and Wei, S. H., (2016), "Engineering properties and performance of asphalt mixtures incorporating steel slag", *Construction and Building Materials*, 128, pp.148–153.
- Chesner, W. H., Collins, R. J., and MacKay, M. H., (1998), "User guidelines for waste and by-product materials in pavement construction", Report Number FHWA-RD-pp.97-148, Washington, D.C.: Federal Highway Administration, US Department of Transportation.
- Dong, B. P., (1999), "Treatment and utilization of solid wastes", Beijing, China.
- ERGÜN, M., and AGAR, E., (2000), "Optimisation of road surface friction from macro-and microtexture: Point of view", In *International symposium on pavement surface characteristics of roads and airfields* pp. 217–226.
- Fakhri, M., and Ahmadi, A., (2017), "Evaluation of fracture resistance of asphalt mixes involving steel slag and RAP: Susceptibility to aging level and freeze and thaw cycles", *Construction and Building Materials*, 157, pp.748–756.

- WSDOT, (2015), "Strategies regarding use of steel slag aggregate in pavements", A report to the state legislature in response to 2ESHB 1299, Washington State Department of Transportation.
- Wu, S., Xue, Y., Ye, Q., and Chen, Y., (2007), "Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures", *Building and Environment*, 42(7), pp.2580–2585.
- Xue, Y., Wu, S., Hou, H., and Zha, J., (2006), "Experimental investigation of basic oxygen furnace slag used as aggregate in asphalt mixture". *Journal of Hazardous Materials*, 138(2), pp.261–268.
- Yildirim, I. Z., & Prezzi, M., (2009), "Use of steel slag in subgrade applications", joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette. <https://doi.org/10.5703/1288284314275>.
- Construction and Building Materials, pp.135, 260–266.
- Monshi, A., and Asgarani, M. K., (1999), "Producing Portland cement from iron and steel slags and limestone", *Cement and Concrete Research*, 29(9), pp.1373–1377.
- National Slag Association, (1998), "Steel Slag-A Premier Construction Aggregate", National Slag Association, Wayne, PA, 12.
- Pasetto, M., and Baldo, N., (2011), "Mix design and performance analysis of asphalt concretes with electric arc furnace slag", *Construction and Building Materials*, 25(8), pp.3458–3468.
- Pasetto, M., and Baldo, N., (2014), "Rutting resistance of Stone Mastic Asphalts with steel slag and Coal Ash", *Sustainability, Eco-Efficiency, and Conservation in Transportation Infrastructure Asset Management*, pp.31–42.
- Robati, M., Carter, A., and Perraton, D., (2015), "Evaluation of a modification of current microsurfacing mix design procedures", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 42(5), 319–328. <https://doi.org/10.1139/cjce-2013-0578>.
- Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D.-Y., and Kennedy, T. W., (2009), "Hot mix asphalt materials, mixture design and construction", NAPA Research and Education Foundation.
- Sherwood, P. T., (2001), "Alternative materials in road construction", London: Thomas Telford.
- Wang, G. C. (2016), "Slag use in asphalt paving", In *The Utilization of Slag in Civil Infrastructure Construction*, pp. 201–238. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100381-7.00010-0>.

Application of Steel Slag as Aggregate in the Road Construction Industry

Mehdi Zalnezhad, Assistant Professor, Highways and Transportation Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

Ebrahim Hesami, Assistant Professor, Highways and Transportation Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

E-mail: Hesami@KTH.se

Received: March 2020-Accepted: September 2020

ABSTRACT

Due to the growing technology of various types of vehicles and their increasing application in the transportation network, the development of road quantity and quality is of particular importance. One way to improve and increase the strength of pavements is to use high-quality materials such as steel slag, which will increase the bearing capacity of the pavements and their life span. Steel slags are by-products of the steel factory, which are often stored as deposits and massive masses around these factories. Over the years, extensive research has been conducted around the world for the use of this substance and several fields have been proposed for this purpose. One of these fields which use the steel slags in large amounts, is as the aggregate in the production of asphalt. This is because it has good physical and frictional properties as well as good durability in resisting the slippage of asphalt pavement and preventing the formation of some deterioration, such as rutting, stripping and polishing of asphalt aggregates. In the present study, in addition to studying the mechanical, physical and chemical properties of steel slag as an aggregate alternative in asphalt pavements, the most recent studies have been mentioned and the use of steel slag in road construction including base and sub-base, and asphalt mixes have been investigated.

Keywords: Aggregate Alternative, Steel Slag, Environment, Suitable Pavement Materials