

جمهوری اسلامی ایران
سازمان برنامه و بودجه کشور

راهنمای استفاده از سرباره‌های آهن و فولاد در لایه‌های اساس و زیراساس روسازی راه

نشریه شماره

آخرین ویرایش ۱۴۰۰/۱۲/۰۷

وزارت راه و شهرسازی
مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
bhrc.ac.ir

معاونت فنی، امور زیربنایی و تولیدی
امور نظام فنی و اجرایی
Nezamfanni.ir

اصلاح مدارک فنی

خواننده گرامی:

امور نظام فنی و اجرایی معاونت فنی، امور زیربنایی و تولیدی سازمان برنامه و بودجه کشور، با استفاده از نظر کارشناسان برجسته مبادرت به تهیه این نشریه نموده و آن را برای استفاده به جامعه مهندسی کشور عرضه نموده است. با وجود تلاش فراوان، این اثر مصون از ایرادهایی نظیر غلط مفهومی، فنی، ابهام، ابهام و اشکالات موضوعی نیست.

از این رو، از شما خواننده گرامی صمیمانه تقاضا دارد در صورت مشاهده هرگونه ایراد و اشکال فنی مراتب را به صورت زیر گزارش فرمایید:

۱- در سامانه مدیریت دانش اسناد فنی و اجرایی (سما) ثبت نام فرمایید: sama.nezamfanni.ir

۲- پس از ورود به سامانه سما و برای تماس احتمالی، نشانی خود را در بخش پروفایل کاربری تکمیل فرمایید.

۳- به بخش نظرخواهی این ضابطه مراجعه فرمایید.

۴- شماره بند و صفحه مورد نظر را مشخص کنید.

۵- ایراد مورد نظر را به صورت خلاصه بیان دارید.

۶- در صورت امکان متن اصلاح شده را برای جایگزینی ارسال نمایید.

کارشناسان این امور نظرهای دریافتی را به دقت مطالعه نموده و اقدام مقتضی را معمول خواهند داشت. پیشاپیش از همکاری و دقت نظر جنابعالی قدردانی می شود.

نشانی برای مکاتبه: تهران، میدان بهارستان، خیابان صفی‌علی‌شاه، مرکز تلفن ۳۳۲۷۱،

سازمان برنامه و بودجه کشور، امور نظام فنی و اجرایی.

Email: info@nezamfanni

web: nezamfanni.ir

باسمه تعالی

پیشگفتار

سرباره^۱ به هر گونه مواد کلوخه‌ای^۲ اطلاق می‌شود که طی فرآیند تولید یک عنصر اصلی و جداسازی آن از ناخالصی‌های ماده خام اولیه، به صورت محصول جانبی و بر اثر سرد شدن مواد مذاب با کمک آب یا هوا تولید می‌شود. با توجه به مقادیر زیاد تولید سرباره آهن و فولاد در کشور و اثرات محیط زیستی آن، نمی‌توان به راحتی پذیرفت که این سرباره‌ها در محل‌های دفن زباله یا دپوهای ضایعات دورریز شوند. از سوی دیگر با افزایش نگرانی‌ها از کمبود منابع طبیعی مصالح سنگی، ضرورت یافتن جایگزینی مناسب برای تأمین مصالح سنگی بیش از پیش احساس می‌شود. سرباره‌ها می‌توانند به عنوان مصالح ساختمانی و راهسازی کاربردهای گسترده‌ای داشته باشند. استفاده مناسب از سرباره‌ها، اثرات محیط زیستی آن‌ها را کاهش می‌دهد، باعث حفظ منابع طبیعی می‌شود و بازدهی اقتصادی نیز به همراه دارد.

برخلاف مصالح سنگی معمولی که از منابع طبیعی دست‌نخورده نظیر رودخانه‌ها و کوه‌ها به دست می‌آیند، سرباره‌ها به عنوان یک فرآورده جانبی دورریز تولید می‌شوند که این مصالح از نظر ترکیبات و شرایط فیزیکی تنوع زیادی دارند و الزامات ویژه‌ای برای خردایش، انبارش، روش‌های مصرف و کنترل کیفیت آن‌ها نیاز است. تاریخچه استفاده از سرباره نشان می‌دهد که مصرف سرباره همواره یک چرخه را دنبال کرده است: (۱) شناسایی کاربرد، (۲) مواجهه با مشکلات عملکردی در زمان بهره‌برداری، (۳) یافتن علل مشکلات و حل آن‌ها و (۴) دستیابی به یک کاربرد مناسب از نظر فنی و این چرخه پیوسته ادامه دارد.

با توجه به آنکه برای گسترش استفاده از سرباره در صنعت راهسازی، نیاز به تدوین یک راهنمای مناسب در زمینه کاربرد سرباره که بتواند مابین تولیدکنندگان سرباره و کاربران سرباره در صنعت راهسازی ارتباط برقرار کند احساس می‌شود، انتظار می‌رود با تهیه «راهنمای استفاده از سرباره‌های آهن و فولاد در لایه‌های اساس و زیراساس روسازی راه»، زمینه استفاده از سرباره‌ها به عنوان مصالح لایه‌های روسازی راه در آیین‌نامه و مقررات ملی فراهم گردد. بدیهی است همانند سایر مصالح، استفاده از سرباره‌های آهن و فولاد در هر پروژه راهسازی، نیازمند توجه فنی و اقتصادی مبتنی بر توسعه پایدار براساس عواملی مانند فاصله حمل، آماده‌سازی و ... می‌باشد.

علی‌رغم تلاش و دقتی که برای تهیه این مجموعه صرف شده است، این مجموعه از وجود اشکال و ابهام در مطالب آن مصون نیست؛ بنابراین در راستای تکمیل و پربار شدن این نشریه از کارشناسان محترم درخواست می‌شود موارد اصلاحی را به امور نظام فنی و اجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور ارسال کنند. کارشناسان سازمان پیشنهادهای دریافت شده را بررسی کرده و در صورت نیاز به اصلاح در متن نشریه/ضابطه، با همفکری نمایندگان جامعه فنی کشور و کارشناسان

¹ Slag

² Agglomerated

مجرب این حوزه نسبت به تهیه متن اصلاحی، اقدام و از طریق پایگاه اطلاع رسانی نظام فنی و اجرایی کشور برای بهره- برداری عموم، اعلام خواهند کرد. به همین منظور و برای تسهیل در پیدا کردن آخرین ضوابط ابلاغی معتبر، در بالای صفحات، تاریخ تدوین مطالب آن صفحه درج شده است که در صورت هر گونه تغییر در مطالب هر یک از صفحات، تاریخ آن نیز اصلاح خواهد شد. از این رو همواره مطالب صفحات دارای تاریخ جدیدتر معتبر خواهد بود.

حمید امانی همدانی

معاون فنی، امور زیربنایی و تولیدی

اسفندماه ۱۴۰۰

تهیه و کنترل «راهنمای استفاده از سرباره‌های آهن و فولاد در لایه‌های اساس و زیراساس روسازی راه»

اعضای گروه تهیه کننده:

محمد شکرچی زاده	دکترای عمران - تکنولوژی بتن	دانشگاه تهران
احمد منصوریان	دکترای عمران - راه و ترابری	مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
علی اصغر اکبری نسرکانی	کارشناسی ارشد عمران - راه و ترابری	شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک
محمود جدیدی	کارشناسی ارشد عمران - راه و ترابری	شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک
ناهید عطارچیان	دکترای عمران - سازه	مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
عطا آقایی آرانی	دکترای عمران - ژئوتکنیک	مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

اعضای گروه نظارت:

فریدون مقدس نژاد	دکترای عمران راه و ترابری	دانشگاه صنعتی امیرکبیر
------------------	---------------------------	------------------------

گروه هدایت و راهبری:

علیرضا توتونچی	معاون امور نظام فنی و اجرایی	سازمان برنامه و بودجه کشور
طاهر فتح‌اللهی	رئیس گروه امور نظام فنی و اجرایی	سازمان برنامه و بودجه کشور

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول- کلیات.....
۳	۱-۱- معرفی سرباره.....
۶	۱-۲- دسته‌بندی سرباره‌ها.....
۶	۱-۲-۱- انواع سرباره بر اساس جنس سنگ معدنی.....
۷	۲-۲-۱- انواع سرباره بر اساس فرآیندهای تولید.....
۸	۳-۲-۱- انواع سرباره بر اساس روش‌های خنک‌سازی.....
۹	۴-۲-۱- انواع سرباره‌های آهنی رایج.....
۱۳	۳-۱- روش‌های تولید سرباره آهن و فولاد.....
۱۳	۱-۳-۱- تولید آهن و تشکیل سرباره کوره بلند.....
۱۳	۱-۱-۳-۱- فرآیند تولید آهن.....
۱۶	۲-۱-۳-۱- تشکیل سرباره کوره بلند.....
۱۸	۲-۳-۱- فرآیندهای تولید فولاد و تشکیل سرباره فولاد.....
۱۹	۱-۲-۳-۱- فرآیند فولادسازی کوره اکسیژن بازی و تشکیل سرباره.....
۲۱	۲-۲-۳-۱- فرآیند فولادسازی کوره قوس الکتریکی و تشکیل سرباره.....
۲۳	۳-۲-۳-۱- فرآیند فولادسازی کوره پاتیلی و تشکیل سرباره.....
۲۴	۴-۱- ویژگی‌های سرباره آهن و فولاد.....
۲۴	۱-۴-۱- ویژگی‌های سرباره کوره بلند خنک شده در هوا ACBFS.....
۲۴	۱-۱-۴-۱- ویژگی‌های شیمیایی.....
۲۶	۲-۱-۴-۱- ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی.....
۲۷	۲-۴-۱- ویژگی‌های سرباره‌های فولاد.....
۲۷	۱-۲-۴-۱- ویژگی‌های شیمیایی.....
۳۲	۲-۲-۴-۱- ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی.....
۳۴	۵-۱- سرباره و توسعه پایدار.....
۳۷	فصل دوم- مرور ادبیات فنی.....
۳۹	۱-۲- مشخصات فنی مصالح اساس و زیراساس.....
۳۹	۱-۱-۲- ویژگی‌های کلی مصالح سنگی اساس و زیراساس.....
۳۹	۱-۱-۱-۲- دانه‌بندی مصالح.....

۴۱	۲-۱-۱-۲- مقاومت مصالح.....
۴۱	۲-۱-۱-۳- شکل و بافت مصالح.....
۴۲	۲-۱-۱-۴- دوام مصالح.....
۴۲	۲-۱-۲- آزمایش‌های تعیین ویژگی‌های کلی مصالح اساس و زیراساس.....
۴۲	۲-۱-۲-۱- آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا CBR.....
۴۳	۲-۱-۲-۲- آزمایش سایش لوس آنجلس.....
۴۴	۲-۱-۲-۳- آزمایش سایش میکرو دوال.....
۴۴	۲-۱-۲-۴- آزمایش یخبندان و ذوب.....
۴۴	۲-۱-۲-۵- آزمایش دوام در برابر سولفات.....
۴۵	۲-۱-۳- حدود مشخصات فنی مصالح لایه‌های اساس و زیراساس.....
۴۵	۲-۱-۳-۱- مشخصات فنی مصالح اساس و زیراساس طبق نشریات شماره ۱۰۱ و ۲۳۴.....
۴۷	۲-۱-۳-۲- مشخصات فنی مصالح اساس و زیراساس طبق استاندارد ASTM D2940.....
۴۹	۲-۱-۳-۳- مشخصات فنی مصالح اساس و زیراساس طبق استاندارد AASHTO M147.....
۵۰	۲-۱-۳-۴- مشخصات فنی مصالح اساس و زیراساس طبق استاندارد ASTM D1241.....
۵۱	۲-۱-۳-۵- مشخصات فنی مصالح اساس و زیراساس طبق استاندارد JIS A5015.....
۵۲	۲-۲- کاربرد مصالح سرپاره در اساس و زیراساس.....
۵۴	۲-۲-۱- عملکرد مصالح سرپاره فولاد در اساس و زیراساس.....
۶۲	۲-۱-۱- مطالعات انجام شده در داخل کشور.....
۶۴	۲-۲-۲- آماده‌سازی مصالح سرپاره فولاد برای اساس و زیراساس.....
۶۵	۲-۲-۳- ملاحظات طراحی اساس و زیراساس.....
۶۵	۲-۳- معیار انبساط حجمی سرپاره فولاد.....
۶۶	۲-۳-۱- تعیین مقدار انبساط حجمی در شرایط محدود نشده.....
۶۷	۲-۱-۳-۱- ویژگی‌های اصلی و مکانیزم انبساط سرپاره فولاد.....
۶۸	۲-۱-۳-۲- انبساط حجمی تئوری سرپاره فولاد.....
۷۱	۲-۱-۳-۳- آزمایش انبساط حجمی سرپاره فولاد.....
۷۴	۲-۳-۲- ارائه معیار برای انبساط حجمی سرپاره فولاد.....
۷۴	۲-۲-۳-۲- معیار انبساط حجمی سرپاره فولاد در اساس و زیراساس.....
۷۶	۲-۲-۳-۲- اصلاح معیار انبساط حجمی سرپاره فولاد در اساس و زیراساس.....
۷۹	فصل سوم- مشخصات فنی و ملاحظات اجرایی.....

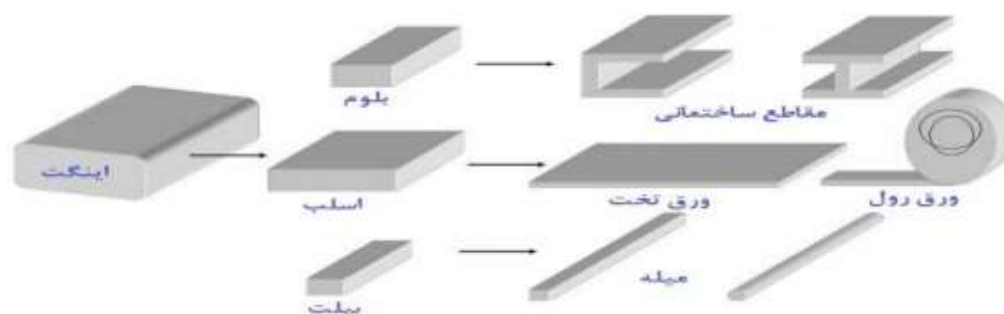
۸۱	۱-۳- مقدمه.....
۸۱	۲-۳- مشخصات فنی مصالح سرباره.....
۸۱	۱-۲-۳- مشخصات فیزیکی و مکانیکی.....
۸۲	۲-۲-۳- مشخصات شیمیایی.....
۸۳	۳-۲-۳- دانه بندی.....
۸۳	۴-۲-۳- سایر مشخصات.....
۸۵	۳-۳- ملاحظات اجرایی مصالح سرباره.....
۸۵	۱-۳-۳- تولید سرباره.....
۸۵	۲-۳-۳- خردایش و دیوی سرباره.....
۸۶	۳-۳-۳- آماده سازی بستر.....
۸۶	۴-۳-۳- پخش و تراکم مصالح اساس و زیراساس.....
۸۸	۵-۳-۳- کنترل تراکم میدانی.....
۸۹	۶-۳-۳- کنترل سطح تمام شده.....
۸۹	۷-۳-۳- حفاظت سطح راه به هنگام اجرای عملیات.....
۸۹	۸-۳-۳- آزمایش های کنترل کیفیت.....
۹۱	مراجع

فصل ۱

کلیات

۱-۱- معرفی سرباره^۱

صنعت ذوب آهن و فولادسازی یکی از مهمترین صنایع در جهان است. معمولاً برای به دست آوردن فولاد خام از دو نوع تکنولوژی رایج استفاده می‌شود. در تکنولوژی اول از معادن سنگ آهن برای تولید فولاد خام استفاده می‌شود و در تکنولوژی دوم، قراضه‌ها، ضایعات صنعتی یا فولادهای خارج از رده را بازیافت می‌کنند. فولاد خام در صنعت فولادسازی در انواع قطعات شمش^۲ (اینگت)، شمشال (بیلت)، شمشه^۳ (بلوم) و تختال^۴ (اسلب) تولید شده و از طریق فرایندهای مکانیکی به ریل، پروفیل ساختمانی، میلگرد، ورق یا سیم و کابل تبدیل می‌شود (شکل ۱-۱).



شکل (۱-۱): انواع مقاطع رایج فولادی و نام آن‌ها

در شکل ۱-۲ فرآیندهای تولید آهن و فولاد و انواع سرباره تولید شده در هر مرحله به صورت شماتیک نشان داده شده است. بیش از دو سوم فولاد خام تولیدی در جهان از ذوب کردن سنگ آهن به دست می‌آید. در این فرآیند، سنگ آهن بر اثر مخلوط شدن با ذغال سنگ، کک و سنگ آهک در یک کوره بلند^۵ (BF) به آهن تبدیل می‌شود. در مرحله بعد، آهن با استفاده از یک کوره اکسیژن بازی^۶ (BOF) به فولاد تبدیل می‌شود. اما بخش بزرگی از فولاد جهانی نیز با استفاده از قراضه و ضایعات آهن و فولاد تولید می‌شود. برای ذوب کردن و بازیافت قراضه و ضایعات فولادی از کوره‌های قوس الکتریکی^۷ (EAF) استفاده می‌شود که در آن از انرژی الکتریکی برای تولید حرارت استفاده می‌گردد. در این حالت، پس از کوره قوس الکتریکی، فولاد حاصله را در یک کوره پاتیلی^۸ (LF) می‌ریزند تا فولاد مذاب برای تولید فولاد با کیفیت‌های متفاوت تصفیه شود (Brito & Agrela, 2018).

¹ Slag

² Ingot

³ Bloom

⁴ Slab

⁵ Blast Furnace

⁶ Basic Oxygen Furnace

⁷ Electric Arc Furnace

⁸ Ladle Furnace

بنابراین، فولادسازی مدرن فرآیندی یکپارچه شامل تولید آهن در کوره بلند BF و فولادسازی در کوره اکسیژن بازی BOF یا کوره قوس الکتریکی EAF است. فولاد مذاب حاصل از فرآیند کوره اکسیژن بازی یا کوره قوس الکتریکی را می‌توان طی یک فرآیند ثانویه درون کوره پاتیلی LF تصفیه کرد یا مستقیماً به مرحله ریخته‌گری انتقال داد. حین فرآیند تولید آهن در کوره بلند (شکل ۱-۲، سمت چپ)، بر اثر ذوب شدن سنگ آهن، قراضه آهن، کک و سنگ‌های گدازآور (گدازه)^۱، سرباره کوره بلند^۲ (BFS) تشکیل شده و در ادامه تخلیه می‌شود. حین فرآیند تولید فولاد نیز (شکل ۱-۲، سمت راست) بر اثر ذوب شدن آهن، قراضه فولاد، آلیاژها و گدازه‌ها سرباره فولاد^۳ (SS) تشکیل شده و در ادامه تخلیه می‌شود. بسته به این که سرباره فولاد از کدام کوره تهیه شده باشد، به سه نوع سرباره کوره اکسیژن بازی^۴ (BOFS)، سرباره کوره قوس الکتریکی^۵ (EAFS) و یا سرباره کوره پاتیلی^۶ (LFS) نامگذاری می‌شود. در فرآیند تولید فولاد درون کوره اکسیژن بازی BOF از ۲۵ تا ۳۵ درصد قراضه و ضایعات فولاد استفاده می‌شود، در حالی که در فرآیند کوره قوس الکتریکی تقریباً ۱۰۰ درصد قراضه و ضایعات استفاده می‌شود (Grubeša et al., 2016). لازم به ذکر است به طور کلی به سرباره‌های حاصل از فرآیندهای تولید آهن و فولاد سرباره‌های آهنی گفته می‌شود.

سرباره‌های مذاب را پس از تخلیه می‌توان در شرایط مختلفی خنک کرده و خردایش یا فرآوری کرد تا برای کاربردهای مختلف مناسب باشد (Wang, 2016). نامگذاری انواع سرباره‌ها بر اساس شرایط خنک‌سازی در بند ۱-۲-۳ به صورت کامل توضیح داده شده است.

سرباره‌ها حدود ۹۰ درصد وزن محصولات جانبی جامد فرآیندهای تولید آهن و فولاد خام را تشکیل می‌دهند و سایر محصولات جانبی شامل گازها، غبارها و لجن‌ها هستند. ترکیب سرباره‌ها بیشتر شامل سیلیس، اکسید کلسیم، اکسید منیزیم، آلومینیوم و آهن است که در نتیجه خارج کردن ناخالصی‌ها از آهن و فولاد مذاب ایجاد می‌شوند (Brito & Agrela, 2018).

بر خلاف مصالح سنگی رایج که مطابق با مشخصات استاندارد، همراه با کنترل کیفیت و بر اساس تقاضای بازار تولید می‌شوند، سرباره‌های آهنی به عنوان محصول جانبی همزمان با تولید آهن و فولاد تولید می‌شوند. از آنجا که به‌طور معمول میزان سرباره تخلیه‌شده از کوره‌ها اندازه‌گیری نمی‌شود و یا کل سرباره تشکیل‌شده از کوره تخلیه نمی‌شود، مقدار تولید سرباره آهنی به طور کلی بر اساس نسبت‌های معمول تولید سرباره به فلز تخمین زده می‌شود که آن نیز به خواص شیمیایی مواد اولیه کوره‌ها وابسته است. به طور معمول برای سنگ‌های آهن با عیار بالا (۶۶-۶۰ درصد آهن)، یک کوره بلند BF در حدود ۰/۳۰-۰/۲۵ تن سرباره به ازای هر تن آهن خام تولید می‌کند. برای سنگ آهن با عیار پایین، مقدار تولید سرباره بیشتر است و گاهی به ۱/۲-۱/۰ تن سرباره به ازای هر تن آهن خام می‌رسد. در کوره‌های فولادی نیز

¹ Flux

² Blast Furnace Slag

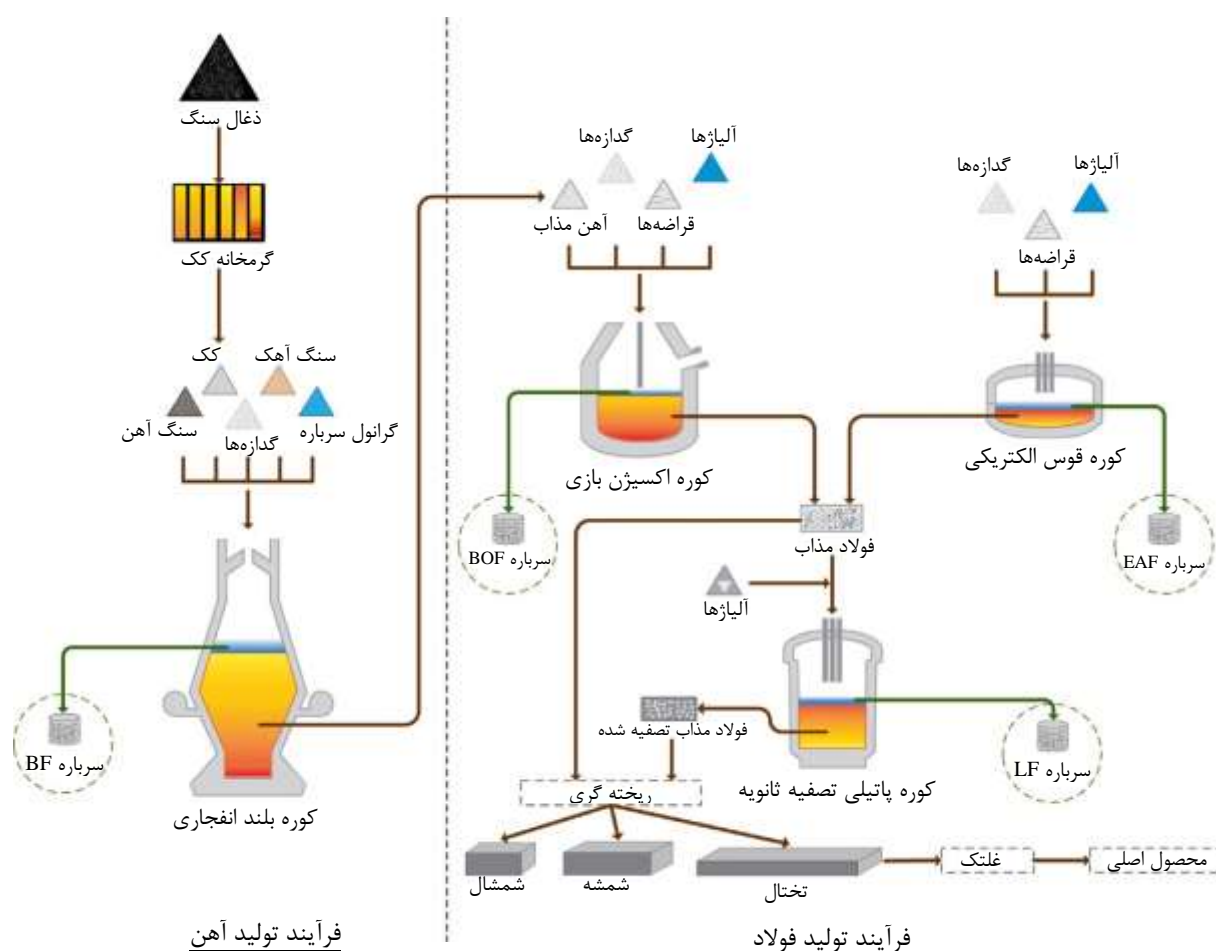
³ Steel Slag

⁴ Basic Oxygen Furnace Slag

⁵ Electric Arc Furnace Slag

⁶ Ladle Furnace Slag

معمولاً حدود ۰/۲ تن سرباره به ازای هر تن فولاد خام تشکیل می‌شود. اما تا ۵۰ درصد این سرباره از جنس فلزات ارزشمندی است که در فرآیند تولید فولاد به کار می‌آید، لذا بیشتر آن سرباره بازیابی شده و به کوره‌ها بازگردانده می‌شود. مقدار سرباره فولاد قابل استفاده پس از بازیابی فلزات معمولاً در حدود ۰/۱ تا ۰/۱۵ تن به ازای هر تن فولاد خام تولیدی است (Wang, 2016).



شکل (۱-۲): فرآیند یکپارچه تولید آهن و فولاد و تشکیل سرباره‌های آهنی (Wang, 2016)

انجمن آمریکایی آزمایش و مواد^۱ (ASTM) سرباره کوره بلند را به عنوان «محصولی غیر فلزی متشکل از سیلیکات‌ها و آلومینوسیلیکات‌های کلسیم و بازهای دیگر که در شرایط مذاب همزمان با آهن در کوره بلند تشکیل می‌شود» تعریف کرده است. این سرباره اصولاً از ناخالصی‌های سنگ آهن (عمدتاً سیلیس و آلومینا) همراه با اکسیدهای کلسیم و منیزیم از سنگ‌های گدازه تشکیل می‌شود. ترکیب شیمیایی سرباره به ترکیبات سنگ آهن، سوخت، گدازه و نسبت‌های مورد نیاز برای عملکرد کارآمد کوره بستگی دارد. سرباره فولاد نیز به عنوان محصول جانبی فرآیندهای فولادسازی، هنگام جداسازی فولاد مذاب از ناخالصی‌ها در کوره‌های فولادسازی ایجاد می‌شود. این ناخالصی‌ها شامل مونوکسیدکربن و

¹ American Society for Testing and Materials

سیلیس، منگنز، فسفر و مقداری آهن به شکل اکسید مایع است. این ناخالصی‌ها در ترکیب با آهن و دولومیت باعث ایجاد سرباره فولاد می‌شوند (Grubeša et al., 2016).

با توجه به این تعاریف مشخص می‌شود که این دو دسته سرباره، از لحاظ ترکیب شیمیایی اختلاف زیادی با هم دارند. سرباره کوره بلند بر خلاف سرباره‌های فولادسازی که ترکیبات متنوعی دارند، ترکیب نسبتاً یکنواختی دارد که سبب ساده‌تر شدن کاربرد آن شده است. وجود ترکیباتی نظیر اکسید آهن در سرباره فولادسازی نیز، استفاده گسترده از این محصول را به‌ویژه در صنایع سیمان محدود کرده است (Iranslag, 2021).

به طور کلی، سرباره آهنی یک محصول جانبی غیرفلزی است که برای تولید آن انرژی قابل توجهی صرف شده و دارای برخی ویژگی‌های شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی مشابه با ویژگی‌های مصالح سنگی طبیعی است. با افزایش اهمیت توسعه پایدار و لزوم کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای و تأکید بر کاهش مقدار مصرف، استفاده مجدد و بازیافت مصالح، بسیار مهم است که امکان کاربرد حداکثری سرباره‌های آهنی فراهم شود تا نه تنها برای دفع آنها هزینه صرف نشود، بلکه اثرات احتمالی محیط زیستی آنها کاهش یابد، منابع طبیعی کمتر مصرف شوند و درآمد اقتصادی نیز حاصل شود. امروزه سرباره‌های فرآوری شده BOF، EAF، BF و LF به عنوان مصالح ساختمانی معمولی در نظر گرفته می‌شوند و در دسترس بودن و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مناسب آن‌ها روزنه امیدی برای مصرف آن در کاربردهای مهندسی ایجاد کرده است (Wang, 2016)، لیکن بایستی مراقب چالش‌های احتمالی بود که در این راهنما به آن‌ها پرداخته می‌شود.

۱-۲- دسته‌بندی سرباره‌ها

۱-۲-۱- انواع سرباره بر اساس جنس سنگ معدنی

به آهن و فولاد، فلزات آهنی گفته می‌شود و به سرباره‌های حاصل از فرآیندهای تولید آهن و فولاد، سرباره‌های آهنی^۱ گفته می‌شود. لیکن به فلزاتی که در آن‌ها آهن به عنوان یک عنصر آلیاژی اصلی وجود ندارد، فلزات غیرآهنی گفته می‌شود. فلزات غیرآهنی بسیار گرانتر از آهن و فولاد هستند و هر کدام از آن‌ها به خاطر ویژگی‌های مطلوبی که دارند، استخراج شده و مصرف می‌شوند. به عنوان مثال، آلومینیوم به خاطر نسبت استحکام به وزن بالا، مس به علت رسانایی الکتریکی و انعطاف‌پذیری بالا و نیکل و روی به دلیل مقاومت بالا در برابر خوردگی، استخراج شده و تولید می‌شوند. در فرآیند تولید فلزات غیرآهنی که به مراتب سخت‌تر از فرآیند تولید آهن و فولاد است، سرباره‌هایی تولید می‌شود که به طور کلی به آن‌ها سرباره‌های غیرآهنی^۲ گفته می‌شود. از انواع رایج آن‌ها می‌توان سرباره مس، سرباره نیکل، سرباره روی، سرباره سرب و سرباره قلع را نام برد. سالانه در دنیا حدود ۶۵۰ میلیون تن سرباره آهنی و حدود ۵۰ میلیون تن سرباره

¹ Ferrous Slags

² Nonferrous Slags

غیرآهنی تولید می‌شود که مقدار قابل توجهی بوده و نشان می‌دهد بایستی حتماً برای مصرف این محصولات جانبی برنامه ویژه‌ای داشت.

البته می‌توان تعریف سرباره را به صورت عمومی‌تر در نظر گرفت. در این تعریف، سرباره به هر گونه مواد کلوخه‌ای^۱ اطلاق می‌شود که به صورت محصول جانبی طی فرآیند تولید یک عنصر اصلی و جداسازی آن از ناخالصی‌های ماده خام اولیه و بر اثر سرد شدن مواد مذاب با کمک آب یا هوا تولید می‌شوند. با این تعریف سرباره‌ها به دو دسته سرباره‌های فلزی^۲ (سرباره‌های آهنی و غیرآهنی) و سرباره‌های غیر فلزی^۳ تقسیم می‌شوند که از انواع آن می‌توان سرباره فسفر و سرباره کوره زباله‌سوزی^۴ را نام برد (Wang, 2016). در این راهنما فقط به سرباره‌های آهنی پرداخته می‌شود.

۱-۲-۲- انواع سرباره بر اساس فرآیندهای تولید

سرباره‌های فولاد را می‌توان بر اساس نوع کوره‌ای که در آن تولید می‌شوند، طبقه‌بندی کرد. اما ویژگی‌های سرباره به نوع فرآیند مورد استفاده برای تولید فولاد خام، شرایط خنک شدن سرباره و فرآیندهای آماده‌سازی آن نیز بستگی دارد. همانطور که پیش از این نیز گفته شد، در فرآیند اصلی فولادسازی، فولاد خام به دو طریق تولید می‌شود: در روش اول، آهن از سنگ آهن در کوره بلند BF تولید می‌شود و در کنار آن، سرباره کوره بلند BFS حاصل می‌شود. در فرآیند فولادسازی با استفاده از آهن مذاب ارسالی از کوره بلند BF، سرباره کوره اکسیژن بازی BOFS نیز حاصل می‌شود. در روش دوم، سرباره در صنعت فولادسازی با استفاده از قراضه و ضایعات فولاد تشکیل می‌شود. در مرحله اول تولید فولاد با استفاده از قراضه و ضایعات، سرباره کوره قوس الکتریکی EAFS تولید می‌شود. در مرحله دوم که برای تصفیه فولاد مذاب انجام می‌شود، سرباره کوره پاتیلی LFS حاصل می‌شود که این نوع سرباره حامل فلزات سنگین مانند کروم، سرب یا روی است (Brito & Agrel, 2018). بنابراین، طبقه‌بندی سرباره‌های آهنی بر اساس فرآیند مورد استفاده برای تولید آهن و فولاد خام را می‌توان به شرح شکل ۱-۳ انجام داد.

¹ Agglomerated

² Metallurgical slags

³ Nonmetallurgical slags

⁴ Incinerator slag



شکل (۳-۱): انواع سرباره‌های آهنی بر اساس فرآیندهای تولید

۳-۲-۱- انواع سرباره بر اساس روش‌های خنک‌سازی

نحوه و سرعت خنک کردن سرباره نیز تعیین‌کننده ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن است. اگر خنک کردن سرباره مذاب به کندی انجام شود، اجزای سرباره به شکل ساختارهای پایدار، کریستالیزه شده و سخت می‌شوند و در بیشتر موارد، مصالح بلوری متراکم و خنثی ایجاد می‌شود. اما اگر خنک شدن به سرعت اتفاق بیفتد، اجزای سرباره به حالت ساختار بی‌شکل و نامنظم سخت می‌شوند و بنابراین، سرباره در حضور برخی مواد، ناپایدار یا فعال است (Brito & Agrel, 2018).

سرباره آهن و فولاد را می‌توان با توجه به روش خنک کردن به چند نوع اصلی تقسیم کرد که در شکل ۴-۱ نشان داده شده است.



شکل (۴-۱): انواع سرباره بر اساس روش خنک کردن (Grubeša et al., 2016)

سرباره بلوری (کریستالی)^۱: این نوع سرباره با ریختن مواد مذاب سرباره درون چال یا گودال^۲ یا انباشتن و کپه کردن روی زمین^۱ و خنک‌سازی تدریجی آن در دمای محیط به دست می‌آید. به محض سخت‌شدن و انجماد توده سرباره،

^۱ Crystalline Slag

^۲ Pit Slag

می‌توان روند خنک شدن را با پاشش آب تسریع کرد که منجر به ایجاد ترک‌هایی در سرباره جامد می‌شود و بنابراین عملیات خردایش سرباره را تسهیل می‌کند. این محصول عمدتاً بلوری و کریستالی است و به علت تشکیل حباب‌های گاز درون سرباره مذاب، دارای ساختار حفره‌دار و متخلخل است.

سرباره گرانولی (حبه‌ای)^۲: این نوع سرباره با سرد کردن سریع سرباره مذاب با آب یا هوا به منظور ایجاد یک حالت شیشه‌ای بدون تبلور یا کریستالی شدن تولید می‌شود. پس از تشکیل سرباره گرانولی کوره بلند، باید قبل از مصرف به عنوان ماده چسباننده و سیمانی، آن را آب‌گیری و خشک کرده و آسیاب نمود. اغلب قبل و بعد از آسیاب و به منظور جدا کردن آهن فلزی باقیمانده از آهن‌ربا استفاده می‌شود. در نتیجه عملیات آسیاب، دانه‌هایی به اندازه ماسه و اغلب مواد پودری، مانند کلینکر تشکیل می‌شود. ساختار فیزیکی و دانه‌بندی سرباره حاصل به ترکیبات شیمیایی و دمای سرباره مذاب در حین خنک شدن بستگی دارد. طی فرآیند گرانول‌سازی، دانه‌هایی به اندازه ماسه شبیه شیشه متراکم تولید می‌شود و حاوی اکسیدهایی است که در سیمان پرتلند با تفاوت قابل توجه در نسبت کلسیم و سیلیسیم دیده می‌شوند. سرباره کوره بلند گرانولی می‌تواند ویژگی‌های هیدرولیکی بسیار خوبی برخوردار است و با یک ماده فعال‌کننده مناسب (مانند هیدروکسید کلسیم) می‌تواند گیرشی مشابه سیمان پرتلند داشته باشد. سرعت واکنش سرباره با افزایش درجه نرمی افزایش می‌یابد. عموماً سرباره گرانولی به اندازه‌ای پودر و آسیاب می‌شود که مقدار درجه نرمی آن در آزمایش با دستگاه نفوذپذیری هوا (بلین) از سیمان پرتلند بیشتر شود تا میزان فعال بودن آن در ساعات اولیه افزایش یابد.

سرباره اسفنجی (منبسط)^۳: این نوع سرباره با سرد کردن سرباره مذاب با مقادیر کنترل‌شده آب، هوا یا کف حاصل می‌شود. مقادیر متفاوت عامل خنک‌کننده و سرعت خنک‌سازی باعث تنوع و گوناگونی ویژگی‌های سرباره خنک‌شده می‌گردد. به طور کلی، این نوع سرباره نسبت به سرباره خنک‌شده در هوا دارای تخلخل و حفرات بیشتری است و بنابراین از نظر وزنی بسیار سبک‌تر است. خنک‌سازی این نوع سرباره شامل خنک کردن سرباره مذاب با مقدار کمی آب و به دنبال آن سرد کردن قطرات سرباره با پرتاب شدن درون جریان هوا توسط یک استوانه پره‌ای با سرعت دورانی زیاد است. بسته به فرآیند خنک‌سازی، دانه‌های سرباره حاصل ممکن است گوشه‌دار و تقریباً مکعبی شکل باشند که برای استفاده به عنوان مصالح دانه‌ای مناسب‌تر هستند و یا ممکن است کروی شکل و صاف باشند که برای استفاده به عنوان یک افزودنی چسباننده سیمانی مناسب‌تر هستند (Grubeša et al., 2016).

۱-۲-۴- انواع سرباره‌های آهنی رایج

بسته به سرعت خنک‌سازی، دو نوع سرباره کوره بلند BFS وجود دارد. سرباره کوره بلند خنک‌شده در هوا^۴ (ACBFS) که در معرض کاهش تدریجی و آهسته دما قرار می‌گیرد و بنابراین، دارای ساختار بلوری و پایداری فیزیکی -

¹ Bank Slag

² Granulated slag

³ Expanded or Foamed or Pelletized Slag

⁴ Air Cooled Blast Furnace Slag

شیمیایی می‌باشد (شکل ۱-۵). سرباره کوره بلند خنک‌شده در هوا ACBFS پس از خنک شدن، خرد شده و با توجه به مشخصات هندسی مورد نیاز برای کاربرد مورد نظر، در اندازه‌های مختلف سرند می‌شود. چگالی سرباره کوره بلند خنک‌شده در هوا ACBFS در حدود ۲/۵ گرم بر سانتیمتر مکعب است و به عنوان مصالح دانه‌ای در بتن، لایه‌های اساس، زیر اساس و لایه‌های رویه در راهسازی استفاده می‌شود.



شکل (۱-۵): سرباره کوره بلند خنک‌شده در هوا ACBFS (Brito & Agrela, 2018)

سرباره کوره بلند گرانولی^۱ (GBFS) در شکل ۱-۶ نشان داده شده است. ترکیب شیمیایی سرباره کوره بلند گرانولی همانند سرباره کوره بلند خنک‌شده در هوا ACBFS است، اما ساختار و پایداری آن‌ها متفاوت است و به دلیل ساختار آمورف یا شیشه‌ای ظرفیت هیدرولیکی بالایی دارد (یعنی به عنوان ماده چسباننده سیمانی از زمان گیرش بسیار اندکی برخوردار است و آنی‌گیر محسوب می‌شود). بنابراین معمولاً آن را به ذرات کوچکتر از ۱۰۰ میکرومتر خرد و آسیاب می‌کنند و در ساخت سیمان پرتلند از آن استفاده می‌کنند. در اسپانیا تمامی سرباره کوره بلند گرانولی GBFS تولیدشده را در صنعت سیمان استفاده می‌کنند.



شکل (۱-۶): سرباره کوره بلند گرانولی GBFS (Brito & Agrela, 2018)

^۱ Granulated Blast Furnace Slag

سرباره کوره اکسیژن بازی BOFS که در شکل (۷-۱) نشان داده شده است، درصد بالایی از عنصر آهن (Fe) دارد و بنابراین، چگالی آن بیشتر از ۳ گرم بر سانتیمتر مکعب است. این نوع سرباره اغلب توسط هوا به آرامی در دمای محیط سرد می‌شود تا ساختار آن کریستالی شده و اجزای آن تثبیت شود. بیشترین کاربرد این نوع سرباره در تولید مصالح دانه‌ای برای مصارف بتنی و راهسازی است.



شکل (۷-۱): سرباره کوره اکسیژن بازی BOFS (Brito & Agrela, 2018)

دو نوع سرباره کوره قوس الکتریکی EAFS شامل سرباره فولاد ضد زنگ^۱ (EAFS-S) و سرباره فولاد خام^۲ (EAFS-C) در شکل‌های ۸-۱ و ۹-۱ نشان داده شده است. تفاوت اصلی این دو نوع سرباره کوره قوس الکتریکی در مقدار SiO_2 و Fe است. مقدار زیاد اکسید آهن یا آهن فلزی که نمی‌توان آن را بازیابی کرد، منجر به تشکیل سرباره فولاد خام EAFS-C با چگالی معمولاً بیشتر از ۳/۵ گرم بر سانتیمتر مکعب می‌شود. سرباره‌های کوره قوس الکتریکی نیز معمولاً به روش خنک شدن توسط هوا در دمای محیط تولید می‌شوند و به عنوان مصالح دانه‌ای، مقاومت فشاری و مقاومت سایشی زیادی دارند. این سرباره‌ها مصالحی با عملکرد مناسب برای استفاده در بتن با مقاومت زیاد و در لایه‌های راهسازی هستند.

^۱ Stainless Steel

^۲ Crude Steel



شکل (۸-۱): سرباره فولاد ضد زنگ کوره قوس الکتریکی EAFS-S (Brito & Agrela, 2018)



شکل (۹-۱): سرباره فولاد خام کوره قوس الکتریکی EAFS-C (Brito & Agrela, 2018)

سرباره کوره پاتیلی LFS که در شکل ۱-۱۰ به تصویر کشیده شده است، معمولاً در تولید فولادهای کم آلیاژ ایجاد می‌شود و پس از چندین روز خنک شدن در هوا، برای تبدیل شدن به ذرات ریز سفید رنگ آسیاب می‌شود. بسته به نوع فرآیند، دو نوع سرباره کوره پاتیلی یافت می‌شود که شامل سرباره‌های اشباع‌شده از آلومینا یا سرباره‌های اشباع‌شده از سیلیس هستند. این سرباره‌ها از نظر ترکیبات با یکدیگر متفاوت هستند به اینصورت که یا دارای درصد بالایی از اکسیدهای آلومینیوم هستند و یا حاوی درصد بالایی از اکسیدهای سیلیس می‌باشند. از سرباره کوره پاتیلی می‌توان به عنوان ماده اولیه در تولید سیمان استفاده کرد اما باید به درصد فلئور^۱ و کلر^۲ آن توجه خاص شود زیرا که می‌تواند بر خصوصیات کلینکر تأثیر منفی داشته باشد (Brito & Agrela, 2018).

¹ Fluorine

² Chlorine



شکل (۱-۱): سرباره کوره پاتیلی LFS (Brito & Agrela, 2018)

به صورت خلاصه، سرباره کوره بلند خنک شده در هوا ACBFS، سرباره کوره اکسیژن بازی BOFS و سرباره کوره قوس الکتریکی EAFS برای استفاده در راهسازی به عنوان مصالح دانه‌ای جایگزین مصالح سنگی طبیعی مناسب‌تر هستند.

۱-۳-۱- روش‌های تولید سرباره آهن و فولاد

۱-۳-۱-۱- تولید آهن و تشکیل سرباره کوره بلند

۱-۳-۱-۱-۱- فرآیند تولید آهن

تولید آهن فرآیند تبدیل سنگ آهن به حالتی است که به راحتی بتواند به فولاد تبدیل شود. این کار اصولاً در کوره بلند BF به همراه تأسیسات کمکی برای ذوب مواد خام انجام می‌شود تا آهن خام که حاوی مقدار زیاد کربن در حدود ۴-۵ درصد است، ساخته شود. مقدار زیاد کربن باعث بسیار سخت شدن آهن خام (چدن) می‌شود اما از سوی دیگر رفتار آن را شکننده کرده و کاربرد آن را محدود می‌کند. لذا از کوره‌های فولادسازی برای ساخت انواع مختلف فولاد که دارای مقدار کربن کمتری (معمولاً کمتر از یک درصد) نسبت به آهن خام هستند و همچنین برای ساخت آلیاژها استفاده می‌شود.

سنگ آهن، کک، گدازه‌ها، هوای داغ و آب (به عنوان خنک‌کننده)، مواد خامی هستند که درون کوره بلند آهن‌گذاری BF ریخته می‌شوند. اولین مرحله تولید آهن و فولاد، استخراج سنگ آهن یا سایر مصالح حاوی آهن از زمین است. سنگ آهن سنگی است که بتوان به مقدار کافی آهن فلزی از آن خارج کرد. این سنگ‌ها معمولاً به صورت هماتیت (Fe_2O_3) یا مگنتیت (Fe_3O_4) یافت می‌شوند. انواع معمول سنگ آهن و درصد آهن آن‌ها در جدول ۱-۱ نشان داده شده است. سنگ آهن حدود ۷۰ درصد از کل مواد اولیه کوره بلند را تشکیل می‌دهد.

جدول (۱-۱): انواع معمول سنگ معدن آهن و مقدار تقریبی آهن آن‌ها (Wang, 2016)

سنگ آهن	هماتیت	مگنتیت	سیدریت	پیریت	لیمونیت	تاکونیت	جاسپر
ترکیب آهنی	Fe ₂ O ₃	Fe ₃ O ₄	FeCO ₃	FeS ₂	Fe ₃ O ₄	گوناگون	گوناگون
درصد آهن Fe	۷۰	۷۲	۶۱	۴۶	۶۰	> ۱۶	۲۵-۴۰

کک از ذغال سنگ تولید می‌شود. برای تهیه کک، ذغال سنگ پیش از انبارش شسته شده، خرد شده و در یک برج سرند می‌شود. مخلوط ذغال سنگ ابتدا در آون کک با مشعل گاز به مدت حدود ۱۸ ساعت داغ می‌شود تا کک تولید شود. این فرآیند به فرآیند کربن‌سازی^۱ نیز معروف است. پس از این فرآیند، کک از آون بیرون آورده می‌شود تا خنک شود. گازی که طی فرآیند کربن‌سازی آزاد می‌شود و ۲۵ درصد از حجم ذغال سنگ را تشکیل می‌دهد، توسط مکنده از طریق دودکش‌ها و خنک‌کننده‌ها جمع‌آوری می‌شود و به عنوان سوخت در کارخانه فولاد استفاده می‌شود (Wang, 2016).

سنگ آهک و دولومیت که مهمترین سنگ‌های کربناته هستند، به عنوان گدازه استفاده شده و تقریباً ۵ درصد از کل مواد خام اولیه در کوره بلند را تشکیل می‌دهند. هر دوی سنگ آهک و دولومیت سنگ‌های رسوبی هستند که بیشتر از مواد معدنی کلسیت (CaCO₃) و دولومیت (CaCO₃·MgCO₃) تشکیل می‌شوند. سنگ آهک و دولومیت با اندازه ۲۵-۷۵ میلیمتر در کوره بلند استفاده می‌شود. آنها را می‌توان با سنگ آهن ریزدانه (کنسانتره آهن) مخلوط کرده و به صورت کلوخه^۲ (آگلومره) درآورد و به عنوان گندله^۳ (گلوله‌های ساخته شده از نرمه سنگ آهن و سایر مواد افزودنی که حاوی درصد بالایی آهن هستند) به کوره اضافه کرد. گندله‌ها (شکل ۱-۱۱) تکه‌های بزرگی متشکل از دانه‌های ریزتر سنگ آهن هستند که یا در دمای بالا پخته شده و آمیخته می‌شوند و یا در دماهای پایین به هم می‌چسبند تا نرمه‌های سنگ آهن به شکلی درآیند که به راحتی قابل حمل و استفاده باشند (Kokal, 2006). گندله‌سازی به منظور مصرف سنگ آهن ریزدانه و پودری شکل در صنعت ذوب آهن توسعه پیدا کرد. استفاده از گندله باعث کاهش ضایعات و افزایش کارایی فرآیند تولید آهن می‌شود و مقدار مصرف گدازه در فرآیند تولید آهن را کاهش می‌دهد (UK Steel, 2014).

مقدار گدازه‌ها که بطور مستقیم به کوره بلند وارد می‌شود، بسته به مقدار گندله‌های اضافه شده به کوره بسیار متفاوت است. در اکثر کوره‌های بلند آهن که در آنها از گندله استفاده می‌شود، به مقدار اضافی گدازه در حدود ۱۰ تا ۵۰ کیلوگرم به ازای هر تن فلز داغ نیاز است.

¹ Carbonization

² Agglomerate

³ Pellet



شکل (۱-۱۱): گندله آهن

کوره بلند BF یا کوره آهن‌گدازی یک استوانه بزرگ فولادی به ارتفاع زیاد تا ۳۰ متر است. حداکثر قطر کوره در قسمت پایین آن عموماً در حدود ۹ متر است. روکش جداره داخلی این کوره‌ها از آجرهای نسوز است که با آب خنک می‌شوند و می‌توانند تا دمای ۲۰۰۰ درجه سانتیگراد را تحمل کنند. شکل ۱-۱۲ تصویر شماتیک یک کوره بلند را نشان می‌دهد.

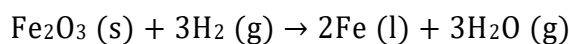
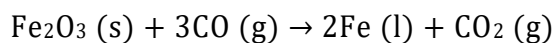
در فرآیند تولید آهن، ابتدا کک، سنگ آهن و گندله به همراه گدازه‌ها از بالای کوره به درون آن ریخته می‌شوند. سپس هوای داغ با دمای حدود ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد از طریق دهانه لوله‌هایی در پایه کوره وارد می‌شود. هوای داغ وارد شده کک را می‌سوزاند و در نهایت گرمای کافی را برای ذوب مواد خام اولیه فراهم می‌کند. مواد درون کوره به سمت پایین حرکت می‌کنند و از پایین گرم می‌شوند. هوای داغ ورودی ممکن است حاوی اکسیژن زیاد باشد و گاهی اوقات ذغال سنگ یا مواد نفتی نیز تزریق می‌شود تا حرارت بیشتری فراهم شده و مصرف کک را کاهش دهد. این فرآیند، هوای داغ را درون کوره به گردش در آورده و آهن موجود در سنگ آهن و گندله ذوب گردیده و آزاد می‌شود تا استخری از فلز مذاب در پایین کوره (یا به اصطلاح قلب کوره) ایجاد شود. سرباره از آمیخته شدن گدازه‌ها (سنگ آهن و دولومیت) با گانگ^۱ (پسماند سیلیسی و آلومینیومی از سنگ آهن) و خاکستر کک درون کوره بلند تشکیل می‌شود. سرباره مذاب که سبک‌تر از فلز آهن است، در بالای آهن مذاب و زیر مواد خام ذوب نشده شناور می‌شود. آهن مذاب و سرباره مذاب در فواصل زمانی منظم از کوره با فرآیند پیوسته تخلیه می‌شوند. از آنجا که مواد اولیه برای تولید آهن خام در این فرآیند با دقت کنترل می‌شود، دامنه ترکیبات شیمیایی سرباره حاصله نیز محدود و مشخص خواهد بود. هوای داغ باعث سوختن کک و حفظ دمای بسیار بالا می‌شود. واکنش بین هوا و سوخت باعث تولید مونوکسید کربن می‌شود. گاز مونوکسید کربن نیز باعث واکنش کاهش اکسید آهن به فلز آهن می‌شود.

^۱ Gangue



شکل (۱-۱۲): تصویر شماتیک کوره بلند BF (Wang, 2016)

واکنش‌های شیمیایی اصلی درون کوره بلند برای تولید آهن مذاب به شرح زیر هستند:



گاز داغ که حاوی مقدار زیادی مونوکسید کربن بوده و از کوره خارج می‌شود، جمع‌آوری شده و پاکسازی می‌شود تا مجدداً به عنوان سوخت برای سایر فرآیندهای فولادسازی یا برای گرمتر کردن هوای ورودی به کوره بلند استفاده شود. وقتی مقدار کافی آهن مذاب در پایین کوره بلند جمع شد، برای انتقال به فرآیندهای فولادسازی به درون پاتیل‌ها تخلیه می‌شود. همچنین هنگامی که مقدار کافی سرباره بر روی آهن مذاب جمع شد، از یک مجرای مجزا در فواصل زمانی منظم تخلیه می‌شود. فرآیند اضافه کردن مواد خام به کوره بلند و خارج کردن آهن و سرباره مذاب به صورت پیوسته ادامه می‌یابد (Wang, 2016).

۱-۳-۲- تشکیل سرباره کوره بلند

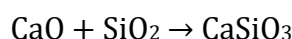
در تولید آهن و فولادسازی، گدازه دو نقش مهم دارد: اول اینکه باعث می‌شود ناخالصی‌های مواد اولیه راحت‌تر ذوب و ترکیب شوند و دوم اینکه ماده‌ای مهیا خواهد بود که برخی ناخالصی‌ها به جای ترکیب شدن با فلز آهن با آن ترکیب شوند. شرایط استفاده از گدازه، شامل نوع و ترکیب شیمیایی سنگ، نسبت اختلاط، اندازه دانه‌ها و نحوه افزودن آن ممکن است بر تشکیل و خصوصیات سرباره تأثیر بگذارد. سنگ آهک و دولومیت که مهمترین گدازه‌های قلیایی مورد

استفاده در تولید آهن و فولادسازی هستند، آهک (CaO) و منیزیم (MgO) را در فرآیند ذوب سنگ آهن تأمین می‌کنند تا سرباره با اجزای اسیدی سیلیس (SiO₂) و آلومینا تشکیل شود (Al₂O₃). در یک گدازه مناسب مقدار اجزای اسیدی مانند سیلیس، آلومینا، گوگرد و فسفر کم است. در طبیعت، سنگ آهن همراه با ناخالصی یافت می‌شود، که اغلب به صورت اکسید شده و مخلوط با سیلیکات‌های فلزات دیگر است. در حین ذوب، هنگامی که سنگ آهن در معرض دمای بالا قرار می‌گیرد، ناخالصی‌ها از فلز مذاب جدا شده و با اکسیدهای بازی گدازه‌ها ترکیب می‌شوند تا ترکیبات CaO-SiO₂-MgO-Al₂O₃ ایجاد شده و از داخل کوره خارج شوند. در بسیاری از فرآیندهای ذوب آهن، اکسیدها به منظور کنترل فرمول شیمیایی سرباره، کمک به جداسازی ناخالصی‌ها و محافظت از آستر نسوز کوره در برابر فرسایش اضافه می‌شوند. در این صورت به این سرباره‌ها عنوان مصنوعی^۱ اطلاق می‌شود.

در کوره بلند آهن، کلسینه شدن^۲ سنگ آهک در دمای بالاتر از ۸۰۰ درجه سانتیگراد شروع می‌شود و دولومیت معمولاً در دمای حدود ۷۰۰ درجه سانتیگراد شروع به تجزیه می‌کند. نقطه ذوب آهک خالص بالاتر از درجه حرارت فرآیند ذوب سنگ آهن است. اما وقتی آهک به سایر اجزا مانند سیلیس اضافه شود، نقطه ذوب آن پایین آمده و فاز مایع تشکیل می‌شود. اصلی‌ترین واکنش‌های شیمیایی کلسینه شدن به شرح زیر هستند:



این واکنش‌ها گرما را از کوره جذب می‌کنند؛ بنابراین کنترل مقدار افزودن سنگ آهک مهم است، زیرا سنگ آهک زیاد باعث کاهش دمای کوره می‌شود. اکسید کلسیم قلیایی است و با ناخالصی‌های اسیدی موجود در سنگ آهن و سایر مواد اولیه مذاب واکنش می‌دهد و سرباره کوره بلند تشکیل می‌شود. همچنین سرباره مذاب مقدار زیادی از گوگرد موجود در مواد اولیه را جذب می‌کند. اکسید کلسیم با سیلیسیم دی اکسید واکنش داده و سیلیکات کلسیم تشکیل می‌شود:



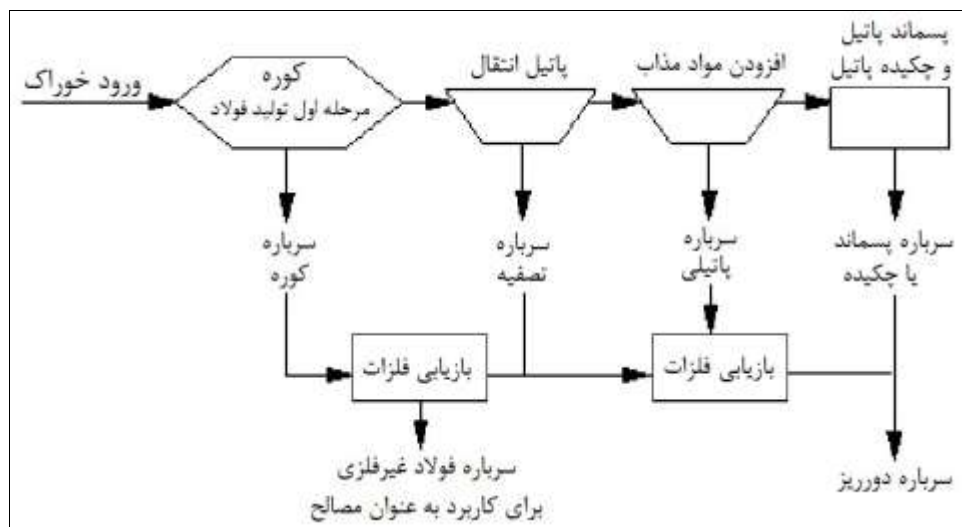
سرباره کوره بلند آهن BFS به نحوی کنترل می‌شود که مقدار اکسید Al₂O₃ در ترکیب آن در حدود ۱۰ درصد حفظ شود تا به یک نقطه ذوب نسبتاً ثابت برسد و سرباره مذاب طیف وسیعی از ترکیبات آهک و سیلیس را داشته باشد. نقطه ذوب معمولاً ۱۴۰۰-۱۵۰۰ درجه سانتیگراد است. آهن فروس (Fe⁺²) با سیلیس در مقایسه با کلسیم و آلومینا در دماهای بسیار کمتری واکنش می‌دهد و ذوب موضعی می‌تواند در قسمت پایین کوره بلند رخ دهد. یکی از اهداف استفاده از گدازه در گندله‌ها، جلوگیری از ذوب زودرس است که به دلیل تشکیل سیلیکات آهن (Fe₂SiO₄ یا فایالیت) بر اثر واکنش سیلیس با آهک و منیزیم در گندله‌ها رخ می‌دهد (Wang, 2016).

¹ Synthetic

² Calcination

۱-۳-۲- فرآیندهای تولید فولاد و تشکیل سرباره فولاد

فرآیند تولید فولاد در بخش اول به صورت اجمالی توضیح داده شد اما با نگاهی دقیق‌تر به فرآیند تولید فولاد می‌توان گفت طی این فرآیند چندین نوع مختلف سرباره تولید می‌شود که با عناوین سرباره کوره^۱ (BOFS یا EAFS)، سرباره تصفیه^۲، سرباره پاتیلی^۳، سرباره چکیده^۴ و سرباره پسماند^۵ شناخته می‌شوند. جریان کلی و فرآیند تشکیل سرباره‌های مختلف در یک کارخانه مدرن فولادسازی در شکل ۱-۱۳ نشان داده شده است.



شکل (۱-۱۳): نمای کلی تولید سرباره در کارخانه فولادسازی (FHWA, 1997)

سرباره فولادی که در مرحله اولیه فولادسازی تولید شده باشد، سرباره کوره نامیده می‌شود و منبع اصلی مصالح دانه‌ای سرباره فولاد است. فولاد مذاب پس از خارج شدن از کوره، برای تصفیه بیشتر به درون پاتیل ریخته می‌شود تا ناخالصی‌های اضافی موجود در آن جدا شود. به این عملیات، تصفیه پاتیلی گفته می‌شود زیرا درون پاتیل انتقال انجام می‌شود. اگر هنگام تصفیه پاتیلی مجدداً مواد مذاب به پاتیل اضافه شده و ذوب شود، سرباره فولاد بیشتری تولید می‌شود. این سرباره‌ها با سرباره کوره وارد شده به درون پاتیل ترکیب گردیده و به جذب محصولات اکسیداسیون، حفظ حرارت و محافظت از آستری نسوز پاتیل کمک می‌کنند. به طور کلی به سرباره‌های تشکیل شده در این مرحله از فرآیند فولادسازی، سرباره تصفیه و سرباره پاتیلی گفته می‌شود.

سرباره چکیده و سرباره پسماند انواع دیگری از سرباره هستند که معمولاً در عملیات ساخت فولاد دیده می‌شوند. این سرباره‌ها معمولاً شامل سرباره‌هایی هستند که در مراحل مختلف عملیات فولادسازی روی زمین محوطه کارخانه چکه

¹ Furnace or Tap Slag

² Raker Slag

³ Ladle Slag

⁴ Pit Slag

⁵ Cleanout Slag

کرده و می‌ریزند یا سرباره‌هایی که پس از تخلیه پاتیل درون آن باقی می‌مانند. از آنجا که در مرحله تصفیه پاتیلی معمولاً مقدار زیادی مواد مذاب افزوده می‌شود، خواص این سرباره پاتیلی با سرباره کوره کاملاً متفاوت است و عموماً برای استفاده به عنوان مصالح دانه‌ای سرباره فولاد مناسب نیستند. این سرباره‌های گوناگون باید از سرباره کوره جدا شوند تا از آلودگی مصالح سرباره تولید شده پیشگیری گردد.

علاوه بر بازیابی سرباره، عموماً سرباره‌های مذاب کوره و پاتیلی به منظور بازیابی فلزات آهنی پردازش می‌شوند. عملیات بازیابی فلزات (با استفاده از جداساز مغناطیسی بر روی آهنربای الکتریکی نقاله‌ای) برای تولیدکننده فولاد بسیار مهم است، زیرا از این فلزات می‌توان به عنوان خوراک کوره بلند برای تولید آهن استفاده کرد (FHWA, 1997).

۱-۳-۲-۱- فرآیند فولادسازی کوره اکسیژن بازی و تشکیل سرباره

فلز مذاب کوره بلند به مقدار حدود ۷۰ تا ۸۰ درصد، قراضه فولاد و گدازه‌ها که عمدتاً سنگ آهک، دولومیت و فلورسپار (CaF_2) هستند، مواد اولیه اصلی کوره اکسیژن بازی را تشکیل می‌دهند. مقدار قراضه فولاد به عواملی مانند درصد سیلیس و کربن و دمای آهن مذاب بستگی دارد. از اکسیژن خالص نیز برای کمک به ذوب شدن مواد اولیه استفاده می‌شود.

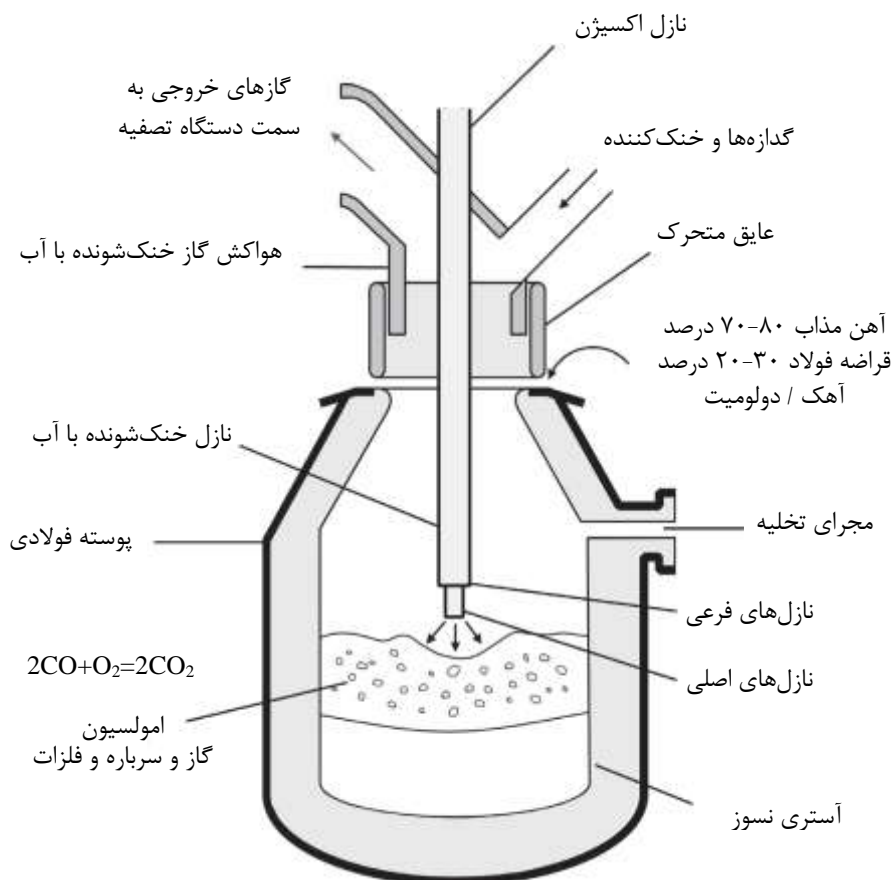
اجزای فعال اصلی سنگ آهک و دولومیت، اکسید کلسیم CaO و اکسید منیزیم MgO هستند. گدازه‌ها برای جذب ناخالصی‌ها و خارج کردن فسفر و گوگرد از آهن مذاب به کوره اضافه می‌شوند. سرباره فولاد در طی این فرآیند تشکیل می‌شود که اثر خاصی بر آستر نسوز کوره ندارد. اما به منظور جلوگیری از فرسایش و اضمحلال آجر منیزیمی، همواره مقدار اکسید منیزیم در سرباره فولاد بین ۵ تا ۱۲ درصد حفظ می‌شود. این کار به کنترل ویسکوزیته سرباره فولاد نیز کمک می‌کند (Kokal, 2006).

مقدار گدازه‌های اضافه‌شده معمولاً به درصد سیلیسیم، گوگرد و مقدار فسفر فلزات و خلوص گدازه بستگی دارد. با کاهش درصد سیلیسیم فلز مذاب و پایین آمدن مقدار منگنز، مقدار آهک مورد نیاز برای فولادسازی کاهش می‌یابد. همچنین با استفاده بیشتر از ضایعات فولاد، نیاز به گدازه کاهش می‌یابد.

رده‌بندی‌های متعددی از فولاد را می‌توان تولید کرد و بنابراین ویژگی‌های سرباره فولاد برای رده‌های مختلف به طور قابل توجهی تغییر می‌کند. فولاد بسته به میزان کربن موجود در آن به صورت رده‌های بالا، متوسط و پایین طبقه‌بندی می‌شود. فولادهای رده بالا درصد کربن بالایی دارند. برای کاهش درصد کربن در فولاد، میزان اکسیژن بیشتری نیاز خواهد بود و اکسید آهن بیشتری ایجاد خواهد شد و معمولاً سنگ آهک و دولومیت بیشتری برای تشکیل سرباره مصرف خواهد شد (FHWA, 1997).

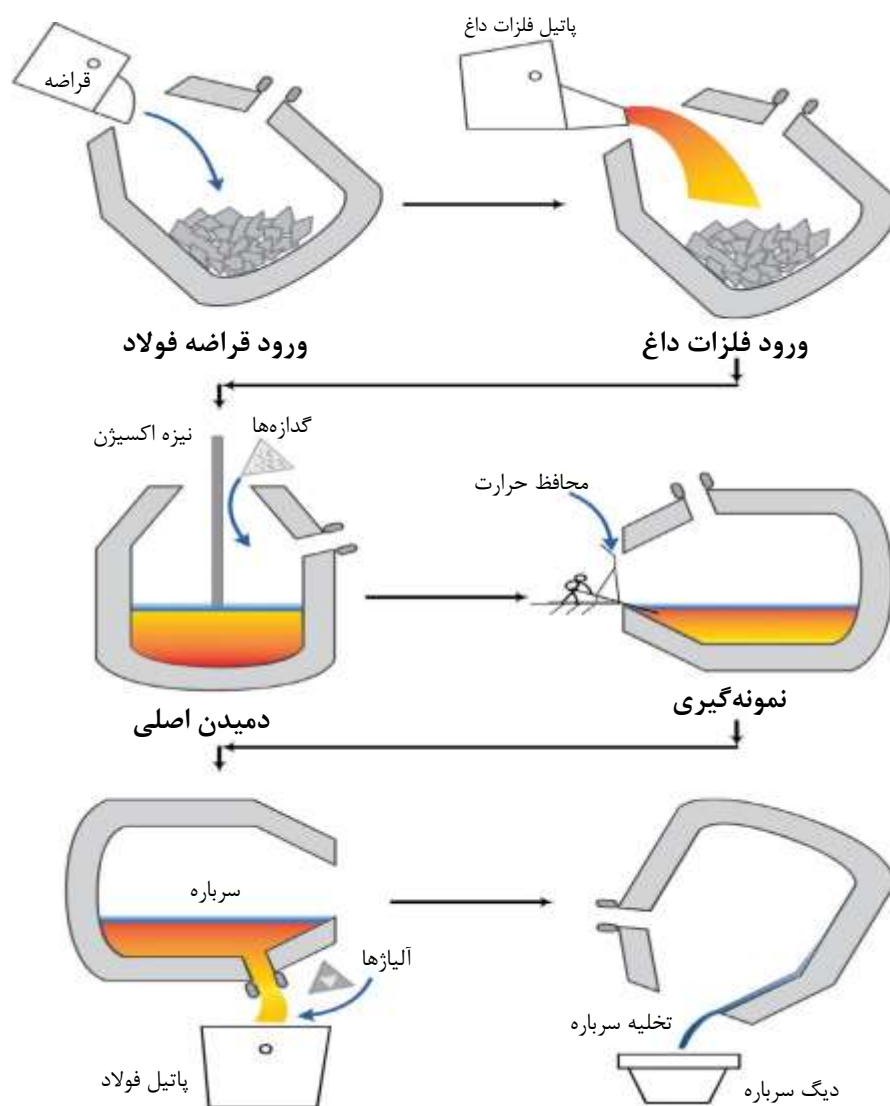
کوره اکسیژن بازی دارای آستری نسوز است و به منظور تصفیه سریع آهن مذاب و تبدیل آن به فولاد، بالای آن باز است. اصطلاح «بازی» در نام این کوره به آستری نسوز منیزیمی آن اشاره دارد که در اثر تماس با سرباره داغ بازی، فولاد مذاب و مواد اولیه فرسوده می‌شود. ظرفیت یک کوره اکسیژن بازی معمولی ۲۲۸ تن و ابعاد آن به ارتفاع ۱۰/۴

متر، قطر خارجی ۸ متر، ضخامت آستری ۰/۹ متر با حجم مفید ۲۲۷ مترمکعب می‌باشد. در شکل ۱-۱۴ تصویری شماتیک از یک کوره اکسیژن بازی ارائه شده است (Wang, 2016).
 حرارت تولید شده توسط اکسیژن دمای داخل کوره را تا ۱۷۰۰ درجه سانتیگراد افزایش می‌دهد که در نتیجه آن، قراضه‌ها ذوب می‌شوند و مقدار کربن موجود در آهن مذاب به مقادیر پایین‌تر از ۱ درصد کاهش می‌یابد و به حذف گوگرد و فسفر کمک می‌کند. فاصله زمانی مابین عملیات تخلیه فولاد حدود ۴۰ دقیقه و محدوده آن ۳۰ تا ۶۵ دقیقه است که نیمی از آن، زمان دمیدن است. نزدیک به پایان زمان دمیدن یا تصفیه (پس از حدود ۲۰ دقیقه)، قرائت دما انجام شده و یک نمونه برای تجزیه و تحلیل برداشته می‌شود. تجزیه و تحلیل شیمیایی در دمای ۱۵۹۳ تا ۱۶۴۹ درجه سانتیگراد انجام می‌شود. پس از تعیین دما و ترکیب شیمیایی فلز مذاب، یک مدل کامپیوتری نسبت بهینه قراضه و فلز مذاب، مقدار گدازه، ارتفاع نازل اکسیژن و مدت زمان دمیدن اکسیژن را تعیین می‌کند. معمولاً نازل اکسیژن به گونه‌ای برنامه‌ریزی می‌شود تا در مدت دمیدن اکسیژن به ارتفاعات مختلف جابجا شود. اگر تجزیه شیمیایی نشان دهد که همه چیز درست است، کوره متمایل شده و فولاد درون یک پاتیل ریخته می‌شود. از این مرحله ممکن است در یک فرآیند تصفیه ثانویه، فولاد بیشتر تصفیه شود یا مستقیماً به کارگاه ریخته‌گری ارسال شود و در آنجا به شکل‌های شمشه، شمشال یا تختال در آید (Stubbles, 2014).



شکل (۱-۱۴): تصویر شماتیک کوره اکسیژن بازی (Wang, 2016)

پس از تخلیه فولاد، سرباره مذاب در یک گاری ریخته می‌شود و برای خنک‌سازی در هوا به محوطه عمل‌آوری سرباره منتقل می‌شود. مراحل عملیاتی اصلی فرآیند کوره اکسیژن بازی در شکل ۱-۱۵ نشان داده شده است. تصفیه بیشتر فولاد در کوره پاتیلی انجام می‌شود که شامل عملیاتی مانند قل زدن فولاد با یک گاز بی اثر (مانند نیتروژن) به منظور اطمینان از اختلاط کامل عناصر آلیاژی و تزریق موادی برای تصفیه ناخالصی‌ها است. در این مرحله، مقدار کربن فولاد در محدوده ۰/۱ درصد تا ۱/۰ درصد خواهد بود (Wang, 2016).



شکل (۱-۱۵): مراحل عملیاتی تولید فولاد در کوره اکسیژن بازی (Wang, 2016)

۱-۳-۲-۲- فرآیند فولادسازی کوره قوس الکتریکی و تشکیل سرباره

ویژگی مهم فرآیند فولادسازی در کوره قوس الکتریکی این است که مواد اولیه شامل قراضه فولادی و گدازه‌ها هستند و مرحله تجزیه سنگ آهن در این فرآیند وجود ندارد. تصویر شماتیک کوره قوس الکتریکی و کوره پاتیلی در شکل ۱-۱۶ ارائه شده است.

کوره قوس الکتریکی استوانه‌ای شکل است. پایین کوره از یک کاسه‌ی کرومی شکل تشکیل می‌شود. پوسته‌ی قسمت بالای کوره نیز استوانه‌ای شکل است و سقف کوره نیز به حالت قطعه‌ای از یک کره مسطح است. پوسته اکثر کوره‌های مدرن جداشدنی است به این معنی که قسمت بالایی قاب کوره را می‌توان به سرعت جدا کرده و از روی قسمت پایین برداشت. این مسأله باعث می‌شود که مدت زمان متوقف شدن کار به خاطر تعویض پوسته بالایی کوره به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا کند. همچنین هنگامی که پوسته بالایی برداشته می‌شود، کف کوره را نیز می‌توان خیلی سریع تعویض کرد. جداره کوره در قسمت بالای تراز سرباره معمولاً از پانل‌های خنک‌شونده با آب ساخته می‌شود. این پانل‌ها روی یک قفسه خنک‌شونده با آب سرد قرار می‌گیرند. سقف کوره نیز از پانل‌های خنک‌شونده با آب ساخته می‌شود. بخش مرکزی سقف که درگاه‌های (پورت‌های) الکتروود را احاطه می‌کند، دلتا نامیده می‌شود و یک پوشش نسوز ریخته‌گری است که با آب خنک شود. کف کوره نیز از یک پوسته فولادی با چندین لایه پوشش نسوز تشکیل می‌شود.

کوره‌های قوس الکتریکی به الکتروودهای گرافیتی مجهز هستند و شبیه کتری‌های عظیم با یک مجرای خارج از مرکز هستند. یک جریان الکتریکی از سه الکتروود گرافیتی عبور داده شده و قوس الکتریکی تشکیل می‌شود. گرمای ایجاد شده توسط این قوس باعث ذوب شدن قراضه فولاد می‌شود. سقف کوره قوس الکتریکی برای سهولت بارگیری مواد اولیه می‌تواند حول یک لولا چرخش داشته باشد. ظرفیت این کوره‌ها تقریباً از ۱۳۵ تن تا ۲۷۰ تن فولاد در هر چرخه تولید است.

عملیات تولید با وارد کردن قراضه فولاد به کوره قوس الکتریکی آغاز می‌شود. برای اینکه جراثیل بارگیری قراضه بتواند یک سطل^۱ کامل قراضه را به بالای کوره برده و درون کوره تخلیه کند، سقف و الکتروودهای کوره، بلند شده و به سمت کنار کوره چرخانده می‌شوند. سپس سقف و الکتروودهای کوره از بالای کوره چرخانده می‌شوند تا در جای خود قرار گیرند. پس از پایین آمدن سقف، الکتروودها پایین می‌آیند تا یک قوس الکتریکی به قراضه‌ها برخورد کند که این امر باعث عبور الکتریسیته از الکتروودها و خود فلز می‌شود. قوس الکتریکی و مقاومت فلز در برابر این جریان الکتریسیته باعث ایجاد حرارت می‌شود. با ذوب شدن قراضه، الکتروودها درون قراضه فولادی تا عمق بیشتری جابجا می‌شوند. اکسیژن را نیز می‌توان به کمک نازل تزریق کرد تا قراضه‌ها را به اندازه‌های کوچکتر تقسیم کند. معمولاً قراضه‌های سبک را در بالای مواد اولیه قرار داده می‌دهند تا سرعت ذوب قراضه‌ها بیشتر شود. پس از چند دقیقه، الکتروودها به اندازه کافی به قراضه‌ها نفوذ می‌کنند و می‌توان از قوس الکتریکی با طول بلند (ولتاژ بالا) استفاده کرد. قوس الکتریکی بلند مقدار نیروی الکتریسیته انتقالی به قراضه را به حداکثر می‌رساند و یک حوض فلز سیال در پایین کوره تشکیل می‌شود. پس از تشکیل حوض مذاب، جریان الکتریکی کاملاً ثابت شده و توان ورودی پیوسته افزایش می‌یابد. اکنون اکسید کلسیم به صورت آهک یا دولومیت همراه با قراضه‌های جدید به کوره وارد می‌شود یا در حین ذوب شدن قراضه‌های قبلی به درون کوره دمیده می‌شود (Wang, 2016).

¹ Bucket

پس از ذوب شدن چند سطل قراضه، عملیات متالورژی تصفیه فولاد (جداسازی کربن و فسفر) شروع می‌شود. در طول مدت تصفیه فولاد، اکسیژن از طریق نازل اکسیژن به درون فولاد مذاب تزریق می‌شود. در مدت تزریق اکسیژن، بخشی از آهن به همراه سایر ناخالصی‌های موجود در فلز داغ از جمله آلومینیوم، سیلیسیم، منگنز، فسفر و کربن، اکسید می‌شوند. این اجزای اکسید شده با آهک (CaO) ترکیب شده و سرباره ایجاد می‌شود. همزمان با تصفیه فولاد، پودر کربن نیز به درون سرباره مذاب شناور روی فولاد مذاب تزریق می‌شود و منجر به تشکیل مونوکسید کربن می‌شود. پس از دستیابی به ترکیب شیمیایی مورد نظر برای فولاد، کوره قوس الکتریکی متمایل شده و فولاد از درون کوره به درون پاتیل تخلیه می‌شود. سرباره مذاب نیز به درون پاتیل یا دیگ حمل جداگانه‌ای ریخته شده و به واحد عمل‌آوری سرباره منتقل می‌شود. فاصله زمانی مابین دفعات تخلیه کوره در عملیات فولادسازی کوره قوس الکتریکی، کمتر از ۶۰ دقیقه هدف‌گذاری می‌شود (Seetharaman, 2005).

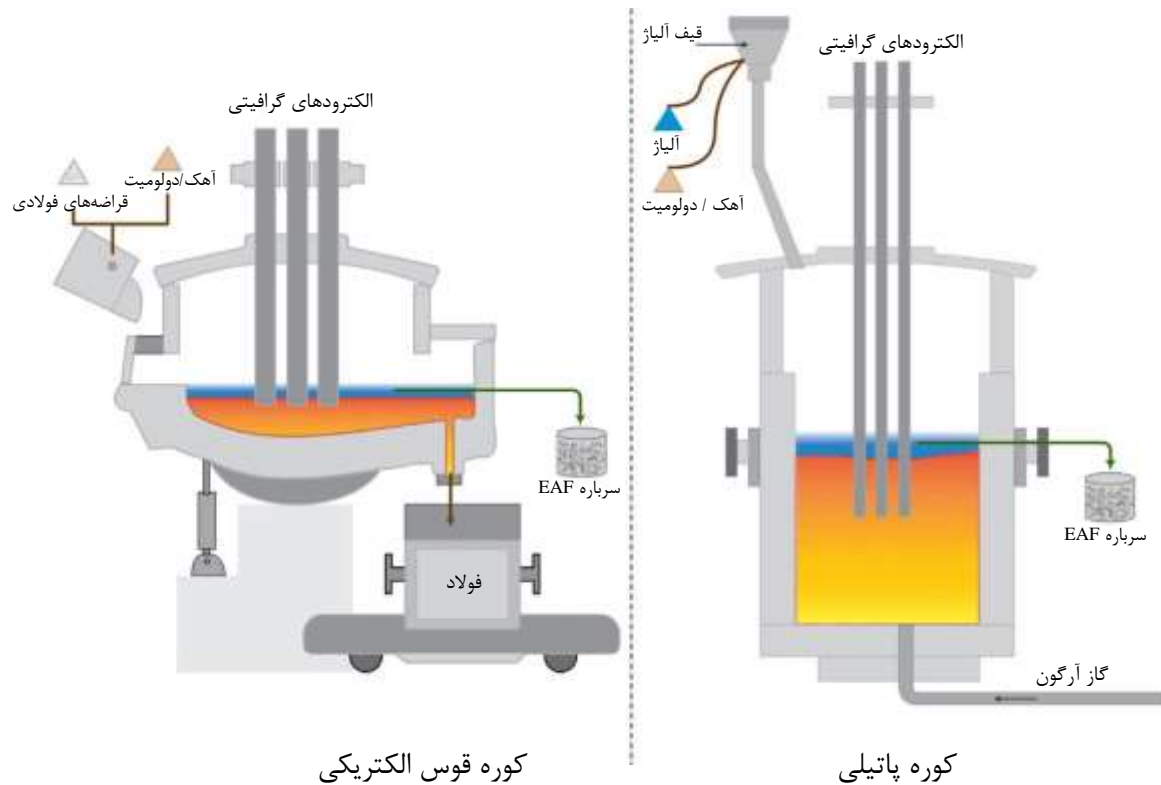
۱-۳-۲-۳- فرآیند فولادسازی کوره پاتیلی و تشکیل سرباره

فولاد مذاب تولید شده توسط فرآیندهای اولیه را می‌توان پس از تخلیه از کوره اکسیژن بازی یا کوره قوس الکتریکی، تحت تصفیه بیشتر قرار داد تا ناخالصی‌های باقیمانده درون فولاد جدا شوند یا عناصر آلیاژی اضافه شوند تا فولاد مورد نیاز با ترکیب شیمیایی و رده خاص به دست آید. این فرآیند تصفیه را عملیات فولادسازی ثانویه، تصفیه ثانویه یا تصفیه پاتیلی^۱ می‌نامند، زیرا درون پاتیل انتقال صورت می‌گیرد. فرآیند تصفیه ثانویه برای تولید فولاد با رده بالا مرسوم است. مراحل مهم فرآیند تصفیه ثانویه شامل گوگردزایی نهایی، گاززدایی اکسیژن و نیتروژن و هیدروژن، جداسازی ناخالصی‌ها و کربن‌زدایی نهایی (برای فولادهای با کربن فوق‌العاده کم) هستند. بسته به کیفیت مورد نیاز، اکثر فولادهای مذاب تولید شده در فرآیندهای BOF و EAF، از برخی یا تمام فرآیندهای تصفیه پاتیلی عبور می‌کنند (Wang, 2016).

کوره‌های پاتیلی شبیه به کوره‌های قوس الکتریکی EAF اما در اندازه کوچکتر هستند و سه الکتروود گرافیتی متصل به یک مبدل قوسی دارند که برای گرم کردن فولاد استفاده می‌شوند. در پایین کوره پاتیلی، عموماً خط لوله‌ای وجود دارد که می‌توان از طریق آن گاز آرگون را برای هم زدن و همگن‌سازی فولاد مذاب درون کوره تزریق کرد. با تزریق مواد گوگردزایی (مانند Ca، Mg، CaSi، CaC₂) از طریق یک نازل می‌توان غلظت گوگرد موجود در فولاد را تا مقدار کم ۰/۰۰۰۲ درصد کاهش داد. افزودن سیلیسیم و آلومینیوم در حین اکسیداسیون، منجر به تشکیل سیلیس (SiO₂) و آلومینا (Al₂O₃) می‌شود. این اکسیدها در مراحل بعدی توسط سرباره تولید شده در فرآیند تصفیه پاتیلی جذب می‌شوند. به علاوه، به منظور تنظیم دقیق ترکیب شیمیایی فولاد برای تولید رده‌های مختلف فولاد، عناصر آلیاژی مناسب از طریق یک قیف آلیاژ به فولاد مذاب اضافه می‌شوند. کوره‌های پاتیلی به عنوان یک محل برای انبارش فولاد قبل از شروع عملیات ریخته‌گری نیز استفاده می‌شوند (Shi, 2004; Yildirim & Prezzi, 2011).

¹ ladle refining

در حین تصفیه پاتیلی، با افزودن گدازه‌ها و ترکیب شدن آن‌ها با سرباره بازمانده از کوره اولیه، سرباره جدید تشکیل می‌شود. با توجه به اینکه مرحله تصفیه پاتیلی معمولاً شامل افزودن گدازه‌ها و آلیاژهای مختلف است، ویژگی‌های سرباره پاتیلی با ویژگی‌های سرباره کوره کاملاً متفاوت است (Shi, 2004; Jones, 2014).



شکل (۱۶-۱): تصویر شماتیک کوره قوس الکتریکی و کوره پاتیلی (Wang, 2016)

۴-۱- ویژگی‌های سرباره آهن و فولاد

۴-۱-۱- ویژگی‌های سرباره کوره بلند خنک شده در هوا ACBFS

۴-۱-۱-۱- ویژگی‌های شیمیایی

ترکیب شیمیایی سرباره معمولاً بر حسب اکسیدهای ساده محاسبه‌شده از طریق آنالیز عناصر با فلورسانس اشعه ایکس^۱ (XRF) بیان می‌گردد. محدوده کامل ترکیبات شیمیایی سرباره کوره بلند خنک شده در هوا ACBFS بر اساس تجزیه و تحلیل شیمیایی بیش از ۱۰۰ منبع سرباره از کشورهای مختلف در جدول ۱-۲ خلاصه شده است. ترکیب شیمیایی کلی سرباره کوره بلند می‌تواند بسته به ماهیت سنگ آهن، ترکیب شیمیایی گدازه‌ها، مقدار مصرف کک و نوع

^۱ X-Ray Fluorescence

آهن مورد استفاده در بازه وسیعی متغیر باشد. این تغییرات بر روی درصد نسبی چهار جزء اصلی تشکیل دهنده (آهک، سیلیس، آلومینا و منیزیم) و همچنین مقدار اجزای جزئی (گوگرد در حالت سولفید و اکسیدهای آهن و منگنز) تأثیر می‌گذارد. با این وجود، ترکیب شیمیایی سرباره کوره بلند تولیدی یک کارخانه ذوب آهن می‌تواند در یک بازه نسبتاً کوچک باشد.

ملاحظه می‌شود که سیستم $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ حدود ۹۵ درصد از ترکیبات سرباره را تشکیل می‌دهد. گوگرد نیز به حالت سولفید و پلی‌سولفید، سولفات‌ها و تیوسولفات‌ها و همچنین به حالت گوگرد عنصری به مقدار کم در ترکیبات سرباره وجود دارد. همچنین مقادیر کمی از ترکیبات آهن و منگنز و مقادیر ناچیزی از منگنز، تیتانیوم و فلوتور نیز در ترکیبات سرباره وجود دارد (Wang, 2016).

جدول (۲-۱): محدوده کامل مقادیر ترکیبات شیمیایی سرباره کوره بلند (Wang, 2016)

مقدار ترکیب (درصد)	اجزای تشکیل دهنده	مقدار ترکیب (درصد)	اجزای تشکیل دهنده
۰/۳-۲/۰	آهن $\text{FeO/Fe}_2\text{O}_3$	۳۱-۵۰	آهک CaO
۰/۱-۲/۳	منگنز اکسید MnO	۲۷-۴۵	سیلیس SiO_2
۰/۶-۳/۰	گوگرد S	۷-۲۴	آلومینا Al_2O_3
کمتر از ۰/۱	P_2O_5	۱-۱۸	منیزیم اکسید MgO

همچنین در یک ارزیابی در سال ۱۹۹۸ میلادی، ترکیب شیمیایی نمونه‌های سرباره کوره بلند از کشورهای مختلف شامل انگلستان، کانادا، فرانسه، آلمان، ژاپن، روسیه، آفریقای جنوبی و ایالات متحده تعیین شد که نتایج و محدوده تغییرات اجزای تشکیل دهنده سرباره‌ها در جدول ۳-۱ ارائه شده است (Hewlett, 1998). درصد ترکیب‌های شیمیایی موجود در نمونه‌های سرباره کوره بلند تولیدی ایران نیز در جدول ۴-۱ ارائه شده است.

جدول ۳-۱: محدوده مقادیر ترکیبات شیمیایی نمونه‌های سرباره کوره بلند (Hewlett, 1998)

مقدار ترکیب (درصد)	اجزای تشکیل دهنده	مقدار ترکیب (درصد)	اجزای تشکیل دهنده
۰/۳-۲/۰	آهن Fe_2O_3	۳۴-۴۳	آهک CaO
۰/۵-۱/۱	منگنز اکسید MnO	۳۳-۳۷	سیلیس SiO_2
۰/۹-۲/۰	گوگرد تری‌اکسید SO_3	۸-۱۶	آلومینا Al_2O_3
		۵-۱۴	منیزیم اکسید MgO

جدول (۴-۱): محدوده مقادیر ترکیبات شیمیایی نمونه‌های سرباره کوره بلند

محدوده رایج	جهان بخش و همکاران (۱۳۹۹)	جیلی خسروی پناه و جیلی (۱۳۹۶)	همکاران مکارچیان و همکاران (۱۳۹۴)	آقایی پور و مدح‌خوان (۱۳۹۴)	راپل و همکاران (۱۳۹۳)	مجبی و همکاران (۱۳۹۳)	اجزای تشکیل‌دهنده
۳۲-۴۱	۳۸	۳۳/۲	۳۹/۷۱	۳۷/۷۱	۳۵/۱	۳۴/۸	CaO
۳۱-۳۹	۳۶	۳۲/۳۵	۳۲/۵۸	۳۵/۸۵	۳۵/۲	۳۷/۵	SiO ₂
۵-۱۵	۸	۱۳	۸/۴۷	۱۳/۳۹	۱۱/۱	۶/۴	Al ₂ O ₃
۶-۱۲	۸/۲	۸/۱	۷/۴۸	۹/۱	۱۰/۷	۸/۶	MgO
۳-۵	--	۳/۶۲	۴/۶۹	--	۳/۸۲	--	TiO ₂
۰-۴	۰/۵	۳/۴۰	۰/۳۵	۱/۰۶	۰/۶۵	۰/۵۱	گروه FeO
۰-۳	۰/۳	۳/۵	۲/۵۱	۲/۵۲	--	۲/۴۹	SO ₃
۱-۲/۵	--	۱/۸۲	۱/۹۲	--	۱/۴۷	--	MnO
<۱/۵	۱	۱/۱	۱/۰۸	۰/۵۸	--	۰/۹	K ₂ O
<۱	۰/۵	۰/۶۱	۰/۶۲	۰/۴۸	--	۰/۳۸	Na ₂ O
<۱۰	۶/۹	--	--	--	--	--	درصد افت وزنی در اثر حرارت LOI

۴-۱-۲- ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی

سرباره کوره بلند خنک‌شده در هوا ACBFS غالباً ماهیت کریستالی و بلوری دارد و ساختار آن بر اثر حل شدن حباب‌ها درون سرباره مذاب، یک ساختار سلولی یا حفره‌دار است. سرباره کوره بلند با خردایش توسط دستگاه‌های سنگ‌شکن به شکل دانه‌های گوشه‌دار، تقریباً مکعبی و با سطوح حفره‌دار شکسته می‌شود. این نوع سرباره چسبندگی عالی با سیمان و قیر دارد. زاویه اصطکاک داخلی بالا و قفل و بست عالی دانه‌های سرباره، استحکام و پایداری آن را بسیار قابل توجه کرده است. وزن واحد حجم^۱ سرباره به دانه‌بندی و اندازه دانه‌های آن بستگی دارد؛ هر چه اندازه دانه‌ها بزرگتر باشد، به دلیل وجود حفرات و منافذ بیشتر، وزن واحد حجم مخلوط مصالح کمتر خواهد بود. وزن واحد حجم بخش درشت‌دانه مصالح سرباره می‌تواند به میزان ۲۰ درصد کمتر از وزن واحد حجم سنگی طبیعی با دانه‌بندی یکسان باشد، در حالی که وزن واحد حجم بخش ریزدانه مصالح سرباره (عبوری از الک ۴/۷۵ میلی‌متر یا شماره ۴) تقریباً برابر وزن واحد حجم مصالح ماسه طبیعی است.

سرباره کوره بلند در برابر اثرات جوی بسیار مقاوم و بادوام است و هنگامی در لایه رویه استفاده شود، به راحتی صیقلی نشده و بافت ریز سطحی خویش را به خوبی حفظ می‌کند. این سرباره دارای ضریب انبساط حرارتی کم و

^۱ Bulk Density or Unit Weight

مقاومت زیاد در برابر آتش است. همچنین به دلیل مقدار تخلخل بالای سرباره، مقدار جذب آب آن نسبتاً زیاد است و یکی از انواع مصالح دانه‌ای با بیشترین مقدار جذب آب است. سرباره کوره بلند به دلیل بافت سطحی زبر، تخلخل نسبتاً زیاد و واکنش‌پذیری قلیایی، خصوصیات چسبندگی خوبی به خصوص در حضور آب از خود نشان می‌دهد. ویژگی‌های فیزیکی سرباره کوره بلند برای یک کارخانه ذوب آهن مشخص، با تغییرات کمی همراه است و تغییراتی که دیده می‌شود، از اندازه تغییرات ویژگی‌های فیزیکی مصالح سنگی طبیعی بیشتر نیست. این تغییرات اندکی هم که وجود دارد به دلیل تنظیم مواد اولیه وارد شده به کوره بلند متناسب با نوع سنگ آهن مصرفی ایجاد می‌شود. با این وجود، تغییر در نوع سنگ آهن مصرفی یک کارخانه می‌تواند تفاوت‌های بیشتری در ویژگی‌های فیزیکی سرباره ایجاد کند تا تغییر سرباره از یک کارخانه به کارخانه دیگر اما با سنگ آهن مشابه. خصوصیات فیزیکی سرباره مانند وزن واحد حجم، تخلخل و اندازه دانه‌ها به نرخ خنک‌شدن و ترکیبات شیمیایی آن بستگی دارد. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سرباره کوره بلند در جدول ۱-۵ ارائه شده است (Wang, 2016).

جدول (۱-۵): ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سرباره کوره بلند (Wang, 2016)

مقدار	ویژگی
۲/۳۸ - ۲/۷۶	وزن مخصوص
۱۱۵۰-۱۴۴۰	وزن واحد حجم (kg/m ³)
۱/۵-۵	جذب آب (درصد)
۵۰-۶۳	شاخص صیقلی شدن (PSV)
۵-۳۱	افت وزنی در سایش (درصد)

مکارچیان و نادری (۱۳۸۹)، محبی و همکاران (۱۳۹۳) و جهان‌بخش و همکاران (۱۳۹۹)، وزن مخصوص نمونه‌های سرباره کوره بلند تولیدی ایران را به ترتیب ۳، ۲/۸۵ و ۲/۸۷ تعیین کردند.

۱-۴-۲- ویژگی‌های سرباره‌های فولاد

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سرباره فولاد اصولاً به نوع فرآیند فولادسازی و رده فولاد تولیدی بستگی دارد اما با این وجود، به طور کلی می‌توان گفت ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سرباره‌های حاصل از کوره اکسیژن بازی BOF و کوره قوس الکتریکی EAF تقریباً مشابه یکدیگر است (Wang, 2016).

۱-۴-۲-۱- ویژگی‌های شیمیایی

ترکیب شیمیایی سرباره معمولاً بر حسب اکسیدهای ساده محاسبه‌شده از طریق آنالیز عناصر با فلورسانس اشعه ایکس (XRF) بیان می‌گردد. ترکیبات شیمیایی سرباره فولاد حاصل از فرآیندهای مختلف فولادسازی در اغلب منابع و ادبیات فنی موضوع ارائه شده است (مثلاً FHWA, 1997). جدول ۱-۶ خلاصه‌ای از ترکیبات شیمیایی سرباره‌های فولاد

تولید شده از فرآیندهای مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود، محدوده ترکیبات شیمیایی سرباره کوره اکسیژن بازی BOFS و سرباره کوره قوس الکتریکی EAFS نزدیک به هم بوده و آهک، سیلیس و اکسید آهن بخش اعظم ترکیبات آن‌ها را تشکیل می‌دهند. اما در سرباره کوره پاتیلی LFS، آهک و آلومینا بیشترین بخش از ترکیبات شیمیایی سرباره را تشکیل می‌دهند. برخی سرباره‌های فولاد نیز حاوی مقادیر ناچیزی از V_2O_5 و TiO_5 هستند که در جدول آورده نشده است (Wang, 2016). درصد اکسیدهای آهن سرباره به میزان کربن فولاد بستگی دارد و به طور کلی برای مقادیر کمتر کربن، درصد آهن افزایش می‌یابد (Kokal, 2006).

تقریباً همه سرباره‌های فولاد در این محدوده‌های شیمیایی قرار می‌گیرند، اما باید توجه داشت همه سرباره‌های فولاد برای مصرف به عنوان سنگدانه مناسب نیستند. سرباره کوره اکسیژن بازی BOFS و سرباره کوره قوس الکتریکی EAFS خنک شده در هوا برای استفاده در راهسازی به عنوان مصالح دانه‌ای مناسب هستند (FHWA, 1997).

جدول (۱-۶): محدوده کامل ترکیبات شیمیایی انواع سرباره‌های فولاد (Wang, 2016)

مقدار ترکیب (درصد)			اجزای تشکیل‌دهنده
سرباره کوره پاتیلی LFS	سرباره کوره قوس الکتریکی EAFS	سرباره کوره اکسیژن بازی BOFS	
۳۰-۶۰	۴۰-۶۰	۳۵-۴۵	آهک CaO
۲-۳۵	۱۰-۳۰	۱۲-۱۷	سیلیس SiO ₂
۰-۱۵	۱۰-۳۰	۱۰-۲۵	آهن اکسید FeO
۰-۵	۲-۵	۵-۱۵	منگنز اکسید MnO
۱-۱۲	۳-۸	۳-۱۵	منیزیم اکسید MgO
۵-۳۵	۲-۹	۰/۹۸-۳/۴	آلومینا Al ₂ O ₃
۰/۱-۱	۰/۱-۰/۶	۰-۰/۳	گوگرد تری‌اکسید SO ₃
۰-۰/۴	۰-۱/۲	۰/۲-۴	فسفر پنتا اکسید P ₂ O ₅

یژگی‌های معدنی سرباره از اهمیت زیادی برخوردار است که بستگی زیادی به نرخ خنک‌شدن سرباره در فرآیند ساخت فولاد دارد. نرخ خنک‌شدن اغلب سرباره‌های فولاد به اندازه کافی کم است، به حدی که معمولاً ترکیبات بلوری تشکیل می‌شوند. ترکیبات غالب شامل سیلیکات دی‌کلسیم، سیلیکات تری‌کلسیم، فریت دی‌کلسیم، مروینیت، آلومینات کلسیم، اکسید آهن، اکسید کلسیم و اکسید منیزیم و مقداری آهک آزاد و منیزیم آزاد هستند. ویژگی‌های نسبی این ترکیبات به روش ساخت فولاد و نرخ خنک‌شدن سرباره فولاد بستگی دارد (FHWA, 1997).

منابع عمده تولید سرباره در ایران به ترتیب کارخانه‌های فولاد مبارکه اصفهان، ذوب آهن اصفهان، فولاد خوزستان و فولاد هرمزگان و سپس کارخانه‌های دیگر نظیر فولاد یزد هستند. بخش عمده سرباره‌های فولاد کشور، سرباره کوره اکسیژن بازی (BOFS) و سرباره کوره قوس الکتریکی (EAFS) است. سرباره کوره اکسیژن بازی محصول جانبی تولید

فولاد در کوره اکسیژن بازی و ناشی از تزریق اکسیژن خالص به چدن مذاب بوده تا همراه با افزودن آهک، سنگ آهن و قراضه آهن، با تجمع ناخالصی‌ها در سرباره، چدن به فولاد تبدیل شود. سرباره کوره قوس الکتریکی محصول جانبی تولید فولاد در کوره قوس الکتریکی است که در آن قراضه آهن مذاب به کمک جریان الکتریکی اکسید می‌شود. در ایران با تولید سالانه حدود سه میلیون تن سرباره فولاد، انباشتگی این محصول تا سال ۱۳۹۸ به بیش از ۵۰ میلیون تن رسیده، که سطح زیادی از زمین‌های مجاور کارخانه‌ها را اشغال نموده است. درصد ترکیب‌های شیمیایی موجود در نمونه‌های سرباره فولاد تولیدی ایران نیز در جدول‌های ۷-۱ و ۸-۱ ارائه شده است. اطلاعاتی از سرباره فولاد کوره پاتیلی تولیدی ایران در ادبیات فنی موضوع یافت نشد.

از مهم‌ترین مشکلات عملیاتی سرباره‌ها که گسترش مصرف آن را با چالش مواجه کرده این است که هنگامی که در مجاورت آب و رطوبت قرار می‌گیرند، منبسط شده و افزایش حجم پیدا می‌کنند. بنابراین، پیش از استفاده از سرباره‌ها در لایه‌های راه، حتماً باید از تحت کنترل بودن انبساط حجمی آن‌ها اطمینان حاصل کرد. اکسیدهای کلسیم و منیزیم آزاد سرباره‌های فولاد، به طور کامل با سایر مواد معدنی موجود در سرباره ترکیب نمی‌شوند و یک اجماع کلی در ادبیات فنی وجود دارد که هیدراتاسیون آهک و منیزیم آزاد موجود در سرباره فولاد در تماس با رطوبت، تا حد زیادی مسئول ماهیت انبساطی اکثر سرباره‌های فولاد است (Emery, 1993; Collins and Ciesielski, 1994). آهک آزاد به سرعت هیدراته می‌شود و می‌تواند باعث تغییر حجم زیاد سرباره در مدت نسبتاً کوتاهی شود، در حالی که منیزیم آهسته‌تر هیدراته می‌شود و باعث انبساط طولانی مدت می‌شود که ممکن است سال‌ها طول بکشد.

سرباره فولاد نسبتاً قلیایی است و pH محلول آن معمولاً در محدوده ۸ تا ۱۰ است. اما pH شیرآبه سرباره فولاد می‌تواند از ۱۱ فراتر رود و باعث خوردگی لوله‌های از جنس آلومینیوم یا فولاد گالوانیزه که در تماس مستقیم با سرباره هستند، شود (FHWA, 1997).

آهک آزاد در سرباره فولاد

یک مقدار مشخص از آهک ترکیب نشده (آهک نپخته یا آهک آزاد) با f-CaO نشان داده می‌شود. آهک آزاد (f-CaO) با وزن مخصوص ۳/۳۴ می‌تواند با رطوبت واکنش دهد و هیدروکسید کلسیم Ca(OH)_2 با وزن مخصوص ۲/۲۳ تشکیل شود که با افزایش حجم تقریباً ۹۰ درصدی همراه است. این دلیل اصلی قابلیت انبساط حجمی برخی از سرباره‌های فولاد است (Wang, 2016).

تجزیه شیمیایی نشان داده است که در سرباره‌های فولاد دو نوع آهک آزاد وجود دارد: آهک آزاد خالص و آهک آزاد محلول در جامد. نوع اول آهک آزاد CaO است و نوع دوم نیز آهک آزاد ترکیب شده با کمتر از ۱۰ درصد اکسید آهن است ($\text{CaO} + x\% \text{FeO}$, $x < 10\%$ by weight). آهک آزاد بیش از حد، به خصوص به حالت محلول در جامد همراه با مقداری اکسید آهن FeO، دلیل اصلی ناپایداری حجمی است (Wang, 2016).

جدول (۷-۱): محدوده مقادیر ترکیبات شیمیایی نمونه‌های سرباره فولاد کوره اکسیژن بازی (BOFS) ایران

محدوده رانج	رحمانی و همکاران (۱۳۹۹)	ژال نژاد و حسینی (۱۳۹۸)	کاووسی و همکاران (۱۳۹۴)	مکرچین و صیفوری (۱۳۹۴)	شهبازی و همکاران (۱۳۹۴)	گودرزی و سلیمی (۱۳۹۳)	علمی و همکاران (۱۳۸۸)	عبیدی و طهماسبی (۱۳۸۸)	اجزای تشکیل دهنده
۳۳-۵۷	۳۴/۶۸	۴۵/۶	۴۵/۱۷	۵۲/۸۵	۴۸/۵	۴۸	۵۰-۵۷	۴۵/۷۷	CaO
۱۴-۳۴	۳۳/۶۰	۱۵/۱	۱۵/۵۸	۲۴/۷	۱۴	۱۶/۹	۲۵-۳۲	۱۴/۹۲	گروه FeO
۹-۲۱	۲۰/۰۴	۱۶/۱	۱۸/۴۷	۸/۹۲	۱۶	۱۲/۶	۹-۱۱	۱۰/۰۷	SiO ₂
۳-۵	--	۳/۸	۳/۰۴	۴/۴۶	۴	--	۴-۵	۴/۴۰	MnO
۱-۵	۱/۲۰	۴/۵	۴/۶۷	۲/۲۲	۲	۳/۴	۱-۲	۴/۷۵	MgO
۰/۵-۵	۴/۹۰	۳/۴	۴/۶۰	۰/۷۸	۴/۵	۲/۲	۰/۷-۱/۴	۲/۳۳	Al ₂ O ₃
۱/۲-۵	--	۲/۸	۱/۶۹	۴/۷۶	۳	۱/۴	۲/۳-۳/۲	۱/۳۸	P ₂ O ₅
۰/۵-۳/۵	--	۳/۱	۲/۴۴	--	۰/۹	۱/۳	--	۰/۹۲	TiO ₂
۰/۵-۳	--	۰/۶۲	--	۲/۳۱	۲/۵	--	--	۱/۴۱	V ₂ O ₅
<۱	۰/۱۷	--	۰/۷۵	--	--	۰/۳	--	۰/۸۷	SO ₃
<۰/۵	--	۰/۳	۰/۲۹	۰/۰۳	۰/۰۴	<۰/۱	--۰/۰۴ ۰/۰۱	۰/۰۵	K ₂ O
<۰/۵	--	۰/۲۹	۰/۳۰	۰/۰۸	--	۰/۲	--۰/۰۴ ۰/۰۲	۰/۱۷	Na ₂ O
<۱۵	۴/۹۵	۲/۵	۲/۳۱	--	--	۸/۳	--	۱۲/۵۲	درصد افت وزنی در اثر حرارت LOI

جدول (۸-۱): محدوده مقادیر ترکیبات شیمیایی نمونه‌های سرباره فولاد کوره قوس الکتریکی (EAFS) ایران

محدوده رانج	رحمانی و همکاران (۱۳۹۹)	ضیائی و بهنیا (۱۳۹۹)	شفا بخش و احمدی (۱۳۹۸)	شهرافیان و همکاران (۱۳۹۸)	هاشمی و همکاران (۱۳۹۷)	مبارکه (۱۳۹۶)	احمدی و همکاران (۱۳۹۶)	کاووسی و همکاران (۱۳۹۴)	اجزای تشکیل دهنده
۲۴-۴۱	۳۱/۰۸	۳۷/۸۵	۳۸/۵۷	۲۵/۲۴	۲۵/۹۰	۳۳	۴۰	۳۸/۸۷	CaO
۱۹-۳۳	۲۰/۶۰	۲۵/۱۳	۲۷/۷۴	۲۱/۳۸	۲۹/۶۰	۳۱/۵	۲۷	۲۵/۷۵	گروه FeO
۱۵-۲۲	۱۸/۰۸	۲۱/۲۳	۱۷/۲۱	۲۱/۲۶	۱۷/۶۳	۱۶/۲	۱۶	۱۷/۴۷	SiO ₂
۴-۱۰	۴/۸۰	۵/۶۹	۵/۲۳	۵/۴۰	۵/۵۰	۹/۵	۵	۵/۰۱	MgO
۳-۹	۶/۶۵	۵/۵۲	۴/۱۳	۵/۴۸	۸/۰۵	۳/۴	۵	۴/۰۷	Al ₂ O ₃
۰/۳-۳	--	۰/۳۹	--	۰/۳۲	--	۰/۶	۱	۲/۳۲	MnO
۰-۲/۵	--	۰/۴۷	--	۰/۴	--	۰/۹	۲	۱/۵۰	P ₂ O ₅
۰-۲/۵	--	۰/۷۱	--	۰/۵۳	--	۱/۲۲	--	۲/۱۱	TiO ₂
۰-۲/۵	۲/۰۸	۰/۲۷	--	۰/۲۸	۲/۱۵	--	--	۰/۴۸	SO ₃
<۱	--	۰/۸۲	۰/۳۸	۰/۷۲	--	--	--	۰/۳۴	Na ₂ O
<۱	--	۰/۶۹	--	۰/۸۹	--	--	--	۰/۲۵	K ₂ O
<۲۰	۱۶/۴۲	--	--	۱۷/۶۷	۱۰/۷۳	--	--	۱/۱۱	درصد افت وزنی در اثر حرارت LOI

این مسأله که در انبساط حجمی مصالح سرباره، مقدار آهک آزاد f-CaO است که نقش ایفا می‌کند و نه حالت آن، یک موضوع پذیرفته شده است. اما تحقیقاتی نیز انجام شده که نشان می‌دهند حالت آهک آزاد نیز در انبساط حجمی نقش دارد و به این نتیجه رسیدند که آهک آزاد به شکل محلول در جامد می‌تواند باعث انبساط حجمی شود و احتمالاً ذرات ریزتر آهک آزاد (با اندازه ۳ تا ۱۰ میکرومتر) علت اصلی انبساط حجمی نیستند (Geiseler, 1996).

ارزیابی‌های میکروسکوپی نشان می‌دهد که در حین خنک‌سازی سرباره، آهک آزاد می‌تواند در شکل‌ها و اندازه ذرات مختلف تشکیل شود. همه انواع آهک آزاد می‌توانند هیدراته شوند، اما آهک آزاد اسفنجی^۱ با اندازه ذرات ۶ تا ۵۰ میکرومتر، مهمترین عامل انبساط است (Wang, 2016).

در ادبیات فنی به رسوبات توفالیک^۲ که از قرارگیری مصالح سرباره فولاد در معرض آب و هوا حاصل می‌شوند، پرداخته شده است. توف^۳ یک رسوب سفیدرنگ و پودری است که از کربنات کلسیم (CaCO₃) تشکیل شده است. این رسوبات معمولاً به صورت طبیعی در چشمه‌ها و محیط‌های آبی یافت می‌شود. آهک آزاد موجود در سرباره فولاد نیز می‌تواند با آب ترکیب شده و محلول هیدروکسید کلسیم (Ca(OH)₂) تولید کند. با قرارگیری این محلول در معرض کربن دی‌اکسید موجود در هوا، کربنات کلسیم به صورت توف سطحی و رسوب پودری در آب‌های سطحی تشکیل می‌شود. رسوبات توف باعث مسدود شدن مسیرهای زهکشی در روسازی‌ها می‌شود (Gupta and Kneller, 1993).

منیزیم اکسید آزاد در سرباره فولاد

فقط حالت آزاد منیزیم اکسید (که به آن پریکلز نیز می‌گویند) مستعد انبساط است و منیزیم اکسید ترکیب شده با سایر مواد معدنی دلیل ناپایداری حجمی سرباره فولاد نیست. پریکلز فقط می‌تواند در سرباره‌های با خاصیت قلیایی کم تشکیل شود. پریکلز در شرایط قلیایی بیشتر که در مورد سرباره فولاد نیز صدق می‌کند، با FeO و MnO محلول جامد تشکیل می‌دهد (Wang, 2016).

توانایی دو ماده برای تشکیل محلول جامد در درجه اول با توجه به ساختار هندسی تعیین می‌شود تا ترکیبات شیمیایی. اگر شعاع اتم‌های جایگزین کمتر از حدود ۱۵ درصد متفاوت باشد، یک محلول جامد پیوسته می‌تواند تشکیل شود. شعاع اتم‌های Mg⁺⁺، Fe⁺⁺ و Mn⁺⁺ به ترتیب، ۰/۷۸، ۰/۸۳ و ۰/۹۱ آنگستروم است. بنابراین آن‌ها می‌توانند به راحتی در واکنش مایع قلیایی، محلول جامد تشکیل دهند. مطالعات میکروسکوپی نشان داده است که پریکلز در سرباره فولاد عمدتاً به حالت محلول جامد با FeO و MnO وجود دارد که اصطلاحاً به آن منیزیم وُستیت^۴ گفته می‌شود و پریکلز آزاد به ندرت دیده می‌شود (Wang, 2016).

بر اساس مقدار محلول جامد پریکلز یک شاخص پایداری پیشنهاد شده است که به صورت نسبت وزنی MgO به FeO بعلاوه MnO محاسبه می‌شود و تعیین‌کننده پایدار بودن MgO است. اگر شرط $MgO / FeO + MnO < 1$

¹ Spongy free lime

² Tufalike precipitates

³ Tufa

⁴ Magnesia Wüstites

برقرار باشد، منیزیم اکسید پایدار بوده و در غیر این صورت ناپایدار است. نسبت فوق برای اکثر سرباره‌های فولاد کمتر از ۱ است. این معادله بر این فرض استوار است که منیزیم اکسید MgO می‌تواند با FeO و MnO محلول جامد تشکیل دهد. تحقیقات در مورد درصد منیزیم آزاد سرباره‌های فولاد نشان داده است که انحلال مناسب دولومیت اضافه شده به درون کوره مهمترین عامل تعیین کننده است. به این منظور، دولومیت باید در مراحل اولیه فرآیند فولادسازی اضافه شود و اندازه دانه‌های آن باید تا حد ممکن کوچک باشد تا دولومیت بتواند حل شده و به صورت کامل واکنش دهد (Luo, 1980).

۱-۴-۲-۲- ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی

سرباره‌های فولاد BOFS و EAFS در مقایسه با سرباره کوره بلند ACBFS، بسیار سنگین‌تر، سخت‌تر و متراکم‌تر هستند. همچنین سرباره‌های فولاد دارای حفرات کمتری هستند، خردایش آن‌ها نسبت به سرباره کوره بلند دشوارتر است و مقاومت آن‌ها در برابر صیقلی‌شدن نیز به طور قابل ملاحظه‌ای زیاد است (Wang, 2016). مصالح سرباره فولاد از نظر ظاهری بسیار گوشه‌دار بوده و دارای بافت سطحی زبری هستند. وزن مخصوص واقعی آن‌ها زیاد و جذب آب آن‌ها متوسط است. مصالح سرباره فولاد با توجه به ظرفیت حرارتی بالای آن، حرارت را نسبت به مصالح سنگی طبیعی معمول به مدت بسیار طولانی‌تر حفظ می‌کنند. ویژگی حفظ گرما در مصالح سرباره فولاد می‌تواند در عملیات لکه‌گیری و ترمیم روسازی با آسفالت داغ در هوای سرد سودمند باشد. سرباره فولاد را می‌توان مشابه مصالح سنگی طبیعی به راحتی خردایش کرده و سرند نمود تا الزامات دانه‌بندی برای کاربرد در لایه‌های راه را برآورده سازد (FHWA, 1997). سرباره فولاد شکسته و سرنده شده ویژگی‌های مکانیکی مطلوبی از جمله مقاومت زیاد در برابر سایش، دوام زیاد در برابر سولفات‌ها و مقاومت باربری زیاد دارد. در جدول ۱-۹ برخی از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سرباره فولاد ارائه شده است.

جدول (۱-۹): ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی معمول سرباره فولاد (FHWA, 1997; Wang, 2016)

مقدار	ویژگی
۳/۲ - ۳/۶	وزن مخصوص
۱۶۰۰ - ۱۹۲۰	وزن واحد حجم (کیلوگرم بر مترمکعب)
کمتر از ۳	جذب آب (درصد)
۵-۷	سختی (موس)
۴۰-۵۰	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
۱۶۹-۳۰۰	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)
۲۰-۲۵	سایش لوس‌آنجلس (درصد)
کمتر از ۱۲	افت وزنی در آزمایش دوام در برابر سولفات سدیم (درصد)
بیش از ۳۰۰	نسبت باربری کالیفرنیا، حداکثر اندازه ۱۹ میلیمتر (درصد)

سرباره‌های فولاد تولید ایران نیز دارای خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مطلوبی هستند. درصد سایش لوس آنجلس نمونه‌های سرباره فولاد تولیدی ایران در جدول ۱-۱۰ ارائه شده است.

همان‌طور که در این جدول ملاحظه می‌شود اغلب نتایج از ۲۵ درصد کمتر می‌باشند که نشان می‌دهد مصالح سرباره فولاد از مقاومت سایشی مناسبی برخوردار هستند. همچنین صیادی (۱۳۹۱) و میرمحمدصادقی و همکاران (۱۳۹۳) مصالح سرباره فولاد را تحت آزمایش سایش میکرودوال قرار دادند و مقدار افت سایشی نمونه‌ها کمتر از ۸ درصد حاصل شد که نشان از مقاومت بالای سرباره فولاد در برابر ضربه و رطوبت دارد. همچنین نتایج مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد که درصد شکستگی مصالح سرباره فولاد در دو وجه، بالای ۹۰ درصد است (میرابی مقدم و اکبری، ۱۳۹۴؛ سالک بافقی و خیبری، ۱۳۹۶؛ معظمی و همکاران،

جدول (۱-۱۰): مقدار سایش لوس آنجلس انواع سرباره فولاد تولید ایران

درصد سایش لوس آنجلس	نوع سرباره	ویژگی مرجع
۲۲/۵	BOFS	عامری و زارعی (۱۳۸۸)
۱۸	BOFS	عامری و همکاران (۱۳۸۸)
۱۹/۶	BOFS	کاووسی و همکاران (۱۳۹۴)
۱۹/۶	BOFS	فرهاد ملاشاهی و همکاران (۱۳۹۵)
۱۸/۲	BOFS	زال‌نژاد و حسامی (۱۳۹۶)
۱۸/۲	BOFS	زال‌نژاد و حسامی (۱۳۹۸)
۲۲/۵	BOFS	معافی مدنی و همکاران (۱۳۹۹)
۲۰	BOFS	عموزاده عمرانی و حصیرچیان (۱۳۹۹)
۳۹ - ۴۲	BOFS	رحمانی و همکاران (۱۳۹۹)
۱۳/۴	EAFS	کاووسی و همکاران (۱۳۹۴)
حداکثر ۱۵/۸	EAFS	میرابی مقدم و اکبری (۱۳۹۴)
۲۹/۵	EAFS	فخری و همکاران (۱۳۹۶)
۱۷	EAFS	احمدی و همکاران (۱۳۹۶)
۱۲/۵	EAFS	هاشمی طباطبایی و همکاران (۱۳۹۷)
۱۲/۱	EAFS	شفابخش و احمدی (۱۳۹۸)
۱۴/۷	EAFS	ضیائی و بهنیا (۱۳۹۹)
۲۱ - ۲۴	EAFS	رحمانی و همکاران (۱۳۹۹)
۱۲	EAFS	معظمی و همکاران (۱۳۹۹)
۱۵ - ۲۱	سرباره فولاد	صیادی (۱۳۹۱)
۱۶	سرباره فولاد	مکارچیان و کوری‌زاده (۱۳۹۴)
۲۲	سرباره فولاد	رضایی حسین آبادی (۱۳۹۴)
۱۸	سرباره فولاد	سالک بافقی و خیبری (۱۳۹۶)
۱۸	سرباره فولاد	عامری و همکاران (۱۳۹۸)

۱۳۹۹؛ ضیائی و بهنیا، ۱۳۹۹) و ضریب تطویل و تورق مصالح سرباره فولاد کمتر از ۱۱ درصد است (صیادی، ۱۳۹۱؛ میرابی مقدم و اکبری، ۱۳۹۴؛ عامری و همکاران، ۱۳۹۸).

اغلب محققان ایرانی افت وزنی مصالح سرباره فولاد در برابر سولفات سدیم یا منیزیم را در حدود ۰/۵ درصد و کمتر از آن تعیین کرده‌اند (فرهاد ملاشاهی و همکاران، ۱۳۹۵؛ فخری و همکاران، ۱۳۹۶؛ زال‌نژاد و حسامی، ۱۳۹۸) لیکن در موارد بسیار معدودی نتایج بالاتری نیز گزارش شده است. به عنوان مثال هاشمی طباطبایی و همکاران (۱۳۹۷) و معظمی و همکاران (۱۳۹۹) مقدار افت وزنی مصالح سرباره فولاد در برابر سولفات سدیم یا منیزیم را به ترتیب ۷ درصد و ۹ درصد تعیین کردند.

مصالح سرباره فولاد ایران خاصیت خمیری ندارند (رضایی حسین‌آبادی، ۱۳۹۴؛ هاشمی طباطبایی و همکاران، ۱۳۹۷؛ رحمانی و همکاران، ۱۳۹۹) و ارزش ماسه‌ای آن‌ها بالاتر از ۵۰ درصد است (فرهاد ملاشاهی و همکاران، ۱۳۹۵؛ فخری و همکاران، ۱۳۹۶؛ زال‌نژاد و حسامی، ۱۳۹۶؛ هاشمی طباطبایی و همکاران، ۱۳۹۷).

در پژوهشی توسط کاووسی و همکاران (۱۳۹۴) گوشه‌داری مصالح سرباره فولاد ریزدانه BOFS و EAFS به ترتیب ۵۰ و ۵۲ تعیین شد که به مراتب از گوشه‌داری مصالح سنگی طبیعی (که حدوداً ۴۵ است) بیشتر است. همچنین شاخص شکل و بافت سطحی سرباره فولاد BOFS و EAFS به ترتیب ۱۹ و ۱۳ تعیین شد که به مراتب از شاخص شکل و بافت سطحی مصالح سنگی طبیعی (که حدوداً ۱۱ است) بیشتر است. بنابراین دانه‌های سرباره فولاد ایران از لحاظ ظاهری تیزگوشه بوده و دارای سطحی با بافت زبر هستند.

مقادیر وزن مخصوص و درصد جذب آب نمونه‌های سرباره فولاد تولیدی ایران در جدول ۱-۱۱ ارائه شده است. بررسی اعداد نشان داده شده در جدول نشان می‌دهد که مقادیر وزن مخصوص از ۲/۶ الی ۳/۶ تغییر می‌کند که بر خلاف مقادیر معمول جهانی، گستره نسبتاً وسیعی را پوشش می‌دهد. مقادیر وزن مخصوص مصالح سرباره فولاد به صورت متوسط در محدوده ۳ قرار دارد که مقداری از وزن مخصوص مصالح سنگی طبیعی بیشتر است. درصد جذب آب سرباره فولاد درشت‌دانه مشابه مصالح سنگی طبیعی کمتر از ۲ درصد است که بسیار مناسب است اما درصد جذب آب سرباره ریزدانه در محدوده ۲ الی ۸ درصدی متغیر است که این مقدار نسبتاً زیاد است.

۱-۵- سرباره و توسعه پایدار

تغییرات اقلیمی چالشی اساسی است که بشر در قرن بیست و یکم در کره زمین با آن روبرو است. فعالیت‌های انسان موجب آزاد شدن بیش از حد گازهای گلخانه‌ای و در نتیجه تغییرات آب و هوایی شده است. فعالیت‌های ساختمانی و راهسازی مقادیر عظیمی از مواد و مصالح را از جمله سیمان، بتن، قیر، مصالح سنگی، فولاد و فلزات را مصرف می‌کند. طی این فرآیند، انرژی زیادی مصرف می‌شود و گازهای گلخانه‌ای منتشر می‌شوند.

جدول (۱۱-۱): مقادیر وزن مخصوص و درصد جذب آب انواع سرباره فولاد تولید ایران

درصد جذب آب		وزن مخصوص حقیقی		نوع سرباره	ویژگی مرجع
ریزدانه	درشت‌دانه	ریزدانه	درشت‌دانه		
۴/۸	۱/۷	۲/۹۳	۳/۴۷	BOFS	عامری و زارعی (۱۳۸۸)
۲/۹		۳/۲۵		BOFS	عامری و همکاران (۱۳۸۸)
۲/۵	۲/۱	۲/۶۸۳	۲/۷۷۸	BOFS	کاووسی و همکاران (۱۳۹۴)
--	--	۲/۶۹ (عبوری الک ۲۰۰)		BOFS	شهبازی و همکاران (۱۳۹۴)
۶/۸	۱/۷	۲/۹۳	۳/۳۸	BOFS	کی‌منش و ذبیحیان (۱۳۹۶)
۵/۱	۱/۷	۳/۱۲	۳/۲۷	BOFS	زال‌نژاد و حسامی (۱۳۹۸)
۳/۳	۱/۸	۲/۷۹	۳/۲۱	BOFS	عموزاده عمرانی و حصیرچیان (۱۳۹۹)
۸/۱	۱/۷	۲/۹۳	۳/۴۷	BOFS	معافی مدنی و همکاران (۱۳۹۹)
--		۲/۹۵-۳/۰۲		BOFS	رحمانی و همکاران (۱۳۹۹)
۲/۱	۱/۸	۲/۹۴۷	۳/۰۵۵	EAFS	کاووسی و همکاران (۱۳۹۴)
۱/۷	۱/۴	--	--	EAFS	میرایی مقدم و اکبری (۱۳۹۴)
--	--	۳/۳۸	۳/۵۶	EAFS	فخری و همکاران (۱۳۹۶)
۱/۶		۳/۰۸۲		EAFS	احمدی و همکاران (۱۳۹۶)
--		۳/۲۳		EAFS	هاشمی طباطبایی و همکاران (۱۳۹۷)
--		۳/۰۲		EAFS	شفابخش و احمدی (۱۳۹۸)
--		۳/۲۵		EAFS	معظمی و همکاران (۱۳۹۹)
--	--	۲/۹۴	۳/۴۱	EAFS	ضیائی و بهنیا (۱۳۹۹)
--		۳/۲۱-۳/۲۵		EAFS	رحمانی و همکاران (۱۳۹۹)
۰/۳۹-۰/۵۵		۲/۸۶-۳/۱۷		سرباره فولاد	صیادی (۱۳۹۱)
--		۳/۴۲		سرباره فولاد	مکارچیان و کاوریزاده (۱۳۹۴)
۱/۳	۱/۱	--	--	سرباره فولاد	رضایی حسین آبادی (۱۳۹۴)
۱/۳		۳/۴۶۳		سرباره فولاد	مسعودی و همکاران (۱۳۹۵)
۲/۰	۱/۷	۲/۷۶	۲/۸۳	سرباره فولاد	سالک بافقی و خیبری (۱۳۹۶)
۲/۰	۱/۷	۲/۶۵	۲/۸۳	سرباره فولاد	عامری و همکاران (۱۳۹۸)

مصالح سنگی بخش زیادی از حجم عملیات راهسازی را تشکیل می‌دهند. اثرات مهم استخراج و خردایش مصالح سنگی شامل تغییر محیط زیست و ایجاد گرد و غبار فرار است. خردایش سنگ‌ها به‌ویژه شن سیلیسی باعث رهاسازی ذراتی در هوا می‌شود که می‌تواند باعث تحریک چشم و مجاری تنفسی انسان شود. جمع‌آوری و جلوگیری از انتشار گرد و غبار در عملیات استخراج و انفجار معادن سنگی، بارگیری و تخلیه مصالح، خردایش، سرد و دیو کردن مصالح بسیار دشوار است (Wang, 2016). به همین صورت، لایروبی و استخراج شن و ماسه باعث تغییر زیستگاه‌های گیاهی و جانوری شده و به فرسایش خاک و آلودگی آب و هوا دامن می‌زند. استخراج شن و ماسه در مجاورت یا درون محل‌های آبخیز باعث رسوب و آلودگی آب می‌شود و زیستگاه‌های آبزیان را مختل می‌کند. تجهیزات استخراج معدن نیز پیوسته انرژی مصرف می‌کنند و از موتورهای احتراق آن‌ها آلودگی انتشار می‌یابد (Medgar, Nisbet, & Van Geem, 2006).

صنعت معدن کانون همه مباحث محیط زیستی و اجتماعی است. اثرات ناشی از استخراج مواد معدنی، ضایعات معدن و آلودگی‌های مربوط به آن‌ها بر محیط زیست افزایش یافته است، زیرا فعالیت معدن از وضعیت معدن کوچک زیرزمینی به معدن بزرگ سطحی تبدیل شده و تعداد معدن نیز افزایش یافته است. متأسفانه برخی معدن نیز در نزدیکی مناطق حفاظت‌شده قرار دارند. افزایش مقدار استخراج مواد معدنی و ضایعات سنگ‌ها و آزادسازی عناصری مانند فلزات سمی و گوگرد باعث افزایش مقدار آلاینده‌ها و فشارهای محیط زیستی شده است. از نظر انتشار آلاینده‌ها، صنعت معدن بی‌شبهت به سایر صنایع نیست، اما با توجه به اینکه مقدار مواد موجود در معدن با گذشت زمان کاهش می‌یابد، اغلب پروژه‌های استخراج معدن فقط ۱۰ تا ۲۰ سال ادامه خواهند یافت (Wang, 2016).

شاید مهمترین واقیعت در مورد معدن این باشد که قطعاً بر شاخص‌های محیط زیستی تأثیرگذار هستند. با این حال، جوامع می‌توانند به روش‌های مختلفی به استخراج از معدن و اثرات ناشی از آن واکنش نشان دهند. یکی از رویکردها می‌تواند کاهش تقاضای مواد معدنی از طریق جایگزینی مصالح سنتی با مصالح مصنوعی باشد. همچنین با استفاده از رویکردهایی نظیر بازیافت محصولات، استفاده مجدد از ضایعات معدنی و استفاده از تکنولوژی‌های کارآمد می‌توان مقدار تقاضا را بیشتر کاهش داد (Spitz & Trudinger, 2009).

طی بیست سال گذشته، مفهوم توسعه پایدار به خوبی در میان مردم جا باز کرده است. هدف مفهوم توسعه پایدار آن است که همه افراد بتوانند نیازهای اساسی خود را برآورده سازند و کیفیت زندگی خود را بهبود بخشند، در حالی که اطمینان داشته باشند سیستم‌ها و منابع طبیعی در راستای منافع آنها و نسل‌های آینده حفظ شده و تقویت می‌شود (Pearce & Ahn, 2012). مصرف مجدد و بازیافت محصولات فرعی صنعتی و شهری می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی موجب صرفه‌جویی در منابع طبیعی و کمک به دوام و پایداری از جنبه‌های محیط زیستی، اجتماعی و اقتصادی شود. مصرف سرباره نیز قطعاً به‌طور مستقیم به پایداری و دوام محیط زیست و به‌طور غیرمستقیم به پایداری اقتصادی و اجتماعی کمک می‌کند (Wang, 2016).

فصل ۲

مرور ادبیات فنی

۲-۱- مشخصات فنی مصالح اساس و زیراساس

لایه اساس بلافاصله زیر لایه سطحی روسازی قرار گرفته و بارهای ترافیکی و وارده از لایه روسازی را تحمل می‌کند. لایه اساس ممکن است یک لایه متراکم از مصالح دانه‌ای با کیفیت و تثبیت‌نشده یا یک لایه از مصالح دانه‌ای تثبیت‌شده با قیر، سیمان، آهک یا خاکستر بادی باشد. لایه زیراساس نیز در صورت وجود، در زیر لایه اساس قرار گرفته و عملکردی مشابه آن دارد. زیراساس معمولاً از مصالح با کیفیتی نسبتاً کمتر و محدوده دانه‌بندی گسترده‌تر نسبت به لایه اساس تشکیل می‌شود.

اگر انتخاب مصالح و طراحی و اجرای لایه‌های راه اعم از لایه‌های اساس، زیراساس، بستر زهکش و لایه رگلاژی به صورت مناسب انجام نشود، منجر به خرابی سازه‌ای روسازی می‌شود. هر یک از این لایه‌ها بسته به روش‌های ساخت و اجرا برای اهداف مختلفی اجرا می‌شوند. به عنوان مثال ظرفیت سازه‌ای مورد نیاز برای لایه‌های آسفالتی را فراهم می‌کنند یا با ایجاد یک زهکش مناسب، حساسیت به یخ‌زدگی را برای روسازی بتنی کاهش می‌دهند. بنابراین پیش از استفاده از سرباره در لایه‌های راه حتماً باید خصوصیات شیمیایی، فیزیکی، مکانیکی و محیط زیستی آن را با دقت ارزیابی نمود تا بتوان به صورت بهینه از آن استفاده کرد (Wang, 2016). در ادامه این بخش، منظور از مصالح سنگی، هرگونه مصالح دانه‌ای اعم از سنگی یا سرباره‌ای است که برای سهولت بیشتر از همان واژه مصالح سنگی استفاده می‌شود.

۲-۱-۱- ویژگی‌های کلی مصالح سنگی اساس و زیراساس

مشخصات مصالح سنگی استاندارد برای مصارف راهسازی عموماً شامل ویژگی‌های مربوط به دانه‌بندی، میزان خردشدن، حدود روانی و شاخص خمیری، دوام و مقاومت در برابر سایش است. معمولاً آئین‌نامه‌ها یک معیار مقاومتی مانند حداقل نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) را نیز در نظر می‌گیرند. ویژگی‌های اصلی مورد نیاز مصالح شامل دانه‌بندی، مقاومت، شکل، بافت و دوام در ادامه توضیح داده می‌شوند.

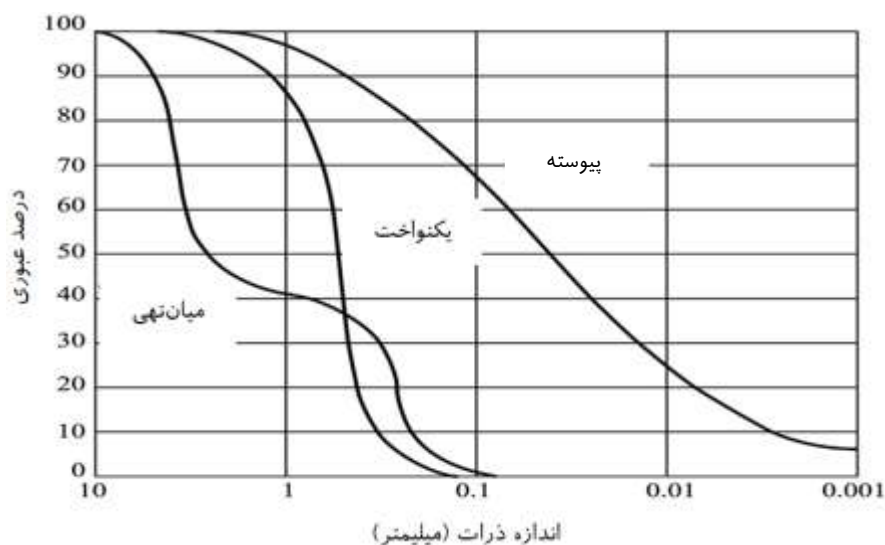
۲-۱-۱-۱- دانه‌بندی مصالح

یکی از فاکتورهای بسیار مهم مصالح سنگی برای استفاده در لایه‌های اساس و زیراساس دانه‌بندی است. دانه‌بندی بر ظرفیت باربری، استحکام، زهکشی و مقاومت یخبندان لایه‌های اساس و زیراساس تأثیر می‌گذارد. بنابراین باید دانه‌بندی مصالح به نحوی انتخاب شود که اهداف مورد نظر را تأمین کند. سه نوع کلی از دانه‌بندی مخلوط مصالح سنگی وجود دارد که با توجه به مقدار ریزدانه کوچکتر از ۷۵ میکرومتر (رد شده از الک شماره ۲۰۰) دسته‌بندی می‌شوند: (۱) بدون ریزدانه، (۲) مقدار ریزدانه رد شده الک ۲۰۰ در مصالح فقط به اندازه پر کردن فضاهای خالی بین دانه‌ها باشد و (۳) مقدار ریزدانه رد شده الک ۲۰۰ بیشتر از حجم فضاهای خالی بین دانه‌ها باشد (Wang, 2016).

در حالت اول، مصالح سنگی مقاومت خود را از تماس دانه به دانه درشت‌دانه‌ها به دست می‌آورد. در این شرایط اگر مصالح سنگی محدود شده نباشد، ناپایدار خواهد بود، اما زهکشی عالی ایجاد می‌کند و کاملاً به یخ‌زدگی غیر حساس است. در حالت دوم هم مصالح سنگی مقاومت خود را از تماس دانه به دانه درشت‌دانه‌ها به دست می‌آورد. در این شرایط حتی اگر مصالح سنگی محدود نشده باشد، به دلیل خواص چسبندگی ریزدانه‌هایی که فضاهای خالی بین دانه‌های درشت‌تر را پر می‌کند، پایدار خواهد بود. به علاوه زهکشی این مصالح مناسب است و می‌تواند به یخ‌زدگی غیرحساس باشد. در حالت سوم، مقاومت مصالح از تماس دانه به دانه ریزدانه‌ها به جای درشت‌دانه‌ها حاصل می‌شود، بنابراین استحکام کمتری دارد. خواص زهکشی این مصالح ضعیف بوده و به یخ‌زدگی بسیار حساس هستند. در بیشتر پروژه‌های بزرگ عمرانی به منظور برخورداری از بهترین عملکرد، مصالح سنگی از بین مصالح نوع اول و نوع دوم انتخاب می‌شوند. بنابراین، یک مخلوط مصالح سنگی مناسب باید از ریزدانه کافی برای پر کردن فضاهای خالی بین درشت‌دانه‌ها و نه بیشتر از حد نیاز برخوردار باشد (Derucher et al., 1998).

مصالح سنگی به طور معمول به مصالح با دانه‌بندی میان‌تهی، یکنواخت و پیوسته طبقه‌بندی می‌شوند. شکل ۱-۲ این سه نوع دانه‌بندی را نشان می‌دهد. به طور کلی، یک مصالح با دانه‌بندی خوب و پیوسته با توزیع کامل اندازه دانه‌ها، چگالی بیشتری نسبت به مصالح با دانه‌بندی‌های یکنواخت یا میان‌تهی به دست خواهد آورد.

البته دستیابی به حداکثر دانسیته تنها پارامتری نیست که باید در مشخصات استاندارد اساس و زیراساس در نظر گرفته شود. همان طور که پیشتر نیز گفته شد، درصد مصالح رد شده از الک شماره ۲۰۰ نیز یک پارامتر مهم تأثیرگذار بر رفتار مصالح سنگی است. درصد بهینه مصالح فیلر (رد شده از الک ۲۰۰) برای دستیابی به حداکثر دانسیته بیشتر از مقدار بهینه مصالح فیلر برای دستیابی به حداکثر مقاومت است. انجام آزمایش‌های سه‌محوری مصالح لایه اساس نشان داده است که بسته به نوع دانه‌بندی و وضعیت تنش‌ها، درصد ریزدانه‌های رد شده از الک ۲۰۰ در محدوده ۵ تا ۱۵ درصد مناسب است. در مقدار فیلرهای بالاتر از این محدوده، تغییر شکل‌ها تحت بارهای ترافیکی به سرعت افزایش می‌یابند. آزمون‌های آزمایشگاهی نشان داده است که به ازای یک مقدار مشخص درصد ریزدانه، دانه‌بندی‌های درشت کمتر از دانه‌بندی‌های ریزتر دچار شیارافتادگی می‌شوند (Barksdale, 1991). حد روانی و شاخص خمیری ریزدانه‌های مصالح سنگی نیز در رفتار آن‌ها نقش بسزایی دارد. برای خاک‌ها و مصالحی که در لایه‌های اساس و زیراساس استفاده می‌شوند، شاخص خمیری نشان‌دهنده میزان کاهش مقاومت مصالح در حضور رطوبت است. آزمایش تعیین نسبت باربری کالیفرنیا CBR به عنوان یک شاخص ساده برای سنجش مقاومت کلی خاک‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (Wang, 2016).



شکل (۱-۲): سه نوع دانه‌بندی مصالح سنگی (Wang, 2016)

۲-۱-۱-۲- مقاومت مصالح

مصالح سنگی باید مقاومت و سختی کافی داشته باشند تا در برابر تنش‌های ناشی از بارهای اجرایی و تکراری خرد نشوند. مقاومت مصالح سنگی تابعی از عوامل مختلف شامل مقاومت ذاتی و شکل دانه‌ها، چگالی و دانه‌بندی آن‌ها است. مصالح سنگی باید به اندازه کافی مقاوم باشند تا در حین خاکبرداری، سرند کردن، حمل و نقل و پخش و تراکم متلاشی نشوند و همچنین باید از مقاومت کافی برای تحمل بارها در زمان بهره‌برداری برخوردار باشند (Rollings & Rollings, 1996). همچنین، هر چه مصالح سنگی مقاوم‌تر و سخت‌تر باشند، مقاومت و استحکام نهایی مخلوط مصالح سنگی بیشتر می‌شود. لازم به ذکر است مصالح سرباره کوره بلند و سرباره فولاد از مقاومت و سختی بالایی برخوردار هستند. مصالح سنگی شکسته به دلیل قفل و بست بهتر، نسبت به دانه‌های گردگوشه مقاومت بالاتری دارند و مقاومت لایه اساس را در برابر شیارافتادگی بهبود می‌بخشند (Wang, 2016).

۲-۱-۱-۳- شکل و بافت مصالح

مصالح سنگی گوشه‌دار با بافت سطحی زبر برای استفاده در لایه‌های اساس و زیراساس ترجیح داده می‌شود. گوشه‌داری مصالح به قفل و بست دانه‌ها کمک می‌کند و بافت سطحی زبر از حرکت دانه‌ها در کنار یکدیگر جلوگیری می‌کند. بنابراین، مصالح سنگی گردگوشه با بافت سطحی صاف برای استفاده در کاربردهای خاکریزی و اساس کمتر مناسب هستند (Derucher et al., 1998).

در حالت ایده‌آل، شکل دانه‌های مصالح سنگی باید مکعبی باشند. دانه‌های پهن و دراز باعث ایجاد مشکلاتی در تراکم و مشکلاتی نظیر شکستن دانه‌ها، افت مقاومت و جدشدگی فیزیکی می‌شوند. حدود مشخصات مربوط به درصد دانه‌های

پهن و دراز در اغلب مشخصات و آئین‌نامه‌ها گنجانده می‌شود. حد بالای پیشنهادی برای این ویژگی در آئین‌نامه‌های مختلف از ۱۰ تا ۳۰ درصد متغیر است (Barksdale, 1991).

۲-۱-۱-۴- دوام مصالح

مقاومت مصالح سنگی در برابر اثرات تجمعی شرایط محیطی و بارهای تکراری را دوام می‌گویند. دوام مصالح سنگی به دما، مقدار بار، شرایط رطوبتی، قرار گرفتن در معرض مواد شیمیایی و چرخه‌های انجماد و ذوب بستگی دارد. دوام کم مصالح سنگی منجر به شکستن دانه‌ها شده و در نتیجه باعث تغییر دانه‌بندی و مختل شدن عملکرد می‌شود. مصالح سنگی برای قرار گرفتن در معرض شرایط میدانی از دوام کافی برخوردار باشند. این شرایط می‌تواند شامل قرار گرفتن در معرض رطوبت و خشک‌شدن، یخبندان و ذوب‌شدن، سایش و ضربه در هنگام ساخت و بهره‌برداری باشد (Barksdale, 1991).

۲-۱-۲- آزمایش‌های تعیین ویژگی‌های کلی مصالح اساس و زیراساس

به منظور شناسایی معادن مناسب مصالح سنگی و سرباره‌ای باید آزمایش‌های مرغوبیت مصالح انجام شود. این آزمایش‌ها را می‌توان پیش از تجهیز و توسعه معدن روی مصالح درجا یا پس از خردایش، روی مصالح دیو شده انجام داد. در هر صورت باید از روش‌های صحیح نمونه‌گیری استفاده شود. نمونه‌گیری مناسب از مصالح برای دستیابی به نتایج آزمایشگاهی دقیق که منعکس‌کننده ویژگی‌های مصالح باشد، ضروری است. آزمایش‌های مرتبط با کیفیت کلی مصالح مورد استفاده برای لایه‌های اساس و زیراساس در ادامه ارائه می‌شود.

۲-۱-۲-۱- آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا CBR

آزمایش تعیین نسبت باربری کالیفرنیا CBR بر روی نمونه‌های متراکم آزمایشگاهی یا نمونه‌های برداشته شده از محل اجرا و همچنین بر روی نمونه‌های میدانی درجا قابل انجام است. آزمایش CBR روی نمونه‌های متراکم آزمایشگاهی به منظور تعیین CBR طراحی مصالح انجام می‌شود. هدف از انجام آزمایش CBR بر روی نمونه‌های میدانی، تعیین شرایط لایه اجرا شده یا شرایط درجای لایه در حالت متراکم است. آزمایش تعیین CBR مناسب‌ترین آزمایش برای خاک‌های ریزدانه است و مطمئن‌ترین نتایج را برای آن‌ها به همراه دارد، اما برای تعیین مقاومت مخلوط مصالح سنگی لایه‌های اساس و زیراساس نیز استفاده می‌شود. آزمایش CBR شاخصی از مقاومت مصالح است، اما مانند آزمایش‌های فشاری تک‌محوری، سه محوری و برش مستقیم، مقدار مقاومت را نشان نمی‌دهد. آزمایش CBR مقاومت مصالح در برابر نفوذ را اندازه‌گیری می‌کند و نتایج را با یک مجموعه مقادیر استاندارد مقایسه می‌کند و مقدار CBR برای آن خاک خاص تعیین می‌شود. در این آزمایش پیستونی با مساحت انتهایی ۳ اینچ مربع با نرخ ۰/۰۵ اینچ در دقیقه به داخل یک نمونه خاک فشرده می‌شود. به ازای هر ۰/۱ اینچ نفوذ پیستون، مقدار بار ایجاد شده توسط لودسل اندازه گرفته می‌شود و این کار تا رسیدن به تغییرشکل کلی ۰/۵ اینچ ادامه می‌یابد. سپس مقدار بارهای وارده در تغییرشکل‌های ۰/۱ و ۰/۲ اینچ با

مقدار بارهای موردنیاز برای ایجاد همین مقدار نفوذ پیستون در یک نمونه سنگ شکسته درشت‌دانه با دانه‌بندی استاندارد مقایسه می‌شود.

در ارزیابی نتایج آزمایش CBR و برای استفاده در طراحی معمولاً مقدار CBR در مقدار ۰/۱ اینچ نفوذ پیستون به خاک برداشت می‌شود. این نتیجه عموماً بیشترین مقدار به دست آمده برای یک آزمایش است، زیرا به‌طور کلی، مقدار CBR با افزایش نفوذ پیستون کاهش می‌یابد.

روش آزمایش CBR میدانی اساساً شبیه همان روش آزمایشگاهی است، با این تفاوت که نمونه با رطوبت درجا آزمایش می‌شود. در آزمایش میدانی بسیار مهم است که دستگاه آزمایش کاملاً عمود باشد و گیج نفوذ به خوبی در مکان صحیح بسته شود. روش‌های آماده‌سازی نمونه و انجام آزمایش CBR در استاندارد ASTM D1883 به صورت کامل توضیح داده شده است (Wang, 2016).

۲-۲-۱-۲- آزمایش سایش لوس آنجلس

آزمایش سایش لوس آنجلس پرکاربردترین آزمایش برای تعیین مقاومت در برابر سایش و دوام مکانیکی مصالح سنگی است. در این آزمایش، نمونه‌ای از مصالح همراه با با گلوله‌های فولادی داخل یک استوانه گردان توخالی قرار می‌گیرد. با چرخش استوانه، یک طبقه در داخل آن، دانه‌های مصالح و گلوله‌های فولادی را در هر دوران بالا برده و سپس به پایین می‌اندازد. روش‌های تهیه نمونه و انجام آزمایش سایش لوس آنجلس در استانداردهای ASTM C131 و ASTM C535 برای مصالح درشت‌دانه با اندازه‌های کوچکتر و بزرگتر به صورت کامل توضیح داده شده است.

مقاومت لوس آنجلس بر حسب درصد کاهش مقدار مصالح به اندازه‌های ریزتر از الک ۱/۷ میلی‌متر (الک شماره ۱۲) پس از ۵۰۰ دوران بیان می‌شود. این آزمایش شاخصی از مقاومت و سختی مصالح دانه‌ای در برابر ضربه را نشان می‌دهد. یعنی، آزمایش سایش لوس آنجلس مصالحی را که در برابر سایش تحت بار ترافیک یا شکستن فیزیکی در حین استخراج، مصرف و پخش در محل پروژه حساس هستند، شناسایی می‌کند. به طور کلی، مقدار سایش برابر یا کمتر از ۴۰ درصد برای مصالح سنگی رضایت‌بخش است، اگرچه گاهی اوقات مقدار سخت‌گیرانه‌تر ۳۰ درصد و کمتر از آن برای مصالح مصرفی در لایه رویه پروژه‌های مهم مانند فرودگاه‌ها و راه‌های اصلی استفاده می‌شود. نکته مهم این است که گرچه مصالح مصرفی در لایه‌های میانی راه به طور مستقیم در معرض سایش ناشی از ترافیک نیستند، اما اگر نتایج آزمایش سایش لوس آنجلس آن‌ها بیش از حد زیاد باشد، در هنگام حمل، پخش و تراکم ممکن است شکسته شده، مقدار ریزدانه آن‌ها افزایش یافته و مقاومت آن‌ها کاهش یابد. البته گاهی استفاده از مصالح با مقدار سایش لوس آنجلس بالاتر تا ۵۰ درصد در لایه‌های میانی روسازی مانند اساس و زیراساس مجاز است. زیرا این یک واقعیت است که آزمایش سایش لوس آنجلس مصالح را در معرض ضربات قابل توجهی قرار می‌دهد و دانه‌های شکننده در این آزمایش ممکن است بیش از آنچه در شرایط واقعی اجرا و بار ترافیکی اتفاق می‌افتد، خرد شوند. به عنوان مثال، سرباره کوره بلند ACBFS و برخی

گرانیت‌ها اغلب عملکرد ضعیفی در این آزمایش از خود نشان می‌دهند، اما در محل مصرف عملکرد خوبی دارند (Wang, 2016).

بنابراین، بهتر است نتایج این آزمایش با تجربیات محلی نیز مقایسه شوند. درست است که مصالحی که در این آزمایش مقبول واقع شوند، احتمالاً سالم و مقاوم در برابر شکستگی و سایش فیزیکی هستند اما مصالحی که در این آزمایش موفق نباشند ممکن است همچنان برای مصرف مناسب باشند و می‌توان برای بررسی بیشتر به سوابق مصرف آن‌ها در گذشته، سختی و خصوصیات پتروگرافی آن‌ها رجوع کرد. خصوصاً اهمیت این موضوع هنگامی بیشتر مشخص می‌شود که مصالح در دسترس پروژه محدود است (Barksdale, 1991).

۲-۱-۲-۳- آزمایش سایش میکرو دوال

آزمایش سایش میکرو دوال^۱ یک آزمایش برای تعیین مقاومت سایشی مصالح در حضور آب و عوامل ساینده است. بسیاری از مصالح در حالت مرطوب بیش از حالت خشک در معرض سایش قرار می‌گیرند و استفاده از آب در این آزمایش برخلاف آزمایش‌هایی که روی مصالح خشک انجام می‌شوند، این کاهش مقاومت در برابر شکستن را نیز در نظر می‌گیرد. آزمایش سایش میکرو دوال برای تشخیص تغییرات و غیریکنواختی ویژگی‌های مصالح تولیدشده از یک منبع مشخص به عنوان بخشی از فرآیند کنترل کیفیت یا تضمین کیفیت نیز مفید است. روش‌های آماده‌سازی نمونه و انجام آزمایش سایش میکرو دوال برای مصالح ریزدانه و مصالح درشت‌دانه در استانداردهای ASTM D7428 و ASTM D6928 به صورت کامل توضیح داده شده است (Wang, 2016).

۲-۱-۲-۴- آزمایش یخبندان و ذوب

اگر مصالح سنگی در شرایط اشباع دچار یخبندان شوند، ممکن است شکسته و از هم گسیخته شوند. شرایط اشباع کامل وقتی به وجود می‌آید که منافذ دانه‌های مصالح پر از آب شود به نحوی که فضای کافی برای انبساط آب هنگام یخبندان وجود نداشته باشد. آسیب‌پذیری مصالح دانه‌ای در شرایط یخبندان تابعی از میزان اشباع‌شدگی، اندازه دانه‌ها، ساختار منافذ، نفوذپذیری و مقاومت کششی مصالح است. برخی سازمان‌ها برای ارزیابی دوام مصالح، آن‌ها را در معرض چرخه‌های یخبندان و ذوب قرار می‌دهند. روش‌های آماده‌سازی نمونه و انجام آزمایش یخبندان و ذوب در استاندارد AASHTO T103 به صورت کامل توضیح داده شده است (Wang, 2016).

۲-۱-۲-۵- آزمایش دوام در برابر سولفات

آزمایش تعیین افت وزنی مصالح سنگی در برابر سولفات سدیم یا منیزیم به عنوان یک آزمایش ارزیابی دوام به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این آزمایش نمونه مصالح در معرض مرطوب و خشک‌شدن مکرر با محلول

^۱ Micro-Deval Abrasion Test

سولفات سدیم یا منیزیم قرار می‌گیرد. از نظر مفهومی، گسترش کریستال سولفات درون منافذ دانه‌های مصالح در اثر مرطوب و خشک شدن مکرر، مشابه رشد کریستال یخ درون منافذ مصالح در اثر یخبندان و ذوب است. اگرچه آزمایش یخبندان و ذوب مصالح و آزمایش دوام در برابر سولفات نمی‌توانند به طور مستقیم دوام میدانی مصالح را پیش‌بینی کنند، اما می‌توانند برای ارزیابی عملکرد نسبی مصالح مفید باشند. بنابراین، در صورت داشتن سوابق عملکردی موفق محلی در شرایط مشابه با نوع کاربرد مورد نظر، نباید یک مصالح را فقط بر اساس نتایج این آزمایش‌ها مردود اعلام کرد (Wang, 2016).

در این آزمایش مقدار معینی از مصالح با دانه‌بندی مشخص به مدت ۱۶ تا ۱۸ ساعت درون محلول سولفات سدیم یا منیزیم غوطه‌ور می‌شود. سپس درون آون با دمای ۱۱۰ درجه سانتیگراد قرار داده شده و تا رسیدن به وزن ثابت خشک می‌شود. این چرخه به دفعات مشخص تکرار می‌شود (معمولاً ۵ یا ۱۰ چرخه). نمونه خنک شده و پس از شستشو خشک می‌شود تا به وزن ثابت برسد. سپس الک شده و توزین می‌شود تا مقدار افت وزنی آن محاسبه شود. روش‌های آماده‌سازی نمونه و انجام آزمایش دوام در برابر سولفات‌ها در استاندارد ASTM C88 به صورت کامل توضیح داده شده است.

۲-۱-۳- حدود مشخصات فنی مصالح لایه‌های اساس و زیراساس

۲-۱-۳-۱- مشخصات فنی مصالح اساس و زیراساس طبق نشریات شماره ۱۰۱ و ۲۳۴

دانه‌بندی مصالح اساس که با روش AASHTO T27 تعیین می‌گردد، با توجه به شرایط پروژه باید با یکی از دانه‌بندی‌های ۱ تا ۵ جدول ۱-۲ مطابقت داشته باشد. مصالح اساس باید مقاوم و بادوام بوده و مشخصات آن با مقادیر مندرج در جدول ۲-۲ مطابقت داشته باشد. مصالح سنگی باید شنی (رودخانه‌ای) یا سنگی (کوهی) باشند.

جدول (۱-۲): دانه‌بندی مصالح اساس طبق نشریات ۱۰۱ و ۲۳۴

درصد وزنی رد شده از هر الک					نوع دانه‌بندی اندازه الک
۵	۴	۳	۲	۱	
---	---	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۵۰ میلی‌متر (۲ اینچ)
---	۱۰۰	---	---	۹۵-۱۰۰	۳۷/۵ میلی‌متر (۱/۵ اینچ)
۱۰۰	۷۰-۱۰۰	۷۵-۹۵	۷۰-۸۵	۶۰-۸۰	۲۵ میلی‌متر (۱ اینچ)
---	۶۰-۹۰	---	۶۰-۸۰	۷۰-۹۲	۱۹ میلی‌متر ($\frac{3}{4}$ اینچ)
۵۰-۸۵	۴۵-۷۵	۴۰-۷۵	۳۰-۶۵	۵۰-۷۰	۹/۵ میلی‌متر ($\frac{3}{8}$ اینچ)
۳۵-۶۵	۳۰-۶۰	۳۰-۶۰	۲۵-۵۵	۳۵-۵۵	۴/۷۵ میلی‌متر (شماره ۴)
۲۵-۵۰	۲۰-۵۰	۲۰-۴۵	۱۵-۴۰	---	۲ میلی‌متر (شماره ۱۰)
---	---	---	---	۱۲-۲۵	۰/۶ میلی‌متر (شماره ۳۰)
۱۵-۳۰	۱۰-۳۰	۱۵-۳۰	۸-۲۰	---	۰/۴۲۵ میلی‌متر (شماره ۴۰)
۲-۸	۲-۸	۲-۸	۲-۸	۲-۸	۰/۰۷۵ میلی‌متر (شماره ۲۰۰)

برای کاهش حساسیت مصالح اساس در مقابل یخبندان می‌توان با تشخیص دستگاه نظارت، درصد مواد رد شده از الک ۲۰۰ را کاهش داد و برای اطمینان بیشتر لازم است درصد مواد ریزتر از ۲۰ میکرون نیز از ۳ درصد تجاوز نکند و ضمناً درصد وزنی مواد رد شده از الک ۲۰۰ نباید از دو سوم درصد وزنی رد شده از الک ۴۰ بیشتر باشد.

جدول (۲-۲): مشخصات مصالح اساس طبق نشریات ۱۰۱ و ۲۳۴

ردیف	آزمایش	مقدار %	روش‌های آزمایش	
			ASTM	AASHTO
۱	دامنه خمیری	حداکثر ۴	D 4318	T 90
۲	حد روانی	حداکثر ۲۵	D 4318	T 89
۳	ارزش ماسه‌ای (پس از کوبیدگی)	حداقل ۴۰	D 2419	T 176
۴	سایش با روش لوس‌آنجلس	حداکثر ۴۵	C 131 و C 535	T 96
۵	افت وزنی با سولفات سدیم	حداکثر ۱۲	C 88	T 104
۶	سی بی آر در تراکم ۱۰۰ درصد آزمایشگاهی	حداقل ۸۰	D 1883	T 193
۷	شکستگی در دوجبهه، مانده روی الک ۴/۷۵ میلیمتر	حداقل ۷۵	D 5821	--
۸	سنگدانه‌های پهن و دراز مانده روی الک ۹/۵ میلیمتری **	حداکثر ۱۵	D 4791	--

* طبق نشریه ۱۰۱، حداکثر ضریب تورق مصالح با روش BS 812 نباید از ۳۵ درصد تجاوز نماید.

** سنگدانه‌ای که حداکثر طول به حداقل ضخامت آن‌ها بزرگتر از ۵ باشد.

دانه‌بندی مصالح زیراساس که با روش AASHTO T27 تعیین می‌گردد، با توجه به شرایط پروژه باید با یکی از دانه‌بندی‌های ۱ تا ۴ جدول ۲-۳ مطابقت داشته باشد. سایر مشخصات مصالح زیراساس باید با مقادیر مندرج در جدول ۲-۴ مطابقت داشته باشد. مصالح سنگی باید شنی (رودخانه‌ای) یا سنگی (کوهی) باشند.

جدول (۳-۲): دانه‌بندی مصالح زیراساس طبق نشریات ۱۰۱ و ۲۳۴

درصد وزنی رد شده از هر الک				نوع دانه‌بندی اندازه الک
۴	۳	۲	۱	
---	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۵۰ میلیمتر (۲ اینچ)
۱۰۰	---	۹۰-۱۰۰	---	۳۷/۵ میلیمتر (۱/۵ اینچ)
۹۰-۱۰۰	۷۵-۹۵	۷۵-۹۰	۷۵-۸۰	۲۵ میلیمتر (۱ اینچ)
۵۵-۸۰	۴۰-۷۵	۴۰-۷۰	۳۰-۶۵	۳ ۹/۵ میلیمتر (۸ اینچ)
۴۰-۶۰	۳۰-۶۰	۳۰-۶۰	۲۵-۵۵	۴/۷۵ میلیمتر (شماره ۴)
۲۸-۴۸	۲۰-۴۵	۲۰-۵۰	۱۵-۴۰	۲ میلیمتر (شماره ۱۰)
۱۴-۲۸	۱۵-۳۰	۱۰-۳۰	۸-۲۰	۰/۴۲۵ میلیمتر (شماره ۴۰)
۵-۱۲	۵-۱۲	۳-۱۲	۲-۸	۰/۰۷۵ میلیمتر (شماره ۲۰۰)

برای کاهش حساسیت مصالح زیراساس در مقابل یخبندان می‌توان به تشخیص دستگاه نظارت، درصد مواد رد شده از الک ۲۰۰ را کاهش داد و برای اطمینان بیشتر لازم است درصد مواد ریزتر از ۲۰ میکرون نیز از ۳ درصد تجاوز نکند و ضمناً درصد وزنی مواد رد شده از الک ۲۰۰ نباید از دو سوم درصد وزنی رد شده از الک ۴۰ بیشتر باشد.

جدول (۲-۴): مشخصات مصالح زیر اساس طبق نشریات ۱۰۱ و ۲۳۴

روش‌های آزمایش		مقدار %	آزمایش	ردیف
ASTM	AASHTO			
D 4318	T 90	حداکثر ۶	دامنه خمیری	۱
D 4318	T 89	حداکثر ۲۵	حد روانی	۲
D 2419	T 176	حداقل ۳۰ در نشریه ۲۳۴ حداقل ۲۵ در نشریه ۱۰۱	ارزش ماسه‌ای (پس از کوبیدگی)	۳
C 131 و C 535	T 96	حداکثر ۵۰	سایش با روش لوس‌آنجلس	۴
D 1883	T 193	حداقل ۳۰	سی بی آر در تراکم ۱۰۰ درصد آزمایشگاهی	۵

۲-۳-۱-۲- مشخصات فنی مصالح اساس و زیراساس طبق استاندارد ASTM D2940

در این استاندارد مشخصات مصالح سنگی طبیعی یا سرباره‌ای مناسب برای مصرف در ساخت لایه‌های اساس و زیراساس و رویه‌های شنی ارائه شده است. دانه‌بندی مصالح دانه‌ای که با روش‌های ASTM C136 و ASTM D422 تعیین می‌گردد، با توجه به شرایط پروژه باید با دانه‌بندی اساس و زیراساس جدول ۲-۵ مطابقت داشته باشد. نگاهی به اعداد این جدول نشان می‌دهد حدود دانه‌بندی مصالح دانه‌ای با حدود مجاز دانه‌بندی‌های ارائه شده در نشریات ۱۰۱ و ۲۳۴ (با دانه‌بندی شماره ۱ جدول ۲-۱ برای مصالح اساس و دانه‌بندی شماره ۲ جدول ۲-۳ برای مصالح زیراساس) مطابقت دارد. مصالح اساس باید مقاوم و بادوام بوده و مشخصات آن با مقادیر مندرج در جدول ۲-۶ مطابقت داشته باشد. مهم‌ترین تفاوت مشخصات فنی مصالح اساس و زیراساس در استاندارد ASTM D2940 با نشریات ۱۰۱ و ۲۳۴ این است که این استاندارد بر خلاف آن نشریات، استفاده از مصالح سرباره‌ای در لایه‌های اساس و زیراساس را به شرط کنترل کردن انبساط حجمی آن‌ها مجاز می‌داند.

جدول (۲-۵): دانه‌بندی مصالح اساس و زیراساس طبق استاندارد ASTM D2940

رواداری		درصد وزنی رد شده از هر الک		نوع دانه‌بندی اندازه الک
		زیراساس	اساس	
زیراساس	اساس	زیراساس	اساس	۵۰ میلیمتر (۲ اینچ)
-۳	-۲	۱۰۰	۱۰۰	
± ۵	± ۵	۹۰-۱۰۰	۹۵-۱۰۰	۳۷/۵ میلیمتر (۱/۵ اینچ)
---	± ۸	---	۷۰-۹۲	۱۹ میلیمتر (۳/۴ اینچ)
---	± ۸	---	۵۰-۷۰	۹/۵ میلیمتر (۳/۸ اینچ)
± ۱۰	± ۸	۳۰-۶۰	۳۵-۵۵	۴/۷۵ میلیمتر (شماره ۴)
---	± ۵	---	۱۲-۲۵	۰/۶ میلیمتر (شماره ۳۰)
± ۵	± ۳	۰-۱۲	۰-۸	۰/۰۷۵ میلیمتر (شماره ۲۰۰) ۲۰۱

- ۱ - درصد وزنی مواد رد شده از الک ۲۰۰ نباید از سه پنجم درصد وزنی رد شده از الک ۳۰ بیشتر باشد.
- ۲ - هنگامی که احتمال یخبندان با توجه به شرایط محیطی پروژه (میزان دما و رطوبت) وجود دارد، باید حد بالای درصد وزنی مواد رد شده از الک ۲۰۰ را کمتر در نظر گرفت. همچنین باید دقت کرد درصد موزنی مواد کوچکتر از ۲۰ میکرون از ۳ درصد تجاوز ننماید.

جدول (۲-۶): مشخصات مصالح اساس و زیراساس طبق استاندارد ASTM D2940

ردیف	آزمایش	مقدار %	روش‌های آزمایش	
			ASTM	AASHTO
۱	دامنه خمیری	حداکثر ۴ ^۱	D 4318	T 90
۲	حد روانی	حداکثر ۲۵	D 4318	T 89
۳	ارزش ماسه‌ای	حداقل ۳۵ ^۲	D 2419	T 176
۴	انبساط حجمی (فقط برای سرباره)	حداکثر ۰/۵	D4792	--
۵	شکستگی در دوجبهه، مانده روی الک ۹/۵ میلیمتر	حداقل ۷۵	D 5821	--

- ۱- برای مصالح زیراساسی که در تراز ارتفاعی بالاتر از تراز احتمالی یخبندان اجرا می‌شود، دامنه خمیری حداکثر ۶ در نظر گرفته می‌شود.
- ۲- برای مصالح زیراساسی که در تراز ارتفاعی بالاتر از تراز احتمالی یخبندان اجرا می‌شود، ارزش ماسه‌ای حداقل ۳۰ در نظر گرفته می‌شود.

۲-۱-۳-۳- مشخصات فنی مصالح اساس و زیراساس طبق استاندارد AASHTO M147

در این استاندارد مشخصات مصالح سنگی طبیعی یا سرباره‌ای مناسب برای مصرف در ساخت لایه‌های اساس و زیراساس و رویه‌های شنی ارائه شده است. دانه‌بندی مخلوط مصالح دانه‌ای اساس و زیراساس باید با یکی از دانه‌بندی‌های مندرج در جدول ۲-۷ مطابقت داشته باشد. البته در مورد رویه‌های شنی، تنها استفاده از دانه‌بندی‌های C تا F مجاز است.

مصالح درشت بزرگتر از ۲ میلی‌متر (الک شماره ۱۰) باید از دانه‌های سخت و با دوام مصالح سنگی، شن طبیعی و سرباره تشکیل شود و مصالحی که در اثر یخبندان و ذوب یا مرطوب و خشک شدن شکسته می‌شوند، نباید مورد استفاده قرار گیرند. مصالح ریزدانه عبوری از الک ۲ میلی‌متر (الک شماره ۱۰) باید از ماسه شکسته یا طبیعی و ذرات معدنی ریز عبوری از الک ۷۵ میکرومتر (الک شماره ۲۰۰) تشکیل شود. سایر مشخصات مصالح دانه‌ای باید با مندرجات جدول ۲-۸ مطابقت داشته باشد.

نگاهی به اعداد جدول ۲-۷ نشان می‌دهد مشابهت زیادی بین حدود دانه‌بندی مصالح دانه‌ای استاندارد AASHTO M147 و حدود مجاز دانه‌بندی‌های ارائه شده در نشریات ۱۰۱ و ۲۳۴ (برای مصالح اساس) وجود دارد. مهم‌ترین تفاوت مشخصات فنی مصالح اساس و زیراساس در استاندارد AASHTO M147 با استاندارد ASTM D2940 و نشریات ۱۰۱ و ۲۳۴ این است که این استاندارد بر خلاف آن‌ها، استفاده از مصالح سرباره‌ای در لایه‌های اساس و زیراساس را تنها در اندازه‌های درشت (بزرگتر از ۲ میلی‌متر) مجاز می‌داند و استفاده از مصالح سرباره‌ای در اندازه‌های کوچکتر از ۲ میلی‌متر مجاز نیست.

جدول ۲-۷: محدوده مشخصات دانه‌بندی مصالح سنگی لایه‌های اساس، زیراساس و رویه (AASHTO M147)

درصد وزنی رد شده از هر الک						نوع دانه‌بندی اندازه الک
F	E	D	C	B	A	
---	---	---	---	۱۰۰	۱۰۰	۵۰ میلی‌متر (۲ اینچ)
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۷۵-۹۵	---	۲۵ میلی‌متر (۱ اینچ)
---	---	۶۰-۱۰۰	۵۰-۸۵	۴۰-۷۵	۳۰-۶۵	۹/۵ میلی‌متر (۳/۸ اینچ)
۷۰-۱۰۰	۵۵-۱۰۰	۵۰-۸۵	۳۵-۶۵	۳۰-۶۰	۲۵-۵۵	۴/۷۵ میلی‌متر (شماره ۴)
۵۵-۱۰۰	۴۰-۱۰۰	۴۰-۷۰	۲۵-۵۰	۲۰-۴۵	۱۵-۴۰	۲ میلی‌متر (شماره ۱۰)
۳۰-۷۰	۲۰-۵۰	۲۵-۴۵	۱۵-۳۰	۱۵-۳۰	۸-۲۰	۰/۴۲۵ میلی‌متر (شماره ۴۰)
۸-۲۵	۶-۲۰	۵-۲۰	۵-۱۵	۵-۲۰	۲-۸	۰/۰۷۵ میلی‌متر (شماره ۲۰۰) ^{۲۰۱}

۱ - درصد وزنی مواد رد شده از الک ۲۰۰ نباید از دو سوم درصد وزنی رد شده از الک ۴۰ بیشتر باشد.

۲ - اگر تجربیات محلی خاص هر پروژه نشان داده باشد که برای پیشگیری از آسیب‌های ناشی از اثرات یخبندان لازم است درصد عبوری مصالح لایه‌های اساس یا زیراساس از الک شماره ۲۰۰ (۷۵ میکرومتر) کمتر از مقادیر مشخص شده در این جدول انتخاب شود، بهتر است مهندس مشاور پروژه مقادیر کمتری را تعیین کند.

مقدار رطوبت مصالح لایه‌های اساس و زیراساس باید با درصد رطوبت بهینه برابر بوده یا اندکی کمتر از آن باشد تا از رسیدن مصالح به دانسیته طرح حین غلتک‌زنی و تراکم اطمینان حاصل شود. در صورتی که قرار است از مصالح دانه‌ای در رویه‌های شنی استفاده شده و روی آن تا چندین سال روکش آسفالتی نشود، بهتر است مهندس مشاور پروژه حداقل درصد مواد عبوری از الک شماره ۲۰۰ در دانه‌بندی‌های C، D و E را ۸ در نظر گرفته و حداکثر حد روانی را ۳۵ تعریف کرده و دامنه خمیری را بین ۴ تا ۹ انتخاب کند.

جدول (۲-۸): مشخصات مصالح اساس و زیراساس طبق استاندارد AASHTO M147

ردیف	آزمایش	مقدار %	روش‌های آزمایش	
			AASHTO	ASTM
۱	دامنه خمیری	حداکثر ۶	T 90	D 4318
۲	حد روانی	حداکثر ۲۵	T 89	D 4318
۳	سایش با روش لوس‌آنجلس ^۱	حداکثر ۵۰	T 96	C 131 و C 535

۱- با توجه به مصالح در دسترس پروژه، مهندس مشاور می‌تواند مقادیر سایش بیشتر از ۵۰ را نیز مجاز تلقی کند.

۲-۱-۳-۴- مشخصات فنی مصالح اساس و زیراساس طبق استاندارد ASTM D1241

در این استاندارد مشخصات مصالح سنگی طبیعی یا سرباره‌ای مناسب برای مصرف در ساخت لایه‌های اساس و زیراساس و رویه‌های شنی ارائه شده است. دانه‌بندی مخلوط مصالح دانه‌ای اساس و زیراساس باید با یکی از دانه‌بندی‌های مندرج در جدول ۲-۹ مطابقت داشته باشد. البته در مورد رویه‌های شنی، تنها استفاده از دانه‌بندی‌های C تا F مجاز است.

مصالح درشت بزرگتر از ۴/۷۵ میلیمتر (الک شماره ۴) باید از دانه‌های سخت و با دوام مصالح سنگی، شن طبیعی و سرباره تشکیل شود. مصالح ریزدانه عبوری از الک ۴/۷۵ میلیمتر (الک شماره ۴) باید از ماسه شکسته یا طبیعی و ذرات معدنی ریز عبوری از الک ۷۵ میکرومتر (الک شماره ۲۰۰) تشکیل شود. سایر مشخصات مصالح دانه‌ای باید با مندرجات جدول ۲-۱۰ مطابقت داشته باشد.

نگاهی به اعداد جدول ۲-۹ نشان می‌دهد مشابهت زیادی بین حدود دانه‌بندی مصالح دانه‌ای استاندارد ASTM D1241 و حدود مجاز دانه‌بندی‌های ارائه شده در AASHTO M147 و نشریات ۱۰۱ و ۲۳۴ (برای مصالح اساس) وجود دارد. مهم‌ترین تفاوت مشخصات فنی مصالح اساس و زیراساس در استاندارد ASTM D1241 با استانداردهای AASHTO M147 و ASTM D2940 و نشریات ۱۰۱ و ۲۳۴ این است که این استاندارد بر خلاف آن‌ها، استفاده از

مصالح سرباره‌ای در لایه‌های اساس و زیراساس را تنها در اندازه‌های درشت (بزرگتر از ۴/۷۵ میلیمتر) مجاز می‌داند و استفاده از مصالح سرباره‌ای در اندازه‌های کوچکتر از ۴/۷۵ میلیمتر مجاز نیست.

جدول (۲-۹): محدوده مشخصات دانه‌بندی مصالح سنگی لایه‌های اساس، زیراساس و روبه طبق استاندارد ASTM D1241

درصد وزنی رد شده از هر الک						نوع دانه‌بندی اندازه الک
F	E	D	C	B	A	
---	---	---	---	۱۰۰	۱۰۰	۵۰ میلیمتر (۲ اینچ)
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۷۵-۹۵	---	۲۵ میلیمتر (۱ اینچ)
---	---	۶۰-۱۰۰	۵۰-۸۵	۴۰-۷۵	۳۰-۶۵	۹/۵ میلیمتر (۳/۸ اینچ)
۷۰-۱۰۰	۵۵-۱۰۰	۵۰-۸۵	۳۵-۶۵	۳۰-۶۰	۲۵-۵۵	۴/۷۵ میلیمتر (شماره ۴)
۵۵-۱۰۰	۴۰-۱۰۰	۴۰-۷۰	۲۵-۵۰	۲۰-۴۵	۱۵-۴۰	۲ میلیمتر (شماره ۱۰)
۳۰-۷۰	۲۰-۵۰	۲۵-۴۵	۱۵-۳۰	۱۵-۳۰	۸-۲۰	۰/۴۲۵ میلیمتر (شماره ۴۰)
۸-۱۵	۶-۱۵	۸-۱۵	۵-۱۵	۵-۱۵	۲-۸	۰/۰۷۵ میلیمتر (شماره ۲۰۰)

- ۱ - درصد وزنی مواد رد شده از الک ۲۰۰ نباید از دو سوم درصد وزنی رد شده از الک ۴۰ بیشتر باشد.
- ۲ - اگر تجربیات محلی خاص هر پروژه نشان داده باشد که برای پیشگیری از آسیب‌های ناشی از اثرات یخبندان لازم است درصد عبوری مصالح لایه‌های اساس و زیراساس از الک شماره ۲۰۰ (۷۵ میکرومتر) کمتر از مقادیر مشخص شده در این جدول انتخاب شود، بهتر است مهندس مشاور پروژه مقادیر کمتر و دامنه محدودتری را تعیین کند.

جدول (۲-۱۰): مشخصات مصالح اساس و زیراساس طبق استاندارد ASTM D1241

ردیف	آزمایش	مقدار %	روش‌های آزمایش	
			ASTM	AASHTO
۱	دامنه خمیری	حداکثر ۶	D 4318	T 90
۲	حد روانی	حداکثر ۲۵	D 4318	T 89
۳	سایش با روش لوس آنجلس ^۱	حداکثر ۵۰	C 131 و C 535	T 96

۱- با توجه به مصالح در دسترس پروژه، مهندس مشاور می‌تواند مقادیر سایش بیشتر از ۵۰ را نیز مجاز تلقی کند.

۲-۱-۳-۵- مشخصات فنی مصالح اساس و زیراساس طبق استاندارد JIS A5015^۱

در این استاندارد ژاپنی مشخصات سرباره‌های آهن و فولاد مناسب برای مصرف در ساخت لایه‌های اساس و زیراساس ارائه شده است. دانه‌بندی مخلوط مصالح دانه‌ای اساس و زیراساس باید با یکی از دانه‌بندی‌های مندرج در جدول ۲-۱۱ مطابقت داشته باشد (البته اندازه چشمه الک‌های مورد استفاده در این استاندارد در کشور ایران رایج نیست). مصالح سرباره‌ای باید فاقد مقادیر قابل توجهی ذرات پولکی، سوزنی یا مواد مضر خارجی نظیر گرد و غبار، لای و مواد آلی باشند و حداکثر مقدار انبساط حجمی مجاز مصالح سرباره‌ای به ۱ درصد محدود می‌گردد. طبق این استاندارد، در تولید مصالح

^۱ Japanese Industrial Standard

سرباره‌ای اساس از سرباره آهن، فولاد یا ترکیبی از آن‌ها استفاده می‌شود و در صورت نیاز می‌توان از افزودنی‌هایی نیز استفاده کرد. وزن واحد حجم مصالح سرباره‌ای اساس باید حداقل ۱/۵ کیلوگرم بر لیتر بوده و مقاومت فشاری تک‌محوری ۱۳ روزه اساس از نوع HMS-25 باید حداقل ۱/۲ مگاپاسکال باشد. طبق استاندارد JIS A5015 مصالح سرباره‌ای نباید مشکل شیرآبه زردرنگ را داشته باشند که در این صورت باید آن‌ها را به مدت بیشتری در معرض هوا و رطوبت قرار داد تا کاملاً پایدار گردند و همچنین مقدار فلزات سنگین سرباره‌ها بایستی محدود گردد.

جدول (۲-۱۱): محدوده مشخصات دانه‌بندی مصالح سنگی لایه‌های اساس و زیراساس طبق استاندارد JIS A5015

درصد وزنی رد شده از هر الک					نوع دانه‌بندی
زیراساس			اساس		
CS-20	CS-30	CS-40	MS-25	HMS-25	اندازه الک
---	---	۱۰۰	---	---	۵۳ میلیمتر
---	۱۰۰	۹۵-۱۰۰	---	---	۳۷/۵ میلیمتر
---	۹۵-۱۰۰	---	۱۰۰	۱۰۰	۳۱/۵ میلیمتر
۱۰۰	---	---	۹۵-۱۰۰	۹۵-۱۰۰	۲۶/۵ میلیمتر
۹۵-۱۰۰	۵۵-۸۵	۵۰-۸۰	---	---	۱۹ میلیمتر
۶۰-۹۰	---	---	۵۵-۸۵	۶۰-۸۰	۱۳/۲ میلیمتر
۲۰-۵۰	۱۵-۴۵	۱۵-۴۰	۳۰-۶۵	۳۵-۶۰	۴/۷۵ میلیمتر
۱۰-۳۵	۵-۳۰	۵-۲۵	۲۰-۵۰	۲۵-۴۵	۲/۳۶ میلیمتر
---	---	---	۱۰-۳۰	۱۰-۲۵	۰/۴۲۵ میلیمتر
---	---	---	۲-۱۰	۳-۱۰	۰/۰۷۵ میلیمتر

۲-۲- کاربرد مصالح سرباره در اساس و زیراساس

مصالح دانه‌ای^۱ گروه گسترده‌ای از مصالح هستند که عمدتاً در صنعت ساختمان و راهسازی استفاده می‌شوند. مصالح دانه‌ای به دو نوع مصالح سنگی طبیعی مانند شن و ماسه و مصالح تولیدشده مانند سرباره، بتن بازیافتی و مصالح

^۱ Aggregates

مصنوعی تقسیم می‌شوند. اصطلاح دانه‌ای هم برای ذرات سخت، شامل هر نوع مصالح دانه‌ای که می‌تواند تا ۳۵ درصد نیز حاوی ذرات عبوری از الک شماره ۲۰۰ باشد، استفاده می‌شود.

مصالح دانه‌ای تثبیت‌نشده^۱ در اجرای بسیاری از زیرساخت‌های حمل و نقل زمینی استفاده می‌شود تا یک شالوده مستحکم با ظرفیت باربری کافی فراهم شود و به جلوگیری از نشست‌های موضعی غیریکنواخت در زیر سازه‌های اجرا شده کمک کند. این کاربردها می‌تواند شامل استفاده به عنوان مصالح اساس یا زیراساس در روسازی راه و فرودگاه، بالاست و زیربلاست در مسیر راه آهن، زیرسازی خطوط لوله و سایر کاربردهای ژئوتکنیکی مانند خاکریزی، خاک بستر راه یا اصلاح‌کننده خاک، ستون‌های سنگی و اجرای خاک مسلح باشد. با توجه به هدایت هیدرولیکی نسبتاً زیاد مصالح سرباره درشت‌دانه در مقایسه با اکثر خاک‌ها، می‌توان از آن به عنوان فونداسیون یا لایه زهکش برای شانه راه و یا برای تصفیه فاضلاب و پوشش آبروهای زیرزمینی استفاده کرد.

در چند دهه گذشته، مشخصات استاندارد و روش‌های آزمایش با موضوع مصالح سرباره و کاربردهای آن تدوین شده است. به عنوان مثال، مشخصات استاندارد BS 1047:1983 برای مصالح سرباره کوره بلند خنک‌شده در هوا به منظور مصرف در راهسازی، استاندارد ASTM D4792 برای تعیین انبساط مصالح دانه‌ای ناشی از واکنش‌های هیدراتاسیون، استاندارد EN 1744-1 برای تعیین ویژگی‌های شیمیایی مصالح دانه‌ای و استاندارد EN 12457-4 برای تعیین ویژگی‌های مصالح ضایعاتی ارائه شده‌اند.

با کاهش منابع مصالح سنگی طبیعی، مصالح سرباره به یک منبع مهم تأمین مصالح تبدیل شده و می‌تواند جایگزین مصالح سنگی طبیعی در راهسازی شود. اگرچه استفاده از سرباره کوره بلند ACBFS سابقه طولانی دارد، اما مصرف امروزی سرباره به عنوان جایگزین مصالح سنگی طبیعی بر پایه ملاحظات نظیر دسترسی به منابع طبیعی، توسعه پایدار، حفاظت از محیط زیست و ویژگی‌های مهندسی عالی سرباره استوار شده است (Wang, 2016).

سرباره فولاد را می‌توان از کارخانه‌های فولادسازی یا از کسانی که سرباره فولاد را از کارخانه‌های فولادسازی جمع‌آوری می‌کنند، تهیه کرد. البته اغلب این افراد به دنبال پردازش سرباره‌ها به منظور بازیابی فلزات ارزشمند آن هستند. این افراد مصالح متنوعی مانند سرباره کوره بلند و انواع سرباره‌های فولاد را جمع‌آوری و پردازش می‌کنند. اما مصالح سرباره باید بر اساس محل تشکیل تفکیک شوند و برای ممانعت از آلودگی این مصالح، از روش‌های مناسب حمل و نگهداری استفاده شود. همچنین بهتر است مصالح سرباره از افرادی تهیه شود که تا حدودی از الزامات و معیارهای مصرف‌کنندگان اطلاع داشته باشد. سرباره‌های فولاد را می‌توان مجدداً در کارخانه فولادسازی استفاده نمود یا آن‌ها را شکسته و سرنند کرد و در لایه‌های راه مورد استفاده قرار داد (FHWA, 1997).

مصالح سرباره دارای خواص مهندسی خوبی است. به عنوان مثال، ویژگی‌های فیزیکی یک نمونه سرباره کوره بلند خنک‌شده در هوا ACBFS و یک نمونه سرباره کوره اکسیژن بازی BOFS در یک کار مطالعاتی با ویژگی‌های مصالح سنگی آهکی شکسته مقایسه شده و نتایج آن در جدول ۲-۱۲ ارائه شده است (Dunster, 2002).

جدول ۲-۱۲: مقایسه ویژگی‌های سرباره کوره بلند و سرباره کوره اکسیژن بازی با مصالح سنگی آهکی (Dunster, 2002)

ویژگی	مصالح سرباره کوره بلند	مصالح سرباره کوره اکسیژن بازی	مصالح سنگی شکسته آهکی
وزن مخصوص ظاهری	۲/۵۵	۳/۵۵	۲/۷۲
جذب آب، درصد	۱/۷	۲/۳	۴/۰
شاخص ضربه در حالت خشک، درصد	۳۴	۷	۱۹
افت وزنی، سایش لوس آنجلس، درصد	۲۱	۹	۳۴
افت وزنی، سایش میکرودوال، درصد	۵ - ۷	۱/۵	۸

مصالح سرباره نسبت به مصالح سنگی طبیعی معمولاً زاویه اصطکاک داخلی بیشتر، سختی بیشتر و شاخص ضربه و خردشدگی^۱ بهتری دارند. از آنجا که اکثر مصالح سرباره یک یا دو مرحله از فرآیند خردایش را پشت سر می‌گذارند، از شاخص‌های گوشه‌داری و دانه‌های پهن و دراز بهتری نسبت به مصالح سنگی طبیعی برخوردار هستند و نسبت به شن و ماسه طبیعی می‌توانند ظرفیت باربری بالاتری فراهم کند. علاوه بر این، سرباره ماده‌ای است که فعالیت هیدرولیکی (فعل و انفعال در مجاورت آب) دارد و به دلیل چسبندگی ناشی از فعالیت هیدرولیکی می‌تواند محصولات با استحکام بیشتر و با دوام‌تر ارائه دهد (Wang, 2016).

بسیاری از مشاوران، استفاده از سرباره کوره بلند و سرباره فولاد به عنوان مصالح دانه‌ای در لایه‌های اساس، زیراساس، خاکریزی، شانه راه، تثبیت خاک بستر و ساخت آسفالت داغ را یک اقدام استاندارد محسوب می‌کنند. اما مشکل اساسی سرباره، انبساط ناشی از واکنش هیدراتاسیون است که در بخش‌های بعدی به تفصیل درباره آن توضیح داده می‌شود و حتماً باید تحت کنترل قرار بگیرد (FHWA, 1997).

۲-۲-۱- عملکرد مصالح سرباره فولاد در اساس و زیراساس

استفاده از سرباره کوره بلند ACBFS در بسیاری از پروژه‌های راهسازی از جمله اساس و زیراساس نسبتاً شناخته شده است و در مشخصات فنی آئین‌نامه‌ها به آن‌ها پرداخته شده است. مشخصات استاندارد برای استفاده از سرباره کوره بلند در راهسازی در دهه ۱۹۷۰ میلادی در برخی از کشورها تصویب شد. به عنوان مثال، مشخصات استاندارد BS 1047:1983 به منظور مشخص کردن ویژگی‌های سرباره کوره بلند برای استفاده در ساخت و ساز در سال ۱۹۷۴ تدوین

^۱ Impact and Crushing Value

شد؛ استاندارد ژاپنی JIS A5015 به منظور ارائه مشخصات سرباره آهن و فولاد برای راهسازی در سال ۱۹۷۹ میلادی تصویب شد و تاکنون چهار مرتبه مورد بازنگری قرار گرفته است. از آن زمان تاکنون تکنولوژی توسعه یافته است و کاربردهای سرباره فولاد و سرباره‌های غیرآهنی و غیرفلزی گسترش یافته است. بر خلاف سرباره کوره بلند خنک‌شده در هوا که از نظر حجمی پایدار و مصرف عمرانی آن ساده است، سرباره‌های فولاد حاصل از کوره اکسیژن بازی BOF و کوره قوس الکتریکی EAF حاوی آهک آزاد (CaO) و پریکلز (MgO) هستند که می‌تواند منجر به ناپایداری حجمی (انبساط) شود و باید از طریق عمل‌آوری و هوادهی مناسب و انجام آزمایش‌های مناسب از کیفیت آن‌ها برای مصرف در لایه‌های راه اطمینان حاصل کرد. سرباره‌ها به دلیل تفاوت‌های زیاد در ویژگی‌ها و معیارهای عملکردی، باید برای هر نوع مصرف پیشنهادی کاملاً ارزیابی شود (Wang, 2016).

مصالح سرباره فولاد عموماً تمایل به انبساط دارند. این امر به دلیل وجود اکسیدهای آزاد آهک و منیزیم است که با ساختارهای سیلیکات واکنش نشان نداده‌اند و می‌توانند در محیط‌های مرطوب هیدراته شده و منبسط گردند. این ماهیت انبساط ذاتی مصالح سرباره (تغییر حجم تا ۱۰ درصد یا بیشتر ناشی از هیدراتاسیون اکسیدهای کلسیم و منیزیم) می‌تواند باعث مشکلاتی در محصولات حاوی سرباره فولاد شود و یکی از دلایل مناسب نبودن مصالح سرباره فولاد برای استفاده در بتن سیمان پرتلند است.

سرباره‌های فولادی که به عنوان مصالح دانه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند، باید برای چندین ماه در فضای باز انباشته و دپو شوند تا مصالح در معرض رطوبت ناشی از بارش‌های طبیعی و یا پاشش آب قرار گیرند. هدف از این انبارش و نگهداری مصالح سرباره فولاد آن است که قبل از استفاده از مصالح در لایه‌های راه، امکان هیدراتاسیون مخرب و انبساط مربوط به آن وجود داشته باشد. مدت زمان لازم برای قرار گرفتن اجزای مصالح در معرض رطوبت بسیار متغیر است زیرا برای هیدراته شدن اکسیدهای منبسط‌کننده سرباره فولاد ممکن است تا ۱۸ ماه زمان لازم باشد. اغلب مراجع حداقل زمان سه یا شش ماهه را برای قرار گرفتن مصالح سرباره در معرض رطوبت الزام کرده‌اند (FHWA, 1997).

با توجه به تجربیات چند دهه گذشته در مورد افزایش کاربرد سرباره در راهسازی، تمرکز اصلی بر روی (۱) ویژگی‌های عمومی و خصوصیات خاص یک سرباره، (۲) اثرات محیط زیستی، (۳) منافع اقتصادی برای یک پروژه و کاربرد خاص و (۴) کاهش انبساط حجمی سرباره فولاد و سایر سرباره‌های آهنی قرار گرفته است (Wang, 2016).

از سرباره فولاد می‌توان به عنوان مصالح در لایه اساس استفاده کرد. مصالح سرباره در نظر بسیاری از سازمان‌های ارائه‌دهنده مشخصات استاندارد، یک نوع مصالح معمولی است و به طور معمول می‌تواند الزامات مصالح مورد استفاده در لایه اساس را به راحتی برآورده سازد. از ظرفیت باربری زیاد مصالح سرباره فولاد می‌توان بر روی لایه‌های زیراساس ضعیف و در راه‌های با ترافیک سنگین به خوبی بهره برد. اتصال و قفل و بست خوب بین دانه‌های مصالح سرباره فولاد باعث انتقال مناسب بارهای ترافیکی به لایه زیراساس ضعیف‌تر می‌شود. با توجه به تشابه شکل دانه‌ها و زاویه اصطکاک داخلی، مصالح سرباره کوره بلند را می‌توان با مصالح سرباره فولاد مخلوط کرد تا عملکرد آن‌ها بهبود یابد بدون آنکه استحکام به طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش یابد (FHWA, 1997).

تجربیات کشورهای آمریکا، بلژیک، ژاپن، هلند و آلمان نشان داده است که اگر سرباره فولاد به درستی انتخاب شده، خرد شود، عمل‌آوری شده و سپس مورد آزمایش قرار گیرد، می‌تواند به عنوان لایه اساس در جاده‌های اصلی و درجه یک استفاده شود. مصالح سرباره فولاد دارای ویژگی‌های مکانیکی بسیار مطلوبی از جمله استحکام بسیار زیاد و دوام خوب برای استفاده در لایه اساس است. این مصالح برای کاربردهای اساس که در آن‌ها مصالح سنگی با کیفیت پایین اغلب کفایت می‌کند، به طور گسترده مصرف نمی‌شود (Collins and Ciesielski, 1994).

در پژوهشی مسائل ژئوتکنیکی و محیط زیستی مربوط به مصالح سرباره فولاد کوره قوس الکتریکی در کشور پرتغال مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج ژئوتکنیکی با معیارهای استاندارد مربوط به آزمایش‌های تجربی مصالح مورد استفاده برای خاکریزها و لایه‌های سازه‌ای راه‌ها مقایسه شدند. محققان نتیجه گرفتند که نتایج آزمون‌های عملکردی نسبت به نتایج آزمون‌های تجربی مانند سایش لوس‌آنجلس و میکرودوال عملکرد مصالح سرباره را بسیار مناسب نشان داده است. به‌علاوه، مصالح سرباره در مقایسه با نتایج آزمایش‌های مکانیکی مصالح سنگی طبیعی، عملکرد مکانیکی بسیار بهتری نشان می‌دهند. نتایج آزمایش میزان سمی بودن شیرابه مصالح سرباره نیز نشان می‌دهد که این مصالح یک محصول جانبی بی‌اثر و کم‌خطر است (Reis Ferreira et al., 2020).

در پژوهشی دیگر آزمایش‌های تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی روی مصالح سنگی طبیعی و مصالح سرباره فولاد به عنوان زیراساس انجام شد. مصالح سنگی شکسته طبیعی به نسبت‌های مختلف با مصالح سرباره مخلوط شدند تا الزامات محدوده مشخصات دانه‌بندی برآورده شود. نسبت اختلاط مصالح سرباره و شن طبیعی برای استفاده در لایه زیراساس به ترتیب برابر ۸۰ و ۵۰ درصد تعیین شد. هر دو نوع مخلوط حاوی مصالح سرباره فولاد و شن طبیعی دارای ویژگی‌های مهندسی عالی بودند و می‌توان از آن‌ها در لایه‌های اساس و زیراساس راه استفاده کرد. آزمایش‌ها نشان داد که وزن مخصوص مصالح سرباره بسیار بیشتر از مصالح سنگی شکسته است. بنابراین حداکثر دانسیته خشک و نسبت باربری کالیفرنیا برای مصالح سرباره فولاد و مخلوط آن با مصالح سنگی شکسته بسیار زیاد است (Singh & Singh, 2018).

محققان دیگری تلاش کردند که کاربرد مصالح دانه‌ای سرباره فولاد در لایه‌های اساس و زیراساس روسازی را ارزیابی کنند. این محققان مخلوط مصالح سرباره فولاد و خاک رسی را در یک پژوهش مورد آزمایش قرار دادند. به این منظور، آزمایش‌های ژئوتکنیکی به منظور تعیین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مصالح سرباره فولاد، خاک رسی و سه مخلوط حاصل از آن‌ها به نسبت‌های ۱۰ و ۲۰ و ۳۰ درصد خاک رسی انجام پذیرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که اگر انبساط مصالح سرباره فولاد کنترل شود، این مصالح ویژگی‌های مطلوبی را برای استفاده به عنوان مصالح راهسازی تأمین می‌کند. سه مخلوط حاصل از ترکیب مصالح سرباره فولاد و خاک رسی عملکرد مطلوبی نشان دادند، درصد انبساط آن‌ها کنترل شده بود و مقدار نسبت باربری کالیفرنیا در آن‌ها زیاد بود. بنابراین محققان تأیید کردند که مخلوط‌های مصالح سرباره فولاد را می‌توان به عنوان مصالح اساس برای اساس و زیراساس راه‌ها استفاده کرد (Buitrago et al., 2021).

در تحقیق جامع دیگری ویژگی‌های مصالح سرباره فولاد و پتانسیل استفاده از آن در لایه اساس راه بررسی شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که مصالح سرباره فولاد محصولی ایمن از نظر محیط زیست است و دارای ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاصی است که آن را به یک گزینه عالی برای ساخت لایه اساس تبدیل کرده است. نتایج آزمایشگاهی و داده‌های میدانی عملکرد برتر مصالح سرباره نسبت به مصالح آهکی طبیعی را نشان می‌دهند. محققان نتیجه گرفتند که در صورت استفاده از مصالح سرباره فولاد به جای مصالح آهکی، مقادیر CBR دو برابر شده و حساسیت رطوبتی نیز بسیار کمتر خواهد بود (Aiban, 2006).

آزمایش‌ها و تحقیقات جاده‌ای نیز در خصوص مصرف سرباره کوره قوس الکتریکی EAFS و سرباره کوره پاتیلی LFS به عنوان مصالح اساس و زیراساس راه انجام شده است. سرباره کوره پاتیلی مقدار زیادی آهک دارد که به سخت شدن سریع کمک کرده و باعث به افزایش ظرفیت باربری و تولید گرد و غبار کمتر در جاده‌های روستایی و مناطق اطراف آن‌ها می‌شود. رفتار آب‌شستگی^۱ بلندمدت دو مقطع آزمایشی راه با استفاده از سرباره کوره قوس الکتریکی و سرباره کوره پاتیلی در لایه‌های اساس و زیراساس در یک مطالعه مورد ارزیابی قرار گرفت. این راه آزمایشی با دو نوع مصالح یا مخلوط متفاوت ساخته شد: گزینه اول ۴۰ سانتیمتر مصالح سنگی طبیعی به عنوان اساس و ۱۰ سانتیمتر مخلوط سرباره کوره قوس الکتریکی و سرباره کوره پاتیلی به نسبت برابر در لایه سطحی دانه‌ای و گزینه دوم ۵۰ سانتیمتر مصالح سرباره کوره قوس الکتریکی. مقایسه دو نوع مصالح و ترکیب آن‌ها در جدول ۲-۱۳ به صورت خلاصه ارائه شده است. آزمون‌های آزمایشگاهی و جاده‌ای به منظور بررسی رفتار آب‌شستگی مصالح سرباره انجام شد. نتایج نشان داد که هیچ مقدار قابل توجهی از فلزات سنگین یا نمک‌هایی که به مسائل محیط زیستی مربوط باشد، از مصالح خارج نشده بود و بر آب‌های زیرزمینی تأثیر نداشت. همچنین با استفاده از مصالح سرباره، مقدار قابل توجهی گرد و غبار مشاهده نشد که سطح جاده و مناطق اطراف آن را پوشانده باشد. همچنین آب جمع‌آوری شده در دو مقطع آزمایشی هیچ تفاوتی بین مصالح دو مقطع را نشان نداد (Bialucha et al., 2007).

جدول (۲-۱۳): مصالح مورد استفاده در دو مقطع راه آزمایشی بین شهری (Bialucha et al., 2007)

مقطع ۲	مقطع ۱	ضخامت لایه (سانتیمتر)	نوع لایه
مصالح سرباره کوره قوس الکتریکی (۰-۳۲ میلیمتر)	مخلوط (۰-۱۶ میلیمتر) سرباره کوره قوس الکتریکی و سرباره پاتیلی (۱ به ۱)	۱۰	لایه سطحی دانه‌ای
	مصالح سنگی طبیعی (۰-۳۲ میلیمتر)	۴۰	لایه اساس دانه‌ای

^۱ Leaching

در مطالعه دیگری نیز در دو مقطع آزمایشی راه در لایه‌های اساس تثبیت نشده و اساس تثبیت شده با سیمان از سرباره کوره قوس الکتریکی و سرباره کوره پاتیلی استفاده شد. لایه‌های تثبیت نشده در مقطع آزمایشی کنترلی شامل دو لایه از مخلوط سرباره کوره قوس الکتریکی و سرباره کوره پاتیلی بود. هر لایه ۲۰ سانتیمتر ضخامت داشت و به طور مستقل به مدت سه ماه در معرض هوا قرار گرفت. مشخصات مصالح در جدول ۲-۱۴ خلاصه شده است. همه نتایج آزمایش‌های انبساط که در جدول نشان داده شده، مربوط به ۱۶۸ ساعت عمل‌آوری است. مقدار متوسط نرخ انبساط در محل اجرا برابر با ۲/۲۵ درصد اندازه‌گیری شد که نزدیک به نتایج آزمایشگاهی بود. همچنین مقدار ظرفیت باربری که به مدت ۶ ماه در نقاط مختلف جاده آزمایشی اندازه‌گیری شد، نشان‌دهنده افزایش مداوم مدول و سفتی لایه بود (Vazquez et al., 2010).

جدول (۲-۱۴): مصالح سرباره کوره قوس الکتریکی و سرباره پاتیل برای مقاطع آزمایشی

لایه‌های سازه‌ای روسازی	ضخامت لایه‌ها (سانتیمتر)	مصالح سرباره (نرخ انبساط مخلوط ۱/۱۸ درصد)	
		سرباره EAFS، سه ماه هوادهی نرخ انبساط ۰/۹۳ درصد	سرباره LFS، سه ماه هوادهی نرخ انبساط ۳/۳۴ درصد
اساس	۲۰	۷۰ تا ۸۰ درصد	۲۰ تا ۳۰ درصد
زیراساس	۲۰	۷۰ تا ۸۰ درصد	۲۰ تا ۳۰ درصد

مقطع تثبیت شده با سیمان نیز از (الف) ۱۰ سانتیمتر لایه زیراساس با مصالح سنگی طبیعی، (ب) ۳۰ سانتیمتر لایه اساس تثبیت شده با سیمان هیدرولیکی از ترکیب ۱۰ سانتیمتر خاک طبیعی و ۲۰ سانتیمتر سرباره کوره قوس الکتریکی و سرباره پاتیلی با افزودن ۲ درصد سیمان و (ج) ۱۶ سانتیمتر مخلوط آسفالتی (در مجموع سه لایه) ساخته شد. جدول ۲-۱۵ نیز سازه روسازی تثبیت شده سیمان را نشان می‌دهد. مطالعات نشان داد که استفاده ترکیبی از سرباره EAF و سرباره کوره پاتیلی می‌تواند مقدار ماده تثبیت کننده را در اساس و زیراساس تثبیت شده کاهش دهد. نتایج نشان داد که حداقل مقاومت فشاری مورد نیاز با افزودن ۲ درصد سیمان حاصل می‌گردد. همچنین ترکیب خاک طبیعی و سرباره EAF و سرباره پاتیلی منجر به مقاومت بالاتری نسبت به گزینه مخلوط مصالح سرباره شد. این مطالعه نشان داد که از سرباره EAF و سرباره کوره پاتیلی می‌توان در لایه زیراساس و اساس استفاده کرد و این مصالح دارای مدول سفتی و ظرفیت باربری بالایی هستند (Vazquez et al., 2010).

کفایت و مرغوبیت سرباره کوره قوس الکتریکی EAF و سرباره کوره بلند گرانولی خنک شده در هوا GBFS برای استفاده در لایه‌های اساس و زیراساس روسازی‌های انعطاف پذیر در پژوهشی جامع مورد ارزیابی قرار گرفت. مخلوط‌های مختلفی از سرباره EAF با سیمان و سرباره EAF با سرباره GBFS برای دستیابی به مخلوط بهینه مورد آزمایش قرار گرفتند. سرباره GBFS به نسبت‌های ۵ و ۱۰ و ۱۵ و ۲۰ درصد از کل مخلوط و سیمان نیز به اندازه ۳ و ۴ و ۵ درصد از

جدول (۲-۱۵): سازه روسازی در مقطع آزمایشی تثبیت شده سیمان

مصالح	ضخامت لایه‌ها (سانتیمتر)	لایه‌های سازه‌ای روسازی
مخلوط آسفالتی	۱۶	رویه
۲۰ سانتیمتر (۶۷٪) مخلوط سرباره EAFS و سرباره LFS (با نرخ انبساط ۱/۱۸ درصد ۱۰ سانتیمتر (۳۳٪) خاک طبیعی	۳۰	اساس
مصالح سنگی طبیعی	۱۰	زیراساس

وزن خشک کل مخلوط استفاده شد. ویژگی‌های مکانیکی و شیمیایی مخلوط‌ها تعیین شد تا کفایت مخلوط مصالح برای ساخت لایه‌های اساس و زیراساس تثبیت شده در جاده‌های با حجم ترافیک کم ارزیابی شود. نتایج نشان داده است که افزودن سیمان و پودر سرباره کوره بلند به مخلوط مصالح سرباره کوره قوس الکتریکی باعث افزایش مقاومت فشاری و نسبت باربری کالیفرنیا می‌شود. درصد مواد چسباننده و زمان عمل‌آوری مخلوط‌ها بر مقاومت فشاری آن‌ها اثر می‌گذارد. تمامی مخلوط‌های مورد آزمایش توانستند معیار حداقل CBR برای لایه زیراساس را برآورده کنند. مخلوط سرباره EAF با ۴ درصد سیمان و با ۱۵ درصد سرباره GBFS توانستند معیار حداقل مقاومت فشاری برای استفاده در جاده‌های روستایی را برآورده کنند. به علاوه، نتایج حاصل از آزمایش تجزیه خصوصیات سمی شیرابه مصالح برای فلزات مختلف نشان داد که مخلوط‌های حاوی سرباره EAF و سرباره GBFS خطرناک نیستند. بر اساس نتایج این آزمایش، همه مخلوط‌ها ماهیت قلیایی داشتند و مقدار pH آنها در محدوده ۱۰ تا ۱۲ تعیین شد (Gonawala et al., 2019).

ویژگی‌های تراکمی و مقاومت فشاری تک‌محوری مصالح سرباره آهن و فولاد دانه‌بندی شده از پنج کارخانه تولیدکننده مختلف به عنوان لایه اساس نیز در پژوهشی ارزیابی شد. آزمایش‌های فشاری تک‌محوری بر روی نمونه‌های عمل‌آوری شده به مدت‌های مختلف تا ۷۳۰ روز انجام شد. بر اساس نتایج حاصل نشان داده شد که تفاوت‌های زیادی در دانسیته تراکم و ویژگی‌های تراکم در بین پنج نوع مختلف مصالح اساس سرباره‌ای وجود دارد. مصالح اساس سرباره از منابع مختلف به ازای زمان‌های متفاوت عمل‌آوری، مقادیر مقاومت فشاری بسیار متفاوتی داشتند، به نحوی که مقاومت فشاری تک‌محوری با افزایش زمان عمل‌آوری افزایش یافت (Yoshida, 2016).

در تحقیقات دیگری استفاده از فیلر آهکی و سرباره فولاد به عنوان مصالح اساس ارزیابی شد. به این منظور، مصالح لایه اساس حاوی سنگ آهک، سرباره فولاد، سرباره کوره بلند گرانولی، و آهک آزمایش شدند. نتایج نشان داد که مخلوط حاوی تا ۲۰ درصد فیلر آهکی اضافی مدول برجهندگی کافی برای استفاده به عنوان مصالح لایه اساس را ندارد. اما وقتی که آهک، پودر سرباره کوره بلند گرانولی و پودر سرباره فولاد به مخلوط کنترلی حاوی ۲۰ درصد پودر سنگ آهک اضافی اضافه شدند، مقدار افت مدول برجهندگی ناشی از افزودن پودر سنگ آهک جبران شد و مخلوط حاصل مقاومت قابل قبول برای راهسازی را به دست آورد (Al Nageim et al., 2010).

در مطالعه‌ای جامع در سال ۲۰۲۰ استفاده از سرباره فولاد در لایه اساس راه بطور گسترده امکان‌سنجی شده و مقدار بهینه مصرف آن به جای مصالح طبیعی تعیین شد. مقادیر مختلف سرباره فولاد (۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد حجمی) در مخلوط استفاده شده و ویژگی‌های مکانیکی و دوام مخلوط‌ها مورد آزمایش قرار گرفت. ساختار و توزیع اجزای مخلوط‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی و همچنین روش طیف‌سنجی اشعه X توزیع انرژی^۱ مشخص شد. این آزمایش‌ها نشان داد که سرباره فولاد برای تقویت مقاومت و عملکرد انقباض مخلوط سیمانی مفید است و می‌تواند جایگزین مصالح طبیعی شود. مقدار جذب آب مصالح سرباره فولاد بیشتر از مصالح آهنی است و با افزایش مقدار سرباره در مخلوط لایه اساس، حداکثر دانسیته خشک و درصد رطوبت بهینه نیز افزایش می‌یابد. روند تغییر مقاومت فشاری تک‌محوری هفت روزه با درصد سیمان رابطه مستقیم دارد. مخلوط حاوی ۵۰ درصد سرباره فولاد با ۴ درصد سیمان بیشترین مقدار مقاومت و مدول سفیدی را داشت. با افزایش مقدار سرباره فولاد، مقاومت در برابر یخبندان و عملکرد انقباضی خشک نمونه‌ها بهبود یافت، اما عملکرد انقباض دمایی مخلوط‌ها تضعیف گردید. نتایج بررسی‌های میکروسکوپی مخلوط‌ها حاکی از آن است که سرباره فولاد مقدار محصولات هیدراتاسیون را افزایش می‌دهد و باعث کاهش تخلخل می‌شود. به طور کلی، افزودن سرباره فولاد به مصالح اساس در راهسازی از نظر فنی امکان‌پذیر است و نسبت ۵۰ درصد سرباره فولاد بهترین عملکرد را به همراه دارد. لازم به یادآوری است اگر از سرباره فولاد در پروژه‌های راهسازی و ساختمانی استفاده شود، فرآیند تولید مصالح سرباره فولاد باید کنترل شود (Liu et al., 2020).

استفاده از سرباره LFS به عنوان مصالح اساس و زیراساس نیاز به شناخت کامل ویژگی‌های مهندسی آن دارد. برای تعیین ویژگی‌های مهندسی سرباره LFS، آزمایش‌های متعددی انجام شده است. همچنین اثر عمل‌آوری بر مقاومت سرباره LFS تثبیت‌نشده با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری محدودنشده و مدول برجهندگی بررسی شده است. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری سرباره LFS تثبیت‌نشده پس از ۷ روز عمل‌آوری تحت دما و رطوبت کنترل‌شده تقریباً به اندازه چهار برابر افزایش یافت. همچنین نمونه‌های عمل‌آوری‌شده به مدت ۷ روز و ۲۸ روز، مدول برجهندگی بیشتری نسبت به نمونه‌های بدون عمل‌آوری داشتند. مدت عمل‌آوری نقش مهمی در مقاومت فشاری سرباره LFS تثبیت‌نشده دارد که به مقدار نسبتاً زیاد آهک مصالح سرباره بستگی دارد. محققان نتیجه گرفتند که ویژگی‌های مهندسی سرباره کوره پاتیلی برای استفاده در لایه‌های اساس و زیراساس، به اندازه مصالح سنگی طبیعی یا حتی برتر از آنها است (Maghool et al. 2017).

در پژوهشی با هدف طراحی مخلوط‌های تثبیت‌شده با سیمان برای راهسازی، از مصالح سرباره فولاد، سرباره کوره پاتیلی و برخی مصالح بازیافتی دیگر استفاده شد. این مخلوط‌ها با انجام آزمایش‌های تراکم پروکتور، مقاومت فشاری و مقاومت کششی غیرمستقیم طراحی شدند. عملکرد این مخلوط‌ها در زمان‌های عمل‌آوری مختلف با تعیین مدول الاستیسیته به روش آزمایش اولتراسونیک ارزیابی گردید. بسته به ترکیب مخلوط‌های مختلف، نتایج مطلوبی برای

¹ energy dispersive X-ray spectroscopy

مقاومت فشاری و مقاومت کششی غیرمستقیم پس از ۷ روز عمل‌آوری حاصل شد. بر اساس نتایج این پژوهش، مصالح سرباره فولاد و سرباره کوره پاتیلی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مناسبی دارند که آنها را برای استفاده در مخلوط‌های سیمانی در راهسازی مطلوب می‌سازد (Pasetto & Baldo, 2016).

به منظور کاربرد مؤثر مصالح سرباره در لایه اساس روسازی‌های انعطاف‌پذیر، ویژگی‌های مهندسی سرباره مس، سرباره فولاد ریزدانه و درشت‌دانه و سرباره کوره بلند تثبیت‌شده با خاکستر بادی و دولیم شامل مقاومت فشاری، مقاومت برشی سه‌محوری، مدول الاستیسیته، مدول برجهندگی و کرنش دائمی مورد ارزیابی قرار گرفته و با مخلوط مصالح مرطوب معمولی مقایسه شدند. بر اساس نتایج به دست آمده، مقدار تنش گسیختگی و مدول الاستیسیته مخلوط‌های سرباره و خاکستر بادی و دولیم بسیار بیشتر از مخلوط مصالح مرطوب معمولی است. این مخلوط‌ها همچنین نسبت به مخلوط مصالح مرطوب معمولی مقدار مدول برجهندگی بیشتر و کرنش ماندگار کمتری دارند (Patel & Shahu, 2017).

به منظور ارزیابی مزایای اصلاح مخلوط مصالح اساس دانه‌ای با افزودن مقدار قابل توجهی از مصالح بازیافتی مانند پودر سنگ آهک، سرباره فولاد و سرباره کوره بلند، آزمایش‌هایی با استفاده از دستگاه بارگذاری سه‌محوری برای اندازه‌گیری مدول برجهندگی مخلوط‌های اصلاح‌شده انجام شد. مقدار مدول برجهندگی مخلوط‌های اصلاح‌شده حاوی تا مقدار ۲۰ درصد پودر سنگ آهک برای استفاده در اساس راه کافی نبود و معیارها را برآورده نکرد. اما افزودن مصالح سرباره باعث افزایش مدول برجهندگی مخلوط‌ها به حدی شد که برای استفاده به عنوان زیراساس روسازی مناسب باشند (Saghafi et al., 2013).

استفاده از مصالح سرباره کوره قوس الکتریکی به عنوان جایگزین مصالح سنگی آهکی در لایه‌های اساس دانه‌ای در تحقیق دیگری نیز امکان‌سنجی شده و مخلوط‌های لایه اساس با جایگزین کردن مقدار ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد مصالح طبیعی با مصالح سرباره فولاد تهیه شدند. ویژگی‌های مخلوط‌های اساس با انجام آزمایش‌های معمول و آزمایش‌های سه‌محوری استاتیکی و دینامیکی تعیین شد تا رفتار این مخلوط‌ها تحت بارهای ترافیکی ارزیابی شود. نتایج تحقیق نشان‌دهنده عملکرد بهتر مخلوط‌های لایه اساس حاوی مصالح سرباره فولاد بود (Shiha et al., 2020).

بازسازی زیرساخت‌های عمرانی باعث ایجاد تقاضای زیادی برای مصالح دانه‌ای و سایر مواد و مصالح ساختمانی می‌شود. به عنوان مثال با توجه به اینکه کشور قطر با مشکل کمبود مصالح دانه‌ای مناسب روبرو است، محققان آن کشور کاربرد مصالح سرباره فولاد و مصالح طبیعی گابرو در آسفالت داغ و لایه‌های اساس و زیراساس روسازی راه‌ها را در یک تحقیق آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌هایی بر اساس مشخصات استاندارد کشور قطر انجام پذیرفت و نتایج آن‌ها با معیارهای مربوطه مقایسه شدند. بر اساس داده‌های به دست آمده در این پژوهش، مصالح دانه‌ای سرباره فولاد قابلیت زیادی برای استفاده در آسفالت داغ و لایه‌های دانه‌ای اساس و زیراساس دارند. بر اساس نتایج آزمایش‌های تراکم و نسبت باربری کالیفرنیا CBR، مصالح سرباره فولاد مقدار CBR بالایی دارند که می‌تواند در لایه‌های اساس و زیراساس عملکرد مناسبی داشته باشد (Ramzi et al., 2014).

۲-۱-۱-۱- مطالعات انجام شده در داخل کشور

رحمانی و همکاران (۱۳۹۹) اثر دانه‌بندی و نوع سرباره فولاد را بر مشخصات تراکمی و مقاومتی مصالح اساس و زیراساس راه با انجام آزمایش‌های مربوطه روی سرباره کوره اکسیژن بازی مجتمع ذوب آهن اصفهان و سرباره کوره قوس الکتریکی کارخانه فولاد مبارکه سپاهان مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها مقدار CBR در دو حالت خشک و غرقاب را برای مصالح سرباره فولاد با دو دانه‌بندی مختلف و انرژی‌های تراکمی متفاوت اندازه‌گیری کردند. در این تحقیق دو دانه‌بندی متفاوت مصالح سرباره با حداکثر اندازه ۱۹ میلیمتر و ۱۲/۵ میلیمتر مورد استفاده قرار گرفت. همچنین از سرباره فولاد دپو شده استفاده گردید که از زمان دپوی آن‌ها بیش از یک سال گذشته بود تا محدودیت‌های مربوط به وجود آهک آزاد آن‌ها کمتر شده و مقدار تورم احتمالی آن‌ها کنترل شده باشد. داده‌های آنالیز شیمیایی سرباره‌های فولاد مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۲-۱۶ ارائه شده است.

جدول ۲-۱۶ ویژگی‌های شیمیایی سرباره‌های فولاد

مقدار ترکیب (درصد)		اجزای تشکیل دهنده
سرباره کوره اکسیژن بازی	سرباره کوره قوس الکتریکی	
۳۴/۷	۳۱/۱	آهک CaO
۳۳/۶	۲۰/۶	آهن اکسید Fe ₂ O ₃
۲۰/۰	۱۸/۱	سیلیس SiO ₂
۴/۹	۶/۷	آلومینیوم اکسید Al ₂ O ₃
۱/۲	۴/۸	منیزیم اکسید MgO
۰/۲	۲/۱	گوگرد تری اکسید SO ₃

مقدار وزن مخصوص سرباره کوره اکسیژن بازی در این تحقیق برای دو دانه‌بندی متفاوت در محدوده ۲/۹۵ تا ۳/۰۶ و برای سرباره کوره قوس الکتریکی در محدوده ۳/۲۱ تا ۳/۲۵ به دست آمد. داده‌ها نشان دادند که مصالح سرباره نسبت به مصالح معدنی طبیعی مقدار چگالی بیشتری دارند که ناشی از وجود مقدار قابل توجهی آهن در سرباره‌های فولاد است. همچنین مقدار رطوبت بهینه تراکم برای مخلوط‌های سرباره فولاد کوره اکسیژن بازی بین ۸/۵ تا ۱۰/۵ درصد و برای مخلوط‌های سرباره فولاد کوره قوس الکتریکی بین ۸/۰ تا ۸/۵ درصد تعیین شد. محققان بر اساس نتایج آزمایش‌های تراکم نتیجه گرفتند که شکل منحنی‌های رطوبت-دانسیتته نامنظم بوده و نمونه‌های متراکم سرباره‌ای مقادیر وزن مخصوص حداکثر بالاتری نسبت به خاک‌های طبیعی دارند. آزمایش‌های تعیین نسبت باربری کالیفرنیا نیز نشان دادند که مصالح سرباره مقدار CBR بیشتری نسبت به مصالح معدنی طبیعی دارند و به طور کلی، مقدار CBR مصالح سرباره کوره قوس الکتریکی بیشتر از مقدار آن برای سرباره کوره اکسیژن بازی است. با انجام آزمایش تعیین حدود اتربرگ روی سرباره‌ها مشخص شد که نمونه‌ها هیچگونه خاصیت خمیری ندارند و نتایج آزمایش سایش لوس آنجلس نیز نشان داد

مقدار مقاومت سایشی مصالح سرباره کوره قوس الکتریکی به مراتب بیشتر از سرباره کوره اکسیژن بازی است. به طور کلی رحمانی و همکاران به این نتیجه رسیدند که سرباره‌های فولاد در مقایسه با خاک‌های طبیعی از ویژگی‌های تراکمی و مقاومتی مطلوبتری برخوردارند و در صورتی که مسأله ناپایداری حجمی و اثرات زیست‌محیطی آن‌ها به درستی بررسی شود، می‌توانند به عنوان مصالح اساس و زیراساس راه مورد استفاده قرار گیرند.

هاشمی طباطبائی و همکاران (۱۳۹۷) نیز استفاده از مصالح سرباره فولاد کوره قوس الکتریکی را به عنوان مصالح لایه زیراساس امکان‌سنجی کردند. به این منظور آن‌ها مصالح لایه زیراساس را با مخلوطی از مصالح سرباره فولاد و مقدار ۲ تا ۲۰ درصد خاکستر بادی^۱ تثبیت کردند و سپس آزمایش‌های تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نظیر تعیین نسبت باربری کالیفرنیا، مقاومت فشاری و قابلیت انبساط را انجام دادند. نتایج نشان داد سرباره فولاد مورد بررسی، حدود مجاز مشخصات تعیین شده برای مصالح زیراساس طبق نشریه ۲۳۴ را از نظر نشانه خمیری، حد روانی، ارزش ماسه‌ای، درصد سایش و درصد افت وزنی در برابر سولفات سدیم برآورده می‌کند. نمونه‌های سرباره خالص و ترکیب آن با درصد‌های مختلف خاکستر بادی، پتانسیل تورمی کمتری نسبت به خاک طبیعی داشتند و با افزایش درصد خاکستر تا ۱۲ درصد، مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها افزایش یافت. محققان با تعیین ویژگی‌های مصالح سرباره فولاد نتیجه گرفتند که این ویژگی‌ها در محدوده مجاز مشخصات استاندارد آئین‌نامه راه ایران برای لایه زیراساس قرار دارند و خصوصیات مهندسی سرباره فولاد و مخلوط آن با خاکستر نسبت به خاک معمول برتری دارد.

مکارچیان و صفا (۱۳۹۲) نیز با انجام آزمایش‌های تراکم استاندارد آزمایشگاهی، اثر سرباره کوره اکسیژن بازی ذوب آهن اصفهان به عنوان تثبیت‌کننده را بر روی تراکم‌پذیری خاک رسی مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه گرفتند که با افزودن مقدار سرباره تا ۴ درصد، مقدار رطوبت بهینه افزایش یافته و حداکثر دانسیته خشک خاک متراکم کاهش می‌یابد و در مقادیر بیش از ۴ درصد، نتیجه عکس حاصل می‌گردد. مصالح سرباره فولاد عبوری از الک شماره ۱۰ با وزن مخصوص ۳/۵۴ در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت.

شهبازی و همکاران (۱۳۹۴) با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری بر روی خاک رس تثبیت‌شده با مصالح ریزدانه سرباره کوره اکسیژن بازی ذوب آهن اصفهان نشان دادند که افزودن مصالح سرباره تا حدی که باعث دانه‌ای شدن و انفصال ذرات خاک رس نشود، باعث افزایش مقاومت فشاری آن می‌شود و با افزایش زمان عمل‌آوری مخلوط می‌توان افزایش بیشتری شاهد بود. مصالح سرباره فولاد عبوری از الک شماره ۲۰۰ با وزن مخصوص ۲/۶۹ در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت.

مبارکه (۱۳۹۶) نیز اثر افزودن ۳ تا ۲۱ درصد سرباره کوره قوس الکتریکی شرکت فولاد مبارکه اصفهان را بر روی پارامترهای زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک فروریزنده مورد مطالعه قرار داده و نتیجه گرفت که سرباره کوره

^۱ Fly Ash

قوس الکتریکی باعث بهبود ویژگی‌های مکانیکی خاک‌های فروریزنده می‌شود. بر اساس نتایج آزمایش‌های برش مستقیم، افزودن سرباره به خاک فروریزنده سبب افزایش زاویه اصطکاک داخلی و کاهش چسبندگی خاک می‌گردد.

اثر سرباره فولاد کوره اکسیژن بازی مجتمع ذوب آهن اصفهان (عبوری از الک شماره ۸) بر دوام کائولینیت به عنوان یک خاک ریزدانه توسط عبدی و طهماسبی (۱۳۸۸) نیز مورد بررسی قرار گرفته است. محققان از آهک نیز به عنوان مصالح فعال‌کننده سرباره و تسریع‌کننده واکنش‌های شیمیایی استفاده کردند. دوام نمونه‌ها با اعمال سیکل‌های یخبندان-ذوب و انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری محصورنشده به عنوان شاخص دوام تعیین گردید. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که نمونه‌های کائولینیت بدون افزودنی پس از اولین سیکل یخبندان-ذوب مقاومت خود را به طور کامل از دست دادند در حالی که افزودن همزمان آهک و سرباره باعث افزایش مقاومت نمونه‌ها در برابر سیکل‌های یخبندان-ذوب گردید. در نهایت محققان نتیجه گرفتند که سرباره فولاد دارای پتانسیل تثبیت خاک‌های ریزدانه بوده و اثرات آن با استفاده همزمان با آهک تقویت می‌گردد.

گودرزی و سلیمی (۱۳۹۳) نیز استفاده از سرباره فولاد کوره اکسیژن بازی مجتمع ذوب آهن اصفهان را برای تثبیت خاک‌های متورمشونده امکان‌سنجی کرده و نتیجه گرفتند که استفاده از سرباره فولاد به عنوان یک زباله صنعتی، روشی مؤثر و اقتصادی برای اصلاح خاک‌های تورمی بوده و باعث حفظ محیط زیست و توسعه پایدار خواهد شد. محققان با اضافه کردن ۲/۵ تا ۲۰ درصد سرباره فولاد به رس اسمکتیت، تأثیر آن بر تورم و مقاومت فشاری خاک در شرایط آزمایشگاهی را بررسی کردند. نتایج به‌دست آمده نشان دادند که با افزودن ۲۰ درصد سرباره و بعد از یک روز عمل‌آوری، پتانسیل تورم اسمکتیت کاملاً کنترل می‌شود و در شرایط عمل‌آوری مناسب، مقاومت فشاری خاک اسمکتیت تا ۹ برابر افزایش می‌یابد. همچنین استفاده از سرباره، سبب کاهش فشار تورم خاک می‌شود به طوری که با افزودن ۱۰ درصد سرباره به خاک و پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، فشار تورم به صفر می‌رسد.

۲-۲-۲- آماده‌سازی مصالح سرباره فولاد برای اساس و زیراساس

به منظور حصول اطمینان از عدم وجود ضایعات فرآیندهای فولادسازی (مانند آجر کوره، چوب، اجزای ناقص ذوب‌شده، آهک و غیره) درون مصالح سرباره فولاد، روش‌های کنترل کیفیت ویژه‌ای باید اجرا شود.

علاوه بر کنترل مشکلات مرتبط با ناپایداری حجمی و تشکیل رسوب توف، فقط باید از سرباره کوره مناسب و با کیفیت بالا استفاده شود. این سرباره‌ها باید فاقد مقادیر قابل توجه آهک و دولیم واکنش نداده باشند. در کشورهای بلژیک و هلند، مقدار آهک آزاد موجود در سرباره فولاد مصرفی برای کاربردهای اساس دانه‌ای به کمتر از ۴/۵ درصد محدود گردیده و الزام شده که برای محدود کردن ناپایداری حجمی، مصالح سرباره به مدت حداقل یک سال هوادهی شوند (PIARC, 1989).

مطالعات نشان می‌دهد اگر درصد کل آهک (CaO) در سرباره‌های فولاد بیش از ۱ درصد باشد، به احتمال زیاد در پروژه‌های زهکشی زیرسطحی راه‌ها توف تشکیل می‌شود (Kneller et al., 1994; Narita et al., 1978). اگرچه هوادهی برای کنترل ناپایداری حجمی سرباره‌های فولاد مفید است، اما به نظر نمی‌رسد مانع تشکیل رسوبات توف گردد. بر اساس تجربیات اخیر توصیه می‌شود که مصالح سرباره فولاد حتماً شسته شوند و کمتر از ۳ درصد وزنی اجزای غیر سرباره‌ای و کمتر از ۰/۱ درصد چوب داشته باشند و فاقد دانه‌های آهکی نرم یا کلوخه‌های اکسید آهک باشند (Farrand and Emery, 1995).

پیش از استفاده به عنوان مصالح اساس دانه‌ای، اجزای آهنی سرباره فولاد به صورت مغناطیسی جدا می‌شوند. سرباره فولاد باید توسط تجهیزات و ماشین‌آلات خردایش و سرنده کردن مشابه مصالح سنگی معمول خرد شده و سرنده شوند تا یک دانه‌بندی مناسب از مصالح دانه‌ای سرباره فولاد تولید شود (FHWA, 1997).

برای استفاده از سرباره فولاد به عنوان مصالح اساس و زیراساس، انبساط حجمی یک از نگرانی‌های اصلی است. یک معیار مصرف برای کاربردهای محدود نشده بر اساس ویژگی‌های فیزیکی سرباره‌ها ارائه شده است. وقتی درصد اکسید قابل هیدراتاسیون سرباره فولاد کم باشد، در مقیاس ماکروسکوپی (ظاهری) منبسط نمی‌شود. در این حالت، این مسئله باید از طریق انجام آزمایش استاندارد انبساط سرباره تأیید شود (Wang, 2016).

۲-۲-۳- ملاحظات طراحی اساس و زیراساس

روش‌های متداول آشتو برای طراحی سازه‌ای روسازی را می‌توان برای طراحی لایه اساس حاوی مصالح سرباره فولاد مورد استفاده قرار داد. اگر مصالح سرباره فولاد به درستی خردایش و سرنده شود، به راحتی می‌تواند الزامات دانه‌بندی و معیارهای فیزیکی مندرج در استانداردهای AASHTO M147 و ASTM D2940 را برآورده سازد. توصیه شده است که برای کنترل قابلیت انبساط و تورم، سرباره فولاد به روش استاندارد ASTM D4792 مورد آزمایش قرار گیرد.

لایه اساس حاوی مصالح سرباره فولاد باید به گونه‌ای طراحی شود که به خوبی زهکش شود (بدون آب راکد) و به منظور جلوگیری از غوطه‌وری، به اندازه کافی از لایه‌های آب زیرزمینی فاصله داشته باشد. همچنین درزهای روسازی باید آب‌بندی شود تا نفوذ آب‌های سطحی به لایه اساس از جنس سرباره فولاد به حداقل برسد. این قواعد به منظور کاهش احتمال شسته شدن آهک یا دولیم آزاد که در این مصالح وجود دارد و باعث بر جای ماندن رسوبات توف می‌شود، توصیه می‌شود (FHWA, 1997).

۲-۳- معیار انبساط حجمی سرباره فولاد

سرباره خنک‌شده در هوا پس از خردایش می‌تواند به عنوان مصالح اساس، زیراساس، خاکریز و مصالح عملیات تثبیت خاک‌های نرم و کنترل فرسایش استفاده شود. برای مصرف سرباره فولاد و برخی سرباره‌های غیرآهنی حاوی آهک آزاد و پریکلز (منیزیم اکسید آزاد)، پایداری حجمی یکی از پارامترهای مهمی است که باید بررسی شود. عدم وجود

دستورالعمل‌های فنی و معیارهای مصرف برای کاربردهای مختلف سرباره فولاد، یکی از موانع گسترش مصرف آن است. به عنوان مثال، برای استفاده از سرباره در لایه اساس راه، یکی از معیارهای تجربی که در حال حاضر استفاده می‌شود، درصد آهک آزاد است.

اینکه از مصالح سرباره به عنوان مصالح اساس و زیراساس به صورت گسترده استفاده نمی‌شود به دو دلیل عمده بازمی‌گردد. اول اینکه مصالح سرباره فولاد به لحاظ حجمی ناپایدار هستند (یعنی منبسط می‌شوند) و مسأله دوم این است که معیاری وجود ندارد که مشخص کند این مقدار از انبساط، چه رابطه‌ای با استحکام و پایداری لایه‌های اساس و زیراساس اجرا شده در محل دارد. البته برخی سرباره‌های فولادی وجود دارند که به اندازه کافی پایدار هستند به نحوی که می‌توانند بدون هیچ گونه مشکلی، حتی در بتن سیمانی مورد استفاده قرار گیرند. بنابراین، برای سرباره‌ها و عموماً سرباره‌های فولاد سؤالات زیر مطرح می‌شود (Wang, 2016):

مکانیسم انبساط حجمی از نظر شیمیایی و فیزیکی چیست؟

مقدار انبساط حجمی تئوری ناشی از آهک آزاد یا پریکلز در سرباره فولاد و سایر سرباره‌ها چقدر است؟

آیا فضاهای خالی موجود در لایه‌های اساس و زیراساس می‌تواند افزایش حجم سرباره را جذب کند و مانع افزایش حجم کلی شود؟

اگر پاسخ سوال ۳ مثبت است، در چه شرایطی یا تحت چه نیروی خارجی می‌تواند این اتفاق بیفتد؟
در ادامه به این سؤالات پاسخ داده می‌شود.

۲-۳-۱- تعیین مقدار انبساط حجمی در شرایط محدود نشده

سرباره را می‌توان در مصارف متعدد پروژه‌های راهسازی استفاده کرد؛ به عنوان مثال، در تولید سیمان، اجرای اساس یا زیراساس، تولید انواع آسفالت، روبه‌های حفاظتی و بتن می‌توان از سرباره استفاده کرد. نبود دستورالعمل فنی و معیار مصرف متناسب با هر یک از این کاربردها، یک عامل بازدارنده بزرگ برای مصرف سرباره محسوب می‌شود. در این بخش، سرباره فولاد به دلیل ماهیت انبساطی آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. سرباره‌های غیرآهنی و غیرفلزی نیز ممکن است به دلیل محتوای آهک آزاد و یا پریکلز، ماهیت انبساطی داشته باشند.

استفاده کلی از سرباره کوره بلند که از ذوب آهن به دست می‌آید، برای طیف وسیعی از کاربردهای عمرانی از اساس و زیراساس و مصالح بتن و آسفالت داغ تا مواد سیمانی نسبتاً شناخته شده است. بر خلاف سرباره کوره بلند که از نظر حجمی پایدار و مصرف آن ساده است، سرباره فولاد حاصل از کوره اکسیژن بازی BOFS و کوره قوس الکتریکی EAFS حاوی آهک آزاد است که می‌تواند منجر به ناپایداری حجمی (انبساط) شود. بنابراین حتماً باید پیش از مصرف سرباره فولاد، آن را به صورت مناسب در معرض هوا و رطوبت قرار داده و آزمایش‌های کنترل کیفی روی آن انجام شود.

اگرچه استفاده از سرباره فولاد در هر بخشی از فرآیندهای راهسازی مزایایی به همراه دارد، اما مصرف سرباره فولاد در لایه‌های اساس و زیراساس به دلایل زیر بسیار بهتر است: (۱) حجم زیادی از سرباره فولاد را می‌توان در لایه‌های اساس و

زیراساس راه مصرف کرد؛ (۲) فرآیند مصرف مصالح سرباره در این لایه‌ها بسیار ساده، روشن و واضح است؛ (۳) در مورد استحکام و پایداری بلندمدت این لایه‌ها نگرانی کمتری وجود دارد؛ (۴) یک روش استاندارد ASTM نیز برای آزمایش تعیین انبساط حجمی تدوین شده است؛ و (۵) صنعت تولید مصالح شکسته سرباره فولاد تأکید بیشتری بر تولید و بازاریابی مصالح سرباره جهت مصارف دانه‌ای دارد.

برای کاربردهای مختلف سرباره باید راهنماهای مختلفی تهیه و معیارهای متفاوتی ارائه شود. به عنوان مثال، قابلیت مصرف سرباره فولاد در بتن یا سایر ترکیبات صلب به نیروی انبساطی سرباره فولاد و نحوه توزیع آن نیرو درون آن جسم صلب بستگی دارد. هیچ معیار واحدی برای کاربردهای مختلف سرباره فولاد وجود ندارد. در صورت استفاده از سرباره فولاد به عنوان مصالح اساس و زیراساس، باید مقدار انبساط حجمی ظاهری در لایه اساس یا زیراساس در حد صفر باشد (Wang, 2016).

واقعیت این است که مصالح اساس یا زیراساس حتی در حالت کاملاً متراکم، حاوی مقداری فضای خالی هستند. اما آیا فضاهای خالی موجود در مصالح سرباره متراکم‌شده می‌تواند هرگونه انبساط حجمی ناشی از سرباره فولاد منبسط‌شونده را جذب کند؟ برای پاسخ به این سوال باید اقدامات زیر انجام شود:

(۱) تعیین نرخ انبساط تئوری مصالح سرباره بر اثر واکنش‌های شیمیایی در حضور رطوبت؛ (۲) انجام آزمایش افزایش حجم آزمایشگاهی در دو حالت محدودشده و محدودنشده و (۳) تعیین رابطه بین درصد آهک آزاد و مقدار انبساط تئوری تحت نیروی محدودشده و ارائه معیار قابلیت مصرف.

معیار قابلیت مصرف باید بر اساس رابطه‌ی بین معادله تخمینی انبساط حجمی (بر حسب درصد، حاصل از تغییرات شیمیایی و فیزیکی آهک آزاد در سرباره فولاد) و حداقل درصد فضای خالی حجمی که می‌تواند انبساط سرباره فولاد تحت یک بار خارجی معین را در خود جای دهد، ارائه شوند.

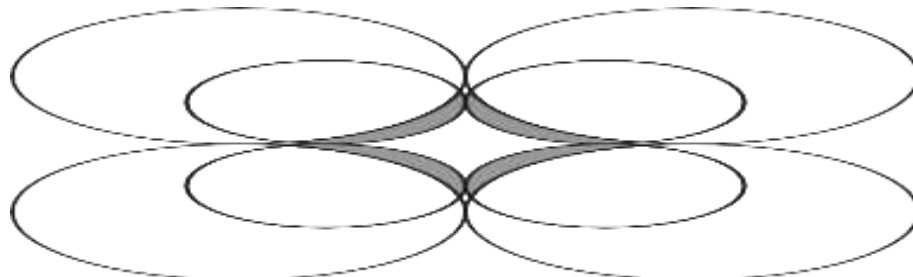
۲-۳-۱- ویژگی‌های اصلی و مکانیزم انبساط سرباره فولاد

سرباره فولاد جامد دارای یک شکل بلوکی لانه زنبوری و متخلخل است. بیشتر سرباره‌های فولاد اصولاً از CaO, MgO, SiO₂ و FeO تشکیل شده‌اند. در روش‌های ساخت فولاد با فسفر کم، مقدار کل این اکسیدها در سرباره مایع در محدوده ۸۸-۹۲ درصد است. بنابراین، سرباره فولاد را به سادگی می‌توان با یک سیستم چهارجزئی CaO-MgO-SiO₂-FeO نشان داد. با این حال، نسبت این اکسیدها و سهم سایر اجزا بسیار متغیر است و بسته به مواد خام اولیه، نوع فولاد تولیدی، شرایط کوره و غیره از یک مرحله تولید به یک مرحله دیگر (حتی در یک کارخانه) تغییر می‌کند (Wang, 2016).

بیشتر سرباره فولاد مورد نیاز برای مصرف به عنوان مصالح اساس و زیراساس از طریق فرآیند خنک‌شدن در هوای محیط تولید می‌شود و به دنبال آن، عملیات جداسازی مغناطیسی، خردایش و سرنده کردن انجام می‌شود. سرباره فولاد خنک‌شده در هوا ممکن است از کلوخه‌های بزرگ و مقداری پودر تشکیل شده باشد. ترکیبات معدنی سرباره فولاد

خنک‌شده هم متغیر است و به فرآیند شکل‌گیری و ترکیبات شیمیایی آن بستگی دارد. سرباره فولاد خنک‌شده در هوا از $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ، $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ و بلورهای مخلوط MgO ، FeO و MnO (یعنی $\text{MgO}\cdot\text{MnO}\cdot\text{FeO}$) که به آن فاز RO گفته می‌شود، تشکیل شده است. CaO نیز می‌تواند وارد فاز RO شود. به‌علاوه، $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ، $\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ، $3\text{CaO}\cdot\text{RO}\cdot 2\text{SiO}_2$ ، $7\text{CaO}\cdot\text{P}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$ و برخی اکسیدهای دیگر در سرباره فولاد وجود دارند (Sersale Frigione et al., 1986; Shi, 2004).

در فرآیند ساخت فولاد، مواد مذاب حاوی آهک (CaO) یا آهک دولومیتی، به همراه آهن و ضایعات به داخل کوره ریخته می‌شوند. همواره مقداری آهک آزاد ($f\text{-CaO}$) در سرباره فولاد وجود دارد. آهک آزاد با وزن مخصوص حدود $3/34$ می‌تواند با آب واکنش دهد و $\text{Ca}(\text{OH})_2$ با وزن مخصوص حدود $2/23$ تولید کند که منجر به افزایش حجم می‌شود (شکل ۲-۲). این مسأله به عنوان دلیل اصلی انبساط حجمی سرباره فولاد در نظر گرفته می‌شود (Montgomery and Wang, 1993).



گوی‌های کوچک: حجم اولیه فاز جامد
گوی‌های بزرگ: حجم نهایی فاز جامد
فضای بین گوی‌های کوچک: فضای خالی اولیه
نواحی هاشور خورده: افزایش فضای خالی
شکل (۲-۲): اثر افزایش حجم فاز جامد بر درصد فضای خالی مخلوط

MgO در سرباره فولاد به حالت شیشه‌ای، کریستال مخلوط یا محلول جامد عمدتاً با FeO و MnO است. شکل آزاد MgO از نظر حجمی ناپایدار است که فقط می‌تواند در شرایط قلیایی کم تشکیل شود. با توجه به شرایط قلیایی زیاد در سرباره فولاد مذاب و شعاع نزدیک Mg^{++} ، Fe^{++} و Mn^{++} (به ترتیب، $0/78$ ، $0/83$ و $0/91$ آنگستروم)، MgO ، FeO و MnO معمولاً محلول جامد تشکیل می‌دهند. گرچه پریکلاز نیز می‌تواند باعث انبساط مصالح سرباره شود، اما آهک آزاد مهمترین عامل انبساط حجمی سرباره فولاد در نظر گرفته می‌شود. مکانیسم انبساط پریکلاز نیز مشابه شکل ۲-۲ است (Wang, 2016).

۲-۳-۱-۲- انبساط حجمی تئوری سرباره فولاد

همانطور که در شکل ۲-۲ نشان داده شده است، تغییر حجم آهک آزاد به دلیل واکنش هیدراتاسیون شامل دو قسمت شیمیایی و فیزیکی است که قابل محاسبه است. با این حال، بخش فیزیکی تغییر حجم نادیده گرفته می‌شود. در بخش‌های بعد، تغییرات حجم ناشی از تغییرات شیمیایی و فیزیکی مورد بحث قرار گرفته است.

الف - انبساط ناشی از تغییرات شیمیایی

سرعت هیدراته شدن آهک آزاد در سرباره فولاد در مقایسه با آهک پخته که هیدراته شدن آن تقریباً در عرض ۳۰ دقیقه انجام می‌شود، نسبتاً کند است (Thomson, 2005). دلیل این امر این است که ساختار آهک آزاد در سرباره فولاد متراکم‌تر است (یعنی آهک آزاد در دمای حدود ۱۷۰۰ درجه سانتیگراد تشکیل شده و قابلیت واکنش آن با رطوبت کمتر است). واکنش آهک آزاد و آب را می‌توان با معادله زیر نشان داد:



در دمای محیط، واکنش به سمت راست معادله ادامه می‌یابد. این واکنش فقط در دمای بالاتر از ۵۴۷ درجه سانتیگراد به سمت چپ ادامه می‌یابد (Lea, 2004). تغییر حجم یک ترکیب آهک و آب و فاز جامد ناشی از واکنش شیمیایی را می‌توان همانطور که در جدول ۲-۱۷ نشان داده شده است، محاسبه کرد. با توجه به داده‌های این جدول، حجم مطلق فاز جامد به مقدار ۹۷/۹۲ درصد افزایش می‌یابد، اما در ترکیب کلی آهک آزاد و آب، کل حجم این ترکیب افزایش نمی‌یابد، و بالعکس، ۴/۵۴ درصد کاهش نیز می‌یابد. این کاهش حجم شیمیایی هنگامی اتفاق می‌افتد که آهک با آب واکنش می‌دهد که مشابه سایر مواد چسباننده مانند سیمان پرتلند و گچ است (Wang, 2016).

جدول (۲-۱۷): تغییر حجم ترکیب آهک آزاد و آب

تغییرات حجم مطلق (cm ³)	تغییرات ترکیب	حجم مطلق فضای خالی (cm ³)		حجم مطلق ترکیب (cm ³)		وزن مخصوص	وزن مولکولی	معادله واکنش
		بعد از واکنش	قبل از واکنش	بعد از واکنش	قبل از واکنش			
۹۷/۹۲	-۴/۵۴	۳۳/۲۳	۱۶/۷۹	۳۳/۲۳	۳۴/۸۱	۳/۳۴	۵۶/۰۸	CaO +
						۱/۰۰	۱۸/۰۲	H ₂ O
						۲/۲۳	=	=
							۷۴/۱۰	Ca(OH) ₂

ب - انبساط حجمی ناشی از تغییرات فیزیکی

مطابق شکل ۲-۲ هنگامی که هیدراتاسیون اتفاق می‌افتد، همراه با افزایش فاز جامد، حجم فضای خالی نیز افزایش می‌یابد. از آنجا که اندازه دانه‌های آهک آزاد به اندازه کافی ریز است، فرض می‌شود که دانه‌های آهک آزاد، قبل و بعد از هیدراتاسیون، به شکل کروی هستند و به شکل ایده‌آل شش ضلعی کاملاً متراکم می‌شوند. در این شرایط، حجم دانه‌های جامد به اندازه ۷۴ درصد از کل حجم مصالح است و حجم فضای خالی نیز ۲۶ درصد از کل حجم را تشکیل می‌دهد. نسبت فاز جامد به فضای خالی ثابت است و به اندازه ذرات بستگی ندارد. بنابراین با تغییر فاز جامد، حجم فضای خالی نیز تغییر می‌کند و با افزایش حجم دانه‌های سرباره فولاد، حجم فضاهای خالی مابین ذرات نیز افزایش خواهد یافت (Wang, 2016).

در شکل ۲-۲، اگر سطح گوی‌های کوچک بتواند دیگری را جذب کند (در فرآیند هیدراتاسیون، ذرات آهک مولکول‌های آب را جذب می‌کنند و در نتیجه حجم فاز جامد افزایش می‌یابد)، گوی‌های کوچک به گوی‌های بزرگ

تبدیل می‌شوند، اگرچه نسبت گوی‌ها (فاز جامد) به فضای خالی تغییر نمی‌کند و تنها حجم مطلق افزایش می‌یابد. به آن معنی که اگر حجم گوی‌ها به اندازه ۱ درصد افزایش یابد، حجم فضای خالی ۰/۳۵۱ درصد ($۰/۳۵۱ \times ۱\% = ۰/۳۵۱$) افزایش می‌یابد (Wang, 2016).

با توجه به داده‌های جدول ۲-۱۷، مقدار فاز جامد در یک واکنش کامل به اندازه ۹۷/۹۲ درصد افزایش می‌یابد. بنابراین، حجم فضای خالی به اندازه ۳۴/۴۰ درصد ($۳۴/۴۰ \times ۹۷/۹۲\% = ۰/۳۵۱$) افزایش می‌یابد. وقتی آهک آزاد هیدراته می‌شود، افزایش حجم فاز جامد منجر به افزایش حجم فضای خالی می‌شود. مجموع افزایش حجم فاز جامد و حجم فضای خالی از تغییر حجم ترکیب آب و آهک آزاد پیشی گرفته و منجر به افزایش حجم آهک خواهد شد. این افزایش حجم به اندازه ۱۳۲/۳۲ درصد (مجموع ۳۴/۴۰ و ۹۷/۹۲) خواهد بود. انبساط فاز جامد بیشتر از انبساط ترکیب آب و آهک آزاد است. بنابراین، انبساط حجمی واقعی آهک آزاد موجود در سرباره فولاد پس از تکمیل واکنش برابر ۱۲۷/۷۸ درصد ($۱۳۲/۳۲ - ۴/۵۴$) است (Wang, 2016).

پ - تخمین انبساط حجمی سرباره فولاد

از مکانیزم انبساط آهک آزاد می‌توان رابطه‌ای برای تخمین مقدار انبساط حجمی سرباره فولاد به دست آورد زیرا افزایش حجم سرباره فولاد کاملاً به دلیل افزایش حجم آهک آزاد در سرباره فولاد است. یک نمونه مخلوط مصالح سرباره فولاد را در نظر بگیرید. حجم کل ظاهری آن با V_0 ، حجم فاز جامد آن با V نشان داده شده و نسبت V/V_0 (یا γ_0/γ_s) که با حرف D نشان داده می‌شود معیاری از چگالی توده سرباره فولاد است. انبساط حجمی به صورت نسبت افزایش حجم به حجم واقعی (فاز جامد) سرباره فولاد تعریف می‌شود:

$$E_s = \Delta V / V$$

که در آن ΔV ، افزایش حجم سرباره فولاد است. بنابراین اگر E_1 را انبساط حجمی آهک و برابر با ۱۲۷/۷۸ درصد، V_0 حجم ظاهری کل سرباره فولاد بر حسب سانتیمتر مکعب، D شاخص چگالی سرباره فولاد (برابر γ_0/γ_s)، F درصد آهک آزاد موجود در سرباره فولاد، γ_0 دانسیته متراکم نمونه سرباره فولاد (g/cm^3)، γ_s وزن مخصوص سرباره فولاد (g/cm^3) و γ_1 دانسیته متراکم آهک را برابر ۳/۳۴ (g/cm^3) در نظر بگیریم. $V\gamma_s$ جرم سرباره فولاد، $V\gamma_s F$ جرم آهک آزاد و $V\gamma_s F/\gamma_1$ حجم آهک آزاد در سرباره فولاد است و بنابراین E_s ، انبساط حجمی سرباره فولاد بر حسب درصد را می‌توان به صورت زیر تعیین کرد:

$$E_s = \frac{1}{V \cdot D} \times \frac{V \cdot D \cdot \gamma_s F}{\gamma_1} \times \frac{E_1}{100}$$

که به صورت ساده شده به شکل زیر در می‌آید:

$$E_s = 0.38 \times \gamma_s F$$

از رابطه فوق نتیجه گرفته می‌شود که انبساط حجمی سرباره فولاد به دانسیته متراکم (γ_s) و درصد آهک آزاد موجود در سرباره فولاد (F) بستگی دارد. γ_s یک ضریب ثابت برای هر سرباره بر حسب g/cm^3 است. بنابراین، انبساط حجمی به

طور مستقیم به درصد آهک آزاد بستگی دارد. قابل ذکر است که واحد عدد ۰/۳۸ در فرمول فوق، معکوس واحد γ_s است (Wang, 2016).

۲-۳-۱-۳- آزمایش انبساط حجمی سرباره فولاد

در معادله فوق برای محاسبه E_s ، حجم واقعی V (یعنی V_{oD}) لحاظ شد. با این حال، هنگامی که از سرباره فولاد به عنوان مصالح اساس یا زیراساس راه استفاده می‌شود، باید به صورت یک جسم کامل ملاحظه شود. از نگاه درونی، درصد فضای خالی یک مصالح مشخص معمولاً صفر نیست، یا به عبارت دیگر، تراکم آن (D) برابر با ۱۰۰ درصد نیست. برای بررسی اینکه آیا حجم فضای خالی یک نمونه متراکم سرباره فولاد می‌تواند انبساط حجمی آن را به صورت درونی جذب کند یا خیر و برای صحت‌سنجی رابطه تخمین انبساط، باید آزمایش‌های انبساط حجمی روی نمونه‌های سرباره در دو حالت با سرباره ۱ و بدون سرباره انجام شود (Wang, 2016).

روش آزمایش استاندارد ASTM D4792 برای انجام تحقیقات آزمایشگاهی انتخاب شد. قطر قالب آزمایش برابر ۱۵/۲۴ سانتیمتر، مساحت آن ۱۸۲/۴ سانتیمتر مربع و ارتفاع آن برابر با ۱۲/۸ سانتیمتر است. نمونه‌های سرباره فولاد درون قالب تحت شرایط با سرباره ۴۵۶۰ گرم (۲۵ گرم بر سانتیمترمربع) و بدون سرباره آزمایش شدند. این نمونه‌ها درون حمام آب در دمای 74 ± 3 درجه سانتیگراد غوطه‌ور شدند. شکل‌های ۲-۳ و ۲-۴ تصاویری از آزمایش انبساط حجمی را نشان می‌دهند.



شکل (۲-۳): تصویر آزمایش انبساط حجمی طبق استاندارد ASTM D4792 (Wang, 2016)



شکل (۲-۴): انجام آزمایش انبساط حجمی بر روی چند نمونه به صورت همزمان (Wang, 2016)

ابتدا نمونه‌ها برای انجام آزمایش انبساط حجمی انتخاب شدند تا به‌طور کیفی بررسی شود که آیا انبساط حجمی یک نوع سرباره اما از تهیه شده منابع مختلف با یکدیگر اختلاف دارند یا خیر. بنابراین، دو آزمایش همزمان (با سربار و بدون آن) برای هر نمونه با اندازه اسمی ۲۰ میلیمتر (۲۰-۱۶ میلیمتر) انجام شد. برای این منظور، سه نمونه سرباره کوره اکسیژن بازی BOFS خنک‌شده در هوا از منابع مختلف انتخاب شدند که ویژگی‌های سه نمونه سرباره و مقدار انبساط حجمی تخمینی آن‌ها در جدول ۲-۱۸ ارائه شده است.

جدول (۲-۱۸): ویژگی‌های نمونه‌های سرباره فولاد برای مقایسه در آزمایش انبساط حجمی (Wang, 2016)

ویژگی	سرباره نوع یک	سرباره نوع دو	سرباره نوع سه
درصد آهک آزاد (f-CaO)، درصد	۱/۸۴	۰/۳۴	۱/۲۷
وزن مخصوص سرباره فولاد (γ _s)، g/cm ³	۲/۹۸	۳/۰۸	۳/۱۶
انبساط حجمی تخمینی (با معادله Es)	۲/۰۸	۰/۳۹	۱/۵۲

نتایج آزمون انبساط حجمی با سربار و بدون سربار در جدول ۲-۱۹ نشان داده شده است. از نتایج جداول ۲-۱۸ و ۲-۱۹ این‌گونه استنباط می‌شود که (۱) نتایج نمونه‌های بدون سربار و با سربار اختلاف دارند، (۲) اختلاف انبساط نمونه‌های بدون سربار و با سربار (K25)، در حدود ۷ تا ۱۳ درصد است (۳) اختلاف انبساط‌های کمتر وقتی روی می‌دهد که نرخ انبساط به ثبات می‌رسد (در روزهای پایانی آزمایش) و (۴) مقدار انبساط حجمی تخمینی به‌دست آمده از روابط برای تخمین مقدار انبساط کلی که طی یک تا دو هفته اول هیدراتاسیون روی می‌دهد، قابل اطمینان است. شکل ۲-۵ نیز نتایج آزمون انبساط سه نمونه سرباره کوره اکسیژن بازی در دو حالت بدون سربار و با سربار را نشان می‌دهد (اختلاف ۷ تا ۱۳ درصد). این اختلافات ناشی از سربار ۲۵ گرم بر سانتیمتر مربع برای ارائه معیار مصرف مهم است. البته با در نظر گرفتن حالت محافظه‌کارانه باید از حدود کمتر اختلافات برای ارائه معیار مصرف استفاده نمود (Wang, 2016).

اختلافات انبساط حجمی مصالح سرباره به دلیل متخلخل بودن مصالح سرباره فولاد و همچنین وجود فشار محدودکننده وجود دارد. به عبارت دیگر، بخشی از انبساط حجمی در فضاهای خالی مصالح جای می‌گیرد و باعث

می‌شود که کل مصالح سرباره فولاد انبساط ظاهری از خود بروز ندهد. برای مصالح سرباره فولاد و سایر سرباره‌ها به منظور مصرف در لایه اساس و زیراساس، باید مقدار انبساط حجمی کلی (ظاهری) را در نظر گرفت. در بیشتر موارد، مقدار انبساط حجمی اساس مصالح سرباره فولاد اساس و زیراساس کمتر از فضاهای خالی آن لایه است که تا حدی به دلیل تخلخل و شکل لانه زنبوری مصالح است (Wang, 2016).

به منظور بررسی بیشتر حدود پایین اختلاف‌ها، شش نمونه سرباره فولاد با اندازه اسمی ۲۰ میلیمتر (۲۰-۱۶ میلیمتر) به منظور انجام ۱۲ آزمایش همزمان، بدون سربار و با سربار، انتخاب شدند. مقادیر دانسیته و درصد آهک آزاد نمونه‌های سرباره فولاد در جدول ۲-۲۰ نشان داده شده است. آزمایش وزن مخصوص نمونه‌ها طبق استاندارد AASHTO T85 برای تعیین ۷۵ و ۷۸ انجام شد. برای تعیین درصد آهک آزاد از روش حجمی استفاده شد. نتایج آزمایش تعیین انبساط حجمی و حدود پایین اختلاف‌ها پس از ثابت شدن انبساط حجمی در جدول ۲-۲۱ نشان داده شده است (Wang, 2016).

بر اساس نتایج جدول ۲-۲۱، حداکثر مقدار انبساط از ۰/۵۶ تا ۲/۵۵ درصد متغیر به دست آمده است. با مقایسه دو آزمایش همزمان برای هر نمونه مشخص شد که مقادیر انبساط نمونه‌های دارای سربار، به‌طور متوسط، به اندازه ۷/۷ تا ۱۰/۹ درصد کمتر از نمونه‌های بدون سربار است (Wang, 2016).

جدول (۲-۱۹): نتایج آزمایش انبساط حجمی سرباره

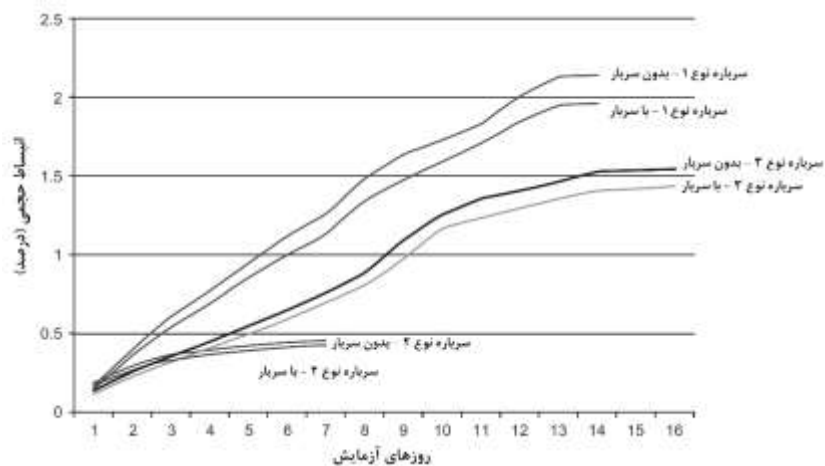
روزهای آزمایش	سرباره نوع یک			سرباره نوع دو			سرباره نوع سه		
	انبساط حجمی (درصد)		K25 (درصد)	انبساط حجمی (درصد)		K25 (درصد)	انبساط حجمی (درصد)		K25 (درصد)
	بدون سربار	با سربار		بدون سربار	با سربار		بدون سربار	با سربار	
۱	۰/۱۵	۰/۱۷	۱۳/۰	۰/۱۷	۰/۱۹	۱۱/۲	۰/۱۲	۰/۱۴	۱۶/۶
۲	۰/۳۶	۰/۴۰	۱۱/۱	۰/۲۷	۰/۳۰	۱۱/۱	۰/۲۳	۰/۲۶	۱۳/۰
۳	۰/۵۴	۰/۶۱	۱۳/۰	۰/۳۴	۰/۳۷	۸/۸	۰/۳۲	۰/۳۶	۱۲/۵
۴	۰/۶۹	۰/۷۷	۱۲/۰	۰/۳۷	۰/۴۰	۸/۱	۰/۴۱	۰/۴۵	۹/۸
۵	۰/۸۶	۰/۹۵	۱۰/۰	۰/۴۰	۰/۴۳	۷/۵	۰/۵۰	۰/۵۵	۱۰/۰
۶	۱/۰۰	۱/۱۲	۱۲/۰	۰/۴۲	۰/۴۵	۷/۱	۰/۵۹	۰/۶۵	۱۰/۲
۷	۱/۱۳	۱/۲۶	۱۱/۵	۰/۴۳	۰/۴۶	۷/۰	۰/۷۰	۰/۷۶	۸/۶
۸	۱/۳۵	۱/۴۹	۱۰/۴				۰/۸۱	۰/۸۹	۹/۹
۹	۱/۴۸	۱/۶۴	۱۰/۸				۰/۹۸	۱/۱۰	۱۲/۲
۱۰	۱/۵۹	۱/۷۳	۸/۸				۱/۱۷	۱/۲۶	۷/۷
۱۱	۱/۷۱	۱/۸۳	۷/۰				۱/۲۴	۱/۳۶	۹/۷
۱۲	۱/۸۵	۲/۰۱	۸/۶				۱/۳۰	۱/۴۱	۸/۵
۱۳	۱/۹۵	۲/۱۳	۹/۰				۱/۳۶	۱/۴۷	۱۱/۰
۱۴	۱/۹۶	۲/۱۴	۸/۰				۱/۴۱	۱/۵۳	۸/۵
۱۵							۱/۴۲	۱/۵۴	۸/۵
۱۶							۱/۴۴	۱/۵۵	۷/۶

جدول (۲-۲۰): مقادیر دانسیته و درصد آهک آزاد نمونه‌های سرباره فولاد (Wang, 2016)

شماره نمونه	BOF 2-1	BOF 2-2	BOF 2-3	BOF 2-4	BOF 2-5	BOF 2-6
دانسیته متراکم نمونه، γ_0 (g/cm ³)	۲/۳۵	۲/۲۸	۲/۱۵	۲/۳۱	۲/۱۹	۲/۲۴
وزن مخصوص سرباره فولاد، γ_s (g/cm ³)	۳/۳۶	۳/۲۷	۲/۸۹	۳/۱۹	۲/۹۹	۳/۲۶
مقدار آهک آزاد، F (درصد)	۲/۷	۳/۵	۳/۳	۳/۱	۲/۴	۳/۴

جدول (۲-۲۱): نتایج آزمایش انبساط حجمی شش نمونه سرباره فولاد کوره اکسیژن بازی (Wang, 2016)

شماره نمونه	انبساط حجمی (درصد)		اختلاف‌های انبساط، K25 (درصد)
	با سربار	بدون سربار	
BOF 2-1	۱/۸۵	۲/۰۱	۸/۶
BOF 2-2	۲/۳۰	۲/۵۵	۱۰/۹
BOF 2-3	۰/۵۶	۰/۶۲	۱۰/۷
BOF 2-4	۱/۳۵	۱/۴۹	۱۰/۴
BOF 2-5	۱/۹۵	۲/۱۰	۷/۷
BOF 2-6	۱/۹۶	۲/۱۶	۱۰/۲



شکل (۲-۵): نتایج آزمایش انبساط حجمی شش نمونه سرباره فولاد کوره اکسیژن بازی بدون سربار و با سربار (Wang, 2016)

۲-۳-۲-۲- ارائه معیار برای انبساط حجمی سرباره فولاد

۲-۳-۲-۱- معیار انبساط حجمی سرباره فولاد در اساس و زیراساس

از نتایج آزمایش‌های انبساط حجمی اینگونه استنباط می‌شود که کمترین اختلاف‌های ناشی از سربار در حدود ۷ تا ۸ درصد است. این به آن معناست که اگر مقدار انبساط حجمی تخمینی از رابطه Es کمتر از حدوداً ۷/۵ درصد از مقدار فضای خالی برآورد شده باشد و مصالح نیز تحت سربار ۲۵ گرم بر سانتیمتر مربع باشد، انبساط حجمی واقعی سرباره

فولاد رخ نخواهد داد. به عبارت دیگر، اگر یکی از شرایط زیر برقرار باشد، انبساط حجمی ظاهری مصالح سرباره فولاد رخ نمی‌دهد.

$$E_s < ۷.۵\%(۱ - D)$$

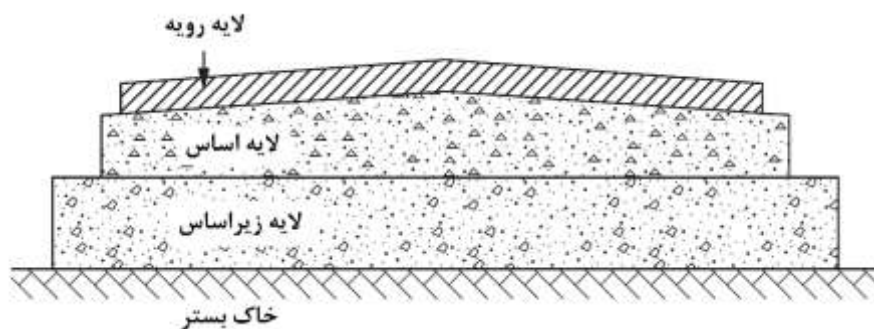
یا

$$۰.۳۸ \times \gamma_s F < ۷.۵\%(۱ - \gamma_s / \gamma_s)$$

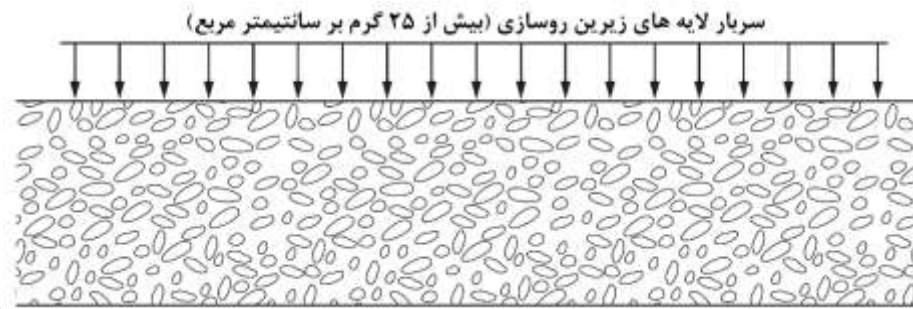
در معادله اول، سمت چپ معادله مقدار تغییر حجم بر حسب درصد است و سمت راست نیز درصدی از حجم است که می‌تواند انبساط سرباره را در خود جای دهد. معادله دوم را می‌توان به شکل زیر بازنویسی کرد:

$$F < \frac{۰.۰۷۵(\gamma_s - \gamma_s)}{۰.۳۸\gamma_s} \times ۱۰۰\%$$

این معادله به این معنی است که اگر درصد آهک آزاد سرباره فولاد کمتر از عبارت سمت راست معادله باشد، سرباره فولاد از نظر ماکروسکوپی انبساط نمی‌یابد یا انبساط حاصل از آهک آزاد می‌تواند توسط حجم فضای خالی سرباره فولاد که تحت فشار ۲۵ گرم بر سانتیمتر مربع قرار دارد، جذب شود. به عبارت دیگر، در صورت تحقق این شرط، انبساط کلی ظاهری اتفاق نخواهد افتاد. معادله فوق یک معادله تجربی است و برای سرباره فولادی که تحت فشار ۲۵ گرم بر سانتیمتر مربع قرار دارد، ایجاد شده است. شکل ۲-۶ لایه‌های سازه روسازی آسفالتی را نشان می‌دهد که شامل لایه‌های آسفالت داغ به ضخامت ۱۰-۳۰ سانتیمتر و اساس و زیراساس است. شکل ۲-۷ نیز نمایی از لایه‌های اساس و زیراساس را تحت سرباره لایه‌های آسفالت داغ نشان می‌دهد. فرض بر این است که ضخامت لایه آسفالتی بیش از ۱۰ سانتیمتر و مقدار سرباره هم بیش از ۲۵ گرم بر سانتیمتر مربع است (Wang, 2016).



شکل (۲-۶): نمای سازه روسازی



شکل (۷-۲): مصالح سرباره به عنوان اساس و زیراساس همراه با لایه رویه ضخیم‌تر از ۱۰ سانتیمتر

۲-۲-۳-۲- اصلاح معیار انبساط حجمی سرباره فولاد در اساس و زیراساس

طی فرآیند خنک شدن سرباره فولاد و هنگام تشکیل ساختارهای بلوری، دو نوع آهک آزاد باقیمانده^۱ و آهک آزاد رسوبی^۲ تشکیل می‌شود. یعنی مقدار آهک آزاد اندازه‌گیری شده از دو بخش آهک آزاد باقیمانده و آهک آزاد رسوبی تشکیل شده است و درصد آهک آزاد باقیمانده بخشی است که در انبساط حجمی سرباره فولاد مشارکت می‌کند. اگر کل مقدار آهک آزاد اندازه‌گیری شده کمتر از ۴ درصد باشد، حاوی ۲ درصد آهک رسوبی است و اگر کل آهک آزاد اندازه‌گیری شده بیشتر از ۴ درصد باشد، حاوی ۲/۸ درصد آهک رسوبی است (Sersale et al., 1986; Geiseler, 1996). بنابراین، معیار اصلاح شده نهایی را می‌توان به صورت زیر در دو بخش بازنویسی کرد:

وقتی آهک آزاد اندازه‌گیری شده کمتر از ۴ درصد باشد، درصد آهک آزاد مجاز عبارت است از:

$$F_{\text{مجاز}} < 2.0\% + \frac{K_{T\Delta}(Y_s - Y_o)}{0.38\gamma_s^T} \times 100\%$$

وقتی آهک آزاد اندازه‌گیری شده بیشتر از ۴ درصد باشد، درصد آهک آزاد مجاز عبارت است از:

$$F_{\text{مجاز}} < 2.8\% + \frac{K_{T\Delta}(Y_s - Y_o)}{0.38\gamma_s^T} \times 100\%$$

مجاز F حداکثر درصد آهک آزاد مجاز برای یک سرباره فولاد است که قرار است در لایه اساس و زیراساس مصرف شود، با این شرط که بر روی لایه سرباره فولاد، لایه‌های ضخیم‌تر از ۱۰ سانتیمتر یا سرباره بزرگتر از ۲۵ گرم بر سانتیمتر مربع قرار گرفته باشد. برای سرباره‌های غیرآهنی یا سرباره‌های با ویژگی‌های فیزیکی متفاوت نسبت به سرباره فولاد، باید آزمایش آزمایشگاهی برای تعیین مقدار اختلافات انبساط حجمی (یعنی K25) انجام شود و مقدار آن در روابط ارائه شده در این بخش استفاده شود.

¹ Residual free CaO

² Precipitated free CaO

با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام شده، حداکثر مقدار مجاز درصد آهک آزاد برای مصالح سرباره فولاد مورد استفاده به عنوان اساس یا زیراساس تحت شرایط بار محدودکننده ۲۵ گرم بر سانتیمتر مربع (معادل لایه رویه به ضخامت ۱۰ سانتیمتر)، در محدوده ۳/۷-۳/۹ درصد است (Wang, 2016).

برخی محققان مقدار مجاز درصد آهک آزاد را بر اساس داده‌های میدانی راهسازی در حدود ۴ درصد اعلام کرده‌اند (Shi, 2004; Wang & Lin, 1983). تحقیقات دیگری پیشنهاد کرده‌اند که حداکثر مجاز ۴ درصد را می‌توان افزایش داد (FHWA, 2010; Piret, 1977). به عنوان مثال بلژیک و هلند، حداکثر مقدار مجاز درصد آهک آزاد برای مصالح سرباره فولاد مورد استفاده به عنوان اساس یا زیراساس را ۴/۵ اعلام کرده‌اند اما الزام کرده‌اند که مصالح سرباره فولاد حتماً باید به مدت یکسال پیش از مصرف در معرض هوا و رطوبت قرار داده شوند (FHWA, 1997).

فصل ۳

مشخصات فنی و ملاحظات اجرایی

۳-۱- مقدمه

با توجه به توضیحات فصل‌های اول و دوم، در این فصل مشخصات فنی و ملاحظات اجرایی مورد نیاز سرباره‌های آهن و فولاد برای استفاده در لایه‌های اساس و زیراساس ارائه می‌گردد. اساس و زیراساس را می‌توان به صورت کامل با استفاده از مصالح سرباره‌ای یا با ترکیبی از مصالح سرباره‌ای و مصالح سنگی طبیعی شنی (رودخانه‌ای) و سنگی (کوهی) اجرا کرد مشروط بر آن که حدود مشخصات مندرج در این فصل رعایت گردند. البته با توجه به اینکه مقدار جذب آب مصالح سرباره‌ای ریزدانه نسبتاً بالا است، توصیه می‌شود تا جایی که امکان دارد از مصالح سرباره‌ای درشت‌دانه (بزرگتر از ۲/۳۶ میلیمتر) به صورت ترکیبی با مصالح سنگی طبیعی استفاده گردد و از مصرف سرباره ریزدانه اجتناب شود. در ادامه این فصل هر کجا واژه سرباره ذکر شد منظور سرباره آهن و فولاد است.

در بعضی موارد به دلیل عدم وجود معادن شن و ماسه و یا سنگ کوهی و یا مصالح سرباره‌ای و یا بُعد مسافت از محل معدن تا پای کار، مشکلاتی از نظر اقتصادی و فنی برای تهیه مصالح زیراساس ایجاد می‌شود. در این موارد می‌توان از مصالح طبیعی یا سرباره‌ای موجود در محل، که مصرف آن به عنوان قشر زیراساس به تنهایی مناسب نمی‌باشد و مخلوط نمودن آن با درصدی از مواد افزودنی تثبیت کننده، نظیر آهک استفاده نمود که در این صورت مخلوط حاصله زیراساس آهکی نامیده می‌شود و برای ضوابط طراحی و ملاحظات اجرایی آن باید به بند ۱۲-۲-۲ نشریه شماره ۱۰۱ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور مراجعه نمود.

از مصالح سرباره می‌توان به عنوان بخش درشت‌دانه در اساس ماکادامی استفاده کرد که برای ضوابط طراحی و ملاحظات اجرایی آن باید به بند ۱۳-۲-۲ نشریه شماره ۱۰۱ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور مراجعه نمود. در هر حالت برای هر پروژه، نوع قشر زیراساس باید تعیین و در مشخصات فنی خصوصی قید گردد.

۳-۲- مشخصات فنی مصالح سرباره

مصالح سرباره باید سخت، محکم، بادوام، تمیز، مکعبی‌شکل و عاری از هر گونه مواد آلی، رسی، شیبستی، پوشش خاکی و دانه‌های سست بوده و برای هر قطعه از پروژه، حتی الامکان از یک معدن تهیه شده باشد. مشخصات فیزیکی، مکانیکی، شیمیایی و دانه‌بندی این مصالح باید با مندرجات بندهای ۱-۲-۳ الی ۳-۲-۳ مطابقت داشته باشد.

۳-۲-۱- مشخصات فیزیکی و مکانیکی

مصالح سرباره‌ای از نظر ظاهری بسیار گوشه‌دار بوده و دارای بافت سطحی زبرتری نسبت به مصالح سنگی طبیعی هستند. وزن مخصوص حقیقی آن‌ها زیادتر و جذب آب آن‌ها متوسط است. سرباره آهن و فولاد شکسته و سرندشده ویژگی‌های مکانیکی مطلوبی از جمله مقاومت زیاد در برابر سایش، دوام زیاد در برابر سولفات‌ها و مقاومت باربری زیاد برای کاربردهای اساس و زیراساس دارد. مهم‌ترین مسأله در ارتباط با مصالح سرباره آهن و فولاد تمایل آن‌ها به انبساط

در اثر هیدراته شدن آهک و منیزیم آزاد هنگام تماس با رطوبت است که باید کنترل گردد. مشخصات فیزیکی و مکانیکی سرباره آهن و فولاد باید با جدول ۱-۳ مطابقت داشته باشد.

جدول (۱-۳): مشخصات فیزیکی و مکانیکی سرباره آهن و فولاد برای استفاده در اساس و زیراساس

روش‌های آزمایش		مشخصات	شرح آزمایش	ردیف
ASTM	AASHTO			
C 127	T 85	حداکثر ۲	جذب آب درشت‌دانه، درصد	۱
C 128	T 84	حداکثر ۸	جذب آب ریزدانه، درصد	۲
D 2419	T 176	حداقل ۵۰	ارزش ماسه‌ای، درصد	۳
C 131	T 96	حداکثر ۵۰	سایش با روش لوس آنجلس، درصد	۴
C 88	T 104	حداکثر ۱۲	افت وزنی با سولفات سدیم، درصد	۵
D 5821	---	حداقل ۸۵	شکستگی در دو جبهه، درصد	۶
---	---	حداکثر ۲۵	ضریب تورق طبق BS 812، درصد	۷
D 4792	---	حداکثر ۰/۵	انبساط بر اثر هیدراتاسیون، درصد	۸

* مصالح سرباره آهن و فولاد باید طبق ASTM D4318 فاقد خصوصیات خمیری باشند.

** میزان رطوبت مصالح باید کمتر از رطوبت بهینه به دست آمده از آزمایش تراکم باشد.

*** آزمایش جذب آب ریزدانه و ارزش ماسه‌ای تنها در صورتی لازم است که از مصالح سرباره ریزدانه (کوچکتر از ۲/۳۶ میلیمتر) در لایه اساس و زیراساس استفاده گردد.

۳-۲-۲- مشخصات شیمیایی

جنس سرباره با توجه به تنوع مصالح و مشخصات کوره آهن‌گدازی و نوع فولاد تولیدی و معدن مصالح اولیه می‌تواند تغییر کند لیکن مقدار ترکیبات شیمیایی سرباره بسته به نوع فرآیند تولید باید در یکی از محدوده‌های جدول ۲-۳ قرار بگیرد. ترکیب شیمیایی سرباره بر حسب اکسیدهای ساده محاسبه‌شده از طریق آنالیز اجزا که توسط فلورسانس اشعه ایکس تعیین می‌شود، بیان می‌گردد.

مقدار آهک آزاد نمونه‌های سرباره طبق AASHTO T219 نباید از ۳ درصد تجاوز نماید. در صورتی که از یک دپوی سرباره مشخص نمونه‌گیری شد و مقدار آهک آزاد آن بیش از ۳ درصد تعیین شد، آن دپو به مدت دو ماه قابل استفاده نیست و پس از گذشت دو ماه، آزمایش مذکور مجدداً انجام شده و در صورتی که آهک آزاد آن به کمتر از ۳ درصد تقلیل یافت، می‌توان از آن دپوی سرباره استفاده نمود. در غیر اینصورت مجدداً باید دو ماه دیگر تا انجام آزمایش مجدد صبر نمود.

جدول (۳-۲): مشخصات شیمیایی سرباره آهن و فولاد برای استفاده در اساس و زیراساس

مقدار ترکیب (درصد)			اجزای تشکیل دهنده
سرباره کوره قوس الکتریکی EAFS	سرباره کوره اکسیژن بازی BOFS	سرباره کوره بلند ACBFS	
۲۴-۴۱	۳۳-۵۷	۳۲-۴۱	CaO
۱۹-۳۳	۱۴-۳۴	۰-۴	گروه FeO
۱۵-۲۲	۹-۲۱	۳۱-۳۹	SiO ₂
۰/۳-۳	۳-۵	۱-۲/۵	MnO
۴-۱۰	۱-۵	۶-۱۲	MgO
۳-۹	۰/۵-۵	۵-۱۵	Al ₂ O ₃
۰-۲/۵	۱/۲-۵	--	P ₂ O ₅
۰-۲/۵	۰/۵-۳/۵	۳-۵	TiO ₂
--	۰/۵-۳	--	V ₂ O ₅
۰-۲/۵	<۱	۰-۳	SO ₃
<۱	<۰/۵	<۱/۵	K ₂ O
<۱	<۰/۵	<۱	Na ₂ O
<۲۰	<۱۵	<۱۰	درصد افت وزنی در اثر حرارت LOI

۳-۲-۳- دانه بندی

دانه بندی مصالح اساس و زیراساس که با روش AASHTO T27 تعیین می گردد، با توجه به شرایط پروژه باید با یکی از دانه بندی های جدول ۳-۳ مطابقت داشته باشد. در صورتی که در لایه اساس و زیراساس از ترکیب مصالح سرباره ای و طبیعی استفاده می شود، برای کاهش حساسیت مصالح اساس و زیراساس در مقابل یخبندان می توان با تشخیص دستگاه نظارت، درصد مواد رد شده از الک ۲۰۰ را کاهش داد و برای اطمینان بیشتر لازم است درصد مواد ریزتر از ۲۰ میکرون نیز از ۳ درصد تجاوز نکند و ضمناً درصد وزنی مواد رد شده از الک ۲۰۰ نباید از دو سوم درصد وزنی رد شده از الک ۴۰ بیشتر باشد. در صورتی که در لایه اساس و زیراساس صرفاً از مصالح سرباره ای استفاده می شود رعایت نکته قبلی ضروری نیست.

۳-۲-۴- سایر مشخصات

به منظور تعیین مقاومت مصالح سرباره ای برای طراحی ضخامت لایه های اساس و زیراساس می توان از آزمایش CBR طبق ASTM D1883 یا آزمایش مدول برجهنگی طبق AASHTO T307 بهره برد. همچنین در صورتی که دستگاه نظارت لازم تشخیص دهد می تواند حداقل مقاومت مشخصی را الزام نماید و به لیست آزمایش های جدول ۳-۱ بیفزاید.

جدول (۳-۳): دانه‌بندی‌های مصالح اساس و زیراساس

درصد وزنی رد شده از هر الک						نوع دانه‌بندی اندازه الک
F	E	D	C	B	A	
---	---	---	---	۱۰۰	۱۰۰	۵۰ میلیمتر (۲ اینچ)
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۷۵-۹۵	---	۲۵ میلیمتر (۱ اینچ)
---	---	۶۰-۱۰۰	۵۰-۸۵	۴۰-۷۵	۳۰-۶۵	۹/۵ میلیمتر (۳/۸ اینچ)
۷۰-۱۰۰	۵۵-۱۰۰	۵۰-۸۵	۳۵-۶۵	۳۰-۶۰	۲۵-۵۵	۴/۷۵ میلیمتر (شماره ۴)
۵۵-۱۰۰	۴۰-۱۰۰	۴۰-۷۰	۲۵-۵۰	۲۰-۴۵	۱۵-۴۰	۲ میلیمتر (شماره ۱۰)
۳۰-۷۰	۲۰-۵۰	۲۵-۴۵	۱۵-۳۰	۱۵-۳۰	۸-۲۰	۰/۴۲۵ میلیمتر (شماره ۴۰)
۸-۲۵	۶-۲۰	۵-۲۰	۵-۱۵	۵-۲۰	۲-۸	۰/۰۷۵ میلیمتر (شماره ۲۰۰)

نکته مهم آن است که آزمایش‌های تعیین مقاومت باید روی نمونه‌های معرف با درصد تراکم مشخص و درصد رطوبت مشخص انجام شوند و مقادیر آن نیز باید در شرایط خصوصی پیمان قید گردد.

روش‌های متداول آشتو برای طراحی سازه‌ای روسازی را می‌توان برای طراحی لایه اساس و زیراساس حاوی مصالح سرباره آهن و فولاد مورد استفاده قرار داد.

مقدار pH مصالح سرباره فولاد عموماً در محدوده ۸ تا ۱۰ متغیر است. با این حال، شیرابه سرباره فولاد می‌تواند مقدار pH بالاتر از ۱۱ داشته باشد. این مقدار pH می‌تواند باعث خوردگی لوله‌های گالوانیزه یا آلومینیومی شود که در تماس مستقیم با سرباره قرار دارند که بایستی تدابیر لازم در این خصوص اتخاذ گردد.

هنگامی که سرباره آهن و فولاد به ویژه سرباره ACBFS در مجاورت آب قرار می‌گیرند ممکن است به دلیل وجود مقدار اندک گوگرد در مصالح سرباره، شیرابه زردرنگ از آن‌ها خارج شود که بوی نامطبوعی دارد. در صورتی که عملیات دپو کردن و قرار دادن مصالح سرباره در معرض هوا و رطوبت به مدت زمان کافی انجام شده باشد، این پدیده رخ نخواهد داد لیکن توصیه می‌شود احتمال رخداد این موضوع با استفاده از روش استاندارد JIS A5015 بررسی گردد.

به منظور جلوگیری از آلودگی خاک و آب توسط فلزات سنگین، به ویژه هنگامی که قرار است از مصالح سرباره آهن و فولاد در راه‌های مناطق مرطوب یا در مجاورت رودخانه‌ها، سواحل و بندرگاه‌ها استفاده شود، توصیه می‌شود مقدار فلزات سنگین مصالح سرباره بررسی شده و مقادیر قابل پذیرش توسط دستگاه نظارت ابلاغ گردد. حدود مجاز مندرج در استاندارد JIS A5015 می‌تواند به عنوان راهنما مورد استفاده قرار گیرد.

۳-۳- ملاحظات اجرایی مصالح سرباره

۳-۳-۱- تولید سرباره

طی فرآیند تولید سرباره باید حداکثر دقت را به کار برد تا از ورود هر گونه مواد زائد و اضافه نظیر خاک، سنگ، چوب، آهک و .. به دانه‌های سرباره جلوگیری شود و دیوهای سرباره فولاد کاملاً تمیز و یکدست باشند (FHWA, 1997). قبل از اینکه مصالح سرباره برای استفاده در لایه اساس یا زیراساس به پای کار حمل گردد، باید از مصالح مصرفی طبق AASHTO T2 نمونه‌برداری کرده و آزمایش‌های مندرج در بندهای ۳-۲-۱ تا ۳-۲-۳ روی آن‌ها انجام پذیرد. نتایج حاصله نباید خارج از محدوده داده شده در همان بند باشد. پس از شروع پروژه باید هر دو ماه یکبار این آزمایش‌ها روی نمونه‌های سرباره انجام شود. همچنین در صورتی که منبع تأمین یا فرآیند تولید سرباره تغییر کند نیز بایستی این آزمایش‌ها مجدداً انجام شوند.

۳-۳-۲- خردایش و دپوی سرباره

همان روش‌ها و تجهیزات رایج برای تولید مصالح سنگی معمول برای مصالح سرباره نیز قابل استفاده است. مصالح سرباره آهن و فولاد تمایل به انبساط در اثر هیدراته شدن آهک آزاد و منیزیم هنگام تماس با رطوبت دارند. بنابراین باید با انبار کردن سرباره‌ها در هوای آزاد به مدت حداقل یکسال پیش از مصرف، آن‌ها را در معرض رطوبت ناشی از بارش طبیعی قرار داد و یا به صورت مصنوعی روی آن‌ها آب پاشی کرد. منظور از این عمل، انجام فرآیند هیدراته شدن و منبسط شدن قبل از استفاده سرباره‌ها به عنوان مصالح دانه‌ای است که از لحاظ شیمیایی، خنثی و پایدار شوند. مصالح به هنگام حمل باید رطوبت کافی داشته باشد تا در جریان حمل دانه‌ها از یکدیگر جدا نشوند. دوره نگهداری مصالح سرباره در دیوهای مرطوب باید با انجام آزمایش‌های کنترل فرآیندهای تولید همراه باشد (آزمون تعیین درصد آهک آزاد و آزمون تعیین پتانسیل انبساط بر اثر هیدراتاسیون) تا معیارهای مربوطه تأمین شود. تا زمانی که آزمایش‌های کنترل فرآیندهای تولید نشان دهند که مصالح سرباره برای استفاده در لایه اساس دانه‌ای مناسب هستند، توصیه می‌شود که هوادهی و نگهداری مصالح در دیوهای مرطوب ادامه یابد (FHWA, 1997).

نگهداری مصالح سرباره بایستی در دیوهایی با اندازه مشخص به صورت جدا از هم انجام شده و به هر یک از این دیوها برجسب معینی اختصاص یابد. سوابق نگهداری هر دیو (شامل تاریخ دیو کردن) و مستندات هر دیو (شامل نتایج آزمایش‌های انجام شده) باید جداگانه نگهداری شود. در صورتی که پیش از حمل مصالح سرباره به محل پروژه، نتایج آزمایش‌های یک دیو خارج از محدوده مجاز یا مردود اعلام گردد، باید دو نمونه تصادفی دیگر با فرآیندی مشابه نمونه اولیه از آن دیو گرفته شده و آزمایش‌های لازم روی آن‌ها انجام شود. اگر نتیجه هر دو آزمایش در محدوده مجاز قرار گیرد، آن دیو برای مصرف مورد پذیرش قرار می‌گیرد. در غیر اینصورت حتی اگر نتیجه یکی از آزمایش‌های مجدد قابل

قبول باشد، استفاده از آن دپو مجاز نیست. لازم به ذکر است مخلوط کردن این دپوی مردود شده با سایر دپوها مجاز نیست.

۳-۳-۳- آماده‌سازی بستر

قبل از اجرای عملیات، بستر روسازی راه باید عاری از هر گونه مواد زائد و اضافی بوده و طبق پروفیل‌های طولی و عرضی آماده شده باشد. ناهمواری این بستر با استفاده از شمشه کنترل می‌گردد. در صورتی که شمشه ۴ متری در جهات مختلف بر روی بستر قرار گیرد، ناهمواری‌های آن در زیر شمشه نباید از ۲۰ میلیمتر تجاوز نماید. پیش از اجرای لایه‌های اساس و زیراساس، خاک بستر نامناسب با مقادیر CBR ضعیف باید اصلاح شوند. طبقه‌بندی خاک بستر بر مبنای CBR در جدول ۳-۴ ارائه شده است. به منظور سهولت بررسی، با عبور یک کامیون کمپرسی بارگیری‌شده از لایه خاک بستر می‌توان کیفیت اجرای آن را ارزیابی کرد به این صورت که آن نواحی که بیش از حد تغییر شکل یابند، باید تا عمق لایه‌های زیرین برداشته شده و با مصالح مناسب جایگزین و یا تثبیت شوند (Wang, 2016).

جدول (۳-۴): طبقه‌بندی خاک بستر (Wang, 2016)

نسبت باربری کالیفرنیا CBR	طبقه‌بندی خاک بستر
بیش از ۱۵	عالی
۱۰-۱۴	خوب
۶-۹	متوسط
کمتر از ۵	ضعیف

۳-۳-۴- پخش و تراکم مصالح اساس و زیراساس

همان روش‌ها و تجهیزات مورد استفاده برای پخش و تراکم مصالح سنگی معمول را می‌توان برای مصالح سرباره آهن و فولاد نیز به کار برد. مصالح باید با دانه‌بندی مشخص و ترجیحاً با درصد رطوبت موردنیاز به محل پروژه حمل شود. این مصالح باید در لایه‌هایی متراکم‌نشده با عمق یکنواخت کمتر از ۲۰۰ الی ۲۵۰ میلیمتر پخش شده و تا رسیدن به یک دانسیته مشخص، متراکم گردند. به منظور پیشگیری از جداشدگی فیزیکی بایستی عملیات پخش با حداقل تیغه‌زدن انجام شود. پخش مصالح را می‌توان توسط دستگاه‌های پخش مکانیکی یا کفی کمپرسی انجام داد اما در هر صورت باید احتمال جداشدگی به حداقل برسد و هرگز نباید دانه‌های درشت و ریز از هم جدا شوند (Wang, 2016). دانه‌های درشت‌تر از اندازه‌های مجاز مندرج در جدول ۳-۳ بایستی از سطح راه برداشته و به خارج از حریم راه حمل گردد. به هنگام پخش مصالح، به وسیله‌گریدر و یا هر وسیله دیگر، مصالح باید آنچنان پخش شود که پس از آب‌پاشی و کوبیدن، ابعاد آن برابر با رقوم، اندازه‌ها و شیب‌ها در نقشه‌های اجرایی باشد.

دستیابی به تراکم مورد نیاز برای هر خاک یا مصالح دانه‌بندی شده فقط زمانی محقق می‌شود که درصد رطوبت آن در محدوده مجاز باشد. بهتر است رطوبت در زمان خردایش و دپو کردن مصالح در کارخانه یا در زمان مخلوط شدن با

آب درون مخلوطکن پیش از بارگیری به کامیون‌ها برای حمل به محل پروژه، به طور یکنواخت در کل مصالح پخش شود. این درصد رطوبت باید تا رسیدن به دانسیته هدف حفظ شود. اگر رطوبت خیلی کم باشد، باید آب را با استفاده از کامیون‌های آب‌پاش به مصالح اضافه کرد. اگر رطوبت بیش از حد زیاد باشد، باید مقدار آب را با هوادهی طبیعی یا روش‌های دیگر کاهش داد (Wang, 2016).

پس از پخش، تسطیح و تنظیم نمودن مصالح، آب‌پاشی به وسیله ماشین آب‌پاش با فشار یکنواخت آغاز می‌گردد. آب‌پاشی طوری بایستی انجام شود که تمام دانه‌های مصالح به طور یکنواخت مرطوب گردد. توقف آب‌پاش به هنگام آب‌پاشی روی لایه اساس یا زیراساس مجاز نمی‌باشد. آب‌پاشی نباید به نحوی انجام شود که موجب صدماتی به بدنه خاکی راه گردد. مقدار آب لازم برای آب‌پاشی بر مبنای درصد رطوبت بهینه که با روش AASHTO T180 در آزمایشگاه به دست آمده است، تعیین می‌گردد. تفاوت مجاز آب مصرفی $\pm 1/5$ درصد نسبت به رطوبت بهینه می‌باشد.

پس از آب‌پاشی، بلافاصله کوبیدن با غلتک ۱۰ تا ۱۲ تنی استوانه‌ای فلزی و یا غلتک‌های چرخ لاستیکی آغاز می‌گردد. علاوه بر این غلتک‌ها می‌توان از غلتک‌های لرزشی نیز استفاده نمود، ولی کوبیدن مصالح باید قبلاً با غلتک‌های استاتیک انجام شود. نوع و وزن دقیق غلتک‌ها باید متناسب با نوع مصالح مصرفی بوده تا موجب خرد شدن دانه‌های مصالح نگردد.

برای تراکم باید از ماشین‌آلات مناسب و کارآمد استفاده نمود. بعضی غلتک‌ها تراکم مورد نیاز را با انرژی کمتری نسبت به سایر روش‌ها تأمین می‌کنند. انواع خاص تجهیزات و روش‌های تراکم عبارت است از: (۱) غلتک لرزشی، (۲) غلتک چرخ لاستیکی که معمولاً روی اساس و زیراساس و خاک‌های غیر چسبنده استفاده می‌شود و (۳) غلتک‌های چرخ فولادی سنگین که برای تراکم اولیه نزدیک به ماشین پخش یا برای تراکم نهایی به همراه گریدر، استفاده می‌شود (Wang, 2016).

استفاده از تراکم لرزشی کارآمدترین و متنوع‌ترین روش برای اجرای اساس و زیراساس است. چند عبور اول غلتک لرزشی باید در حالت استاتیک (بدون لرزش) صورت گیرد. این رویکرد برای کنترل بهتر تراکم اولیه قبل از غلتک‌زنی ارتعاشی تا رسیدن به تراکم مورد نیاز اجرا می‌شود. وزن و دامنه ارتعاش باید با توجه به ضخامت لایه پخش شده و مقاومت مصالح لایه زیرین تنظیم شود. از مقادیر دامنه ارتعاش زیاد نباید برای تراکم لایه‌های کم ضخامت استفاده شود، مخصوصاً اگر لایه مورد نظر بر روی خاک بستر ضعیف پخش شده باشد. عبور مکرر با دامنه ارتعاش زیاد منجر به شکستن دانه‌های مصالح و تغییر دانه‌بندی می‌شود. کارایی غلتک چرخ لاستیکی روی اساس و زیراساس با مصالح دانه‌ای شکسته به مقدار فشار و عمل ورز دادن لاستیک‌ها بستگی دارد. مزیت غلتک‌های لاستیکی این است که حتی اگر لایه زیرین ناهموار و غیریکنواخت باشد، منجر به دانسیته نهایی یکنواخت می‌شوند. هنگامی که ضخامت لایه‌های اساس و زیراساس پخش شده بیش از حدود ۱۰۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر است، غلتک‌های چرخ فولادی استاتیک در دستیابی به تراکم یکنواخت کمتر از غلتک‌های چرخ فولادی لرزشی کارآمد هستند (Wang, 2016).

عملیات تراکم از کناره‌های راه شروع و به محور آن ختم می‌گردد به استثنای قوس‌ها که از داخل و از پایین‌ترین نقطه، شروع شده و به بلندترین رقوم در خارج قوس ختم می‌گردد. در صورتی که دانه‌های درشت و ریز مصالح پخش شده از هم جدا شده باشد، باید قبل از کوبیدن برای اصلاح آن اقدام شود. غلتک‌زنی (و در صورت لزوم توأم با آب‌پاشی)، باید آنقدر ادامه یابد تا اینکه لایه کوبیده شده و منسجمی مطابق ابعاد و شیب داده شده در نقشه‌ها به دست آید. سطوحی را که کوبیدن آن‌ها با غلتک‌های خودرو امکان‌پذیر نباشد، می‌توان از وسایل کوبنده موتوری کوچک استفاده نمود، مشروط بر اینکه تراکم مورد نظر تأمین گردد.

قبل از اتمام عملیات تراکم، سطح اساس یا زیراساس مجدداً کنترل می‌شود تا انطباق رقوم اجرا شده با رقوم پروژه محرز گردد. در صورت لزوم با برداشتن قسمتی از مصالح در نقاط مرتفع و اضافه نمودن آن در سطوحی که کمبود مصالح دارد، ناهمواری‌ها باید اصلاح گردد و سپس کوبیدگی تا حصول نتیجه ادامه یابد. حداکثر ضخامت هر لایه کوبیده شده از قشر زیراساس ۲۰ سانتیمتر می‌باشد. در صورتی که ضخامت کل محاسبه شده قشر زیراساس از ۲۰ سانتیمتر تجاوز نماید، مصالح در دو و یا چند لایه پخش و کوبیده خواهد شد. در مواردی که ضخامت اساس ۱۵ سانتیمتر یا کمتر باشد، مصالح باید در یک لایه پخش و کوبیده شود و در حالتی که ضخامت اساس بیش از ۱۵ سانتیمتر باشد، باید ضخامت کل را به لایه‌های مساوی تقسیم نمود ولی در هیچ حالتی نباید ضخامت هر لایه کوبیده از ۱۵ سانتیمتر بیشتر باشد.

به منظور جلوگیری از تغییرات حجمی و تشکیل توف، باید حداکثر دقت لازم را به کار برد تا از پخش مصالح سرباره در ترازهای پایین‌تر از سطح زمین و در محل‌هایی که احتمال غوطه‌وری در آب وجود دارد، جلوگیری شود. در صورت استفاده از مصالح سرباره توصیه می‌شود یک سیستم مناسب زهکشی آب‌های زیرزمینی اجرا شود تا تخلیه آب‌ها به درستی انجام شده و از تجمع آب در مجاورت دانه‌های سرباره فولاد جلوگیری شود. همچنین ترک‌های ایجاد شده در سطح روسازی در دوره بهره‌برداری بایستی در اسرع وقت درزگیری شوند تا از نفوذ آب‌های سطحی به لایه اساس و زیراساس ممانعت به عمل آید. این تمهیدات برای به حداقل رساندن احتمال نشت آهک آزاد و دولیم انجام می‌شود که منجر به تشکیل رسوبات توف شده و در ادامه باعث مسدود نمودن مسیرهای زهکشی می‌شوند (FHWA, 1997).

۳-۳-۵- کنترل تراکم میدانی

تراکم نسبی لایه زیراساس و اساس با آزمایش AASHTO T191 باید برابر صد در صد حداکثر وزن مخصوص خشک مصالحی باشد که در آزمایشگاه با روش AASHTO T180 طبقه D به دست می‌آید. در مواردی که ضخامت لایه زیراساس ۲۰ سانتیمتر یا ضخامت لایه اساس ۱۵ سانتیمتر است این تراکم باید در تمام ضخامت لایه تأمین شده و کنترل شود.

در صورتی که تراکم نسبی به دست آمده کمتر از میزان مشخصه باشد، باید لایه کوبیده شده شخم زنی و سپس با آب‌پاشی و غلتک‌زنی مجدد آنقدر کوبیده شود تا تراکم نسبی قید شده تأمین شود. ضخامت هر لایه نباید از دو برابر بزرگترین اندازه دانه‌های مصالح مصرفی کمتر باشد.

زیراساس و اساس باید تا رسیدن به دانسیته هدف که بر اساس نتایج تراکم آزمایشگاهی یا نتایج مربوط به یک نوار آزمایشی میدانی مشخص می‌شود، متراکم گردد. یک دانه‌بندی یکسان نیز باید در کل پروژه استفاده شود و در محدوده رواداری‌ها حفظ شود. هرگونه تغییر در منبع تأمین یا فرآیند تولید مصالح، مستلزم ارائه فرمول کارگاهی جدید و تعریف یک دانسیته هدف جدید است.

با استفاده از دستگاه دانسیته‌سنج اتمی که دانسیته و رطوبت را اندازه‌گیری می‌کند، آزمایش‌های دانسیته با سرعت بیشتری انجام می‌شود. ترجیحاً این دستگاه باید در حالت ارسال مستقیم^۱ کار کند تا میانگین دانسیته مرطوب را برای کل ضخامت یک لایه منعکس کند. در صورت استفاده از دستگاه دانسیته‌سنج اتمی، انجام آزمایشات همبستگی در هر پروژه و محلی که از مصالح سرباره یا سایر مصالح غیرمعمول استفاده شده باشد، اهمیت زیادی دارد زیرا برخی مواد فلزی و مصالح دارای یون‌های هیدروژن بر قرائت دستگاه تأثیرگذار هستند (Wang, 2016).

۳-۳-۶- کنترل سطح تمام شده

رقوم سطح تمام شده هر لایه از قشر زیراساس و اساس و قبل از پوشش با لایه بعدی با توجه به نیمرخ‌های طولی و عرضی اندازه‌گیری می‌شود. در هر نقطه، اختلاف بین رقوم نقشه‌ها و آنچه ساخته شده برای زیراساس و اساس به ترتیب نباید از ۲ و ۱/۵ سانتیمتر تجاوز نماید (اختلاف در یک جهت پذیرفته نیست). شیب‌های طولی و عرضی باید با نقشه‌ها مطابقت داشته باشد. ناهمواری سطح تمام شده قشر زیراساس و اساس با استفاده از شمشه کنترل می‌گردد. در صورتی که شمشه ۴ متری در جهات مختلف بر روی سطح زیراساس و اساس قرار گیرد، ناهمواری‌های آن نباید از ۱/۵ سانتیمتر تجاوز نماید.

۳-۳-۷- حفاظت سطح راه به هنگام اجرای عملیات

به منظور حفاظت مشخصات قشر زیراساس، پیمانکار باید برنامه اجرایی عملیات را طوری تنظیم کند که پس از پخش و کوبیدن قشر زیراساس یا اساس و حصول اطمینان از دارا بودن مشخصات مورد نظر، روی آن با مصالح قشر بعدی پوشیده شود، در غیر این صورت از عبور و مرور وسایل نقلیه و ماشین‌آلات راهسازی از روی آن باید جلوگیری نمود.

۳-۳-۸- آزمایش‌های کنترل کیفیت

برای کنترل کیفیت مصالح و کارهای انجام شده بایستی از مصالح تهیه شده قبل و بعد از مصرف و نیز حین اجرای کار و متناسب با پیشرفت آن‌ها آزمایش‌های لازم به عمل آید. تعداد و نوع این آزمایش‌ها به شرح زیر است:

^۱ Direct Transmission Mode

زیراساس:

الف: در ابتدای پروژه از مصالح تهیه شده در پای کار نمونه‌برداری شده و آزمایش‌های بندهای ۱-۲-۳ تا ۳-۲-۳ انجام شود تا در صورتی که مصالح طبق مشخصات نباشد اصلاح گردد. پس از شروع پروژه باید هر دو ماه یکبار این آزمایش‌ها روی نمونه‌های سرباره انجام شود. همچنین در صورتی که منبع تأمین یا فرآیند تولید سرباره تغییر کند نیز بایستی این آزمایش‌ها مجدداً انجام شوند.

ب: به ازای هر ۵۰ متر از طول راه یک آزمایش تعیین وزن مخصوص محلی انجام می‌شود (به ترتیب در وسط، چپ و راست)، و در صورتی که عرض راه زیاد باشد یک آزمایش برای هر ۱۰۰ متر مکعب مصالح به عمل می‌آید. ضخامت لایه زیراساس در هر آزمایش اندازه‌گیری و گزارش می‌شود.

پ: آزمایش تراکم آزمایشگاهی به ازای هر ۵۰۰ متر مکعب مصالح یک بار صورت می‌گیرد و در صورتی که جنس مصالح تغییر کند، آزمایش بیشتری به عمل می‌آید.

ت: از مصالحی که روی راه پخش و متراکم می‌شود از هر ۱۰۰۰ متر مکعب یکبار آزمایش دانه‌بندی و ارزش ماسه‌ای انجام می‌شود.

ث: در صورتی که دستگاه نظارت لازم تشخیص دهد برای سایر آزمایش‌های مورد نیاز اقدام می‌شود.

اساس:

الف: از مصالح تهیه شده در پای کار نمونه‌برداری شده و آزمایش‌های بند ۱-۲-۳ تا ۳-۲-۳ انجام شود تا در صورتی که مصالح طبق مشخصات نباشد اصلاح گردد. پس از شروع پروژه باید هر دو ماه یکبار این آزمایش‌ها روی نمونه‌های سرباره انجام شود. همچنین در صورتی که منبع تأمین یا فرآیند تولید سرباره تغییر کند نیز بایستی این آزمایش‌ها مجدداً انجام شوند.

ب: به ازای هر ۵۰ متر از طول راه یک آزمایش تعیین وزن مخصوص محلی انجام می‌شود (به ترتیب در وسط، چپ و راست)، و در صورتی که عرض راه زیاد باشد یک آزمایش برای هر ۷۵ متر مکعب مصالح به عمل می‌آید. ضخامت لایه زیراساس در هر آزمایش اندازه‌گیری و گزارش می‌شود.

پ: آزمایش تراکم آزمایشگاهی به ازای هر ۵۰۰ متر مکعب مصالح یک بار صورت می‌گیرد و در صورتی که جنس مصالح تغییر کند، آزمایش بیشتری به عمل می‌آید.

ت: از مصالحی که روی راه پخش و متراکم می‌شود از هر ۵۰۰ متر مکعب یکبار آزمایش دانه‌بندی، درصد شکستگی و ارزش ماسه‌ای انجام می‌شود.

ث: در صورتی که دستگاه نظارت لازم تشخیص دهد برای سایر آزمایش‌های مورد نیاز اقدام می‌شود.

مراجع

- Aiban, S.A. (2006). Utilization of Steel Slag Aggregate for Road Bases. *Journal of Testing and Evaluation* Volume 34, No.1, pp 65-75. <https://doi.org/10.1520/JTE12683>.
- TM, (2006). Standard test method for potential expansion of aggregates from hydration reactions. American Society for Testing and Materials, ASTM D 4720.
- Barksdale, R.D. (1991). *The aggregate handbook*. Washington, DC: Nationals Stone Association.
- Bialucha, R., Nicoll, R. & Wetzel, T. (2007). Long term behavior of steel slag used for unbound rural roads. In: *The 5th European slag conference*, September 19–21, 2007, Luxembourg.
- Brito, J.D. & Agrela, F. (2018). *New Trends in Eco-Efficient and Recycled Concrete*. Duxford, UK: Woodhead Publishing.
- Buitrago N.D.T., Oliveira V.H.S., Ribeiro L.F.M., Cavalcante A.L.B. & Monteiro F.F. (2021). Applicability Evaluation of Mixtures of Steel Slag Aggregate with Lateritic Soil as Base Material for Road Pavements. In: Reddy K.R., Agnihotri A.K., Yukselen-Aksoy Y., Dubey B.K. & Bansal A. (eds) *Sustainable Environment and Infrastructure. Lecture Notes in Civil Engineering*, Volume 90. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51354-2_21.
- Calkins, M. (2009). *Materials for sustainable sites*. Hoboken, NJ: John Wiley.
- Collins, R.J., & Cielieski, S.K. (1994). Recycling and use of waste materials and by-products in highway construction. National Cooperative Highway Research Program, Synthesis of Highway Practice 199. Transportation Research Board, Washington, DC.
- Derucher, K.N., Korfiatis, G.P., & Ezeldin, A.S. (1998). *Materials for civil and highway engineers* (4th edition). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Dunster, A.M. (2002). Blastfurnace slag and steel slag as aggregate: A review of their uses and applications in UK construction. In: *Proceedings of the 3rd European slag conference*, October 2–4, Keyworth, the UK.
- Emery, J.J. (1974). A simple test procedure for evaluating the potential expansion of steel slag. In *Annual conference of the Roads and Transportation Association of Canada*, September 23–26.
- Emery, J.J. (1993). *Steel Slag Aggregates Use in Hot Mix Asphalt Concrete*. Final Report, Geotechnical Engineering Limited for the Steelmaking Slag Technical Committee.
- Farrand, B., & Emery, J.J. (1995). Recent improvements in quality of steel slag aggregate. *Transportation Research Record*, 1486, 137–141.
- Feldman, R.M. (1981). *Tufa Precipitation and Its Effect on Drainage of Highways*. Report, Kent State University.
- FHWA. (1997). *User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction*. Federal Highway Administration. Publication Number: FHWA-RD-97-148. <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/ssa1.cfm>.
- Geiseler, J. (1996). Use of Steel Works Slag in Europe. *Waste Management Journal*, 16(1–3), 59–63.
- Gonawala, R.J., Khapre, s., Kumar, R. & Chauhan, K.A. (2019). Suitability of EAF slag and GGBFS mix as cementitious base/subbase layer for low volume road construction, *International Journal of Geotechnical Engineering*, DOI: 10.1080/19386362.2019.1621458 .
- Grubeša, I.N., Barisic, I., Fucic, A. & Bansode, S.S. (2016). *Characteristics and Uses of Steel Slag in Building Construction*. Duxford, UK: Woodhead Publishing.
- Gupta, J.D., & W.A. Kneller. (1993). *Precipitate Potential of Highway Subbase Aggregates*. Report No. FHWA/OH-94/004, Prepared for the Ohio Department of Transportation.

- Hewlett, P.C. (1998). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete* (4th edition). Burlington, MA: Elsevier.
- IranSlag, www.iranslag.com, Accessed Jan, 2021.
- Jones, J.A.T. (2014). *Electric Arc Furnace Steelmaking*. AISI, Steelworks. <http://www.steel.org/>.
- Kneller, W.A., Gupta, J., Borkowski, M.L. & Dollimore, D. (1994). Determination of Original Free Lime Content of Weathered Iron and Steel Slags by Thermogravimetric Analysis. *Transportation Research Record* 1434, National Research Council, Washington, DC.
- Kokal, H.R. (2006). *Fluxes for Metallurgy*. In: *Industrial Minerals and Rocks, Commodities, Markets, and Uses*. (7th edition). Littleton, CO: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Lea, F.M. (2004). *Chemistry of Cement and Concrete* (4th edition). Revere, MA: Chemical Publishing Company, Inc. 2004.
- Liu, J., Yu, B. & Wang, Q. (2020). Application of steel slag in cement treated aggregate base course. *Journal of Cleaner Production*, Volume 269, 121733. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121733>.
- Luo, S. (1980). Effect of MgO in Steel Slag on Soundness of Cement. In: *Proceedings of the 7th International Congress on the Chemistry of Cement*, Paris, 3, pp 25-30.
- Maghool, F., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S. & Du Y.J. (2017). Laboratory Evaluation of Ladle Furnace Slag in Unbound Pavement-Base/Subbase Applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Volume 29, Issue 2. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001724](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001724).
- Medgar, L.M., Nisbet, M.A., & Van Geem, M.G. (2006). Life cycle inventory of Portland cement manufacture. PCA R&D Serial No. 2095b. Skokie, IL: Portland cement Association.
- Montgomery, D., & Wang, G. (1993). Engineering uses of slag - a by-product material. In: *Proceedings of the International Conference on Environmental Management, Geo-Water & Engineering Aspects*, NSW, Australia, 1993.
- Narita, K., Onoye, T. & Z. Takata. (1978). On the Weathering Mechanisms of LD Converted Slag (in Japanese). Koba Steel Ltd., Japan.
- Noureldin, A.S. & McDaniel, R.S. (1990). Evaluation of surface mixtures of steel slag and asphalt. *Journal of Transportation Research Board*, 1990, 133–149.
- Pasetto, M. & Baldo, N. (2016). Recycling of waste aggregate in cement bound mixtures for road pavement bases and sub-bases. *Construction and Building Materials*, Volume 108, Pages 112-118. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.023>.
- Patel, S. & Shahu, J.T. (2017). Comparative Study of Slags Stabilized with Fly Ash and Dolime for Utilization in Base Course. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Volume 29, Issue 10. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002017](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002017).
- Pearce, A.R. & Ahn, Y.H. (2012). *Sustainable building and infrastructure-Paths to the future*. Glasgow, UK: Routledge Taylor and Francis.
- PIARC. (1989). *Marginal Materials. State of the Art Report*, Permanent International Association of Road Congresses, Paris.
- Ramzi, T., Okan, S., Husam, S. (2014). Recycling of Local Qatar's Steel Slag and Gravel Deposits in Road Construction. *International Journal of Waste Resources*, Volume 4, No 4.
- Reis Ferreira, S.M., Correia A.G., Rogue A. & Cavalheiro A.M. (2010). Mechanical and Environmental Behavior of Granular Materials Application to National Steel Slag. *Semana de Engenharia*. Guimaraes.

- Rollings, M.P., & Rollings, R.S. (1996). *Geotechnical materials in construction*. New York, NY: McGraw-Hill.
- Saghafi, B., Al Nageim, H., Visulios, P. & Ghazireh, N. (2013). Use of Waste Limestone Dust and Steel Slag in UK Highways Type 1 Unbound Mixtures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, Volume 166, Issue 2, pp 99-107. <https://doi.org/10.1680/coma.11.00029>.
- Seetharaman, S. (2005). *Fundamental of Metallurgy*. Boca Raton, FL: Woodhead Publishing and CRC Press.
- Sersale, R., Amicarelli, V., Frigione, G., et al. (1986). A study on the utilization of an Italian steel slag. In: *Proc. 8th International Congress on the Chemistry of Cement*, Rio de Janeiro, Brazil, 194–198.
- Shen, W., Zhou, M., Ma, W., Hu, J., & Cai, Z. (2009). Investigation on the application of steel slag-fly ash-phosphogypsum solidified material as road base material. *Journal of Hazardous Materials*, 164(1), 99–104.
- Shi, C. (2004). Steel slag - its production, processing, characteristics, and cementitious properties. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*. 16(3), 230–236.
- Shiha, M., El-Badawy & S., Gabr, A. (2020). Modeling and Performance Evaluation of Asphalt Mixtures and Aggregate Bases Containing Steel Slag. *Construction and Building Materials*, Volume 248, No 118710.
- Singh, A. & Singh, S.K. (2018). Utilization of Slag in Partial Replacement of Road Aggregate. *International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology*, Volume 7, Issue 5. DOI: 10.15680/IJIRSET.2018.0705160.
- Spitz, K., & Trudinger, J. (2009). *Mining and the environment, from ore to metal*. London: Taylor and Francis.
- Stubbles, J. (2014). *The Basic Oxygen Steelmaking (BOF) Process*. AISI, Steelworks. <http://www.steel.org>.
- Thomson, M. (2005). Why is types hydrated lime special? In: *Proceedings of International Building Lime Symposium*, Orlando, FL, 2005.
- UK Steel. (2014). Ironmaking. <http://www.eef.org.uk/uksteel/About-the-industry/How-steel-is-made/step-by-step/Ironmaking.htm>.
- US EPA, (2010). US Federal Environment Protection Agency, Use of Recycled Industrial Materials in Roadways. <http://www.epa.gov/osw/conserves/rrr/imr/pdfs/roadways.pdf>.
- US Geological Survey (USGS). (2014). USGS yearbook.
- USGS, (2010). Industrial Solid Wastes, US Geological Survey. [http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron & steel slag/790400.pdf](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron&steelslag/790400.pdf).
- Vazquez, E., Barra, M., Perez, F., Alavedra, P., Scheibmeir, E., & Bou, M. (2010). Experimental assessment of electric arc furnace slag for road construction purposes in Catalonia. *Proceedings of the 6th European slag conference*, October 20–22nd, Madrid, Spain.
- Wang, G.C. (2016). *The Utilization of Slag in Civil Infrastructure Construction*. Duxford, UK: Woodhead Publishing.
- Wang, G.C. (2010). Determination of expansion force of steel slag coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 24(2010), 1961–1966.

- Wang, G., & Emery, J. (2004). Technology of slag utilization in highway construction. In: Proceedings of Annual Conference of Transportation Association of Canada, Quebec City, QC, 2004.
 - Wang, Y., & Lin, D. (1983). Steel slag blended cement. *Silicates Industrielles*, 6, 121–126.
 - Yildirim, I.Z. & Prezzi, M. (2011). Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag. *Advances in Civil Engineering*. <http://dx.doi.org/10.1155/2011/463638>.
 - Yoshida, N. (2016). Uniaxial Compressive Strength of Hydraulic, Graded Iron and Steel Slag Base-Course Material Produced at Different Manufacturers and its Increase with Curing Time. *Japanese Geotechnical Society Special Publication, Volume 2, Issue 46*, pp 1614-1618. <https://doi.org/10.3208/jgssp.TC202-13>.
- آقای پور، آ. و مدح‌خوان، م. (۱۳۹۴)، «بررسی تأثیر سرباره کوره بلند آسیاب شده بر روی درصد رطوبت، تراکم و مقاومت فشاری بتن غلتکی روسازی، و مقایسه با روش تاگوچی»، سومین کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری، ایران، تهران.
 - احمدی، ا.، فخری، م. و عاملی، ع. (۱۳۹۶)، «مقایسه شاخص‌های استاتیکی و دینامیکی مقاومت در برابر تغییرشکل برای سنجش پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی مصالح بازیافتی»، فصلنامه علمی پژوهشنامه حمل و نقل، دوره ۱۴، شماره ۴، ص ۱۴۵-۱۲۹.
 - جهان‌بخش، ح.، مبینی، م.، قوامی جمال، ص. و مقدس‌نژاد، ف. (۱۳۹۹)، «ارزیابی تأثیر غبار کوره سیمان بر عملکرد ملات قیر امولسیون-سیمان حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی و خاکستر بادی برای زیرسازی راه آهن سریع‌السیر بدون بالاست»، فصلنامه مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، دوره ۶، شماره ۳، ص ۶۷-۴۷.
 - خسروی‌پناه، ح. و جلیلی، م. (۱۳۹۶)، «اثر تثبیت با سرباره کوره‌های ذوب فلزات و آهک بر خواص خمیری خاک رس واگرای استان گلستان»، کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری و شهرسازی ایران معاصر، ایران، تهران.
 - راپل، م.، مناف‌پور، م. و مناف‌پور، ع. (۱۳۹۳)، «مطالعه آزمایشگاهی تأثیر سرباره کوره آهن‌گدازی و ملات بین لایه‌ای بر نفوذپذیری ذاتی و بین لایه‌ای سدهای بتنی غلتکی»، هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، ایران، بابل.
 - رحمانی، ا.، افشاری، م.، آرایی آقای، ع. و عطارچیان، ن. (۱۳۹۹)، «بررسی اثر انرژی تراکم، دانه‌بندی و نوع سرباره فولادی بر مشخصات تراکمی و نسبت باربری کالیفرنیا»، فصلنامه علمی پژوهشنامه حمل و نقل، سال ۱۷، دوره ۲، شماره ۶۳، ص ۱۵۰-۱۳۷.
 - رضایی حسین‌آبادی، م. (۱۳۹۴)، «ارزیابی بتن متخلخل سرباره‌ای به عنوان رویه در روسازی‌های بتنی در راستای تکنولوژی پایدار و حفظ محیط زیست»، دومین کنفرانس عمران، معماری و شهرسازی کشورهای جهان اسلام، ایران، تبریز.

- زال‌نژاد، م. و حسامی، ا. (۱۳۹۶)، «ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر استفاده از مصالح سرباره فولادی بر مشخصات چسبندگی و شیارشدگی آسفالت حفاظتی میکروسرفیسینگ»، کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری و شهرسازی ایران معاصر، ایران، تهران.
- زال‌نژاد، م. و حسامی، ا. (۱۳۹۸)، «ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر استفاده از سرباره فولاد بر مشخصات آسفالت حفاظتی میکروسرفیسینگ»، فصلنامه مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، دوره ۵، شماره ۱، ص ۱۶-۳۵.
- سالک بافقی، م. و خیبری، م. (۱۳۹۶)، «بررسی اثرات دانه‌بندی و شکل سنگدانه‌ها بر مقاومت لغزندگی مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای»، فصلنامه علمی پژوهشنامه حمل و نقل، دوره ۱۴، شماره ۱، ص ۲۱۸-۲۳۶.
- شعرباغیان، س.، صحاف، ع. و محمدزاده مقدم، ا. (۱۳۹۸)، «بررسی آزمایشگاهی خواص ملات ماسه سیمان آسفالتی نوع ۲ حاوی سرباره کوره قوس الکتریک»، کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، معماری و بازآفرینی شهری، آلمان، مونیخ.
- شفابخش، غ. و احمدی، س. (۱۳۹۸)، «بررسی تأثیر استفاده از سرباره فولاد و اندودهای سطحی مختلف بر عملکرد مقاومت برشی بین لایه‌ای روسازی مرکب»، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۱۱، شماره ۲، ص ۴۷۵-۴۹۹.
- شهبازی، م.، روشن ضمیر، م. و ابطحی، م. (۱۳۹۴)، «بررسی اثر تثبیت‌کننده و تسلیح‌کننده زیست محیطی روی خصوصیات مکانیکی خاک رس تورم‌پذیر»، دهمین کنگره ملی مهندسی عمران، ایران، تبریز.
- صیادی، ح. (۱۳۹۱)، «بررسی خواص فیزیکی سرباره فولاد بعنوان بالاست در خطوط ریلی»، نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، ایران، اصفهان.
- ضیائی، س. و بهنیا، ک. (۱۳۹۹)، «ارزیابی آزمایشگاهی مخلوط‌های آسفالت داغ حاوی سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی»، فصلنامه مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، دوره ۶، شماره ۲، ص ۱-۲۰.
- عامری، م. و زارعی، ذ. (۱۳۸۸)، «ارزیابی آزمایشگاهی اثر سرباره فولاد بر مقاومت لغزندگی مخلوط‌های آسفالتی»، هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، ایران، شیراز.
- عامری، م.، شکرچی‌زاده، م. و شهابی شه‌میری، ح. (۱۳۸۸)، «بررسی تأثیر استفاده از سرباره کنورتور ذوب آهن اصفهان به عنوان جایگزین سنگدانه بر بتن غلتکی روسازی راه»، هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، ایران، شیراز.
- عامری، م.، امیری هرمزکی، م.، وامق، م. و خیبری، م. (۱۳۹۸)، «ارزیابی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی گرم (WMA) با مواد افزودنی‌های گرم آلی و شیمیایی»، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۱۰، شماره ۴، ص ۹۸۷-۱۰۰۲.

- عبدی، م. و طهماسبی، م. (۱۳۸۸)، «تأثیر سرباره فولادسازی بر دوام خاک‌های ریزدانه»، هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، ایران، شیراز.
- عموزاده عمرانی، م. و حصیرچیان، م. (۱۳۹۹)، «بررسی اثر سرباره فولاد و مصالح خرده آسفالتی بر خصوصیات مکانیکی و آلاینده‌های روسازی بتن غلتکی»، فصلنامه مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، دوره ۶، شماره ۲، ص ۸۷-۱۰۸.
- فخری، م.، احمدی، ا.، علی‌نسب، ر. و کریمی گوغری، م. (۱۳۹۶)، «بررسی آزمایشگاهی رفتار فیزیکی و مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با مصالح سنگی سرباره‌ای»، فصلنامه علمی پژوهشنامه حمل و نقل، دوره ۱۴، شماره ۲، ص ۲۲۷-۲۳۸.
- فرهاد ملاشاهی، ح.، جلیلی قاضی‌زاده، م.، محمدزاده مقدم، ا. و عباس قربانی، م. (۱۳۹۵)، «مقایسه تغییرشکل‌های ماندگار مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره کوره اکسیژنی با مخلوط‌های حاوی سرباره کوره قوس الکتریک»، نهمین کنگره ملی مهندسی عمران، ایران، مشهد.
- کاووسی، ا.، جلیلی قاضی‌زاده، م. و حسنی، ا. (۱۳۹۴)، «بررسی تأثیر پیرشدگی آزمایشگاهی دراز مدت بر رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره‌های قوس الکتریک و کوره اکسیژنی»، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۷، شماره ۱، ص ۱۰۵-۱۲۰.
- کی‌منش، م. و ذبیحیان، ر. (۱۳۹۶)، «بررسی اثر استفاده از سرباره‌ها در روسازی راه‌ها به منظور بهبود ارتقای خواص مقاومتی و کیفیت راه‌ها»، کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری و شهرسازی ایران معاصر، ایران، تهران.
- محبی، ر.، بهفرنیا، ک.، شجاعی، م. و علاپور، ف. (۱۳۹۳)، «بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن قلیا فعال سرباره‌ای با استفاده از روش تاگوچی»، هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، ایران، بابل.
- مبارکه، م. (۱۳۹۶)، «بررسی آزمایشگاهی تأثیر سرباره کوره‌های قوس الکتریک بر روی پارامترهای مقاومت برشی خاک فروریزنده»، کنفرانس عمران، معماری و شهرسازی کشورهای جهان اسلام، ایران، تبریز.
- مسعودی، س.، ابطحی، م. و گلی خوراسگانی، ا. (۱۳۹۵)، «بررسی عملکرد بلندمدت مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی سرباره فولاد کوره قوس الکتریک»، فصلنامه مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، دوره ۲، شماره ۴، ص ۲۳-۴۲.
- معظمی، د.، صحاف، س. و محمدزاده مقدم، ا. (۱۳۹۹)، «رفتار خزشی در مخلوط‌های آسفالتی سنگدانه‌ای حاوی مصالح سنگی مصنوعی و ذرات پلاستیک ضایعاتی»، نشریه مهندسی عمران فردوسی، سال ۳۳، شماره ۱، ص ۴۹-۶۶.
- مکارچیان، م. و نادری، ح. (۱۳۸۹)، «تأثیر رطوبت بر مقاومت CBR خاک تثبیت‌شده با آهک و سرباره کوره ذوب آهن (GGBS) در مجاورت سولفات»، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، ایران، مشهد.

- مکارچیان، م. و صفا، م. (۱۳۹۲)، «اثر تثبیت‌کننده‌های آهک و سرباره فولادسازی کارخانه ذوب آهن اصفهان و آلاینده‌های شیمیایی روی تراکم‌پذیری خاک رسی کائولینیت»، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، ایران، زاهدان.
- مکارچیان، م. و صیفوری، ن. (۱۳۹۴)، «بررسی پارامتر دوام (DI) خاک رس تثبیت‌شده با آهک و سرباره فولادسازی (BOS) کارخانه ذوب آهن اصفهان»، دهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، ایران، تبریز.
- مکارچیان، م. و کوری‌زاده، س. (۱۳۹۴)، «ارزیابی الیاف کنف و سرباره فولاد کوره قوس الکتریکی در آسفالت با استخوان‌بندی درشت‌دانه (SMA)»، دهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، ایران، تبریز.
- مکارچیان، م.، نجاتی، م. و مرشدی نجات، ف. (۱۳۹۴)، «تأثیر سربار دانه‌ای کوره بلند ذوب آهن (GGBS) بر دوام خاک رس تثبیت‌شده با آهک در آزمایش یخ زدن و آب شدن»، دهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، ایران، تبریز.
- معافی مدنی، س.، چوبدار، ا. و عاملی، ع. (۱۳۹۹)، «ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر سرباره فولاد بر خصوصیات خستگی مخلوط‌های آسفالتی گرم»، فصلنامه علمی پژوهشنامه حمل و نقل، دوره ۱۷، شماره ۱، ص ۲۶-۱۵.
- میرابی مقدم، م. و اکبری، ع. (۱۳۹۴)، «بررسی آزمایشگاهی تأثیر دما بر مقاومت لغزندگی انواع مخلوط‌های آسفالتی»، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۶، شماره ۴، ص ۷۱۶-۷۰۳.
- میرمحمدصادقی، س.، هاشمی‌نژاد، آ.، ودادی، پ. و آزادبخش، ا. (۱۳۹۳)، «بررسی مقاومت ساییدگی سرباره فولاد برای استفاده به عنوان بالاست در خطوط راه آهن»، هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، ایران، بابل.
- هاشمی طباطبایی، س.، آقایی آرای، ع.، کاتبی، ب. و سلامت، ا. (۱۳۹۷)، «استفاده از سرباره فولاد مخلوط با خاکستر جهت تثبیت لایه زیراساس جاده»، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، فصلنامه علمی مهندسی ساختمان و علوم مسکن، دوره ۱۲، شماره ۲۲، ص ۱۹-۱۳.

**Islamic Republic of Iran
Plan and Budget Organization**

Guideline for Usage of Ferrous Slags in Base and Subbase layers of Pavement

NO:

Last Edition: 2022-2-26

**Deputy of Technical,
Infrastructure and Production Affairs
Department of Technical and
Execution Affairs**

**The Ministry of Road & Urban
Development
Road, Housing & Urban Development
Research Center**

Nezamfanni.ir

Bhrc.ac.ir

2022