





IRANIAN MINES AND MINING INDUSTRIES DEVELOPMENT
AND RENOVATION ORGANIZATION

سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران

تهیه و تدوین راهنمای کاربرد سرباره فولاد در خاکریزهای مهندسی راه و راه آهن (گزارش مدیریتی)

قرارداد شماره ۱۶۲۳۲

مرکز تحقیقات راه مسکن و شهرسازی

ناهید عطارچیان

عطا آقایی

سال ۱۴۰۱

همکاران پروژه (به ترتیب الفبا):

دکتر مرتضی اسماعیلی
مهندس علی اصغر اکبری نسرکانی
دکتر ایرج رحمانی
مهندس امیرسعید سلامت
دکتر محمد شکرچی زاده
دکتر حسن قاسم زاده
دکتر احمد منصوریان
مهندس سید حسین یزدانی طبائی

چکیده

یکی از عمده‌ترین کاربردهای سرباره فولاد در جهان در پروژه‌های راهسازی و همچنین احداث خطوط راه آهن است. استفاده از مصالح سرباره فولاد در پروژه‌های عمرانی ضمن رفع مشکلات ناشی از انباشت این مصالح در اطراف کارخانه‌ها، منجر به کاهش برداشت مصالح از منابع طبیعی و مانع تخریب محیط‌زیست می‌شود. باید در نظر داشت که دسترسی به مصالح طبیعی جهت استفاده در انواع خاکریزهای مهندسی، همیشه امکان پذیر نیست و در بعضی مناطق، منابع قرصه سنگی و آبرفتی محدود می‌باشد. تسریع توسعه پایدار نیازمند یافتن جایگزینی مناسب برای مصالح طبیعی است و از طرفی با توجه به محدودیت‌های مالی و اعتباری، استفاده از مصالح جایگزین باید ضمن تامین سطح ایمنی و کیفیت، مقرون به صرفه نیز باشد. در اروپا، آمریکا و ژاپن براساس نتایج مطالعات و پژوهش‌های انجام شده، ضوابط و معیار فنی برای استفاده از مصالح سرباره آهن و فولاد در خاکریزهای مهندسی تدوین شده و استفاده از این مصالح عملیاتی شده است.

در ایران با توجه به حجم زیاد تولید و انباشت سرباره آهن و فولاد ضروری است تا با تهیه ضوابط و مراجع فنی متناسب با ویژگی‌های سرباره‌های تولید داخل، زمینه استفاده از این مصالح در پروژه‌های عمرانی کشور فراهم شود. امور نظام فنی و اجرایی سازمان برنامه و بودجه عهده‌دار تهیه ضوابط و استانداردهای فنی و قراردادی طرح‌های عمرانی (از محل وجوه عمومی) است. درج ردیف استفاده از مصالح سرباره فولاد در فهرست بها واحد رشته راه، راه‌آهن و باند فرودگاه نیز براساس دستورالعمل‌ها و راهنمای کاربرد این مصالح قابل انجام است.

در این پروژه پس از گردآوری و تحلیل مطالعات و پژوهش‌های ملی و بین‌المللی پیرامون مشخصات فیزیکی، شیمیایی، مکانیکی، دینامیکی و زیست محیطی مصالح سرباره فولاد، معیارهای پذیرش برای کنترل مشخصات فنی مصالح سرباره آهن و فولاد معرفی شده و نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی تعدادی از نمونه‌های سرباره فولاد تولید داخل کشور ارائه شده است. براساس نتایج حاصله راهنمای استفاده از این

مصالح در خاکریزهای مهندسی راه و راه آهن تدوین و ارائه شده است. راهنماهای تدوین شده به نظام امور فنی و اجرایی کشور ارائه شده است و بر این اساس در فهرست بها واحد رشته راه، راه آهن و باند فرودگاه سال ۱۴۰۱؛ ردیف‌های مربوط به استفاده از مصالح اساس و زیراساس سرباره‌ای در فصول ۱۴ و ۲۰ اضافه شدند.

فهرست مطالب

عنوان	شماره صفحه
فصل اول مشخصات و کاربردهای سرباره فولاد	۱
۱-۱- انواع سرباره های آهن و فولاد، مشخصات فیزیکی و شیمیایی	۱
۱-۲- میزان تولید سرباره فولاد و زمینه های کاربرد	۴
فصل دوم خلاصه نتایج آزمون ها	۷
۱-۲- مشخصات مصالح سرباره ای و فهرست آزمون ها	۷
۲-۲- خلاصه نتایج آزمون ها	۸
فصل سوم مشخصات فنی مصالح اساس و زیراساس و بالاست و زیربلاست	۱۲
۱-۳- مشخصات فنی مصالح اساس و زیراساس سرباره ای	۱۲
۲-۳- مشخصات فنی مصالح بالاست و زیربلاست سرباره ای	۱۳

فهرست شکل ها

عنوان	شماره صفحه
فصل اول مشخصات و کاربردهای سرباره فولاد	۱
شکل ۱-۱: فرآیندهای تولید آهن و فولاد و تشکیل انواع سربارهها (WANG, 2016)	۱
شکل ۲-۱: انواع سرباره بر اساس روش خنک سازی (GRUBEŠA ET AL., 2016)	۲
شکل ۳-۱: میزان تولید سرباره فولاد در دنیا (WSA, ۲۰۱۸)	۵
شکل ۴-۱: سهم هر یک از زمینهای کاربرد سرباره فولاد در دنیا (WSA, ۲۰۱۸)	۵
شکل ۵-۱: توزیع وزنی زمینهای کاربرد انواع سرباره فولاد در ژاپن و اروپا (BARATI & JAHANSHAHI, ۲۰۱۹)	۶

فهرست جدول ها

عنوان	شماره صفحه
فصل اول مشخصات و کاربردهای سرباره فولاد	۱
جدول ۱-۱: محدوده مقادیر ترکیبات شیمیایی انواع سرباره های فولاد (WANG, 2016)	۲

- جدول ۱-۲: محدوده مقادیر ترکیبات شیمیایی سرباره فولاد کوره اکسیژنی (BOF) در ایران ۳
- جدول ۱-۳: محدوده مقادیر ترکیبات شیمیایی سرباره فولاد کوره قوس الکتریکی (EAF) در ایران ۳
- فصل دوم خلاصه نتایج آزمون ها ۷
- جدول ۱-۲: فهرست مجموعه آزمونهای انجام شده ۷
- جدول ۲-۲: خلاصه نتایج حاصل از انجام آزمونها ۸
- فصل سوم مشخصات فنی مصالح اساس و زیراساس و بالاست و زیربالات ۱۲
- جدول ۱-۳: مشخصات فیزیکی و مکانیکی سرباره آهن و فولاد برای استفاده در اساس و زیراساس ۱۲
- جدول ۲-۳: دانه بندی های مصالح اساس و زیراساس ۱۲
- جدول ۳-۳: مشخصات شیمیایی سرباره آهن و فولاد برای استفاده در اساس و زیراساس ۱۳
- جدول ۳-۴: درصد وزنی عبوری مجاز از الک های مختلف برای زیربالات سرباره ای ۱۴
- جدول ۳-۵: درصد وزنی عبوری از الک های مختلف برای مصالح بالاست مصرفی در راه آهن ایران (نشریه ۳۰۱، ۱۳۸۴) ۱۴
- جدول ۳-۶: آزمون های کنترل کیفیت و معیارهای پذیرش مصالح زیربالات سرباره ای ۱۵
- جدول ۳-۷: آزمون های کنترل کیفیت و معیارهای پذیرش مصالح بالاست سرباره ای ۱۶
- جدول ۳-۸: الگوی بارگذاری پیشنهادی برای تعیین مدول برجهنگی بالاست/زیربالات ۱۷

مجموعه فعالیت‌ها به انجام رسیده در این پروژه که با هدف رفع یکی از مشکلات ملی پیرامون انباشت سرباره-های آهن و فولاد انجام شده است، بدون حمایت و پشتیبانی سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران امکان پذیر نبود. مساعدت‌های به عمل آمده در این زمینه شایسته تقدیر و تشکر است.

مقدمه

به طور کلی انجام پروژه "تهیه و تدوین راهنمای کاربردی سرباره فولاد در خاکریزهای مهندسی راه و راه آهن" ذیل قرارداد پژوهشی قرارداد ۱۶۲۳۲ به تاریخ ۱۳۹۹/۰۶/۰۳ شامل مراحل کاری زیر می‌باشد:

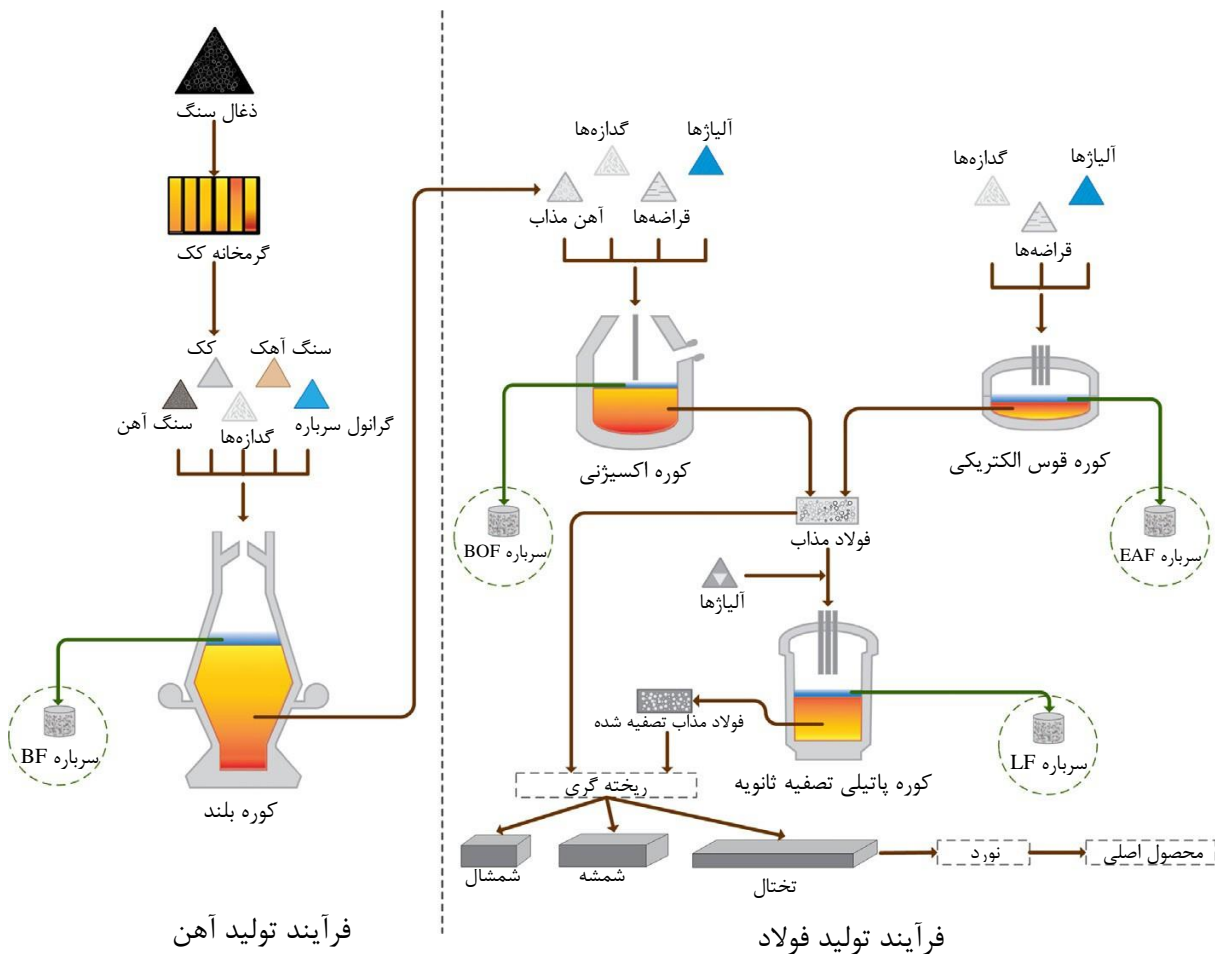
- ۱) برنامه‌ریزی پروژه و تشکیل کارگروه‌ها
- ۲) جمع‌آوری ادبیات فنی و مطالعات پیشین
- ۳) تهیه مصالح و انجام آزمایش‌ها
- ۴) تجزیه و تحلیل نتایج و مقایسه آن با نتایج موجود برای مصالح معمول و سرباره‌های فولاد مشابه و ارائه گزارش
- ۵) تدوین پیش‌نویس راهنمای فنی و اجرایی استفاده از مصالح سرباره فولاد برای کاربرد موضوع پروژه
- ۶) برگزاری جلسات کمیته بازخوانی راهنماها
- ۷) ارائه دستورالعمل ارزیابی کیفی مصالح سرباره فولاد برای کاربرد موضوع پروژه
- ۸) تهیه گزارش نهایی

گزارش نهایی این پروژه در ۳ جلد مطابق شرح خدمات قرارداد تهیه شده است. جلد اول گزارش در سه فصل تنظیم شده است و مشتمل بر مراحل اول و دوم می‌باشد. جلد دوم گزارش در یک فصل تنظیم شده است و حاوی گزارش مراحل سوم و چهارم مشتمل بر ۳) تهیه مصالح و انجام آزمایش‌ها و ۴) تجزیه و تحلیل نتایج و مقایسه آن با نتایج موجود است. در جلدهای ۳-الف و ۳-ب به ترتیب "راهنمای استفاده از سرباره‌های آهن و فولاد در لایه‌های اساس و زیر اساس روسازی راه" در یک فصل و "راهنمای استفاده از سرباره‌های آهن و فولاد به عنوان بالاست و زیربلاست راه آهن" در سه فصل و سه پیوست ارائه شده‌اند. شایان ذکر است که متن راهنما طی نامه شماره ۱۲۴۳۹-۶۵-۰۰ به تاریخ ۱۴۰۰/۰۷/۲۶ برای امور نظام فنی و اجرایی، مشاورین و پیمانکاران سازمان برنامه و بودجه ارسال شده است و در تارنمای سازمان در مرحله نظرخواهی قرار دارد. در ادامه خلاصه‌ای از یافته‌ها، نتایج و خروجی‌های پروژه ارائه شده است.

فصل اول مشخصات و کاربردهای سرباره فولاد

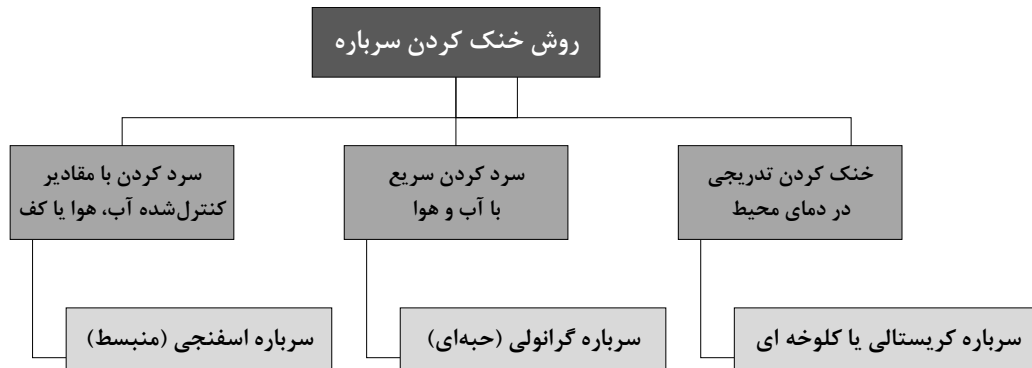
۱-۱- انواع سرباره های آهن و فولاد، مشخصات فیزیکی و شیمیایی

سرباره محصول جانبی در تولید مذاب یک فلز خاص مانند آهن، فولاد، مس، نیکل و...؛ شامل اکسیدهای پایدار فلزی و غیرفلزی می‌باشد. در شکل (۱-۱) انواع سرباره‌های آهن و فولاد براساس نوع فرآیند تولید نشان داده شده است. سرباره‌ها همچنین براساس روش خنک سازی نیز طبقه‌بندی می‌شوند (شکل ۱-۲). در جداول (۱-۱) الی (۱-۳) مشخصات شیمیایی انواع سرباره‌های آهن و فولاد در جهان و ایران ارائه شده است.



شکل ۱-۱: فرآیندهای تولید آهن و فولاد و تشکیل انواع سرباره‌ها (Wang, 2016)

فصل اول: مشخصات و کاربردهای سرباره های آهن و فولاد		
تاریخ گزارش: مرداد ماه ۱۴۰۱	ویرایش: ۱	صفحه: ۱



شکل ۱-۲: انواع سرباره بر اساس روش خنک سازی (Grubeša et al., 2016)

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

مقدار ترکیب (درصد)			اجزای تشکیل دهنده
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	اکسید آهن FeO
۰-۵	۲-۵	۵-۱۵	اکسید منگنز MnO
۱-۱۲	۳-۸	۳-۱۵	اکسید منیزیم MgO
۵-۳۵	۲-۹	۰/۹۸-۳/۴	آلومینا Al ₂ O ₃
۰/۱-۱	۰/۱-۰/۶	۰-۰/۳	تری‌اکسید گوگرد SO ₃
۰-۰/۴	۰-۱/۲	۰/۲-۴	پنتا اکسید فسفر P ₂ O ₅

بر اساس نتایج تجزیه شیمیایی، در سرباره‌های آهن و فولاد مقادیری آهک آزاد و اکسید منیزیم آزاد موجود است. با توجه به احتمال واکنش انبساطی این ترکیبات در مجاورت با آب ضروری است تا مقادیر این ترکیبات در سرباره‌های آهن و فولاد برای استفاده در لایه اساس و زیراساس، همچنین لایه بالاست و زیربلاست کنترل شود. با هدف کاهش میزان آهک نشکفته درون سرباره انباشت شده، بایستی سرباره آبیاری شود و به اندازه کافی زمان

داده شود تا آهک درون سرباره‌ها شکفته شود. در صورت عدم آبیایی مکانیزه و به شرط وجود بارندگی، حداقل زمان ماند سرباره در محل انباشت، ۶ ماه توصیه می‌شود.

جدول ۱-۲: محدوده مقادیر ترکیبات شیمیایی سرباره فولاد کوره اکسیژنی (BOF) در ایران

محدوده رانج	رحمانی و همکاران (۱۳۹۹)	زال‌نژاد و حسامی (۱۳۹۸)	کاووسی و همکاران (۱۳۹۴)	مکارچیان و صیغوری (۱۳۹۴)	شهبازی و همکاران (۱۳۹۴)	گودرزی و سلیمی (۱۳۹۳)	عامری و همکاران (۱۳۸۸)	عبدی و طهماسی (۱۳۸۸)	اجزای تشکیل‌دهنده
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	۰/۰۱-۰/۰۴	۰/۰۵	K ₂ O
<۰/۵	--	۰/۲۹	۰/۳۰	۰/۰۸	--	۰/۲	۰/۰۲-۰/۰۴	۰/۱۷	Na ₂ O
<۱۵	۴/۹۵	۲/۵	۲/۳۱	--	--	۸/۳	--	۱۲/۵۲	درصد افت وزنی در اثر حرارت LOI

جدول ۱-۳: محدوده مقادیر ترکیبات شیمیایی سرباره فولاد کوره قوس الکتریکی (EAF) در ایران

محدوده رانج	رحمانی و همکاران (۱۳۹۹)	ضیائی و بهنیا (۱۳۹۹)	شفابخش و احمدی (۱۳۹۸)	شعربافیان و همکاران (۱۳۹۸)	هاشمی و همکاران (۱۳۹۷)	مبارکه (۱۳۹۶)	احمدی و همکاران (۱۳۹۶)	کاووسی و همکاران (۱۳۹۴)	اجزای تشکیل‌دهنده
۲۴-۴۱	۳۱/۰۸	۲۷/۸۵	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

فصل اول: مشخصات و کاربردهای سرباره های آهن و فولاد

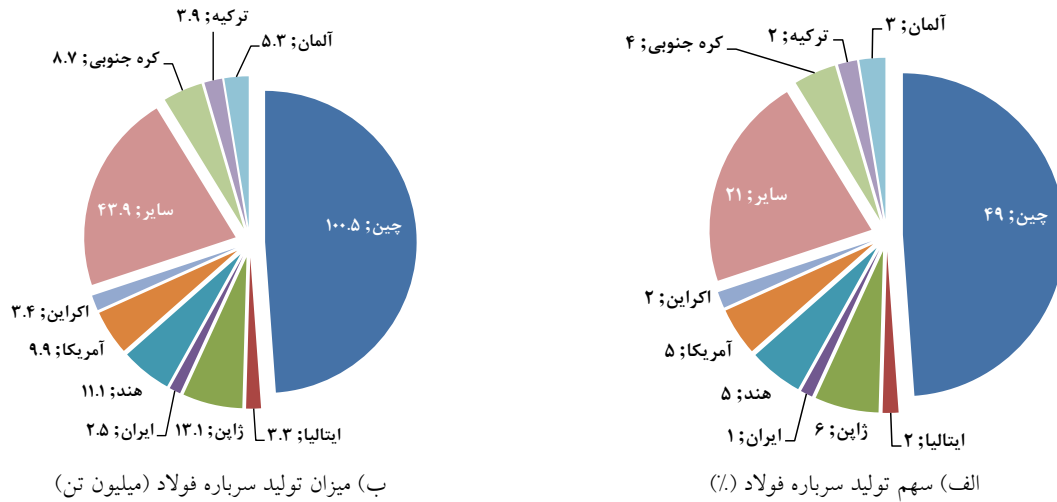
۰/۳-۳	--	۰/۳۹	--	۰/۳۲	--	۰/۶	۱	۲/۳۲	MnO
۰-۲/۵	--	۰/۴۷	--	۰/۴	--	۰/۹	۲	۱/۵۰	P ₂ O ₅
۰-۲/۵	--	۰/۷۱	--	۰/۵۳	--	۱/۲۲	--	۲/۱۱	TiO ₂
۰-۲/۵	۲/۰۸	۰/۲۷	--	۰/۲۸	۲/۱۵	--	--	۰/۴۸	SO ₃
<۱	--	۰/۸۲	۰/۳۸	۰/۷۲	--	--	--	۰/۳۴	Na ₂ O
<۱	--	۰/۶۹	--	۰/۸۹	--	--	--	۰/۲۵	K ₂ O
<۲۰	۱۶/۴۲	--	--	۱۷/۶۷	۱۰/۷۳	--	--	۱/۱۱	درصد افت وزنی در اثر حرارت LOI

۱-۲- میزان تولید سرباره فولاد و زمینه های کاربرد

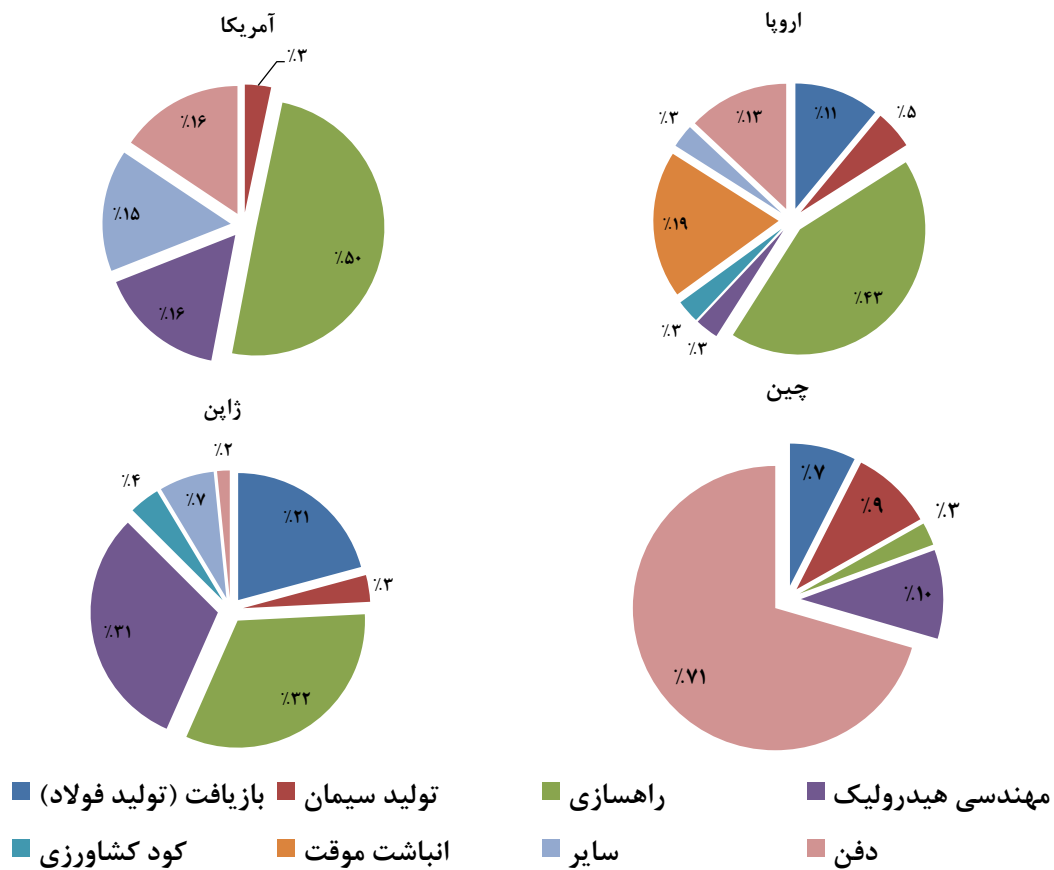
مطابق گزارش انجمن جهانی فولاد^۱ (۲۰۱۸)، مجموع تولید فولاد جهان در سال ۲۰۱۷ در حدود ۱۷۹۰ میلیون تن می‌باشد. طبق گزارش طرح جامع فولاد (۱۳۹۷)، ایران با تولید حدود ۲۵ میلیون تن فولاد در سال ۲۰۱۸، دهمین تولید کننده فولاد در جهان می‌باشد و هفتاد درصد سهم تولید فولاد در منطقه را در اختیار دارد. در شکل (۱-۳) میزان تولید سرباره فولاد در دنیا و سهم ایران از تولید جهانی سرباره فولاد نشان داده شده است. ایران سالانه ۲/۵ میلیون تن سرباره فولاد تولید می‌نماید که از این میزان حدود ۶۵۰ هزار تن از نوع BOF و الباقی (۱/۸۵ میلیون تن) از نوع EAF می‌باشد. این در حالی است که در دنیا تقریباً ۷۰٪ فولاد در کوره‌های اکسیژنی تولید شده و از این رو تقریباً ۷۰٪ سرباره فولاد در دنیا از نوع BOF می‌باشد. زمینه کاربرد سرباره‌ها در دنیا و میزان مصرف در هر زمینه کاربرد در نقاط مختلف دنیا متفاوت بوده و بیشتر وابسته به قوانین و مقررات محلی می‌باشد. آمار دقیقی پیرامون زمینه‌های کاربرد در کشورهای مختلف دنیا در دسترس نمی‌باشد. براساس آمار موجود، بهترین و بیشتر آمار بازیافت و مصرف سرباره‌ها در دنیا متعلق به اروپا و ژاپن می‌باشد. در شکل‌های (۱-۴) و (۱-۵) سهم هر یک از زمینه‌های کاربرد در اروپا، آمریکا، چین و ژاپن به عنوان عمده‌ترین تولید کنندگان سرباره فولاد در دنیا نشان داده شده است.

¹ World Steel Association

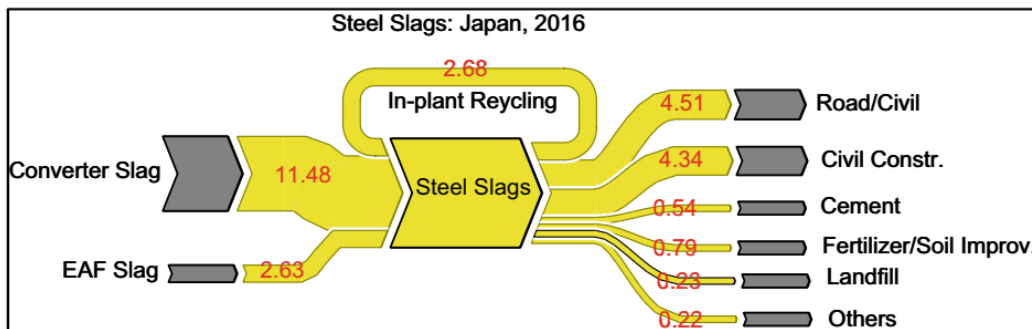
فصل اول: مشخصات و کاربردهای سرباره های آهن و فولاد	
تاریخ گزارش: مرداد ماه ۱۴۰۱	ویرایش: ۱
صفحه: ۴	



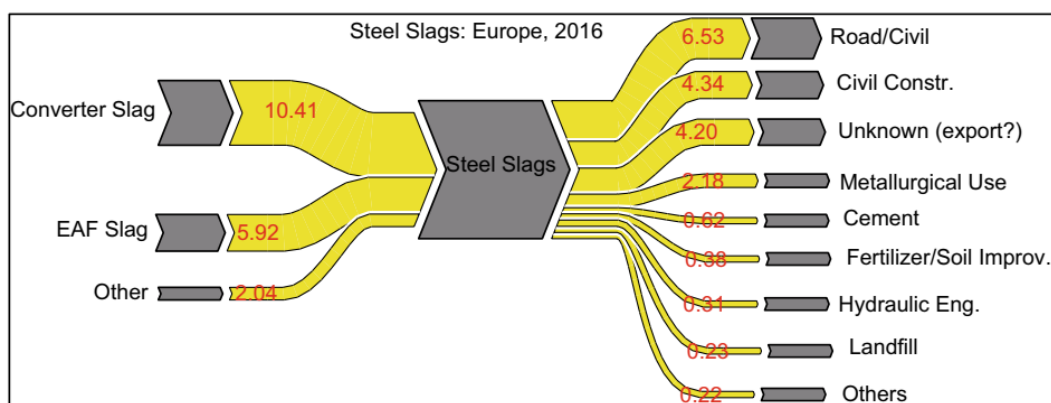
شکل ۱-۳: میزان تولید سرباره فولاد در دنیا (WSA، ۲۰۱۸)



شکل ۱-۴: سهم هر یک از زمینه‌های کاربرد سرباره فولاد در دنیا (WSA، ۲۰۱۸)



الف) توزیع وزنی زمینه‌های کاربرد در ژاپن



ب) توزیع وزنی زمینه‌های کاربرد در اروپا

شکل ۱-۵: توزیع وزنی زمینه‌های کاربرد انواع سرباره فولاد در ژاپن و اروپا (Barati & Jahanshahi, ۲۰۱۹)

فصل دوم خلاصه نتایج آزمون ها

۱-۲- مشخصات مصالح سرباره ای و فهرست آزمون ها

فهرست آزمون‌های انجام شده بر روی نمونه‌های سرباره فولاد و مصالح سنگی معدنی مطابق شرح خدمات پروژه در جدول (۱-۲) ارائه شده است.

جدول ۱-۲: فهرست مجموعه آزمون‌های انجام شده

شماره ردیف	گروه آزمون	عنوان آزمون	مصالح مورد بررسی	
۱	فیزیکی	وزن مخصوص	مصالح سنگی آهکی و آذرین، سرباره فولاد EAF و BOF فولاد مبارکه و خراسان	
۲		جذب آب		
۳		انتخاب دانه بندی		
۴		فیزیکی	چگالی حداکثر و حداقل	مصالح سنگی آذرین BOF و EAF خراسان و مبارکه
۵			تطویل و تورق	مصالح سنگی آهکی و آذرین، سرباره فولاد EAF و BOF فولاد مبارکه و خراسان
۶			مقاومت الکتریکی	مصالح سرباره فولاد و مصالح سنگی
۷			انبساط حجمی	مصالح سرباره فولاد BOF, EAF خراسان و مبارکه
۸	مقاومتی و دوام	سایش لوس آنجلس	مصالح سنگی آذرین BOF و EAF خراسان و مبارکه	
۹		سایش میکرودوال	مصالح سنگی آهکی و آذرین، سرباره فولاد EAF و BOF فولاد مبارکه و خراسان	
۱۰		ارزش ضربه‌ای	مصالح سنگی آهکی و آذرین، سرباره فولاد EAF و BOF فولاد مبارکه و خراسان	
۱۱		ارزش شکست		
۱۲		شاخص بار نقطه ای		
۱۳		سلامت سولفاتی		
۱۴		دوام (سیکل ذوب و یخ)	مصالح سرباره فولاد BOF, EAF خراسان و مبارکه	
۱۵	CBR	مصالح سرباره فولاد BOF, EAF		
۱۶	شیمیایی	XRD و XRF	مصالح سنگی آهکی و آذرین، سرباره فولاد EAF و BOF فولاد مبارکه و خراسان	
۱۷		تعیین ترکیبات شیرابه	مصالح سرباره فولاد BOF, EAF خراسان و مبارکه	
۱۸		تعیین درصد آهک آزاد و pH		
۱۹	دینامیکی	تعیین پارامترهای رفتاری	مصالح سنگی آذرین، BOF و EAF خراسان و مبارکه	

۲-۲- خلاصه نتایج آزمون ها

خلاصه نتایج حاصل از انجام آزمون‌ها به همراه مقایسه با معیارهای پذیرش موجود در جدول (۲-۲) ارائه شده است. شرح و تحلیل نتایج در بخش ۴-۲۱ جلد ۲ گزارش پروژه ارائه شده است.

جدول ۲-۲: خلاصه نتایج حاصل از انجام آزمون‌ها

ردیف	عنوان آزمون	خلاصه نتایج
۱	وزن مخصوص	میانگین مقدار وزن مخصوص درشت‌دانه مصالح سرباره فولاد EAF در حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد بیشتر از مقدار وزن مخصوص مصالح سنگی می‌باشد. مصالح سرباره فولاد مورد بررسی، معیار حداقل مقدار وزن مخصوص مصالح بالاست برابر با ۲/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب را برآورده می‌نمایند.
۲	جذب آب	درصد جذب آب مصالح سرباره فولاد مورد آزمایش، به دلیل بافت حفره‌دار و خلل و فرج موجود در سطح دانه‌ها، در حدود یک درصد و به طور متوسط بیشتر از مصالح سنگی معدنی است. حداکثر مقدار درصد جذب آب مجاز مصالح برای استفاده به عنوان مصالح اساس و زیر اساس راه برابر با ۲ درصد است.
۳	انتخاب دانه بندی	پس از انتخاب منحنی دانه‌بندی مصالح اساس، زیر بالاست و بالاست و کنترل معیار فیلتر، مقادیر چگالی حداکثر و حداقل توده‌ای مصالح تعیین شد. براساس نتایج حاصله برای مصالح بالاست، چگالی حداکثر خشک سرباره EAF خراسان، EAF مبارکه و BOF ذوب آهن به ترتیب: ۱/۷۹، ۱/۸۱ (۱/۹) و ۱/۴۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب و برای مصالح زیربلاست و اساس راه (دانه‌بندی ۲)، چگالی حداکثر خشک سرباره EAF خراسان، EAF مبارکه و BOF ذوب آهن به ترتیب: ۲/۴۰، ۲/۴۳ و ۱/۸۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب است.
۴	چگالی حداکثر و حداقل	
۵	تطویل و تورق	در نمونه‌های سرباره فولاد مورد بررسی، میزان تطویل و تورق در حدود ۵ تا ۱۳ درصد مشاهده شده است. سنگدانه‌های سرباره‌ای از شکل مکعبی بیشتری نسبت به توده مصالح سنگی مورد بررسی، برخوردار بودند. مطابق الزامات موجود مقدار درصد تورق مصالح اساس و زیر اساس باید کمتر از ۲۵ درصد باشد. این معیار برای مصالح بالاست و زیر بالاست برابر با ۵ درصد است.
۶	مقاومت الکتریکی	مقدار مقاومت ویژه الکتریکی به روش ۴ الکترودی و، در مصالح سرباره فولاد BOF و EAF به ترتیب برابر با ۴/۵ و ۳/۹ اهم کیلومتر می‌باشد. این درحالی که است که مقدار مقاومت ویژه الکتریکی برای مصالح سنگی معدن انجیل آوند در حدود ۷/۴ اهم کیلومتر است. افت مقاومت ویژه الکتریکی در مصالح سرباره فولاد می‌تواند متاثر از حضور اکسیدهای فلزی در این نمونه‌ها باشد.
۷	انبساط حجمی	میزان انبساط حجمی نمونه سرباره فولاد BOF مورد بررسی در پایان روز هفتم آزمون، کمتر از حداکثر انبساط حجمی مجاز برابر با ۰/۵ درصد مشاهده شد. در سایر نمونه‌های سرباره فولاد مورد آزمایش مقدار انبساط حجمی در نمونه‌ها ناچیز است.
۸	سایش لوس آنجلس	مقدار درصد سایش لوس آنجلس در نمونه‌های سرباره فولاد مورد بررسی، معیارهای موجود برای درصد سایش لوس آنجلس مجاز برای مصالح اساس و زیر اساس و بالاست و زیر بالاست خطوط راه آهن را برآورده می‌نماید. مطابق الزامات موجود مقدار حداکثر سایش لوس آنجلس مجاز مصالح اساس و زیر اساس ۵۰ درصد است. این معیار برای مصالح بالاست و زیر بالاست سرباره‌ای برابر با ۳۰ درصد است.

فصل دوم: خلاصه نتایج آزمون ها

تاریخ گزارش: مرداد ماه ۱۴۰۱	ویرایش: ۱	صفحه: ۸
-----------------------------	-----------	---------

ردیف	عنوان آزمون	خلاصه نتایج
۹	سایش میکرودوال	رفتار سایشی مصالح سرباره فولاد قابل مقایسه با رفتار مصالح سنگی معدنی می باشد و مقدار درصد سایش بدست آمده برای نمونه های مورد بررسی مابین مقادیر بدست آمده برای مصالح سنگی آهکی و آذرین قرار دارد. در کلیه نمونه های سنگی و سرباره ای مورد آزمایش مقدار درصد سایش میکرودوال کمتر از مقدار حداکثر مجاز برابر با ۲۵ درصد است.
۱۰	ارزش ضربه ای	میزان خردشدگی و افت وزنی مصالح سرباره ای در آزمون تعیین ارزش ضربه ای مصالح کمتر از مقادیر متناظر در مصالح سنگی معدنی است. تعداد محدود ضربات وارده در این آزمایش در تفسیر نتایج باید مورد ملاحظه قرار گیرد.
۱۱	ارزش شکست	ارزش شکست یا خردشدگی مصالح و مقاومت در برابر فشار وارده، در مصالح سرباره ای تقریباً مشابه مصالح سنگی می باشد و معیارهای موجود در زمینه حداکثر مقدار ارزش شکست مصالح را، برآورده می نمایند.
۱۲	شاخص بار نقطه ای	متوسط مقادیر شاخص بار نقطه ای در مصالح سرباره فولاد تقریباً نصف مقادیر نظیر آن در مصالح سنگی آذرین انجیل آوند و در حدود مقادیر بدست آمده برای مصالح سنگی آهکی فیروزکوه است. لیکن باید در نظر داشت که مقادیر شاخص بار نقطه ای در مصالح سرباره فولاد دارای پراکندگی و تغییرات زیاد در مقایسه با مصالح سنگی معدنی می باشد. ضریب تغییرات نتایج برای نمونه های سرباره فولاد و مصالح معدنی به ترتیب بیش از ۳۰ درصد و در حدود ۱۰ است. این تغییرات در شاخص بار نقطه ای که یکی از معیارهای تحمل بار مکانیکی می باشد، مبین حساسیت مصالح سرباره فولاد به اعمال بارهای مکانیکی و دینامیکی است.
۱۳	سلامت سولفاتی	درصد افت وزنی مصالح اساس و زیر بالاست سرباره ای در آزمون سلامت در حدود ۳ درصد و کمتر از حد ۱۲ درصد معیار پذیرش در این زمینه می باشد. مطابق نتایج حاصله بر روی مصالح مورد بررسی، درصد افت وزنی مصالح بالاست سرباره ای به طور قابل ملاحظه ای کمتر از مصالح سنگی معدنی می باشد و معیار پذیرش موجود در این زمینه برابر با ۵ درصد را برآورده می نماید.
۱۴	CBR	مقدار نسبت باربری کالیفرنیا CBR در مصالح سرباره فولاد مورد بررسی بالاتر از ۸۰ درصد بوده و به خوبی معیارهای موجود در این زمینه برای مصالح اساس و زیر اساس را برآورده می نماید.
۱۵	افت وزنی در آزمون ذوب و یخ	میزان افت وزنی مصالح سرباره فولاد مورد بررسی برای ۲۵ سیکل کمتر از معیار معرفی شده توسط نشریه ۳۵۵ (برای ۱۲ سیکل) بوده و در حد قابل قبول است. با ملحوظ نمودن افزایش تعداد سیکل های ذوب و یخ، می توان چنین جمع بندی و تحلیل نمود که کلیه نمونه های سرباره فولاد مورد آزمایش، حداکثر مجاز افت وزنی در برابر چرخه های ذوب و یخ را برآورده می نمایند.
۱۶	XRF و XRD	نتایج آزمون های XRF، XRD و ICP-MASS انجام شده بر روی نمونه های سرباره فولاد در گزارش ارائه شده است. مطابق نتایج حاصل از روش تحلیل شیمیایی XRF مقدار اکسیدهای آهن در نمونه های سرباره فولاد EAF در حدود ۳۰ الی ۴۰ درصد بیش از مقادیر اکسیدهای آهن موجود در نمونه های سرباره فولاد BOF می باشد. همچنین مجموع اکسیدهای آهن و فولاد موجود در نمونه های سرباره فولاد EAF بیش از ۳۰ درصد می باشد. مطابق معیارهای ارائه شده در دستنامه AREMA برای استفاده از مصالح سرباره فولاد به عنوان بالاست و زیربلاست خطوط راه آهن آمریکا ضرورتی ست، مجموع اکسیدهای آلومینیوم و آهن موجود در سرباره فولاد به زیر ۳۰ درصد محدود شود.
۱۷	تعیین ترکیبات شیرابه	با هدف ارزیابی غلظت مواد سمی و فلزات سنگین در پسماند خشک سرباره فولاد و همچنین و شیرابه خروجی از مصالح سرباره فولاد، غلظت فلزات سنگین به ترتیب مطابق EPA 3050 و EPA 1311 تعیین و استخراج شده است. مطابق بررسی های به عمل آمده، مقادیر فلزات سنگین در مصالح سرباره فولاد (پسماند خشک و شیرابه خروجی) در محدوده مجاز معرفی شده توسط EPA قرار دارد.

فصل دوم: خلاصه نتایج آزمون ها		
تاریخ گزارش: مرداد ماه ۱۴۰۱	ویرایش: ۱	صفحه: ۹

ردیف	عنوان آزمون	خلاصه نتایج
۱۸	مقدار pH و آهک آزاد	مقدار pH در نمونه‌های سرباره فولاد مورد آزمایش بین ۱۰ تا ۱۱ متغیر است. این مقدار pH می‌تواند باعث خوردگی لوله‌های گالوانیزه یا آلومینیوم عبوری از مجاورت راه که در تماس مستقیم با مصالح سرباره‌ای هستند، شود. از این رو ضروری است که در زمان اجرا این موارد مورد ملاحظه قرار گرفته و تدابیر لازم در این خصوص اتخاذ گردد. مقدار آهک آزاد در نمونه سرباره‌های BOF در حدود ۵ برابر مقدار آهک آزاد موجود در نمونه‌های سرباره فولاد EAF است، برای نمونه‌های سرباره فولاد مورد بررسی، مقدار آهک آزاد کمتر از مقدار حداکثر مجاز معرفی شده (برابر با ۳ درصد) برای استفاده از مصالح سرباره فولاد به عنوان مصالح لایه اساس و زیر اساس راه می‌باشد.
۱۹	تعیین پارامترهای رفتاری	آزمون‌های دینامیکی و عملکردی با سیکل زیاد بر روی مصالح بالاست و زیربلاست سنگی و سرباره‌ای با هدف ارزیابی رفتار بلندمدت مصالح و مقایسه رفتار مصالح سرباره‌ای با مصالح متداول بالاست در خطوط ریلی کشور انجام شد. نتایج حاصله نشان‌دهنده موارد زیر است: ۱- رفتار دینامیکی و عملکرد بلند مدت مصالح سرباره فولاد تحت اثر بارهای سیکلی، مشابه نمی‌باشد. در حالی که مطابق نتایج آزمون‌های انجام شده، رفتار دینامیکی نسبتاً پایدار در مصالح بالاست و زیربلاست سرباره‌ای BOF و مصالح سنگی معدنی مشاهده می‌شود، رفتار دینامیکی مصالح سرباره فولاد EAF متغیر و متفاوت است. ۲- بطور کلی در مصالح بالاست و زیربلاست سرباره فولاد EAF با افزایش تعداد سیکل و دامنه تنش سیکلی؛ همچنین کاهش فرکانس بارگذاری، مقادیر مدول برجهندگی کاهش می‌یابد. در حالی که رفتار مصالح سرباره فولاد BOF و مصالح سنگی انجیل‌آوند، دارای پایداری دینامیکی بوده و افت مقادیر مدول برجهندگی در سیکل‌های بالا مشاهده نمی‌شود. ۳- به طور کلی مقدار نشست مصالح در اثر اعمال بار دینامیکی در مصالح بالاست سرباره‌ای EAF خراسان بیشتر از EAF مبارکه و بیشتر از مصالح گرانیته انجیل‌آوند است. شکست و خردشدگی مصالح سرباره فولاد EAF در اثر اعمال بار سیکلی منجر به افزایش میرایی این مصالح و افت سریع مقدار مدول برجهندگی می‌شود. مشاهدات آزمایشگاهی نشان‌دهنده حساسیت، تردی و شکنندگی بیشتر مصالح سرباره فولاد EAF نسبت به اعمال بارهای دینامیکی سیکل زیاد است. شایان ذکر است مقادیر میرایی بالاست بیشتر از مقادیر نظیر زیربلاست سرباره است. ۴- تعداد سیکل‌های مسبب نشست ۲۵ میلیمتر (۶۰ سانتی‌متر ارتفاع بالاست) برای مصالح سرباره EAF خراسان، مبارکه و مصالح معدنی انجیل‌آوند به ترتیب حدود ۱۵۰۰۰، ۳۰۰۰۰ و ۴۰۰۰۰ سیکل می‌باشد. افزایش تعداد سیکل‌های مسبب نشست یکسان، نشان‌دهنده عملکرد بهتر بلندمدت مصالح می‌باشد.

۱- براساس مطالعات و بررسی‌های به عمل آمده مصالح سرباره فولاد حداقل معیارهای لازم نظیر میزان درصد جذب آب، سایش لوس آنجلس، تطویل و تورق، انبساط حجمی، مقدار آهک آزاد، سلامت سولفاتی و نسبت CBR برای استفاده به عنوان مصالح اساس و زیر اساس راه را دارا، می‌باشند. با توجه به pH قابل ملاحظه مصالح سرباره‌ای و احتمال خوردگی لوله‌های گالوانیزه یا آلومینیوم، عبور لوله‌ها و تماس مستقیم آنها با مصالح سرباره‌ای در مجاورت راه‌ها، باید مورد ملاحظه قرار گیرد. بر این اساس راهنمای استفاده از این مصالح به عنوان اساس و زیر اساس در پروژه‌های راهسازی تهیه شده است.

فصل دوم: خلاصه نتایج آزمون‌ها		
تاریخ گزارش: مرداد ماه ۱۴۰۱	ویرایش: ۱	صفحه: ۱۰

۲- براساس نتایج حاصله برای استفاده از مصالح سرباره فولاد EAF به عنوان مصالح بالاست و زیر بالاست خطوط راه آهن باید عملکرد بلندمدت و رفتار دینامیکی این مصالح تحت اثر بارهای سیکلی وارده از نظر میزان نشست و پایایی مدول برجهندگی همچنین مقدار مقاومت ویژه الکتریکی مورد ملاحظه قرار گیرد. نمونه های مصالح سرباره فولاد مورد بررسی از نظر معیار حداقل وزن مخصوص، درصد جذب آب، مقدار سایش لوس آنجلس، سایش میکرورووال، سلامت سولفاتی، افت وزنی در اثر یخبندان، تطویل و تورق، مشخصات فنی لازم برای استفاده به عنوان مصالح بالاست و زیربلاست خطوط ریلی را برآورده می نمایند، لیکن مطابق نتایج آزمون های شیمیایی بر روی نمونه های سرباره فولاد مورد بررسی، میزان مجموع اکسیدهای آهن و فولاد در نمونه های سرباره فولاد EAF از حداکثر مقدار مجاز ۳۰ درصد تجاوز می نماید. افزایش اکسیدهای فلزی و سختی مصالح سرباره فولاد EAF می تواند با تردی و شکنندگی بیشتر این مصالح و حساسیت آنها به اعمال بارهای دینامیکی سیکل زیاد، مرتبط باشد.

۳- به منظور فراهم شدن امکان استفاده از مصالح سرباره فولاد، خنک شدن تدریجی، جداسازی ناخالصی ها، فرآوری، خریدایش و دانه بندی مصالح سرباره ای باید به طور جدی مورد ملاحظه قرار گیرد. همچنین با توجه به پراکندگی مشخصات فنی و کیفیت نمونه های سرباره فولاد موجود در کشور، ضروری ست ضمن اهتمام به انجام آزمون های کنترل کیفی سرباره های موجود، موضوع برنامه ریزی بلندمدت با هدف ارتقاء کیفیت سرباره های فولاد EAF مورد توجه قرار گیرد. بر اساس بررسی های به عمل آمده و نتایج آزمون های آزمایشگاهی راهنمای استفاده از این مصالح به عنوان بالاست و زیربلاست راه آهن تهیه شده است.

فصل دوم: خلاصه نتایج آزمون ها		
تاریخ گزارش: مرداد ماه ۱۴۰۱	ویرایش: ۱	صفحه: ۱۱

فصل سوم مشخصات فنی مصالح اساس و زیراساس و بالاست و زیربلاست

۳-۱- مشخصات فنی مصالح اساس و زیراساس سرباره ای

جدول ۳-۱: 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.

جدول ۳-۲: 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	۰/۱۰۷۵ میلی‌متر (شماره ۲۰۰)

فصل سوم: مشخصات فنی مصالح اساس و زیراساس و بالاست و زیربلاست

صفحه: ۱۲

ویرایش: ۱

تاریخ گزارش: مرداد ماه ۱۴۰۱

جدول ۳-۳: 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- مشخصات فنی مصالح بالاست و زیربلاست سرباره ای

مصالح مورد اشاره در این راهنما شامل مصالح سرباره آهن و فولاد حاصل از کوره‌های اکسیژنی و قوس الکتریکی است که می‌تواند برای تعمیر خطوط موجود یا ساخت خطوط جدید در راستای ضوابط و توصیه‌های نشریه‌های ۲۷۹، ۳۰۱، ۳۵۵ و ۳۹۴ امور نظام فنی و اجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور برای بیشینه بار محوری ۲۵ تن و بیشینه سرعت ۱۶۰ کیلومتر بر ساعت با در نظر گرفتن فاصله حمل بهینه استفاده شود. با توجه به انباشت مصالح سرباره در نقاط مشخصی از کشور، فاصله بهینه حمل این مصالح با لحاظ بهای کمتر سرباره فولاد نسبت به مصالح سنگی طبیعی از یک سو و از سوی دیگر هزینه حمل بیشتر آن ناشی از وزن مخصوص بالاتر، سایر مزایا و معایب فنی و اقتصادی، همچنین ملاحظات زیست محیطی تعیین می‌شود. در راهنمای حاضر مطابق AREMA (۲۰۱۰) باید مقدار اکسید کلسیم در سرباره‌های آهن و فولاد کمتر از ۴۵ درصد و مجموع مقادیر اکسیدهای آهن و

فصل سوم: مشخصات فنی مصالح اساس و زیراساس و بالاست و زیربلاست		
تاریخ گزارش: مرداد ماه ۱۴۰۱	ویرایش: ۱	صفحه: ۱۳

آلومینیوم در سرباره‌های آهن و فولاد به ترتیب کمتر از ۱۷ و ۳۰ درصد باشد. علاوه بر این لازم است ترکیبات شیمیایی حاوی فسفر و گوگرد در این مصالح، به حداقل مقادیر متعارف محدود شوند. این راهنما، جنبه‌های ایمنی و بهداشتی بکارگیری سرباره به عنوان مصالح لایه بالاست و زیربلاست را شامل نمی‌شود. بنابراین باید تمهیدات لازم در این خصوص به ویژه در هنگام به کارگیری در فضاهای بسته مانند تونل‌ها مد نظر قرار گیرد.

جدول ۳-۴: درصد وزنی عبوری مجاز از الک‌های مختلف برای زیربلاست سرباره ای

گروه (مرز بالا/مرز پایین)						اندازه (میلیمتر)	قطر چشمه‌های الک (اینچ) یا شماره آن
۳		۲		۱			
-	-	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۵۰	۲
۱۰۰	۱۰۰	۹۵	۷۵	۱۰۰	۹۰	۲۵	۱
۸۵	۵۰	۷۵	۴۰	۸۴	۵۰	۹,۵	۰,۳۷۵
۶۵	۳۵	۶۰	۳۰	-	-	۴,۷۵	#۴
۵۰	۲۵	۴۵	۲۰	۵۰	۲۶	۲	#۱۰
۳۰	۱۵	۳۰	۱۵	۳۰	۱۲	۰,۴۲۵	#۴۰
۵	۵	۵	۵	۵	۵	۰,۲۱	#۷۰
۲	۲	۲	۲	۲	۲	۰,۰۷۵	#۲۰۰

جدول ۳-۵: درصد وزنی عبوری از الک‌های مختلف برای مصالح بالاست مصرفی در راه آهن ایران (نشریه ۳۰۱، ۱۳۸۴)

گروه (مرز بالا/مرز پایین)										اندازه (میلیمتر)	قطر چشمه‌های الک (اینچ) یا شماره آن
۵		۴		۳		۲		۱			
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۷۵	۳
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۸۰	۱۰۰	۹۰	۱۰۰	۶۳	۲,۵
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۵	۱۰۰	۶۰	۸۵	-	-	۵۰	۲
۹۰	۱۰۰	۶۰	۹۰	۳۵	۷۰	۵۰	۷۰	۲۵	۶۰	۳۹	۱,۵
۲۰	۵۵	۱۰	۳۵	۰	۱۵	۲۵	۵۰	۰	۱۰	۲۵	۱
۰	۱۵	۰	۱۰	۰	۵	۵	۲۰	۰	۵	۱۲,۵	۰,۷۵
۰	۵	۰	۳	۰	۰	۰	۱۰	۰	۰	۹,۵	۰,۳۷۵
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳	۰	۰	۴,۷۵	#۴

جدول ۳-۶: آزمون های کنترل کیفیت و معیارهای پذیرش مصالح زیربالاست سرباره ای

روش آزمایش	مقدار مجاز	نوع آزمایش
ASTM C136	مطابق جدول (۳-۱)	آزمایش دانه بندی
ASTM C117	≤ ۲ %	درصد مصالح ریزتر از الک شماره ۲۰۰
ASTM C117	≤ ۵ %	درصد مصالح ریزتر از الک شماره ۷۰
ASTM C131	≤ ۲۵ %	درصد سایش لس آنجلس برای ۱۰۰۰ دور
ASTM D7428	≤ ۱۸ %	درصد سایش میکرودوال
ASTM G51	≤ ۱۱٫۵	pH
ASSHTO T219	≤ ۳ %	درصد آهک نشکفته
ASTM D4792	≤ ۰٫۵ %	درصد انبساط حجمی
EPA METHOD 1311	مطابق جدول (۴-۲)	غلظت آلاینده ها و مواد سمی در شیرابه

چنانچه نتایج کنترل کیفیت زیربالاست و بالاست سرباره ای مطابق جداول (۳-۶) و (۳-۷) در آستانه پذیرش مقادیر مجاز تعریف شده قرار گیرد، به منظور اطمینان از رفتار پایدار مصالح، انجام آزمایش های دینامیکی تعیین مدول برجهندگی، نشست و شکست دانه ها الزامی خواهد بود. روش انجام آزمون ها و محدوده مقادیر قابل قبول مدول برجهندگی، نشست و شکست دانه ها در پیوست الف (گزارش نهایی جلد ۳-ب) ارائه شده است.

جدول ۳-۷: آزمون های کنترل کیفیت و معیارهای پذیرش مصالح بالاست سرباره ای

روش آزمایش	مقدار مجاز			نوع آزمایش
	سرباره فولاد		سرباره آهن (BF)	
	(EAF)	(BOF)		
ASTM C136	مطابق جدول (۲-۱)			آزمایش دانه بندی
ASTM C117	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$	درصد مصالح ریزتر از الک شماره ۲۰۰
ASTM C127	$\geq 2.8 (t/m)$	$\geq 2.4 (t/m)$	$\geq 2.3 (t/m)$	وزن مخصوص
ASTM C127	$\leq 1\%$	$\leq 2\%$	$\leq 5\%$	درصد جذب آب
ASTM C142	$\leq 0.5\%$	$\leq 0.5\%$	$\leq 0.5\%$	درصد کلوخه های رسی و سنگدانه های شکننده
ASTM C535 ASTM C131	$\leq 30\%$	$\leq 40\%$	$\leq 40\%$	درصد سایش لس آنجلس برای ۱۰۰۰ دور
ASTM C88	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$	درصد افت وزنی در برابر سولفات سدیم برای ۵ دوره متوالی خشک و تر شدن
ASSHTO T103	$\leq 8\%$	$\leq 8\%$	$\leq 8\%$	درصد افت وزنی در اثر ذوب و یخ (۱۲ دوره ذوب و یخ)
ASTM D4791	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$	درصد تطویل و تورق
ASTM D6928 ASTM D7428	$\leq 18\%$	$\leq 22\%$	$\leq 22\%$	درصد سایش میکرودوال
ASTM G51	≤ 11.5	≤ 11.5	≤ 11.5	pH
ASSHTO T219	$\leq 4\%$	$\leq 4\%$	$\leq 4\%$	درصد آهک نشکفته
ASTM D4792	$\leq 0.5\%$	$\leq 0.5\%$	$\leq 0.5\%$	درصد انبساط حجمی
EPA METHOD 1311	مطابق جدول (۴-۲)			غلظت آلاینده ها و مواد سمی در شیرابه

فصل سوم: مشخصات فنی مصالح اساس و زیراساس و بالاست و زیربلاست

صفحه: ۱۶

ویرایش: ۱

تاریخ گزارش: مرداد ماه ۱۴۰۱

۱-۲-۳- الگوی بارگذاری آزمون سه محوری دینامیکی برای تعیین مدول برجهندگی

جدول ۳-۸: الگوی بارگذاری پیشنهادی برای تعیین مدول برجهندگی بالاست زیربلاست

ردیف	تنش محصورکننده σ_3 (kPa)	تنش انحرافی استاتیکی $\sigma_{1s}-\sigma_{3s}$ (kPa)	تنش تفاضلی سیکیلی q_{cyclic} (kPa)	فرکانس بارگذاری (Hz)
۱	۳۰	۱۰۰	۷۰	۲
۲	۳۰	۱۰۰	۱۰۰	۲
۳	۳۰	۱۰۰	۱۰۰	۴
۴	۳۰	۱۰۰	۱۴۰	۲
۵	۳۰	۱۰۰	۱۴۰	۴
۶	۳۰	۸۰	۱۴۰	۲
۷	۳۰	۸۰	۱۴۰	۴
۸	۵۰	۱۰۰	۸۰	۲
۹	۵۰	۱۰۰	۱۲۰	۲
۱۰	۵۰	۱۰۰	۱۲۰	۴
۱۱	۵۰	۱۰۰	۱۶۰	۲
۱۲	۵۰	۸۰	۱۴۰	۴
۱۳	۵۰	۸۰	۱۶۰	۲

۳-۳- ارزیابی فنی و اقتصادی استفاده از بالاست و زیر بالاست سرباره ای

در ارزیابی‌های فنی و اقتصادی برای استفاده از بالاست سرباره‌ای به عنوان جایگزین بالاست سنگی می‌بایست نکات زیر مد نظر قرار گیرد:

- با توجه به وزن مخصوص بالاتر بالاست سرباره‌ای نسبت به بالاست سنگی از یک سو و از سوی دیگر، محدودیت تناژ واگن‌های حمل بالاست، امکان انتقال حجم کمتری از بالاست سرباره‌ای نسبت به بالاست سنگی وجود خواهد داشت که این موضوع مستقیماً بر هزینه‌های حمل بالاست سرباره‌ای تأثیرگذار است.

فصل سوم: مشخصات فنی مصالح اساس و زیراساس و بالاست و زیربلاست		
تاریخ گزارش: مرداد ماه ۱۴۰۱	ویرایش: ۱	صفحه: ۱۷

۲. به دلیل محدودیت نقاط انباشت بالاست سرباره‌ای در کشور، لازم است فاصله حمل بهینه نسبت به محل انباشت برای هر بالاست سرباره‌ای محاسبه شود.
۳. به دلیل محدودیت حجم انباشت بالاست سرباره‌ای در کشور در بلندمدت، از منظر نگهداری و تعمیر، اضافه کردن بالاست سنگی به بالاست سرباره‌ای برای جبران کسری بالاست سرباره‌ای محتمل است. از این رو رفتار سایشی و مکانیکی ترکیب این دو مصالح، می‌بایست مد نظر قرار گیرد.
۴. با توجه به سایش بیشتر ادوات تعمیر و نگهداری در تماس با بالاست سرباره‌ای نسبت به بالاست سنگی، این نکته در برآورد چرخه عمر بالاست سرباره‌ای در مقایسه با بالاست سنگی باید مورد توجه قرار گیرد.
۵. در شرایطی که مشخصات مکانیکی بالاست سرباره‌ای نسبت به بالاست سنگی بهتر باشد، می‌توان نسبت به کاهش ضخامت لایه بالاست و کاهش عرض شانه بالاست با ملحوظ نمودن معیارهای طراحی و تعمیر و نگهداری اقدام نمود.
۶. در ضخامت یکسان، لایه بالاست سرباره‌ای بار مرده بیشتری را در مقایسه با بالاست سنگی بر ابنیه فنی اعمال می‌نماید که این موضوع باید در طراحی این ابنیه مورد توجه قرار گیرد.

فصل سوم: مشخصات فنی مصالح اساس و زیراساس و بالاست و زیربلاست		
تاریخ گزارش: مرداد ماه ۱۴۰۱	ویرایش: ۱	صفحه: ۱۸