جمهوری اسلامی ایران

سازمان برنامه و بودجه کشور

راهنمای استفاده از سرباره‌های آهن و فولاد به عنوان اساس و زیراساس راه و باند فرودگاه

ضابطه شماره ۸۷۷

آخرین ویرایش: ۱۳-۰۸-۱۴۰۲

معاونت تولیدی، فنی و زیربنایی

امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران

nezamfanni.ir

وزارت راه، و شهرسازی

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

bhrc.ac.ir

۱۴۰۲

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

همکار و سرور گرامی

در نظر است تا پس از مدتی چند ماهه، این نشریه که حاصل سال‌ها مطالعه و تجربه در سطح کشور و مراجع معتبر بین‌المللی است، به عنوان ضابطه لازم‌الاجرا ابلاغ شود. لذا خواهشمند است ضمن مطالعه دقیق و استفاده از آن، نظرات ارزشمند خود را به نشانی زیر ارسال فرمایید تا قبل از ابلاغ، اصلاحات مورد نیاز انجام پذیرد:

Nezamfanni@chmail.ir

Nezamfanni.ir

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

اصلاح مدارک فنی

خواننده گرامی:

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

از این‌رو، از شما خواننده‌ی گرامی صمیمانه تقاضا دارد در صورت مشاهده هر گونه ایراد و اشکال فنی، مراتب را بصورت زیر گزارش فرمایید:

۱- در سامانه مدیریت دانش اسناد فنی و اجرایی (سما) ثبت‌نام 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 موضوع مورد نظر را مشخص کنید.

۵- ایراد مورد نظر را بصورت خلاصه بیان دارید.

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

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 می‌شود.

نشانی برای مکاتبه : تهران، میدان بهارستان، خیابان صفی علی‌شاه - مرکز تلفن ۳۳۲۷۱

سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، امور نظام فنی و اجرایی

web: nezamfanni.ir **Email: nezamfanni@chmail.ir**

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

باسمه تعالی

پیشگفتار

سازمان برنامه و بودجه کشور به عنوان متولی توسعه پایدار کشور و نظام فنی و اجرایی یکپارچه، به استناد ماده (۲۳) قانون برنامه و بودجه و ماده (۳۴) قانون احکام دائمی برنامه‌های توسعه و آیین‌نامه و سند اجرایی آن، با کمک دستگاه‌های اجرایی و توان متخصصان دانشگاهی و حرفه‌ای کشور، به تهیه و ابلاغ ضوابط و مقررات و مستندات لازم در این حوزه می‌پردازد.

استفاده از ضوابط و معیارها در مراحل پیدایش، مطالعه (مطالعات امکان‌سنجی)، طراحی (پایه و تفصیلی)، اجرا، راه اندازی، تحویل و بهره‌برداری طرح‌های عمرانی به لحاظ فنی و اقتصادی، کیفیت طراحی و اجرا (عمر مفید) و هزینه‌های بهره برداری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از طرفی، تالیف و تدوین ضوابط و معیارهای فنی مستلزم توجه به پژوهش‌های علمی و تخصصی در جهت بکارگیری صحیح نیروی انسانی متخصص و کارآمد و همچنین سیاست‌ها و برنامه‌ریزی مناسب است.

دسترسی به مصالح طبیعی جهت استفاده در انواع خاکریزهای مهندسی از جمله اساس و زیراساس راه و باند فرودگاه همیشه امکان پذیر نیست و در بعضی مناطق، منابع قرضه سنگی (صخره ای) و آبرفتی محدود بوده و تولید آنها خسارت جبران ناپذیری به محیط زیست وارد خواهد کرد. از این رو برای تسریع توسعه پایدار، یافتن جایگزینی مناسب برای مصالح طبیعی الزامی به نظر می‌رسد. از طرفی با توجه به محدودیت‌های بودجه‌ای استفاده از مصالح نوین ارزانتر عامل مهمی در کاهش هزینه ها و سرعت اجرای پروژه های راه می‌باشد. یکی از مصالحی که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است، سرباره‌های کارخانه های آهن و فولاد می‌باشند. در حال حاضر بیش از ۶۰ میلیون تن از این مصالح در مناطق اطراف کارخانه های فولاد و ذوب آهن کشور انباشت شده است که امکان ایجاد مشکلات زیست محیطی و اشغال زمینهای گاهاً ارزشمند اطراف وجود دارد. علی‌رغم اشاره به استفاده از سرباره فولاد به عنوان مصالح خاکریز در نشریه های ۱۰۱ و ۲۳۴، معیارهای پذیرش، کنترل کیفی اولیه، برای استفاده آنها ارائه نشده است. با توجه به حجم زیاد تولید و انباشت سرباره آهن و فولاد در کشور، 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. مصالح سرباره‌ای می‌توانند جایگزین مناسب مصالح طبیعی برای فواصل بهینه حمل خصوصا در مواقع عدم دسترسی به مصالح با کیفیت باشند. طبق FHWA (۱۹۹۷) بکارگیری سرباره کوره اکسیژن بازی (BOF) و سرباره کوره قوس الکتریکی (EAF) سرد شده در هوا برای استفاده در راهسازی به عنوان مصالح دانه‌ای مناسب است. استفاده از سرباره کوره بلند سرد شده در هوا ACBFS سابقه طولانی در انگلستان از سال ۱۹۷۴ (BS 1047:1983) و ژاپن از سال ۱۹۷۹(JIS A5015) دارد. با توجه به نیاز جدید در کشور و افزایش وزن کامیونهای معدنی تا ۱۵۰ تن برای انتقال مواد استخراجی در معادن و کارخانه تولید آهن

omoorepeyman.ir

و فولاد و حتی انتقال سرباره‌ها در راههای دسترسی اطراف کارخانه های فولاد، تعیین مشخصات فنی مصالح سرباره برای ساخت روسازی راه برای موارد مذکور ضروری است.

علیرغم ورود سرباره به واحد پایه رشته راه، راه آهن و باند فرودگاه سال ۱۴۰۱، استفاده از مصالح سرباره فولاد و آهن به عنوان مصالح اساس و زیراساس، منوط به انطباق مشخصات فنی خصوصی پیمان است. نوشتار مذکور بر اساس جمع آوری ادبیات فنی موجود جهانی بوده، بعضی از معیارهای کنترل کیفی اولیه سرباره‌ها را ارائه می‌داد و بسیاری از جنبه های فنی مرتبط از جمله مسائل مرتبط با دانه بندی واقعی حاصل از خردایش، میزان ریزدانه و اثرات قابل توجه ریزدانه بر رفتار و پارامترهای مقاومتی از جمله CBR و تعیین مدول برجهندگی در تنشهای معمول طبق AASHTO T307 و تنشهای بالای مورد نیاز در باند فرودگاه برای استفاده آنها ارائه نشده بود. بطوریکه در آزمایش‌های اولیه روی سرباره های تعدادی از کارخانه های فولاد کشور و سایر کشورها نشان داد که مقادیر پارامترهای طراحی از جمله CBR مصالح سرباره بیش از چند برابر مقادیر مصالح معمولی است. در صورتیکه این آزمایشها روی دانه بندی ساختگی با درصد ریزدانه ساختگی انجام شده و با دانه‌بندی حاصل از خردایش واقعی سرباره مطابقت ندارد. از طرفی افزایش ریزدانه، سبب مشکلات مرتبط با حرکت دانه‌های ریزدانه موجود و ریزدانه ناشی از شکست حین بهره برداری می‌شود. لذا بخش ژئوتکنیک و زیرساخت مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی با طرح آزمایشهای جامع برای اولین بار در کشور، رفتار تحت بار بهره برداری شامل نشست و شکست تحت بار دینامیکی و تعیین ارتباط بین نتایج آزمایشهای مختلف برای طراحی روسازی از جمله مقادیر واقعی CBR و ارتباط آن با مقادیر مدول برجهندگی سرباره ها و سایر مشخصات فنی را ارائه در قالب دستورالعمل فعلی شود. به طوریکه در این دستورالعمل حداقل ضوابط برای استفاده از سرباره‌های آهن و فولاد به عنوان مصالح روسازی راه و باند فرودگاه ارائه شده است. تهیه این دستورالعمل مقدمات فنی و قانونی استفاده از مصالح سرباره‌ها به عنوان مصالح خاکریز مهندسی راه و باند را در کشور فراهم می‌کند.

با توجه به مطالب فوق الذکر مرکز تحقیقات راه مسکن و شهرسازی تهیه «راهنمای استفاده از سرباره‌های آهن و فولاد به عنوان اساس و زیراساس راه و باند فرودگاه» با هماهنگی امور نظام فنی‌اجرایی، مشاورین و پیمانکاران سازمان برنامه و بودجه در دستور کار قرارداد،

علیرغم تلاش، دقت و وقت زیادی که برای تهیه این مجموعه صرف گردید، این مجموعه مصون از وجود اشکال و ابهام در مطالب آن نیست. لذا در راستای تکمیل و پربار شدن این ضابطه 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 مجرب این حوزه، نسبت به تهیه متن اصلاحی، اقدام و از طریق پایگاه اطلاع رسانی نظام فنی و اجرایی کشور برای بهره‌برداری 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 شده‌است که در صورت هرگونه تغییر در مطالب هر یک از صفحات، تاریخ آن نیز اصلاح خواهد شد. از اینرو همواره مطالب صفحات دارای تاریخ جدیدتر معتبر خواهد بود.

omoorepeyman.ir

از شرکت ملی فولاد و همچنین شرکتهای فولادی کشور از جمله شرکت ذوب آهن اصفهان، شرکت فولاد خراسان و خصوصاً شرکت فولاد مبارکه اصفهان تهیه مصالح یا کمک مالی برای انجام آزمایشها و مطالعات تشکر می گردد.

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

تهیه و کنترل « دستورالعمل استفاده از سرباره‌های آهن و فولاد به عنوان اساس و زیراساس راه و باند فرودگاه» [ضابطه/نشریه شماره ۸۷۷]

اعضای گروه تهیه‌کننده:

عطا آقایی آرایی	مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی	دکترای مهندسی عمران-خاک و پی
احمد منصوریان	مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی	دکترای مهندسی عمران-راه و ترابری
علی اصغر اکبری نسرکانی	شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک	کارشناسی ارشد عمران- راه و ترابری
محمود جدیدی	شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک	کارشناسی ارشد عمران- راه و ترابری
بهاره ابراهیمی علویجه	دانشگاه یزد	دانشجوی دکترای عمران-خاک و پی
سمیه احمدی	دانشگاه صنعتی شریف	دانشجوی دکترای عمران-خاک و پی
ایرج رحمانی	مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی	دکترای مهندسی عمران- خاک و پی
بهنام آزادنور	دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین‌طوسی	کارشناسی ارشد عمران-خاک و پی
حسین حسنی	مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی	کاردان آزمایشگاه بخش ژئوتکنیک
امیرسعید سلامت	مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی	کارشناسی- زمین شناسی

اعضای گروه نظارت:

محمد شکرچی زاده	دانشکده فنی دانشگاه تهران	دکترای مهندسی عمران- تکنولوژی بتن

اعضای گروه تایید کننده (عضو کمیته تخصصی و داوری پیش نویس اولیه و داوری نسخه نهایی دستورالعمل):

عباس قلندرزاده	دانشکده فنی، دانشگاه تهران،	دکترای عمران- خاک و پی
فرزین کلانتری	دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی	دکترای عمران- خاک و پی
سید طاها طباطبایی عقدا	مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی	دکترای عمران -خاک و پی
سید محمد منصورزاده	مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی	کارشناسی ارشد - خاک و پی
فریدون مقدس نژاد	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	دکترای عمران-راه و ترابری
حمیدرضا صاحب الزمانی	مهندسین مشاور	دکترای عمران
مرتضی اسماعیلی	دانشگاه علم و صنعت	دکترای عمران- خاک و پی
حسن قاسم‌زاده	دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی	دکترای عمران- خاک و پی
محمدصادق رضازاده جودی	مهندسین مشاور	کارشناسی ارشد عمران
اصغر فتوت فرد	مهندسین مشاور	کارشناسی ارشد عمران
سید حسین یزدانی طبائی	شرکت راه آهن جهموری اسلامی ایران	کارشناسی ارشد مواد-متالوژی

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول- کلیات	**۱**
۱-۱- مقدمه	۳
۱-۲- دامنه کاربرد	۳
۱-۳- محدودیت استفاده از سرباره در راه و باند	۴
۱-۴- دانه بندی مصالح اساس و زیراساس سرباره ای	۴
۱-۴-۱- محدوده دانه بندی مصالح اساس سرباره‌ای	۶
۱-۴-۲-محدوده دانه‌بندی مصالح زیراساس	۶
۱-۵- ضخامت لایه‌های اساس و زیراساس	۸
فصل دوم-مشخصات اساس و زیراساس سرباره‌ای و معیارهای پذیرش	**۹**
۲-۱- مقدمه	۱۱
۲-۲- انواع سرباره های آهن و فولاد در ایران	۱۱
۲-۳- سرد کردن و دانه بندی سرباره ها	۱۲
۲-۴- آزمایشهای کنترل کیفیت و معیارهای پذیرش	۱۳
۲-۵- ترکیبات شیمیایی سرباره ها	۱۶
۲-۵-۱- کنترل میزان انبساط مصالح سرباره ای	۱۷
۲-۵-۲- ملاحظات فنی در خصوص شیرابه سرباره ها	۱۸
فصل سوم- ضوابط طراحی، اجرا، تعمیر و نگهداری راه و باند با اساس و زیراساس سرباره‌ای	**۲۱**
۳-۱- مقدمه	۲۳
۳-۲- دانه بندی	۲۳
۳-۳- چگالی حداقل و حداکثر و مقایسه آن با نتایج آزمایش تراکم استاندارد و اصلاح شده	۲۳
۳-۴-زاویه اصطکاک داخلی بسیج شده	۲۴
۳-۵-آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)	۲۵
۳-۵-۱- اثر ریزدانه بر نتایج آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا	۲۶
۳-۵-۲- اثر حداکثر اندازه دانه‌ها و مقدار ریزدانه بر مقادیر CBR	۲۷
۳-۵-۳-تثبیت سرباره EAF فولاد مبارکه با خاکستر بادی به عنوان لایه زیراساس	۳۰
۳-۶- مدول بر جهندگی (M_R) در طراحی روسازی	۳۲
۳-۶-۱- تعریف مدول بر جهندگی	۳۲

omoorepeyman.ir

۳-۶-۲- نقش ضریب برجهندگی در طراحی روسازی انعطاف‌پذیر ۳۳
۳-۶-۲-۱- آزمایش بارگذاری سیکلی ۳۵
۳-۶-۲-۲-روابط تجربی ۳۶
۳-۶-۲-۳-روابط همبستگی با سایر پارامترهای مقاومتی خاک ۳۷
۳-۶-۳-روش ساده معادل اندازه گیری مدول برجهندگی ۳۹
۳-۷-شرایط بارگذاری مصالح اساس باند فرودگاه برای تعیین مدول برجهندگی ۳۹
۳-۷-۱- سایر ملاحظات اساس باند ۴۰
۳-۸-تنش تماسی و افقی بین روسازی/اساس و اساس/زیراساس راه ۴۱
۳-۹-کاربرد ژئوسنتتیک ها در اساس و زیراساس سرباره‌ای ۴۱
۳-۹-۱-اثرات تسلیح با ژئوگرید ۴۲
۳-۹-۱-۱ عمق مناسب نصب ژئوگرید ۴۲
۳-۱۰-نفوذپذیری اساس سرباره ای و معمولی ۴۲
۳-۱۱- ملاحظات ساخت لایه اساس و زیراساس سرباره ای ۴۳
۳-۱۱-۱- تولید سرباره ۴۴
۳-۱۱-۲- خردایش و دپوی سرباره ۴۴
۳-۱۱-۳- آماده‌سازی بستر ۴۴
۳-۱۱-۴- پخش و تراکم مصالح اساس و زیراساس ۴۵
۳-۱۱-۵- کنترل تراکم میدانی ۴۷
۳-۱۱-۶- کنترل سطح تمام شده ۴۷
۳-۱۱-۷- حفاظت سطح راه به هنگام اجرای عملیات ۴۸
۳-۱۱-۸- آزمایش های کنترل کیفیت ۴۸
۳-۱۱-۸-۱- آزمایش‌های کنترل کیفیت زیر اساس ۴۸
۳-۱۱-۸-۲- آزمایش های کنترل کیفیت اساس ۴۸
۳-۱۲- اختلاط مصالح طبیعی و سرباره های آهن و فولاد ۴۹
۳-۱۳- تعمیر و نگهداری ۴۹
۳-۱۴- ملاحظات ویژه برای ارزیابی فنی و اقتصادی ۴۹
پیوست ۱- طراحی آزمون سه محوری سیکلی برای اساس و زیراساس **۵۱**
پ-۱- مقدمه ۵۳
پ-۱-۲- مشخصات دستگاه سه محوری ۵۳

omoorepeyman.ir

پ-۱-۳- روش ساخت نمونه ۵۴
پ-۱-۴- الگوی بارگذاری ۵۴
پ-۱-۴-۱- تعداد سیکل بارگذاری اساس و زیراساس ۵۴
پ-۱-۴-۲- فرکانس بارگذاری ۵۵
پ-۱-۴-۳- دامنه تنش های اعمالی ۵۵
پ-۱-۵ روش انجام آزمون ۵۵
پ-۱-۵-۱- تعیین مدول برجهندگی ۵۵
پ-۱-۵-۲- تعیین مدول برشی و میرایی ۵۹
پ-۱-۵-۳- تعیین مقاومت پساسیکلی ۶۰
پ-۱-۶- گزارش آزمون ۶۱
پیوست ۲ - انتخاب تنشهای محدودکننده، تنش سیکلی و فرکانس بارگذاری برای آزمایشهای سه محوری سیکلی آسفالت و اساس اصلاح شده طبق CEN EN 12697-25 2005 **۶۳**
پیوست ۳- نمونه مقادیر مدول برشی، نسبت میرایی و مدول برجهندگی، نشست اساس و زیر اساس سرباره‌ای **۶۹**
مراجع **۷۷**

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

فهرست شکل ها

عنوان **صفحه**

شکل (۱-۲) فرآیند یکپارچه تولید آهن و فولاد و انواع سرباره‌های تولید شده(Wang, 2016)..... ۱۲
شکل(۳-۱) نمودار دانه‌بندی نمونه‌های CBR آزمایش شده..... ۲۷
شکل (۳-۲) دانه‌بندی مصالح خاک و سرباره (هاشمی طباطبایی و همکاران، ۱۳۹۹)..... ۳۰
شکل (۳-۳) تعریف ضریب برجهندگی در بارگذاری تکراری تحت تنش همه جانبه (ε_a: کرنش محوری برگشت‌ناپذیر).۳۳
شکل (۳-۴) تخمین مدول برجهندگی لایه‌های روسازی براساس آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران برای مصالح غیرسرباره ای..... ۳۸
شکل (پ-۱-۱) نمایش شماتیک اجزاء دستگاه سه محوری قطر بزرگ دینامیکی..... ۵۳
شکل (پ-۱-۲) رابطه تنش-کرنش هیسترزیس..... ۶۰
شکل (پ-۲-۱) شکل شماتیک بارگذاری سینوسی و پالسی(CEN EN 12697-25, 2005)..... ۶۵

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول (۱-۱) درصد وزنی عبوری از الک‌های مختلف برای مصالح اساس (اصلاح شده نشریات ۱۰۱، ۲۳۴).....۶
جدول (۱-۲) دانه بندی مجاز از الک‌های مختلف زیراساس سنگی و شنی مصرفی طبق نشریات ۱۰۱ و ۲۳۴ (اصلاح شده برای ۱۰۰درصد سرباره).....۷
جدول (۲-۱) آزمون‌های کنترل کیفیت و معیارهای پذیرش مصالح اساس و زیراساس سرباره‌ای.....۱۳
جدول (۲-۲) مشخصات شیمیایی سرباره آهن و فولاد برای استفاده در اساس و زیراساس.....۱۶
جدول (۲-۳) نتایج تعیین فازهای تشکیل دهنده نمونه مصالح سرباره های فولاد و مصالح سنگی مورد بررسی به روش XRD.....۱۷
جدول (۲-۴) میزان مجاز غلظت آلاینده‌ها (mgL^{-1}) در شیرابه سرباره‌ها به روش EPA 1311 (اصلاح شده).....۱۹
جدول (۳-۱)دانه بندی انتخابی برای مصالح زیراساس و اساس راه (درصد عبوری).....۲۳
جدول(۳-۲)چگالی حداقل و حداکثر مصالح انتخابی اساس طبق ASTM D4253 .....۲۴
جدول(۳-۳)دانسیته خشک و رطوبت بهینه طبق تراکم استاندارد و اصلاح شده اساس سرباره EAF مبارکه دانه بندی نوع ۱.....۲۴
جدول (۳-۴) محدوده مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و بسیج شده برای مصالح اساس و زیراساس سرباره‌ای.....۲۵
جدول (۳-۵) پارامترهای مقاومت برشی حاصل از آزمایش برش مستقیم تحت سربارهای ۱،۲ و kg/cm^2 ۳ (هاشمی طباطبایی و همکاران، ۱۳۹۹).....۲۵
جدول (۳-۶) محدوده مقادیر CBR سرباره.....۲۶
جدول (۳-۷) نتایج آزمایش CBR با تمرکز بر مقدار ریزدانه.....۲۸
جدول(۳-۸) دانه‌بندی مصالح مورد استفاده (رحمانی و همکاران، ۱۳۹۹).....۲۹
جدول(۳-۹) نتایج آزمایش‌های نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) برحسب درصد بر روی سرباره EAF (رحمانی و همکاران، ۱۳۹۹).....۲۹
جدول (۳-۱۰) نتایج آزمون ظرفیت باربری کالیفرنیا (CBR) طبق (ASTM D1883) بر روی مصالح سرباره های فولاد کشور.....۳۰
جدول(۳-۱۱) نتایج آزمایش تراکم ASTM D1557 برای سرباره EAF و اختلاط آن با خاکستر(هاشمی طباطبایی و همکاران، ۱۳۹۹).....۳۰
جدول (۳-۱۲) مقادیر CBR خاک، سرباره و سرباره تثبیت شده با خاکستر بادی (هاشمی طباطبایی و همکاران، ۱۳۹۹)۳۱
جدول (۳-۱۳) الگوی بارگذاری نمونه‌ها در آزمایش مدول برجهندگی خاک بستر راه (AASHTO T307).....۳۵

omoorepeyman.ir

جدول (۳-۱۴)گام های بارگذاری آزمایش سه محوری سیکلی بـرای مصـالح اسـاس اصـلاح شـده راه AASHTO T307 (Hanifa, 2015)..... ۳۶
جدول (۳-۱۵) تخمین مدول برجهندگی بستر روسازی با CBR خاک طبیعی..... ۳۹
جدول (۳-۱۶) انواع ژئوسنتتیک‌ها و کاربرد آنها..... ۴۱
جدول (۳-۱۷) نتایج نفوذپذیری مصالح به روش بار افتان (Bowels ۱۹۸۱) دانه‌بندی نوع ۱..... ۴۳
جدول (۳-۱۸) مشخصات لایه زیراساس و اساس سرباره ای حین اجرا..... ۴۳
جدول (۳-۱۹) طبقه‌بندی خاک بستر(Wang, 2016)..... ۴۵
جدول (پ-۱-۱) مشخصات دستگاه سه محوری قطر بزرگ برای انجام آزمایشهای مونوتونیک و سیکلی دینامیکی..... ۵۴
جدول(پ-۱-۲)الگوی بارگذاری نمونه‌های سه محوری سیکلی بزرگ مقیاس برای تعیین مدول برجهندگی و تعیین رفتار عملکردی خاک اصلاح شده و تراشه آسفالت بازیافتی اصلاح شده با سیمان به عنوان اساس یا زیراساس سـرباره ای راه و باند..... ۵۶
جدول (پ-۱-۳) الگوی بارگذاری پیشنهادی برای تعیین مدول برجهنـدگی اسـاس و اساس/زیراسـاس سـرباره‌ای بانـد و مسیرهای با ترافیک سنگین(کامیونهای حمل مصالح معدنی)..... ۵۸
جدول(پ-۱-۴) نمونه نتایج آزمایشهای مونوتونیک پساسیکلی و شکست دانه نمونه تک لایه اساس سرباره ای..... ۶۱
جدول (پ-۳-۱) خلاصه نتایج آزمایش سه محوری بزرگ مقیاس شامل مدول برجهندگی، میرایی، نشست بر روی نمونـه اساس یا زیراساس سرباره EAF شرکت فولاد مبارکه با γ=۲/۳۳ g/cm^3 مطابق استاندارد اصـلاح شـده AASHTO T307 برای بارگذاری اساس باند در σ'_3=۰/۲۱kg/cm^2 -σ'_3=۱/۴kg/cm^2 در گام‌های تا ۵۰۰۰ سیکل..... ۷۱
جدول (پ-۳-۲) خلاصه نتایج مدول برشی، نسبت میرایی و کرنش برشی نمونـه‌هـای سـه محـوری قطـر ۳۰ سـانتیمتر اساس EAF شرکت فولاد مبارکه تک لایه با γ=۲/۳۳ g/cm^3 طبق استاندارد ASTM D3999 (اعمال ۱۰۰ سیکل در هـر گام بارگذاری)..... ۷۲
جدول (پ-۳-۳) خلاصه نتایج مدول برشی، نسبت میرایی و کرنش برشی نمونه‌های سه محـوری قطـر ۳۰cm اسـاس و زیراساس تک لایه سرباره..... ۷۳
جدول (پ-۳-۴) خلاصه نتایج آزمایش سه محوری بزرگ مقیاس تعیین مدول برجهندگی بر روی نمونه تک لایه به قطـر ۳۰ cm لایه اساس و زیراساس از مصالح سرباره مختلف..... ۷۵

omoorepeyman.ir

A

سایش (خردایش) **abrasion**

نوعی مکانیسم آسیاکردن مواد معدنی که در آن بر اثر مالش سطوح نسبت به همدیگر ذرات ریز تولید می شوند.

سرباره کوره اکسیژن بازی **Basic Oxygen Furnace (BOF)**

محصول جانبی تولید فولاد در کوره‌های اکسیژن بازی است.

لایه اساس **base layer**

لایه‌ای از مصالح سنگی با مشخصات فنی معین بوده و بر روی بستر راه یا لایه زیراساس قرار می‌گیرد به‌طوری‌که قابلیت تحمل بارهای وارده از لایه‌های بالاتر روسازی را دارا می‌باشد.

ظرفیت باربری کالیفرنیا **California Bearing Ratio(CBR)**

آزمایشی برای تعیین ظرفیت باربری خاک در خاکریز مهندسی به ازای میزان نفوذ مشخصی است.

رفتار دینامیکی لایه‌های اساس و زیراساس **Dynamic behavior of base and subbase layers**

یک واژه عمومی برای تعریف رفتار مصالح اساس و زیراساس تحت بارهای عبوری است که شامل تعیین منحنی‌های تنش-کرنش سیکلی جهت اندازه‌گیری مدول برجهندگی، رفتار خستگی از نظر ایجاد کرنش‌های محوری برگشت‌پذیر و کرنشهای برگشت ناپذیر تجمعی (نشست کل) و همچنین تعیین معیارهای گسیختگی لایه‌های اساس و زیراساس است.

سرباره کوره قوس الکتریکی **Electric Arc Furnace (EAF)**

محصول جانبی تولید فولاد در کوره قوس الکتریکی است.

ریزدانه **fine grained aggregate**

بخشی ازمصالح خاکی که از الک نمره ۲۰۰ با اندازه ۰/۰۷۵ میلیمتر عبور می کند

ژئوسنتتیکها **geosynthetics**

اغلب ممکن است به دو گروه کلی تقسیم بندی شوند: ژئوتکستایل و ژئوممبرین. ژئوتکستایل‌ها اساساً دارای ساختار بافته و نبافته هستند و در مقابل نفوذ آب و گاز نفوذپذیر هستند و برای اهداف فیلتراسیون و جداسازی بکار می روند. دیگر محصولات مشابه مانند ژئوگرید، ژئومش، ژئونت و ژئومتس هستند که در عملیات ژئوتکنیکی برای تسلیح استفاده می‌شوند. در صورتی که ژئوممبرین‌ها نفوذناپذیر هستند و اساساً برای اهداف آب‌بندی بکار می‌روند.

omoorepeyman.ir

تنش تفاضلی سیکلی حداکثر **maximum deviatoric cyclic stress**

برابر با بیشینه تنش قائم اعمالی بر وسط لایه اساس یا زیراساس ناشی از عبور ترافیک است.

زاویه اصطکاک داخلی بسیج شده **mobilized friction angle**

مقداری از زاویه اصطکاک مصالح دانه ای در خاکریزهای مهندسی که در اثر بارگذاری معمول ایجاد می شود.

رفتار یکنوا (مونوتونیک) **monotonic behavior**

بررسی رفتار مصالح در آزمایش سه‌محوری تحت نیروی برش یکنوا تا مرحله گسیختگی است که از آن برای تعیین مقاومت برشی شامل زاویه اصطکاک و همچنین میزان رفتار تغییرحجم و تعیین کرنش‌حجمی استفاده می‌شود.

مدول برجهندگی **resilent modulus**

از تقسیم بیشینه تنش سیکلی اعمالی بر کرنش کشسان بعد از پایدار شدن رفتار تغییرشکل مصالح بدست می‌آید.

باند فرودگاه **runway**

محلی برای پریدن و فرود هواپیما که دارای لایه های مختلف روسازی از جمله اساس و زیراساس است.

سرباره فولاد **steel slags**

محصول جانبی تولید فولاد است که اغلب دارای وزن مخصوص بیشتری نسبت به مصالح معمول بوده و دارای ساختار حفره‌ای است.

زیراساس **subbase**

لایه زیراساس نخستین لایه روسازی است که برروی بستر روسازی قرار می‌گیرد.

روش شیرابه‌گیری و اندازه‌گیری غلظت مواد سمی سرباره **Toxicity Characteristic Leaching Procedure for slag(TCLP)**

روشی برای میزان غلظت مجاز آلاینده‌ها در شیرابه سرباره‌های فولاد است که مقدار آن قابل مقایسه با مقادیر مجاز برای آب آشامیدنی است.

omoorepeyman.ir

فصل ۱

کلیات

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

۱-۱- مقدمه

در این فصل ضمن ارائه دامنه کاربرد راهنما و محدوده مجاز استفاده از مصالح سرباره آهن و فولاد به عنوان مصالح لایه اساس و زیراساس در راه و باند فرودگاه، محدوده دانه‌بندی مصالح اساس و زیراساس ارائه شده است. پیش از استفاده سرباره به عنوان مصالح اساس و زیراساس دانه‌ای، اجزای آهنی سرباره فولاد به صورت مغناطیسی جدا می‌شوند. سرباره آهن و فولاد باید توسط تجهیزات و ماشین‌آلات خردایش و سرند کردن مشابه مصالح سنگی معمول خرد شده و سرند شوند تا یک دانه‌بندی مناسب از مصالح دانه‌ای سرباره فولاد و آهن تولید شود.

۱-۲- دامنه کاربرد

مصالح مورد اشاره در این راهنما شامل مصالح سرباره آهن و فولاد حاصل از کوره‌های اکسیژن بازی و قوس الکتریکی است که می‌تواند برای تعمیر راه و باند موجود یا ساخت راه جدید در راستای ضوابط و توصیه‌های نشریه‌های ۱۰۱ و ۲۳۴ امور نظام فنی و اجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور برای بار محوری ۸ تن تا کامیونهای معدنی ۱۵۰ تنی و وزن هواپیمای بالای ۳۷۵ تن حمل بار و 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 نسبت به مصالح سنگی طبیعی از یک سو و از سوی دیگر هزینه حمل بیشتر آن ناشی از وزن مخصوص بالاتر، همچنین سایر مزایا یا معایب فنی، اقتصادی و زیست محیطی تعیین می‌شود. 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 راهنما رعایت شود.

در راهنمای حاضر باید مقدار اکسید کلسیم در سرباره‌های آهن و فولاد کمتر از ۴۵ درصد و مجموع مقادیر اکسیدهای آهن و 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 اساس و زیراساس را شامل نمی‌شود. با توجه به سابقه اندک استفاده از این مصالح در راه سازی کشور، توصیه می‌شود به هنگام به کارگیری این مصالح به عنوان مصالح لایه اساس و زیراساس، برنامه مدونی برای پایش محورهای دارای این مصالح از منظر رفتارسنجی و همچنین نگهداری و تعمیر در یک دوره زمانی مد نظر قرار گیرد. ارائه نتایج چنین پایشی به کمیته تدوین کننده این راهنما الزامی است. از نتایج این پایش‌ها برای اصلاح احتمالی آتی در این راهنما استفاده خواهد شد.

omoorepeyman.ir

۱-۳- محدودیت استفاده از سرباره در راه و باند

اگر سرباره آهن و 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 و باند فرودگاه استفاده شود. مصالح سرباره به عنوان لایه سطحی دانه ای و لایه اساس در دو مقطع راه آزمایشی بین‌شهری عملکرد مناسب داشته است (Bialucha et al., 2007).

مهم‌ترین تفاوت مشخصات فنی مصالح اساس و زیراساس در استاندارد ASTM D2940 با نشریات ۱۰۱ و ۲۳۴ این است که استاندارد ASTM D2940 بر خلاف نشریات مورد اشاره، استفاده از مصالح سرباره‌ای در لایه‌های اساس و زیراساس را به شرط کنترل کردن انبساط حجمی آن‌ها مجاز می‌داند. روش آزمون میزان انبساط حجمی نمونه سرباره فولاد مطابق ASTM D4792 معرفی شده است. میزان انبساط حجمی نمونه در روز هفتم قرارگیری در شرایط آزمون نباید بیشتر از ۰/۵ درصد باشد. 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 شسته‌شدن آهک که در این مصالح وجود دارد و باعث بر جای ماندن رسوبات توف می‌شود، توصیه می‌شود(FHWA, 1997). رسوبات توفالیک[1] از قرارگیری مصالح سرباره فولاد در معرض آب و هوا حاصل می‌شوند. توف[2] یک رسوب سفیدرنگ و پودری است که از کربنات کلسیم ($CaCO_3$) 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). مشکل اساسی سرباره، انبساط ناشی از واکنش هیدراتاسیون است (FHWA,1997).

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

۱-۴- دانه بندی مصالح اساس و زیراساس سرباره ای

محدوده منحنی‌های دانه‌بندی مناسب مصالح اساس و زیراساس برای روسازی در ایران، مطابق با نشریه ۱۰۱ و ۲۳۴ سازمان برنامه و بودجه کشور، قابل تعیین است.

---

[1] Tufalike Precipitates

[2] Tufa

omoorepeyman.ir

در اثر خردایش مصالح سرباره ای دو نوع دانه‌بندی به وجود می‌آید که با توجه به مقدار ریزدانه کوچکتر از ۰/۰۷۵میلیمتر(رد شده از الک شماره ۲۰۰) دسته‌بندی می‌شوند: (۱) بدون ریزدانه، (۲) مقدار ریزدانه ردشده الک ۲۰۰ فقط تا به اندازه پر کردن فضاهای خالی بین دانه‌ها باشد.

در حالت اول، مصالح سنگی مقاومت خود را از تماس دانه به دانه درشت‌دانه‌ها به‌دست می‌آورد. در این شرایط اگر مصالح سرباره زیر رویه محصور شده نباشد، ناپایدار خواهد بود، اما زهکشی عالی ایجاد می‌کند و کاملاً به یخ‌زدگی غیرحساس است. در حالت دوم هم مصالح سنگی مقاومت خود را از تماس دانه به دانه درشت‌دانه‌ها به‌دست می‌آورد. در این شرایط معمولاً به علت سابقه مرطوب شدن مصالح سرباره حتی اگرمحدود نشده باشد، به دلیل وجود ریزدانه‌هایی‌که فضاهای خالی بین دانه‌های درشت‌تر را پر می‌کند، پایدار خواهد بود. به‌علاوه زهکشی این مصالح مناسب است و می‌تواند به یخ‌زدگی غیرحساس باشد. لازم به ذکر است اکثر مصالح سرباره ای خردایش شده از نوع اول و به مقدار کمی از نوع دوم است.

هرچند مقدار جذب آب مصالح سرباره‌ای ریزدانه نسبتاً بالا است و در صورت وجود ریزدانه می‌تواند برای اساس و زیراساس مشکل آفرین می‌شود، اما با توجه به مقدار ریزدانه اندک سرباره سرد شده در هوا و خردایش شده(زیردانه کمتر ۲ درصد) مشکلی برای استفاده آنها به عنوان اساس و زیراساس در صورت رعایت مطالب راهنما وجود ندارد. چنانچه به صورت ساختگی درصد ریزدانه سرباره خردایش شده افزایش یابد، می توان با ایجاد سربار مناسب (پوشش با لایه های روسازی) یا ترکیب با مصالح طبیعی از اثرات سو ناشی از جذب آب جلوگیری و از آن استفاده کرد. در ادامه این فصل هر کجا واژه سرباره ذکر شده، منظور سرباره آهن و فولاد است.

براساس بررسی‌های انجام شده در دنیا استفاده از سرباره کوره بلند، سرباره کوره اکسیژنی و سرباره کوره قوس الکتریکی که به صورت تدریجی درهوا خنک شده و فرصت تشکیل فازهای معدنی کریستالی به مذاب داده شده است، در راهسازی و روسازی بالاستی خطوط ریلی به عنوان مصالح دانه‌ای جایگزین مصالح سنگی طبیعی گزارش شده است(FHWA,1997). مشکل اساسی مرتبط با تورم برای آهک آزاد و منیزیم می باشد که باید درصدهای آنها در سرباره کنترل شوند. 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 طولانی‌مدت می‌شود که ممکن است سال‌ها طول بکشد. لذا مهم‌ترین تفاوت مشخصات فنی مصالح اساس و زیراساس در استاندارد های AASHTO M147 وASTM D1241 با استاندارد ASTM D2940 و نشریات ۱۰۱ و ۲۳۴ این است که این استانداردها بر خلاف آن نشریات، استفاده از مصالح سرباره‌ای در لایه‌های اساس و زیراساس را تنها در اندازه‌های درشت به ترتیب (بزرگتر از ۲ میلیمتر و ۴/۷۵ میلیمتر) مجاز می‌داند و استفاده از مصالح سرباره‌ای در اندازه‌های کوچکتر از ۲ میلیمتر و ۴/۷۵ میلیمتر مجاز نیست و به جای آنها استفاده از مصالح ماسه شکسته یا طبیعی و ذرات معدنی مناسب توصیه می شود. استفاده از مصالح با دانه‌بندی پیوسته برای سرباره به عنوان اساس و زیراساس توصیه می شود.

omoorepeyman.ir

۱-۴-۱- محدوده دانه بندی مصالح اساس سرباره‌ای

طبق نشریه ۱۰۱ و ۲۳۴ اندازه دانه‌های اساس و زیراساس تا ۵۰ میلیمتر و از سنگ شکسته، تیزگوشه با سطوح زبر بوده و باید حالت پولکی و سوزنی نداشته باشد(جدول ۱-۱).

جدول (۱-۱) درصد وزنی عبوری از الک‌های مختلف برای مصالح اساس (اصلاح شده نشریات ۱۰۱، ۲۳۴)

قطر چشمه الک (اینچ) یا شماره	اندازه (میلیمتر)	گروه (حد بالا و پایین) نشریات ۱۰۱، ۲۳۴										ASTM D2940	
		۱		۲		۳		۴		۵			
۲	۵۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	–	–	–	–	۱۰۰	۱۰۰
۱/۵	۳۷/۵	۱۰۰	۹۵	–	–	–	–	–	–	–	–	۱۰۰	۹۵
۱	۲۵	۸۰	۶۰	۸۵	۷۰	۹۵	۷۵	۱۰۰	۷۰	۱۰۰	۱۰۰	–	–
۰/۷۵	۱۹	۹۲	۷۰	۸۰	۶۰	–	–	۹۰	۶۰	–	–	۹۲	۷۰
۰/۵	۱۲/۵	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
۰/۳۷۵	۹/۵	۷۰	۵۰	۶۵	۳۰	۷۵	۴۰	۷۵	۴۵	۸۵	۵۰	۷۰	۵۰
#۴	۴/۷۵	۵۵	۳۵	۵۵	۲۵	۶	۳۰	۶۰	۳۰	۶۵	۳۵	۵۵	۳۵
#۱۰	۲	–	–	۴۰	۱۵	۴۵	۲۰	۵۰	۲۰	۵۰	۲۵	–	–
#۳۰	۰/۶	۲۵	۱۲	–	–	–	–	–	–	–	–	۲۵	۱۲
#۴۰	۰/۴۲۵	–	–	۲۰	۸	۳۰	۱۵	۳۰	۱۰	۳۰	۱۵		
#۷۰	۰/۲۱	۵	۲	۵	۲	۵	۲	۵	۲	۵	۲	۵	۲
#۲۰۰[۱]	۰/۰۷۵	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰	۲	۰

[۱] برای اساس و زیراساس درصد وزنی مواد رد شده از الک ۲۰۰ نباید از دو سوم درصد وزنی رد شده از الک ۴۰ بیشتر باشد(ASTM D1241 و AASHTO M147).

در صورت استفاده از مصالح سرباره به عنوان اساس، باید دانه‌ها سخت، محکم، بادوام، تمیز، مکعبی‌شکل و عاری از هر گونه مواد آلی، رسی، شیستی، پوشش خاکی و دانه‌های سست و آهک باشد. مطابق این راهنما دانه‌بندی اساس سرباره‌ای مطابق با گروه ۱ با محدود کردن درصدگذشته ۰/۲۱ mm به ۵٪ و درصد گذشته از ۰/۰۷۵ mm به زیر ۲٪ توصیه می‌شود.

۱-۴-۲-محدوده دانه‌بندی مصالح زیراساس

مصالح زیراساس باید ضمن برخورداری از مدول برجهندگی مناسب و کرنش پلاستیک کم برای تحمل بارهای وارده و محدود کردن نشست درحد قابل قبول، قابلیت تخلیه آب ورودی از لایه اساس و یا لایه بستر را به طرفین مسیر، دارا باشد. به این منظور لازم است که دانه‌بندی مصالح زیراساس از نظر اندازه بین مصالح اساس و بستر قرار گیرد(جدول ۱-۲).

همانند زیراساس سنگدانه ای، اساس و زیراساس سرباره‌ای نیز می‌بایست معیارهای فیلتراسیون و زهکشی مطابق روابط (۱-۱) و (۱-۲) میان اساس (فیلتر)-زیراساس (خاک محافظت شده) و زیراساس (فیلتر)-بستر(خاک محافظت شده) را برآورده کرد. نظر به مشخص بودن منحنی دانه‌بندی بستر، در ابتدا لازم است منحنی دانه‌بندی مصالح زیراساس

omoorepeyman.ir

به عنوان فیلتر مصالح بستر با توجه به معیارهای فوق انتخاب شود. در ادامه با توجه به نقش اساس به عنوان فیلتر زیراساس لازم است حد پایین منحنی دانه‌بندی مصالح اساس ($D_{15(f)}$) به اندازه کافی از حد بالای منحنی دانه‌بندی مصالح زیراساس ($D_{85(ps)}$) کوچک‌تر باشد (رابطه ۱-۱). همچنین برای زهکشی مناسب آب ورودی به راه لازم است حد میانی منحنی دانه‌بندی مصالح اساس ($D_{50(f)}$) به اندازه کافی از حد میانی منحنی دانه‌بندی مصالح زیراساس ($D_{50(ps)}$) کوچک‌تر باشد (رابطه ۱-۲).

$$D_{15(f)} \leq 5\ D_{85(ps)} \qquad (۱-۱)$$

$$D_{50(f)} \leq 25\ D_{50(ps)} \qquad (۱-۲)$$

به منظور اطمینان از سهولت زهکشی در مصالح اساس، زیراساس و بستر می‌توان علاوه بر دو معیار فوق، معیار زیر را نیز لحاظ کرد.

$$D_{15(f)} > 5\ D_{15(ps)} \qquad (۱-۳)$$

در این روابط $D_{15(f)}$ و$D_{50(f)}$ به ترتیب قطر مصالح فیلتر متناظر با درصد عبوری ۱۵ و ۵۰ و$D_{15(ps)}$، $D_{50(ps)}$ و $D_{85(ps)}$ به ترتیب قطر خاک محافظت شده توسط مصالح فیلتر متناظر با درصد عبوری ۱۵، ۵۰ و ۸۵ است.

جدول (۱-۲) دانه بندی مجاز از الک‌های مختلف زیراساس سنگی و شنی مصرفی طبق نشریات ۱۰۱ و ۲۳۴ (اصلاح شده برای ۱۰۰درصد سرباره)

قطر چشمه‌های الک (اینچ) یا شماره	اندازه (میلیمتر)	گروه (مرز بالا/مرز پایین) نشریات ۱۰۱ و ۲۳۴								ASTM D2940	
		۱		۲		۳		۴			
۲	۵۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	–	–	۱۰۰	۱۰۰
۱/۵	۳۷/۵	–	–	۹۰	۱۰۰	–	–	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۰
۱	۲۵	۷۵	۸۰	۷۵	۹۰	۷۵	۹۵	۱۰۰	۹۰	–	–
۰/۳۷۵	۹/۵	۳۰	۶۵	۴۰	۷۰	۴۰	۷۵	۸۰	۵۵	–	–
#۴	۴/۷۵	۲۵	۵۵	۳۰	۶۰	۳۰	۶۰	۶۰	۴۰	۶۰	۳۰
#۱۰	۲	۱۵	۴۰	۲۰	۵۰	۲۰	۴۵	۴۸	۲۸	–	–
#۴۰	۰/۴۲۵	۸	۲۰	۱۰	۳۰	۱۵	۳۰	۲۸	۱۴	–	–
[1]#۷۰	۰/۲۱	۳	۶	۳	۶	۳	۶	۶	۳	–	–
[2,3]#۲۰۰	۰/۰۷۵	۰	۳	۰	۳	۰	۳	۳	۰	۳	۰

[1] برای زیراساس سرباره 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 ۲۰۰ میکرون از ۳ درصد تجاوز ننماید.

[2] طبق ASTM D2940 برای مصالح اساس و زیراساس درصد وزنی مواد رد شده از الک ۲۰۰ نباید از سه پنجم درصد وزنی رد شده از الک ۳۰ بیشتر باشد.

[3] طبق ASTM D2940 در صورتی که در لایه اساس و زیراساس از ترکیب مصالح سرباره‌ای و طبیعی استفاده می‌شود، برای کاهش حساسیت مصالح اساس و زیراساس 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.

omoorepeyman.ir

در صورت وجود بستر ریزدانه ممکن است یک لایه زیراساس نتواند به تنهایی معیارهای بالا را برآورده کرد، در این صورت استفاده از زیراساس دولایه‌ای با رعایت معیارهای فوق الزامی است. در صورت عدم دسترسی به مصالح مناسب برای لایه زیراساس درتماس با بستر می توان از مصالح ژئوسنتتیک مانند ژئوتکستایل یا ژئوکامپوزیت به عنوان جایگزین استفاده نمود. مطابق این راهنما، دانه‌بندی زیراساس سرباره‌ای نوع ۱ با محدودکردن درصدگذشته ۰/۲۱ mm به ۶٪ و درصد گذشته از ۰/۰۷۵mm به زیر ۳٪ توصیه می شود.

حین ارتعاش قالب استوانه‌ای مخصوص تراکم که با مصالح اساس و زیراساس سرباره فولاد (با بیشینه ۲۰ درصد ماسه گذشته از الک با اندازه چشمه ۰٫۲۱ میلیمتر) در شرایط اشباع پر شده است، مشاهده شد که ضمن نشست نمونه و افزایش تراکم آن، دوغاب مصالح ریزدانه از پایین به بالا حرکت نموده که می‌تواند در عمل منجر به مشکلات برای بدنه راه شود. از این رو توصیه می‌شود مقدار بیشینه ۲۰ درصد ماسه (زیر ۰٫۲۱ میلیمتر) در دانه‌بندی مصالح اساس و زیراساس به ترتیب کمتر از ۵ درصد و ۶درصد و درصد عبوری از الک شماره ۲۰۰، به ترتیب کمتر از ۲ درصد و ۳ درصد محدود شود. از طرفی، آهک آزاد اسفنجی[1] با اندازه ذرات ۶ تا ۵۰ میکرومتر، مهمترین عامل انبساط حجمی سرباره است (Wang, 2016). لیکن احتمالاً ذرات ریزتر آهک آزاد (با اندازه ۳ تا ۱۰ میکرومتر) علت اصلی انبساط حجمی نیستند(Geiseler, 1996).

آهک آزاد یا پخته نشده یا ترکیب‌نشده (f-CaO) با وزن مخصوص ۳/۳۴ می‌تواند با رطوبت واکنش دهد و هیدروکسیدکلسیم $Ca(OH)_2$ 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).

لذا عدم وجود ریزدانه به صورت خودکار، اثرات مخرب ناشی از آن در لایه های اساس و زیراساس را حذف می کند.

۱-۵- ضخامت لایه‌های اساس و زیراساس

مهمترین مشخصه‌های هندسی لایه‌های اساس و زیراساس که بر عملکرد راه به عنوان یک سازه تاثیرگذارند ضخامت آنها است. مجموع ضخامت لایه‌های اساس و زیراساس باید تنش‌های قائم وارد بر بستر را تا حد مجاز قابل تحمل توسط بستر(برای عدم بروز گسیختگی برشی و نیز برای کاهش نشست‌ها) کاهش دهد. همچنین ضخامت زیراساس باید به گونه ای انتخاب شود تا از نفوذ مصالح ریزدانه بستر به درون لایه اساس و زیر رویه جلوگیری کند.

در تعیین ضخامت لایه ها از مقادیر بزرگ پارامترهای مقاومتی و طراحی مصالح سرباره صرف‌نظر شده و مشابه مصالح طبیعی، حدود ارائه شده در نشریه ۲۳۴ رعایت شود.

[1] Spongy free lime

omoorepeyman.ir

فصل ۲

مشخصات اساس و زیراساس سرباره‌ای و معیارهای پذیرش

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

۲-۱- مقدمه

در این فصل ضمن معرفی انواع سرباره‌های آهن و فولاد تولید شده در ایران، روش‌های سردکردن، فرآوری و آماده‌سازی این مصالح، همچنین مشخصات فنی، معیارهای پذیرش و دوره‌های زمانی انجام آزمون‌های کنترل کیفیت با هدف استفاده از مصالح سرباره آهن و فولاد به عنوان مصالح لایه اساس و زیراساس ارائه شده است. در ادامه، ملاحظات مربوط به ترکیب شیمیایی سرباره‌ها، کنترل میزان انبساط مصالح، ترکیب شیمیایی شیرابه سرباره‌ها و نظایر آن برای مصالح سرباره‌ای ارائه شده است.

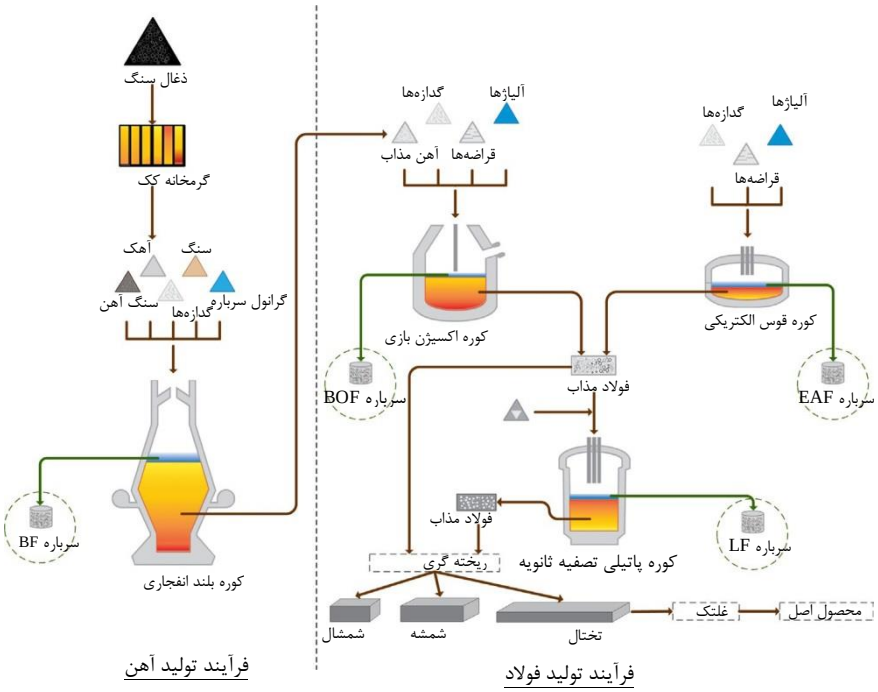
۲-۲- انواع سرباره های آهن و فولاد در ایران

سرباره عمده‌ترین پسماند زنجیره تولید آهن و فولاد محسوب می‌شود که ساختاری نسبتاً پیچیده و تا حدودی کریستالی دارد و به علت ماهیت فرآیند فولادسازی، به صورت توده‌ای از نظر فیزیکی متخلخل اما متشکل از ذرات با سختی و استحکام بسیار بالا است. سرباره به علت دارا بودن اجزای آهن‌دار از وزن مخصوص نسبتاً بالایی برخوردار است، از آنجایی‌که آهن قراضه سهمی بسیار ناچیز در سبد مواد اولیه تولید فولاد کشور دارد و عمده فولاد از مواد دست اول معدنی تولید می‌شود، سرباره فرآیند فولادسازی ایران با مشکل دارا بودن فلزات سنگین مواجه نیست.

در شکل (۲-۱) فرآیندهای تولید آهن و فولاد و محصولات جانبی (انواع سرباره‌ها) به صورت شماتیک نشان داده شده است. سهم تولید فولاد از طریق کوره بلند در دنیا بالای ۸۰ درصد است. در این فرآیند، سنگ آهن بر اثر مخلوط شدن با ذغال سنگ، کک و سنگ آهک در یک کوره بلند[1] (BF) به آهن تبدیل می‌شود. در مرحله بعد، آهن با استفاده از کوره اکسیژن بازی[2] (BOF) و یا کوره قوس الکتریکی[3] (EAF) به فولاد تبدیل 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(EAF) تقریباً ۱۰۰ درصد قراضه و ضایعات استفاده می‌شود(Grubeša et al., 2016). بخش عمده سرباره‌های فولاد کشور، سرباره های BOF و EAF است. حدود ۷۰ درصد فولاد ایران از طریق EAF و حدود ۳۰ درصد از طریق BOF تولید می‌شود. سرباره کوره‌های قوس الکتریکی حاصل تغذیه آهک و دولومیت به منظور تصفیه و کنترل فرآیند فولادسازی و ناخالصی‌های موجود[4] در ترکیب آهن اسفنجی مصرفی 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.

[1] Blast Furnace
[2] Basic Oxygen Furnace
[3] Electric Arc Furnace
[4] Gangue

omoorepeyman.ir



شکل (۱-۲) فرآیند یکپارچه تولید آهن و فولاد و انواع سرباره‌های تولید شده(Wang, 2016)

در کوره‌های فولادی نیز 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). در ایران با توجه به کیفیت مواد اولیه دردست، به ازای تولید هر تن فولاد در حدود ۳۰۰ الی ۳۵۰ کیلوگرم سرباره تولید می‌شود که این سرباره به صورت فاز مذاب در دمایی در حدود ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد از کوره تخلیه می‌شود. سرباره پس از تخلیه در هوا، معمولاً به کمک پاشش آب خنک شده و سپس به محل‌های انباشت (دپو) منتقل می‌شود.

۲-۳- سرد کردن و دانه بندی سرباره ها

سرباره خروجی از کوره فولاد، دارای دمای بسیار بالایی بوده و با استفاده از آب یا هوا خنک می‌شود. بسته به میزان آب مورد استفاده برای خنک کردن، سرباره اسفنجی شده یا ریزدانه می‌شود. توصیه می‌شود برای کاربرد سرباره به عنوان اساس و زیراساس راه و باند از سرباره سرد شده در معرض هوا به دلیل چگالی بالاتر و بافت درشت‌تر استفاده شود. سرباره سرد شده، در مکان مناسبی انباشت می‌شود. به دلیل امکان وجود آهک نشکفته درون سرباره انباشت شده، بایستی سرباره آبپاشی شود و به اندازه کافی زمان داده شود تا آهک درون سرباره‌ها شکفته شود. در صورت عدم آبپاشی مکانیزه و به شرط وجود بارندگی، حداقل زمان ماند سرباره در محل انباشت، ۶ ماه توصیه می‌شود. برای استفاده از سرباره، به عنوان مصالح اساس و زیراساس، این مصالح باید خرد شده و دانه‌بندی شود.

omoorepeyman.ir

۲-۴- آزمایشهای کنترل کیفیت و معیارهای پذیرش

خلاصه آزمایش‌های کنترل کیفی مصالح زیراساس و اساس به همراه معیارهای پذیرش به ترتیب در جدول (۲-۱) ارائه شده است. پس از فرآوری سرباره به صورت اساس و زیراساس لازم است از هر ۱۸۰ تن اساس آماده شده حداقل ۴۵ کیلوگرم نمونه گرفته شده و آزمایش‌های تعیین درصد مصالح ریزتر از الک شماره ۲۰۰، تعیین درصد کلوخه‌های رسی و سنگدانه‌های شکسته، میزان سایش، تعیین درصد افت وزنی در برابر سولفات سدیم، تعیین وزن مخصوص، درصد جذب آب، درصد تطویل و تورق، تعیین مشخصات شیرابه و pH روی آن انجام شود. در صورت هرگونه تغییر معدن و غیره باید آزمایشهای لازم توسط کارخانه تولید کننده انجام شود. کارخانه برای استفاده از سرباره، باید گواهینامه فنی تایید محصول را از مراجع معتبر اخذ نمایند. چنانچه نتایج کنترل کیفیت زیراساس و اساس سرباره‌ای مطابق جدول (۲-۱) نزدیک به حدود بالا و پایین تعریف شده قرار گیرد، به منظور اطمینان از رفتار پایدار مصالح، انجام آزمایش‌های دینامیکی تعیین مدول برجهندگی، نشست و شکست دانه‌ها الزامی خواهد بود. روش انجام آزمون‌ها و محدوده مقادیر قابل قبول مدول برجهندگی، نشست و شکست دانه‌ها در پیوست "الف" ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که درصد تورق و تطویل سنگدانه‌ها برای مصالح سنگ طبیعی بیشتر از مصالح سرباره برای دانه بندی آزمایش شده طبق استاندارد است. مقدار ارزش ماسه‌ای مصالح سرباره EAF شرکت فولاد مبارکه و BOF ذوب آهن اصفهان بر اساس استاندارد ASTM D2419 به ترتیب ۵۴ درصد و ۸۰ درصد است.

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(AASHTO M147).

در صورتی که قرار است از مصالح دانه‌ای سرباره‌ای در رویه‌های شنی استفاده شده و روی آن تا چندین سال روکش آسفالتی نشود، بهتر است مهندس مشاور پروژه حداقل درصد مقدار عبوری از الک ۲۰۰ در دانه‌بندی‌های اساس و زیر اساس را ۸٪ با افزون مصالح ریزدانه طبیعی در نظرگرفته و حداکثر حدروانی را ۳۵ تعریف کرده و دامنه‌خمیری را بین ۴ تا ۹ انتخاب کند(AASHTO M147). در صورت وجود مصالح سرباره‌ای ریزدانه، نیازی به افزودن مصالح ریزدانه مانند ریزدانه طبیعی برای افزایش چسبندگی خاک نیست. زیرا سرباره ماده‌ای است که فعالیت هیدرولیکی (فعل و انفعال در مجاورت آب) دارد و به دلیل چسبندگی ناشی از فعالیت هیدرولیکی محصولات با استحکام بیشتر و با دوام‌تر ارائه می دهد(Wang, 2016).

جدول (۲-۱) آزمون‌های کنترل کیفیت و معیارهای پذیرش مصالح اساس و زیراساس سرباره‌ای

مشخصه و آزمایش	روش آزمایش	مقدار مجاز		
		سرباره آهن (BF)	سرباره فولاد (BOF)	(EAF)
دانه بندی	ASTM C136	مطابق جدول (۱-۱) و (۱-۲)		
درصد مصالح ریزتر از الک شماره ۲۰۰ اساس	ASTM C117	≤ ۲	≤ ۲	≤ ۲

omoorepeyman.ir

درصد مصالح ریزتر از الک شماره ۲۰۰ زیراساس بعد کوبش	ASTM C117	≤۳	≤۳	≤۳
درصد مصالح ریزتر از الک شماره ۷۰ اساس	ASTM C117	≤ ۵	≤ ۵	≤۵
درصد مصالح ریزتر از الک شماره ۷۰ زیراساس بعد کوبش	ASTM C117	≤۶	≤۶	≤۶
وزن مخصوص	ASTM C127	≥ ۲٫۳	≥ ۲٫۶	≥ ۲٫۹
درصد جذب آب	ASTM C127	≤ ۵	≤ ۲/۵	≤ ۱/۵
حد خمیری[1] (عبوری الک ۴۰#)زیراساس (AASHTO M147، ASTM D1241) بدون یخبندان	ASTM D 4318 و ASSHTO T90	<۶	<۶	<۶
حد خمیری[1] (عبوری الک ۴۰#)اساس (AASHTO M147، ASTM D1241)	ASTM D 4318 و ASSHTO T90	<۴	<۴	<۴
حد روانی[1] (عبوری الک ۴۰#) (AASHTO M147، ASTM D1241)	ASTM D 4318 و ASSHTO T89	<۲۵	<۲۵	<۲۵
درصد سایش لس‌آنجلس[2](AASHTO M147، ASTM D1241)	ASTM C131, C535 ASSHTO T96	≤۵۰	≤۵۰	≤۳۰
درصد سایش لس‌آنجلس برای ۱۰۰۰ دور اساس و زیراساس	ASTM C535 ASTM C131	≤ ۳۸	≤ ۳۸	≤ ۳۰
درصد سایش لس‌آنجلس برای ۸۰۰ دور در لایه رویه پروژه‌های مهم مانند فرودگاه‌ها و راه‌های اصلی	ASTM C535 ASTM C131	≤ ۳۰	≤ ۳۰	≤ ۲۵
درصد کلوخه‌های رسی و سنگدانه‌های شکننده	ASTM C142	≤ ۰٫۵	≤ ۰٫۵	≤ ۰٫۵
CBR در تراکم ۱۰۰٪ زیراساس راه (درصد)	ASTM D1883,AASHTO T193	≤ ۳۰	≤ ۳۰	≤ ۳۰
CBR در تراکم ۱۰۰٪ اساس راه (درصد)	ASTM D1883,AASHTO T193	≤ ۸۰	≤ ۸۰	≤ ۸۰
CBR زیراساس باند فرودگاه (مشروط به عدم یخ زدن) (درصد)	ASTM D1883	≤۳۵	≤ ۳۵	≤ ۳۵
CBR اساس باند فرودگاه (مشروط به عدم یخ زدن) (درصد)	ASTM D1883	≤۱۰۰	≤ ۱۰۰	≤ ۱۰۰
ارزش ماسه ای زیراساس (پس ازکوبیدگی)- برای تراز بالای یخبندان(۳۰-۲۵) (درصد)	ASTM D 2419 و ASSHTO T176	≤ ۳۵	≤ ۳۵	≤ ۳۵
ارزش ماسه ای اساس (پس ازکوبیدگی)-بیش از ۵۰ برای سرباره(درصد)	ASTM D 2419 و ASSHTO T176	≤ ۴۰	≤ ۴۰	≤ ۴۰
شکستگی در دو جبهه- مانده روی الک ۴/۷۵ میلیمتر (درصد)[4]	ASTM D 5821	۵۰	۵۰	۵۰
درصد افت وزنی در برابر سولفات سدیم برای ۵	ASTM C88 و	≤ ۵	≤ ۵	≤ ۵

omoorepeyman.ir

دوره متوالی خشک و تر شدن (حداکثر ۱۲٪ برای مصالح طبیعی)	ASSHTO T104			
درصد افت وزنی در اثر ذوب و یخ (تعداد دوره ذوب و یخ)	ASSHTO T103	۱۲	≤ ۸	≤ ۸	≤ ۸
		۲۵	≤۱۰	۱۰	۱۰
درصد تطویل* و تورق روی ۹/۵ میلیمتر	ASTM D4791(بزرگتر از ۹/۵ میلیمتر) BS 812-105.1 (بزرگتر از ۶ میلیمتر)		≤ ۱۵	≤ ۱۵	≤ ۱۵
درصد سایش میکرودوال برای ۱۲۰۰۰ دوران (درشت دانه۱۹-۹/۵ میلیمتر)	ASTM D6928		≤۲۲	≤۱۸	≤۱۸
درصد سایش میکرودوال برای ۱۵۰۰ دوران (ریزدانه ۴/۷۵-۰/۰۷۵ میلیمتر)	ASTM D7428		≤ ۱۵	≤ ۱۲	≤ ۱۲
شاخص بار نقطه ای(Is (50) (MPa	ASTM D5731		۴<	۴<	۴<
شاخص صیقلی شدن(٪)			۵۰-۶۳		
ارزش ضربه مصالح (AIV) (درصد)	BS 812-112			۲۳	۱۰
ارزش شکست (ACV) (درصد)	BS 812-110		۳۰	۳۳	۲۰
سختی موس			۵-۷	۵-۷	۵-۷
گوشه داری ریزدانه (در مصالح سنگی طبیعی برابر ۴۵ است)				۵۲	۵۰
pH	ASTM G51		≤۱۱/۵	≤ ۱۱/۵	≤ ۱۱/۵
درصد آهک نشکفته[۳،۵]	ASSHTO T219		≤۳	≤۳	≤ ۳
درصد انبساط حجمی	ASTM D4792		≤ ۰/۵	≤ ۰/۵	≤ ۰/۵
غلظت آلاینده ها و مواد سمی در شیرابه	EPA METHOD 1311		مطابق جدول (۲-۴)		

[۱] سرباره بدون حد خمیری

[۲] با توجه به مصالح معمولی در دسترس پروژه، گاهی استفاده از مصالح با مقدار سایش لوس‌آنجلس بالاتر تا ۵۰ درصد به شرط عملکرد مناسب در عمل در لایه‌های میانی روسازی مانند اساس و زیراساس مجاز است.

۳ 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 باز باید دو ماه دیگر تا انجام آزمایش مجدد صبر نمود. در حالی که مقدار آهک آزاد در نمونه سرباره‌های BOF در حدود ۵ برابر مقدار آهک آزاد موجود در نمونه‌های سرباره فولاد EAF است.

[۴] نشریه ۲۳۴ و ASTM D 5821حداقل ۷۵

۵ در کشورهای بلژیک و هلند، مقدار آهک آزاد موجود در سرباره فولاد مصرفی برای کاربردهای سرباره به عنوان 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).

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

omoorepeyman.ir

۲-۵- ترکیبات شیمیایی سرباره ها

ترکیب شیمیایی سرباره‌ها با توجه به تنوع مصالح و مشخصات کوره‌های آهن‌گذاری و نوع فولاد تولیدی و معدن مصالح اولیه تغییر می کند. محدوده ترکیبات شیمیایی سرباره‌های آهن و فولاد بسته به روش تولید در جدول (۲-۲) نشان داده شده است. مقادیر وزنی ترکیبات شیمیایی موجود در مصالح از طریق تحلیل اجزا توسط فلورانس اشعه ایکس[1] (XRF) قابل تعیین است (ASTM E1621, 2013).

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

اجزای تشکیل‌دهنده	مقدار ترکیب (درصد)					
	سرباره کوره بلند		سرباره فولاد			
	BF		BOF		EAF	
کشور/مرجع	ایران	(Wang, 2016)	ایران	(Wang, 2016)	ایران	(Wang, 2016)
CaO	۳۲-۴۱	۳۱-۵۰	۲۶-۵۷	۳۵-۴۵	۱۷-۴۱	۴۰-۶۰
گروه FeO	۰-۴	۰/۳-۲	۱۴-۳۴	۱۰-۲۵	۱۹-۴۵	۱۰-۳۰
SiO_2	۳۱-۳۹	۲۷-۴۵	۹-۲۱	۱۲-۱۷	۱۱-۲۲	۱۰-۳۰
MnO	۱-۲/۵	۰/۱-۲/۳	۳-۵	۵-۱۵	۰/۲-۵/۷	۲-۵
MgO	۶-۱۲	۱-۱۸	۱-۷/۵	۳-۱۵	۴-۱۲	۳-۸
Al_2O_3	۵-۱۵	۷-۲۴	۰/۵-۸	۰/۹۸-۳/۴	۳-۹	۲-۹
P_2O_5	۰/۱	<۰/۱	۱/۲-۵	۰/۲-۴	<۲/۵	۰-۱/۲
TiO_2	۳-۵		۰/۵-۳/۵		<۲/۵	
V_2O_5	--		۰/۵-۳		<۲	
SO_3	<۳	۰/۶-۳/۰	<۱	۰-۰/۳	<۲/۵	۰/۱-۰/۶
K_2O	<۱/۵		<۰/۵		<۱	
Na_2O	<۱		<۰/۵		<۱	
Cr (Autelitano and Giuliani, 2015)						۰/۸۴
درصد افت وزنی در اثر حرارت LOI	<۱۰		<۱۵		<۲۰	

× برای تعیین اکسید منیزیم (MgO) آزمایش می‌بایست مطابق EN 196-2 انجام و نتایج آن ارائه شود. اگر میزان اکسید منیزیم بیشتر از ۵ درصد نباشد زمان آزمایش می‌بایست ۲۴ ساعت در نظر گرفته شده و در غیر این صورت این زمان برابر ۱۶۸ ساعت است.

به منظور استفاده از سرباره‌های آهن و فولاد به عنوان زیراساس و اساس در راه و باند ضروری است مقدار اکسید کلسیم در سرباره‌های آهن و فولاد کمتر از ۴۵ درصد و مجموع مقادیر اکسیدهای آهن و آلومینیوم در سرباره آهن و فولاد به ترتیب کمتر از ۱۷ و ۳۰ درصد باشد. مطابق نتایج حاصل از روش XRF مقدار اکسیدهای آهن در نمونه‌های

[1] X-ray Fluorescence

omoorepeyman.ir

سرباره فولاد EAF در حدود ۳۰ الی ۴۰ درصد بیش از مقادیر اکسیدهای آهن موجود در نمونه‌های سرباره فولاد BOF می باشد.

سرباره فولاد را به سادگی می‌توان با یک سیستم چهارجزئی $CaO-MgO-SiO_2-FeO$ نشان داد. در روش‌های ساخت فولاد با فسفر کم، مقدار کل این اکسیدها در سرباره مایع در محدوده ۹۲-۸۸ درصد است. لذا محدوده ترکیبات شیمیایی سرباره BOF و EAF نزدیک به هم بوده و آهک، سیلیس و اکسید آهن بخش اعظم ترکیبات آن‌ها را تشکیل می‌دهند. درصد اکسیدهای آهن سرباره به میزان کربن فولاد بستگی دارد و به طور کلی برای مقادیر کمتر کربن، درصد آهن افزایش می‌یابد(Kokal ۲۰۰۶).

فازهای تشکیل‌دهنده عناصر به کمک تحلیل پراش پرتو ایکس (XRD) مطابق BS EN 13925-1 (۲۰۰۸) قابل تعیین است(جدول ۲-۳). در این آزمایش محدوده زاویه براگ θ بین ۱ تا ۵۰ درجه، جریان ۳۰ میلی‌آمپر، ولتاژ ۴۰ کیلوولت و طول موج پرتو x (k_α تیوب مس) است. نتایج آزمایش میزان سمی بودن شیرآبه مصالح سرباره نیز نشان می‌دهد که این مصالح، محصولی جانبی بی‌اثر و کم‌خطر است(Reis Ferreira et al., 2020).

جدول (۲-۳) نتایج تعیین فازهای تشکیل دهنده نمونه مصالح سرباره های فولاد و مصالح سنگی مورد بررسی به روشXRD

سنگ های معدنی		سرباره های فولاد		
گرانیت	آهک	EAF فولاد مبارکه	EAF فولاد خراسان	BOFذوب آهن اصفهان
Feldspar (Ca, Na)	$CaCO_3$	$Ca_3 Mg (SiO_4)_2$	$Ca_3 Mg (SiO_4)_2$	CaCO
SiO_2	SiO_2	FeO	FeO	SiO_2
Fe_2O_3	-	Fe_3O_4	Fe_3O_4	FeO
$CaCO_3$	-	$Ca_2 Al_2 SiO_7$	$Ca_2 Al_2 SiO_7$	$Ca_2 SiO_4$
Feldspar (K)	-	$CaCO_3$	$CaCO_3$	Fe_3O_4
Clay Mineral	-	$Ca_3 SiO_5$	$Ca TiO_3$	$Ca_2 Al (Al, Si)_2 O_7$
FeO (OH)	-	-	-	$Ca_2 Mg Si_2 O_7$
-	-	-	-	$Ca_3 Al_2 O_6$
-	-	-	-	$MgSi O_3$

۲-۵-۱- کنترل میزان انبساط مصالح سرباره ای

انبساط حجمی ناشی از هیدراتاسیون آهک آزاد و اکسید منیزیم موجود در سرباره‌ها می‌تواند موجب تورم و بروز تغییرشکلهای نابرابر در لایه‌های روسازی شود. طی فرآیند خنک شدن سرباره فولاد و هنگام تشکیل ساختارهای بلوری، دو نوع آهک آزاد باقیمانده[1] و آهک آزاد رسوبی[2] تشکیل می‌شود. یعنی مقدار آهک آزاد اندازه‌گیری‌شده از دو بخش آهک آزاد باقیمانده و آهک آزاد رسوبی تشکیل شده است و 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

[1] Residual free CaO

[2] Precipitated free CaO

omoorepeyman.ir

رسوبی است و اگر کل آهک آزاد اندازه‌گیری شده بیشتر از ۴ درصد باشد، حاوی ۲/۸ درصد آهک رسوبی است(1996 (Sersaleet al., 1986), (Geiseler,. از این رو لازم است بیشینه مقدار آهک آزاد در سرباره‌ها برای به کارگیری به عنوان لایه اساس و زیراساس به زیر ۳ درصد محدود شود. در روش آزمون انبساط تسریع شده پیشنهادی توسط EN 13242:2013، میزان انبساط حجمی مصالح سرباره‌ای تحت بخار ۱۰۰ درجه می‌بایست کمتر از ۵٪ باشد. در صورت تجاوز از این مقدار، باید میزان انبساط مصالح سرباره‌ای در آزمایشگاه مطابق روش متداول پیشنهادی توسط ASTM D4792 تعیین شود. در این روش 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 سربار ۴۵۶۰ گرم (۲۵ گرم بر سانتیمترمربع) و بدون سربار آزمایش می شوند. این نمونه‌ها درون حمام آب در دمای ۳±۷۴ درجه سانتیگراد غوطه‌ور شدند. براین اساس لازم است میزان انبساط مصالح سرباره‌ای در اثر غوطه‌وری ۷ روزه در آب ۷۰ درجه سانتی‌گراد کمتر از ۰/۵ درصد باشد. مقادیر انبساط نمونه‌های دارای سربار، به‌طور متوسط، به اندازه ۷ تا ۱۶ درصد کمتر از نمونه‌های بدون سربار برای سرباره BOF است(Wang, 2016). 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 محاسباتی و تخمینی 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 حتی با وجود درصد آهک آزاد بین ۳/۹-۳/۷ درصد رخ نخواهد داد((Wang, 2016). این کار با ایجاد لایه رویه (مثلاً از آسفالت) ضخیم‌تر از ۱۰ سانتیمتر قابل انجام است.

۲-۵-۲- ملاحظات فنی در خصوص شیرابه سرباره ها

با هدف ارزیابی تاثیرات زیست‌محیطی استفاده از سرباره‌ها به عنوان مصالح اساس و زیراساس، غلظت فلزات سنگین نظیر کروم (Cr) و وانادیم (V) و میزان آلایندگی شیرابه حاصل از سرباره‌ها اندازه‌گیری می‌شود. باید در نظر داشت که pH بالای شیرابه سرباره فولاد می‌تواند در تسریع خوردگی لوله‌های آلومینیومی و فولادی گالوانیزه، کالورت‌های مدفون و همچنین آهن آلات موجود در بدنه راه و باند موثر باشد. همچنین pH بالا می‌تواند از منظر زیست محیطی، زندگی آبزیان را در نهرها و آبروهای مجاور جاده به خطر اندازد. برای ارزیابی غلظت آلاینده‌ها و مواد سمی در شیرابه سرباره فولاد، لازم است شیرابه‌گیری و اندازه‌گیری غلظت مواد سمی[1] (TCLP) مطابقEPA Method 1311 انجام شود. در جدول (۲-۴) میزان غلظت مجاز آلاینده‌ها در شیرابه سرباره‌های فولاد (۱۰ برابر مقادیر مجاز برای آب آشامیدنی) ارائه شده است. لازم به ذکر است مقدار مجاز آلاینده ها در جدول (۲-۴) حدود ۱۰ برابر مقادیر مجاز غلظت آنها برای آب آشامیدنی است. لازم به ذکر است برحسب غلظت فلزات سنگین در شیرابه، پسماند در ۴ I (برابر۱۰۰IV)، II (برابر۲۵IV)، III (برابر ۱۰IV) و IV)گروه طبقه‌بندی می شود. بر این اساس شیرابه نوع I و IV به ترتیب بالاترین و پایین‌ترین میزان غلظت مجاز فلزات

[1] Toxicity characteristic Leaching Procedure

omoorepeyman.ir

سنگین را در شیرابه دارا می‌باشند. غلظت فلزات در شیرابه نوع IV، مقادیر مجاز برای آب شرب برآورده می‌کرد. معمولاً در سرباره غلظت آلاینده هایی چون وانادییم و کروم در مرز مجاز هستند و غلظت مابقی آلاینده‌ها اکثراً در حد غلظت مجاز برای آب آشامیدنی هستند.

جدول (۲-۴) میزان مجاز غلظت آلاینده‌ها (mgL^{-1}) در شیرابه سرباره‌ها به روش EPA 1311 (اصلاح شده)

آلاینده	نشانه شیمیایی	بیشینه مقدار مجاز
باریم	Ba	۱۰
آرسنیک	As	۰/۵
کادمیم	Cd	۰/۱
کروم	Cr	۰/۵
سرب	Pb	۰/۵
سلنیم	Se	۰/۱
جیوه	Hg	۰/۰۲
نقره	Ag	۰/۵
کربن آلی محلول	DOC[1]	۳۰۰
نیترات	NO_3	۵۰۰
فلئوراید	F	۱۰
سولفات	SO_4	۱۰۰۰
کلر	Cl	۸۰۰
سیانید	CN	۰/۵
مس	Cu	۰/۵
روی	Zn	۴
برلیوم	Be	۰/۱
کبالت	Co	۲/۵
نیکل	Ni	۰/۱
وانادییم	V	۲/۵
آزبست	ASB	۰/۳

[1] Dissolved Organic Carbon

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

فصل ۳

ضوابط طراحی، اجرا، تعمیر و نگهداری راه و باند با اساس و زیراساس سرباره‌ای

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

۳-۱- مقدمه

برای طراحی و تعیین ضخامت لایه اساس و زیراساس، نیاز به پارامترهای همچون دانسیته خشک، درصد رطوبت بهینه، زاویه اصطکاک داخلی، CBR، مدول برجهندگی است. این فصل به موارد مذکور می پردازد.

۳-۲- دانه بندی

در جدول (۳-۱) دو دانه بندی انتخابی برای مصالح زیراساس و اساس راه ارائه شده است. با توجه به مشکلات مرتبط با دانه بندی نوع۱(ناشی از پمپاژ دانه های رد شده از الک ۷۰# به بالا و پایین لایه در صورت حضور آب)، استفاده از آن توصیه نمی شود.

جدول (۳-۱)دانه بندی انتخابی برای مصالح زیراساس و اساس راه (درصد عبوری)

شماره الک (اینچ)	اندازه (میلیمتر)	دانه بندی نوع ۲	دانه بندی نوع ۱
۱	۲۵	۱۰۰	۱۰۰
۳ / ۴	۱۹	۹۰	۹۰
۱ / ۲	۱۲/۵	۷۸	۷۸
۳ / ۸	۹/۵	۷۰	۷۰
۴	۴/۷۵	۵۰	۵۰
۱۰	۲	۳۰	۳۸
۱۶	۱/۱۸	۲۱	۳۲
۲۰	۰/۸۵	۱۵	۲۸
۳۰	۰/۶	۱۰	۲۷
۴۰	۰/۴۲۵	۸	۲۵
۷۰	۰/۲۱	۵-۶*	۲۰
۱۰۰	۰/۱۵	۴-۵*	۱۵
۱۴۰	۰/۱۰۶	۳-۴*	۷
۲۰۰	۰/۰۷۵	۲-۳*	۰

*حد بالا برای زیراساس و مرز پایین برای اساس توصیه می شود

۳-۳- چگالی حداقل و حداکثر و مقایسه آن با نتایج آزمایش تراکم استاندارد و اصلاح شده

چگالی حداقل و حداکثر برای مصالح در دانه‌بندی مختلف بر اساسASTM D4253 قابل تعیین است که نمونه نتایج برای مصالح مختلف در جدول (۳-۲) آورده شده‌است.

omoorepeyman.ir

با توجه به حداکثر اندازه دانه، انجام آزمایش تراکم استاندارد و اصلاح شده برای تعیین دانسیته خشک مصالح لازم است. نمونه نتایج آزمایش تراکم استاندارد و اصلاح‌شده مصالح سرباره EAF در جدول (۳-۳) آورده شده‌است. با مقایسه نتایج دانسیته حداکثر برای انجام آزمایشها انتخاب می‌شود.

جدول(۳-۲)چگالی حداقل و حداکثر مصالح انتخابی اساس طبقASTM D4253

نوع مصالح	چگالی حداقل میانگین γ_{dmin} (gr/cm^3)	چگالی حداکثر γ_{dmax} (gr/cm^3)
اساس -سنگ معدنی آذرین انجیلاوند دانه‌بندی نوع ۲	۱٫۶۴	۱٫۹۲
اساس -سرباره فولاد خراسانEAF با ۲۰٪ گذشته از ۰/۲۱ میلیمتر- دانه‌بندی نوع ۱	۲٫۱۶	۲٫۸۸
اساس -سرباره فولاد خراسان EAF - دانه‌بندی نوع ۲	۲٫۰۲	۲٫۴۰
اساس -سرباره فولاد مبارکهEAF دانه‌بندی نوع ۱	۲٫۰۴	۲٫۵۱
اساس -سرباره فولاد مبارکهEAF- دانه‌بندی نوع ۲	۲٫۰۲	۲٫۴۳
اساس سرباره EAF مبارکه -دانه‌بندی نوع ۲-قرضه جدید	۲/۰۲	۲/۳۳
اساس آهکی ایرانکوه-دانه‌بندی نوع ۲	۱/۷۱۵	۲/۱۴
اساس BOF ذوب آهن-دانه‌بندی نوع ۲	-	۱/۸۱

جدول(۳-۳)دانسیته خشک و رطوبت بهینه طبق تراکم استاندارد و اصلاح شده اساس سرباره EAF مبارکه دانه بندی نوع ۱

	چگالی خشک g/cm^3	رطوبت بهینه
تراکم استاندارد	۲/۵۳	۶
تراکم اصلاح شده	۲/۶۹	۶/۴

۳-۴-زاویه اصطکاک داخلی بسیج شده[۱]

برای اهداف طراحی، مقدار زاویه اصطکاک داخلی(ASTM D 3080) بسیج شده لایه‌های اساس و زیراساس از رابطه (۳-۱) محاسبه می‌شود:

$$\tan \emptyset_m = \frac{\tan \emptyset}{F.S.} \quad (۱-۳)$$

که در آن، $\emptyset$: زاویه اصطکاک داخلی

$\emptyset_m$: زاویه اصطکاک داخلی بسیج شده

F. S.: ضریب ایمنی که برابر با ۲ در نظر گرفته می‌شود.

[۱] Mobilized Friction Angle

omoorepeyman.ir

تنش‌های قائم برای انجام آزمایش‌های برش مستقیم ۳۰، ۶۰ و ۱۴۰ کیلوپاسکال پیشنهاد می شود. در جدول (۳-۴) محدوده زاویه اصطکاک داخلی و بسیج شده برای مصالح اساس و زیراساس سرباره فولاد ارائه شده است.

جدول (۳-۴) محدوده مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و بسیج شده برای مصالح اساس و زیراساس سرباره‌ای

زاویه اصطکاک داخلی (Ø) (درجه)	محدوده زاویه اصطکاک بسیج شده ($Ø_m$) (درجه)
۴۰-۶۸	۳۰-۴۵

برای مصالح EAF مبارکه و دانه بندی با مقدار ریزدانه ۱۰٪ و حداکثر اندازه دانه ۲۵ میلیمتر، مقادیر زاویه اصطکاک بین ۴۰ تا ۵۳ درجه و برای دانه بندی با ریزدانه ۵٪ و حداکثر اندازه ۵۰ میلیمتر مقادیر زاویه اصطکاک بین ۵۷ تا ۶۸ درجه تحت تنشهای قائم ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۵۰ کیلوپاسکال در آزمایش برش مستقیم است(رحمانی و همکاران ۱۳۹۹). نمونه EAF مبارکه با حداکثر اندازه ۲۵ میلیمتر و بدون ریزدانه مقدار زوایه اصطکاک برای تنشهای قائم۳۰، ۶۰ و ۱۴۰ کیلوپاسکال بیش از ۵۶ درجه در آزمایش برش مستقیم است. زاویه اصطکاک داخلی سرباره فولاد طبق (Wang, 2016) و (FHWA, 1997) بین ۴۰ تا ۵۰ درجه پیشنهاد شده است.

در جدول (۳-۵) پارامترهای مقاومت برشی حاصل از آزمایش برش مستقیم تحت سربارهای ۱،۲ وkg/cm^2 ۳ روی سرباره EAF خالص و افزودن ۱۲درصد خاکستر ارائه شده است(هاشمی طباطبایی و همکاران، ۱۳۹۹).

جدول (۳-۵) پارامترهای مقاومت برشی حاصل از آزمایش برش مستقیم تحت سربارهای ۱،۲ و kg/cm^2 ۳ (هاشمی طباطبایی و همکاران، ۱۳۹۹)

نمونه سرباره	(ϕ)	C (kg/cm^2)
خاک(شکل ۳-۲)	۴۶/۵	۰/۴
سرباره EAF	۴۷	۰/۵
سرباره EAF با ۱۲ درصد خاکستر	۵۵	۰/۱۱

۳-۵-آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)

آزمایش تعیین ظرفیت باربری کالیفرنیا، متداول‌ترین روش جهت تعیین مقاومت نسبی خاک‌ها برای عملیات راه سازی است. با استفاده از نتایج این آزمایش می‌توان ظرفیت باربری خاک بستر و لایه‌های اساس و زیر اساس را تعیین نمود. آزمایش ظرفیت باربری کالیفرنیا (CBR) بر اساس استاندارد AASHTO T193 بر روی آزمونه‌های سرباره‌ها، با تعداد ضربات ۵۶،۳۰،۱۰ و ۶۵ قابل انجام است. همچنین برای باند فرودگاه برای CBR بستر کمتر از ۵ درصد، بهسازی خاک لازم است.

لازم به ذکر است مقادیر CBR دانه‌های انواع مختلف سرباره فولاد نسبت به مصالح سنگی معدنی طبیعی تا مقدار تقریبی۴۰۰ درصد متغیر است (Akinwumi, 2012). براساس مطالعات بر روی لایه زیر اساس راه‌ها که مخلوطی از

omoorepeyman.ir

سرباره فولاد و مصالح طبیعی با ۳۰ تا ۸۵ درصد وزنی سرباره فولاد است، نشان دهنده مقادیر بالای CBR (۴۵۵ درصد) می‌باشد(Aiban, 2006). در (جدول ۳-۶) مقادیر CBR تعدادی از مطالعات گزارش شده است.

جدول (۳-۶) محدوده مقادیر CBR سرباره

مقادیرCBR	نام مرجع
۴۰۰<	(Aiban and Abdul Wahab, 1999)
۳۰۰	(Noureldin an Mc Daniel, 1990)
>۲۰۰	(Holliday,1997)
>۳۰۰	(Wang, 2016)، (FHWA, 1997) برای حداکثر اندازه ۱۹ میلیمتر

نتایج آزمایشگاهی و داده‌های میدانی عملکرد برتر مصالح سرباره نسبت به مصالح آهکی طبیعی را نشان می‌دهند. محققین 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).

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).

لیکن مقادیر CBR سرباره خردایش شده شدیداً به درصد ریزدانه بستگی دارد. با توجه به درصد ریزدانه اندک مصالح حاصل از انفجار معادن طبیعی و همچنین مصالح سرباره به کمتر ۲ ٪، اعداد CBR سرباره ها به شرط تراکم مناسب بیش از ۸۰ می باشد که بسیار کمتر از مقادیر ذکر شده در جدول (۳-۶) است.

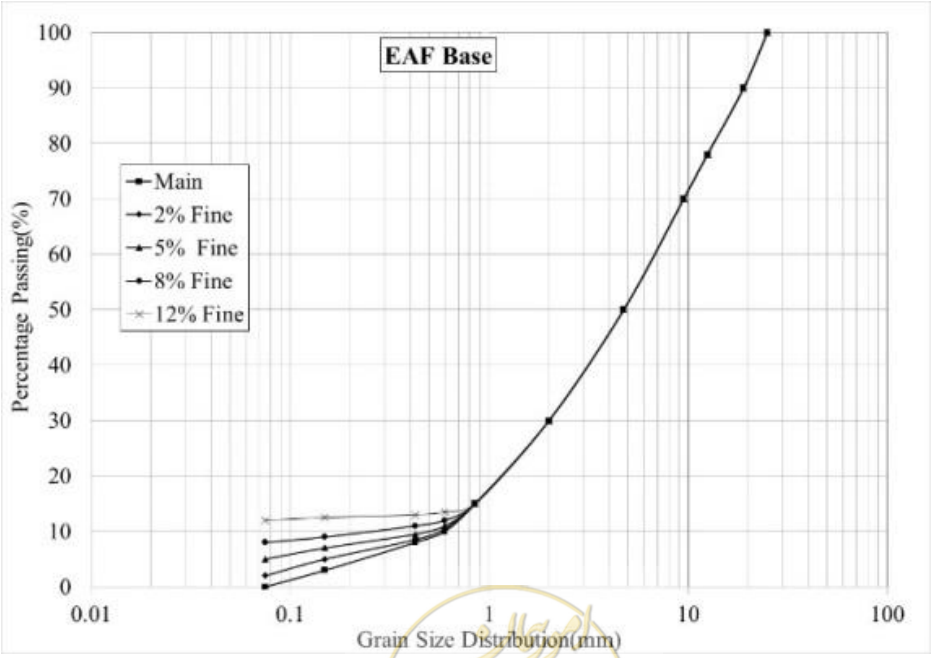
۳-۵-۱- اثر ریزدانه بر نتایج آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا

آزمایش CBR در ارزیابی مصالح بستر روسازی، اساس و زیراساس برای کمک به طراحی روسازی‌ها کاربرد دارد. در این آزمایش از استاندارد ASTM D1883 استفاده شده‌است. در این آزمایش از پیستونی با نرخ نفوذ ثابت ۱/۳ میلی‌متر بر دقیقه استفاده شده‌است. نیروی متناظر با نفوذهای مختلف تا ۱۳ میلی‌متر ثبت شده و در نهایت مقادیر CBR برای نفوذ ۱/۲۵، ۲/۵ و ۵ میلی‌متر برای نمونه‌های مختلف محاسبه شد. در این آزمایش مصالح مختلف با دانه بندی نوع ۲ از جمله سرباره EAF مبارکه، EAF خراسان، سرباره BOF ذوب‌آهن اصفهان و مصالح سنگ طبیعی مانند انجیلاوند و ایرانکوه در حالت خشک و اشباع مورد آزمایش قرار گرفت. همچنین برای نمونه سرباره مبارکه اثر افزایش مقادیر ریزدانه عبوری از الک ۲۰۰ (به میزان ۲، ۵، ۸ و ۱۲٪) نیز بررسی شد. نمودار دانه‌بندی نمونه‌های آزمایش شده در شکل (۳-۱) ارائه شده‌است. نتایج آزمایش CBR در جدول(۳-۷) آورده شده‌است. نتایج نشان می دهد که برای دانه بندی پیشنهادی این راهنما مقادیر CBR برای مصالح مورد بررسی بسیار کمتر از مقادیر ادبیات فنی است.

omoorepeyman.ir

۳-۵-۲- اثر حداکثر اندازه دانه‌ها و مقدار ریزدانه بر مقادیر CBR

مقادیر CBR محدوده بالا و پایین دانه بندی پیشنهادی اساس و زیراساس نشریات ۱۰۱ و ۲۳۴ توسط رحمانی و همکاران (۱۳۹۹) بررسی شد(جدول۳-۷). دانه‌بندی‌های G1 و G2 نمونه‌ها در جدول (۳-۸) اراده شده است. در این آزمایش بر اساس رطوبت بهینه حاصل از آزمایش تراکم نمونه ساخته شده و به‌منظور لحاظ کردن وزن لایه آسفالت وزنه ۴/۵ کیلوگرمی بر روی نمونه قرار گرفته‌است. نتایج نسبت باربری بر حسب چگالی خشک حداکثر به ازای نفوذ ۱/۲۵، ۲/۵ و ۵ میلی‌متر مصالح EAF مبارکه در جدول (۳-۹) شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش تعداد ضربه سبب افزایش در مقدار نسبت باربری شده اما برای حالت تراکم اصلاح شده و در حالت خشک افزایش تعداد ضربه از ۳۰ به ۵۶ مقادیر نسبت باربری را کاهش داده‌است. در تراکم استاندارد غرقاب شدن نمونه سبب کاهش (در تمام تعداد ضربات کوبش) در نسبت باربری شده اما در تراکم اصلاح شده غرقاب شدن، ابتدا برای تعداد ضربات ۱۰ و ۳۰ ضربه سبب افزایش مقادیر نسبت باربری و برای تعداد ضربات کوبش ۵۶ و ۶۵ سبب کاهش نسبت باربری شده‌است. دانه‌بندی G2 نسبت باربری بیشتری در مقایسه با دانه‌بندی G1 در حالت خشک و غرقاب دارد که این اختلاف در تعداد ضربه بالا مشهود است. بیشترین مقدار ظرفیت باربری مربوط به سرباره با دانه‌بندی G2 در حالت تراکم اصلاح شده در حالت اشباع و با تعداد ضربات ۶۵، عدد ۴۹۰ درصد است. کمترین مقدار CBR مربوط به سرباره با دانه‌بندی G1 در حالت تراکم استاندارد اشباع و با تعداد ضربات ۱۰، عدد ۱۴درصد است. و به طور کلی، مقدار CBR مصالح سرباره EAF مبارکه بیشتر از مقدار آن برای سرباره BOF ذوب آهن است. لازم به ذکر است اعداد جدول برای درصد ریزدانه نمودارهای G1 و G2 به ترتیب با درصد ریزدانه ۱۰ و ۵ درصد می باشد که با دانه حاصل از خردایش مصالح سرباره از نظر درصد ریزدانه تفاوت دارد.



شکل(۳-۱) نمودار دانه‌بندی نمونه‌های CBR آزمایش شده

omoorepeyman.ir

جدول (۳-۷) نتایج آزمایش CBR با تمرکز بر مقدار ریزدانه

دانسیته خشک (gr/cm^3)	مقدار نفوذ ۵ mm	۲/۵ mm	۱/۲۵ mm	تعداد ضربات	شرایط	نوع تراکم	مصالح
۲/۳۳	۷۸	۴۸	۳۹	۱۰	خشک	استاندارد	سرباره EAF مبارکه
۲/۴۴	۸۴	۷۲	۵۰	۳۰			
۲/۴۴	۸۶	۷۲	۴۳	۵۶			
۲/۴۴	۱۰۶	۹۲	۶۴	۶۵			
۲/۲۹	۲۰	۱۴	۱۰	۱۰	اشباع		
۲/۳۵	۷۴	۵۷	۳۹	۳۰			
۲/۴	۷۱	۵۴	۳۸	۵۶			
۲/۴۴	۸۳	۶۶	۴۸	۶۵			
۲/۳۵	۴۲	۳۰	۲۲	۱۰	خشک	اصلاح شده	
۲/۵۱	۹۴	۷۷	۵۲	۳۰			
۲/۵	۱۳۱	۹۹	۷۴	۵۶			
۲/۵۳	۱۲۶	۱۰۰	۶۴	۶۵			
۲/۴۵	۶۹	۵۶	۴۰	۱۰	اشباع		
۲/۵۲	۱۱۵	۸۱	۴۷	۳۰			
۲/۴۶	۱۰۶	۸۰	۵۲	۵۶			
۲/۵۲	۸۶	۶۷	۴۵	۶۵			
۲/۶	۱۷۳	۱۲۷	۸۵	۵۶	خشک	اصلاح شده	سرباره EAF مبارکه+ ٪۲ ریزدانه سرباره EAF مبارکه
۲/۶۷	۱۹۵	۱۴۳	۸۸		اشباع		
۲/۶۱	۲۱۶	۱۶۹	۱۱۳	۵۶	خشک	اصلاح شده	سرباره EAF مبارکه+ ٪۵ ریزدانه سرباره EAF مبارکه
۲/۶۵	۲۱۴	۱۵۹	۱۰۱		اشباع		
۲/۷	۲۳۳	۱۷۵	۱۰۵	۵۶	خشک	اصلاح شده	سرباره EAF مبارکه+ ٪۸ ریزدانه سرباره EAF مبارکه
۲/۷۳	۲۳۹	۱۵۱	۹۳		اشباع		
۲/۷۷	۲۶۲	۱۹۳	۱۱۷	۵۶	خشک	اصلاح شده	سرباره EAF مبارکه+ ٪۱۲ ریزدانه سرباره EAF مبارکه
۲/۸۴	۲۹۸	۱۹۱	۱۰۲		اشباع		
۱/۹۱	۳۱	۲۶	۱۸	۱۰	خشک	استاندارد	آهک ایرانکوه
۲/۰۱	۵۴	۴۱	۲۹	۳۰			
۲/۱۱	۷۰	۵۷	۴۱	۵۶			
۲/۰۹	۸۰	۷۱	۶۱	۶۵			
۱/۹۹	۳۲	۲۱	۱۳	۱۰	اشباع	اصلاح شده	
۲/۱۱	۸۲	۵۸	۳۴	۳۰			
۲/۲۵	۱۳۸	۹۸	۶۵	۵۶			
۲/۱۹	۹۷	۷۰	۴۷	۶۵			
۲/۰۹	۵۳	۴۱	۳۰	۱۰	اشباع		
۲/۱۷	۱۲۱	۱۰۳	۷۱	۳۰			
۲/۲	۱۵۵	۱۳۰	۹۱	۵۶			
۲/۲۴	۱۳۹	۱۰۶	۷۶	۶۵			

omoorepeyman.ir

۲/۳۸	۴۱	۳۰	۱۹	۱۰	خشک	اصلاح شده	سرباره EAF خراسان
۲/۵۶	۱۰۰	۷۹	۵۲	۳۰			
۲/۵۸	۱۳۴	۹۹	۶۲	۵۶			
۲/۶۴	۱۵۶	۱۱۶	۷۸	۶۵			
۲/۵	۶۹	۵۱	۳۶	۱۰	اشباع		
۲/۴۶	۷۰	۵۱	۳۰	۳۰			
۲/۴۹	۹۲	۷۰	۴۸	۵۶			
۲/۵۴	۱۲۵	۱۰۰	۶۷	۶۵			
۲/۱۸	۱۵۰	۱۱۵	۷۷	۵۶	خشک	اصلاح شده	آذرین انجیل آوند
۲/۲۲	۲۰۰	۱۵۳	۱۰۷		اشباع		
۲/۰۲	۱۱۰	۷۹	۴۱	۵۶	خشک	اصلاح شده	سرباره BOF ذوب آهن اصفهان
۲/۱۱	۱۵۲	۹۷	۷۳		اشباع		

جدول(۳-۸) دانه‌بندی مصالح مورد استفاده (رحمانی و همکاران، ۱۳۹۹)

		G1	G2
شماره الک BS	قطر ذرات (م م)	درصد عبوری از الک	درصد عبوری از الک
۲in	۵۰/۸	۱۰۰	۱۰۰
۱in	۲۵/۴	۱۰۰	۷۵
۳/۸in	۹/۵	۸۴	۴۰
#۴	۴/۷۵	۶۷	۳۰
#۱۰	۲	۵۰	۲۰
#۴۰	۰/۴۲۵	۳۰	۱۵
#۲۰۰	۰/۰۷۵	۱۰	۵

جدول(۳-۹) نتایج آزمایش‌های نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) برحسب درصد بر روی سرباره EAF (رحمانی و همکاران، ۱۳۹۹)

نوع دانه‌بندی	نحوه تراکم	حالت آزمونه	نفوذ ۱/۲۵ میلی‌متر				نفوذ ۲/۵ میلی‌متر				نفوذ ۵ میلی‌متر			
			تعداد ضربه				تعداد ضربه				تعداد ضربه			
			۱۰	۳۰	۵۶	۶۵	۱۰	۳۰	۵۶	۶۵	۱۰	۳۰	۵۶	۶۵
G1	استاندارد	خشک	۷	۱۷	۴۳	۵۹	۱۲	۳۲	۶۶	۹۵	۱۷	۴۴	۱۱۰	۱۶۲
		غرقاب	۸	۱۵	۲۹	۵۸	۱۲	۲۲	۴۶	۹۲	۱۴	۲۸	۸۵	۱۰۵
	اصلاح شده	خشک	۳۰	۶۸	۶۶	۸۹	۴۸	۱۱۰	۱۱۰	۱۵۴	۵۷	۱۸۴	۱۵۷	۲۰۱
		غرقاب	۳۱	۱۰۰	۱۱۵	۱۴۴	۵۰	۱۵۴	۱۵۸	۲۰۲	۷۰	۲۰۶	۲۲۵	۲۷۰
G2	استاندارد	خشک	۴۴	۵۳	۱۱۰	۱۳۲	۶۶	۸۱	۱۶۲	۱۷۳	۹۶	۱۲۳	۲۲۱	۲۲۸
		غرقاب	۴۴	۳۹	۹۳	۱۱۷	۶۶	۶۶	۱۴۰	۱۶۵	۹۱	۱۱۵	۲۰۶	۲۲۵
	اصلاح شده	خشک	۶۱	۱۲۴	۱۶۳	۱۶۸	۹۹	۱۸۴	۲۳۵	۲۶۴	۱۵۲	۲۵۰	۳۳۸	۳۵۳
		غرقاب	۸۹	۱۰۱	۲۱۲	۱۹۸	۱۲۵	۱۴۳	۳۳۰	۲۹۴	۱۶۷	۲۲۳	۴۱۷	۴۹۰

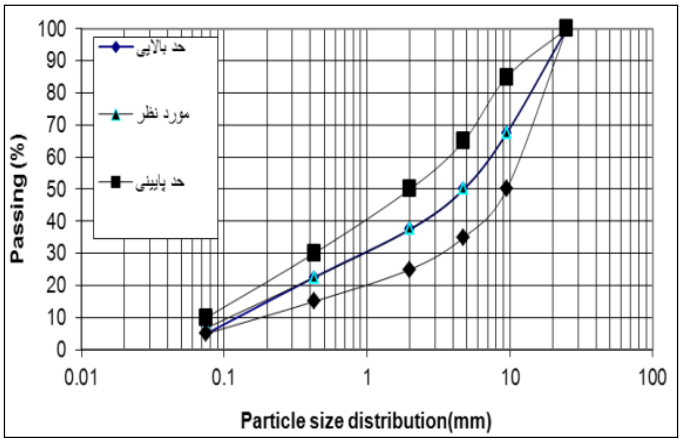
omoorepeyman.ir

جدول (۳-۱۰) نتایج آزمون ظرفیت باربری کالیفرنیا (CBR) طبق (ASTM D1883) بر روی مصالح سرباره های فولاد کشور

نوع دانه‌بندی	نحوه تراکم	حالت آزمونه	BOF				EAF			
			تعداد ضربه				تعداد ضربه			
			۱۰	۳۰	۵۶	۶۵	۱۰	۳۰	۵۶	۶۵
G1	استاندارد	خشک	۱۸	۵۱	۹۰	۱۱۳	۱۷	۴۴	۱۱۰	۱۶۲
		اشباع	۱۱	۴۰	۸۸	۱۰۰	۱۴	۲۸	۸۵	۱۰۵
	اصلاح شده	خشک	۳۶	۹۱	۱۲۰	۱۴۲	۵۷	۱۸۴	۱۵۷	۲۰۱
		اشباع	۱۵	۶۹	۱۰۰	۱۳۰	۷۰	۲۰۶	۲۲۵	۲۷۰
G2	استاندارد	خشک	۶۰	۸۷	۱۵۳	۱۶۱	۹۶	۱۲۳	۲۲۱	۲۲۸
		اشباع	۵۶	۸۳	۱۲۲	۱۲۷	۹۱	۱۱۵	۲۰۶	۲۲۵
	اصلاح شده	خشک	۶۶	۱۲۷	۲۴۰	۲۵۵	۱۵۲	۲۵۰	۳۳۸	۳۵۳
		اشباع	۶۵	۱۱۸	۱۹۹	۲۰۳	۱۶۷	۲۲۳	۴۱۷	۴۹۰

۳-۵-۳-تثبیت سرباره EAF فولاد مبارکه با خاکستر بادی به عنوان لایه زیراساس

اثر افزودن ۲، ۷، ۱۲ و ۲۰ درصد خاکستر بادی نوع C ایران به سرباره فولادی مورد بررسی قرار گرفته است. دانه‌بندی در نظر گرفته‌شده برای خاک و سرباره در شکل ارائه شده‌است. در جدول(۳-۱۱) نتایج آزمایش تراکم ASTM D1557 برای سرباره EAF و اختلاط آن با خاکستر ارائه شده است(هاشمی طباطبایی و همکاران، ۱۳۹۹).



شکل (۳-۲) دانه‌بندی مصالح خاک و سرباره (هاشمی طباطبایی و همکاران، ۱۳۹۹)

جدول(۳-۱۱) نتایج آزمایش تراکم ASTM D1557 برای سرباره EAF و اختلاط آن با خاکستر(هاشمی طباطبایی و همکاران، ۱۳۹۹)

نمونه	درصد رطوبت بهینه	دانسیته خشک (گرم بر سانتیمتر مکعب)
خاک	۸/۴	۲/۱
سرباره EAF	۸	۲/۶۲
سرباره EAF مبارکه با ۲ درصد خاکستر	۸/۲	۲/۵۵
سرباره EAF مبارکه با ۷ درصد خاکستر	۸/۳	۲/۵۴
سرباره EAF مبارکه با ۱۲درصد خاکستر	۸/۵	۲/۵۱
سرباره EAF مبارکه با ۲۰ درصد خاکستر	۸/۸	۲/۴۶

omoorepeyman.ir

چگالی حداقل و حداکثر نمونه‌های سرباره و خاک، براساس استانداردهای ASTM D4253 و ASTM D4254 به‌ترتیب ۲/۲۲، ۲/۶۹، ۱/۶۶ و ۲/۰۸ است.

چگالی مصالح سرباره در مقایسه با خاک بیشتر برآورد شده‌است. افزودن خاکستر بادی به سرباره فولاد مقدار چگالی حداکثر آن را کاهش داده و مقدار رطوبت بهینه آن را افزایش داده‌است.

این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM D1557 بر روی نمونه‌های خاک، سرباره خالص و سرباره با مقادیر ۲، ۷، ۱۲ و ۲۰ درصد خاکستر در زمان‌های عمل آوری ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه انجام شد. در این آزمایش ابتدا نمونه‌ها را با مقادیر رطوبت بهینه حاصل از آزمایش تراکم اصلاح شده، در قالب‌های CBR کوبیده و سپس با قرار دادن سربار ۴/۵ کیلوگرمی به منظور لحاظ وزن لایه آسفالت ، آماده گردیدند. سپس نمونه‌ها در حمام رطوبت (محفظه‌های پلاستیکی درب دار محتوی آب)، جهت برقراری شرایط طبیعی در محیط آزمایشگاه قرار گرفتند. یک لایه آجری مشبک، برای جلوگیری از تماس مستقیم نمونه‌ها با آب در این محفظه‌ها، در زیر نمونه‌ها قرار گرفت. بدین ترتیب تاثیر محیط مرطوب در زمان‌های عمل آوری تعیین شده، مورد ارزیابی قرار گرفت (هاشمی طباطبایی و همکاران، ۱۳۹۹). نتایج آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا برای نفوذ ۱/۲۵، ۲/۵ و ۵ میلی‌متر برای نمونه خاک، سرباره و سرباره تثبیت شده با خاکستر بادی در جدول (۳-۱۲) ارائه شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که سرباره به‌طور کلی ظرفیت باربری بیشتری در مقایسه با خاک دارد. افزودن خاکستر بادی مقادیر ظرفیت باربری را نسبت به سرباره خالص کاهش داده با این وجود این مقادیر از ظرفیت باربری خاک بیشتر است.

جدول (۳-۱۲) مقادیر CBR خاک، سرباره و سرباره تثبیت شده با خاکستر بادی (هاشمی طباطبایی و همکاران، ۱۳۹۹)

خاک			سرباره خالص-ساخته شده با رطوبت بهینه		
نفوذ (میلی‌متر)					
۱/۲۵	۲/۵	۵	۱/۲۵	۲/۵	۵
۲۴	۳۰	۴۰	۱۵۲	۲۰۰	۳۱۱
عمل آوری ۱۸۰ روزه					
۲۸			۲۲۶		

اختلاط سرباره با خاکستر (٪)	زمان عمل‌آوری											
	۷روزه			۲۸روزه			۵۶ روزه			۱۸۰ روزه		
	نفوذ (میلی‌متر)											
	۱/۲۵	۲/۵	۵	۱/۲۵	۲/۵	۵	۱/۲۵	۲/۵	۵	۱/۲۵	۲/۵	۵
۲	۷۱	۱۰۰	۱۳۵	۷۶	۸۷	۱۰۰	*۷	*۱۱	*۲۰	۶۸	۱۱۵	۱۴۰
۷	۸۶	۱۳۰	۲۰۴	۸۱	۱۴۵	۱۵۷	*۱۴	*۲۱	*۳۶	۱۲۹	۱۳۶	۱۳۵
۱۲	۱۹۰	۲۶۰	۳۰۷	*۲۴	*۳۶	*۴۱	۱۱۲	۱۶۳	۱۶۰	۱۲۹	۱۴۵	۱۵۱
۲۰	۹۵	۱۵۲	۲۰۴	۹۰	۱۳۰	۱۳۷	*۱۴	*۱۹	*۲۷	۱۲۲	۱۳۹	۱۲۶

* برای حالت اشباع می باشد

omoorepeyman.ir

افزایش مقدار خاکستر بادی تا ۱۲ درصد سبب افزایش در مقدار نسبت باربری شده و پس از آن افزایش مقدار خاکستر بادی نسبت باربری را کاهش داده‌است. مقادیر نسبت باربری حاصل شده در زمان عمل‌آوری ۷ روز بیشترین مقادیر را نتیجه داده و افزایش زمان عمل‌آوری سبب کاهش در مقادیر نسبت باربری شده‌است. غرقاب شدن به شدت مقادیر CBR سرباره مخلوط شده با خاکستری بادی نوع C را کاهش می دهد به طوریکه به سختی امکان استفاده از آن برای زیراساس راه قابل تایید است.

۳-۶- مدول بر جهندگی (M_R) در طراحی روسازی

رفتار لایه‌های روسازی انعطاف‌پذیر، تابع مدت زمان بارگذاری و شدت آن می‌باشد (ویسکوالاستیک). همچنین تراز قرارگیری مصالح در لایه‌های مختلف روسازی موجب تغییر حالت تنش شده و خواص مقاومتی مصالح را تحت تأثیر قرار می‌دهد. لذا در مدلسازی و طراحی لایه‌های روسازی در شرایط نزدیکتر به واقعیت، استفاده از پارامتری که متناسب با رفتار ویسکوالاستیک خاک بوده، و از تغییرات حالت تنش متأثر شود، منطقی به نظر می‌رسد. بر این اساس، پارامتر مدول بر جهندگی در طراحی لایه‌های روسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

عوامل اثر گذار بر سفتی یا مدول برجهندگی خاک‌های سرباره، عبارتند از: تنش محدودکننده، تنش محوری استاتیکی اولیه، تنش سیکلی، مقدار رطوبت، درصد فضای خالی و فرکانس بارگذاری. برای روسازی در هنگام ساخت و همچنین در بلند مدت (تغییرات فصلی سطح آب زیرزمینی و شرایط محیطی)، تغییر در مقدار رطوبت به آسانی رخ می‌دهد. مقدار رطوبت باید هنگام برآورد M_R در نظر گرفته شود(Phillip and Cameron, 1995). بطورکلی، سطح رطوبت بالاتر به معنای M_R کمتر است. تثبیت خاک بستر ممکن است ویژگی‌های مکانیکی آن را به طور قابل توجه بهبود دهد، اما به خاطر اثر همزمان بار ترافیک و هوازدگی، این مصالح، در طی زمان دچار زوال می‌شوند و کارآیی‌شان کاهش یافته و حتی از دست می‌رود. روشهای رایج طراحی راه چنین زوال‌هایی را در خاک‌های تثبیت شده در نظر نمی‌گیرند و در پی آن، استفاده از آن‌ها ممکن است منجر به طراحی دست پایین روسازی راه‌ها شود و نتیجه آن نگهداری برنامه‌ریزی نشده و یا شکست زودرس راه خواهد بود(Rasul,2016), (Rasul et al., 2016).

۳-۶-۱- تعریف مدول بر جهندگی

بیشتر مصالح روسازی ارتجاعی نیستند و پس از هر اعمال بار، قدری تغییر شکل دائمی در آنها ایجاد می‌شود که در مراحل ابتدایی اعمال بار، قابل ملاحظه است ولی با افزایش تعداد تکرار، تغییر شکل دائمی ناشی از تکرار کاهش می‌یابد (شکل ۳-۳) و در خاکها، عملاً بعد از ۱۰۰ تا ۲۰۰ تکرار، تمامی تغییر شکلها برگشت‌پذیر خواهد بود. مدول برجهندگی، مدول ارتجاعی براساس کرنش برگشت‌پذیر، تحت بارهای تکراری می‌باشد و طبق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \qquad (۲-۳)$$

omoorepeyman.ir

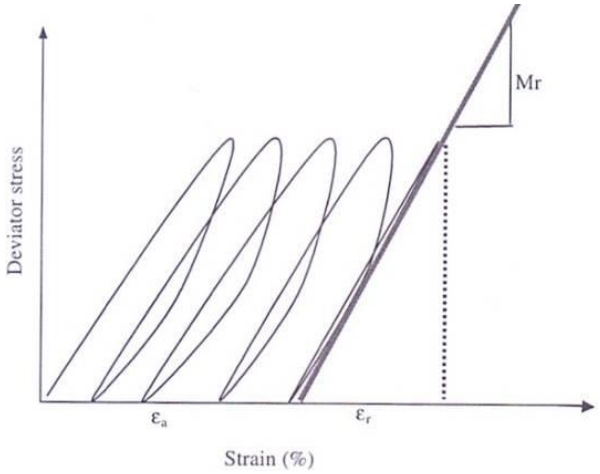
M_R: مدول بر جهندگی، ε_r: کرنش برگشت‌پذیر، σ_d: تنش انحرافی

مدول برجهندگی لایه‌های غیرآسفالتی روسازی و خاک بستر روسازی به سه روش محاسبه می‌شود (Malla و Joshi ۲۰۰۷):

آزمایش بارگذاری سیکلی براساس استاندارد AASHTO T307

روابط تجربی حاصل از آزمایشهای صحرایی

استفاده از روابط همبستگی با سایر پارامترهای مقاومتی خاک



شکل (۳-۳) تعریف ضریب برجهندگی در بارگذاری تکراری تحت تنش همه جانبه (εa: کرنش محوری برگشت‌ناپذیر)

۳-۶-۲- نقش ضریب برجهندگی در طراحی روسازی انعطاف‌پذیر

لایه‌های روسازی در سازه راه، تحت تأثیر بارهای تکراری ترافیک قرار می‌گیرند. مدت زمان این بارگذاری کوتاه بوده و به سرعت وسایل نقلیه بستگی دارد. تا سال ۱۹۸۶ میلادی، عمدتاً از نتایج آزمایش CBR جهت تعیین خصوصیات مقاومتی لایه‌های روسازی استفاده می‌شد، ولی CBR، پارامتر استاتیکی بوده و بیانگر وضعیت لایه‌های روسازی تحت بارهای تکراری نمی‌باشد (Malla and Joshi,2007). لذا در سال ۱۹۸۶ پارامتر مدول برجهندگی، به عنوان یک پارامتر مقاومتی جهت تعیین ضخامت لایه‌ها در AASHTO برای طراحی لایه‌های روسازی، مورد استفاده قرار گرفت. مدول برجهندگی با توجه به تعریف آن پارامتر مناسبی جهت تعیین خواص مقاومتی مصالح لایه‌های روسازی تحت بارگذاری سیکلی و شرایط سرویس‌دهی آنها می‌باشد. این پارامتر شرایط تنش و کرنش مصالح را تحت بارگذاری تکراری نشان می‌دهد(AASHTO, 1993) , (Ricardo et al.,2007) و در حال حاضر در آیین‌نامه‌های معتبر طراحی روسازی مانند راهنمای طراحی روسازی AASHTO و راهنمای طرح روسازیهای جدید و بهسازی روسازی به عنوان پارامتر اصلی مقاومتی لایه‌های روسازی و بستر نهایی روسازی مورد استفاده قرار گرفته است(AASHTO, 1993) , (FHA, 2006). در آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴)، مقاومت لایه‌های روسازی جهت تعیین ضخامت آنها به روشی مشابه راهنمای طراحی روسازی AASHTO و با استفاده از مدول برجهندگی به دست می‌آید. در این آیین‌نامه برای لایه‌های اساس، زیراساس و خاک بستر روسازی، عدد ضخامت (عدد سازه‌ای) تعریف می‌شود که این عدد تابع ترکیبی از

omoorepeyman.ir

متغیرها و داده‌های اولیه طرح شامل مقاومت خاک بستر، تعداد کل محورهای ساده هم ارز ۸/۲ تنی، نشانه خدمت‌دهی نهایی، ضریب قابلیت اطمینان و شرایط جوی است. بین عدد ضخامت روسازی و ضخامت واقعی هر لایه، رابطه زیر وجود دارد:

$$SN_i = \frac{a_i . m_i . D_i}{2.5} \quad (۳-۳)$$

که در آن:

SNi: عدد ضخامت لایه، Di: ضخامت لایه مربوط برحسب سانتیمتر، a_i :ضریب سازه‌ای لایه (ضریب قشر)

m_i: ضریب زهکشی لایه‌های اساس و زیراساس که بیانگر کیفیت زهکشی این لایه‌ها باتوجه به خصوصیات مصالح آنها است و از جداول مربوطه محاسبه می‌شود. این ضریب بین ۰/۴-۱/۴ در شرایط متفاوت تغییر کرده و برای لایه آسفالتی محاسبه نمی‌شود.

ضریب سازه‌ای لایه که به طور اختصار ضریب لایه نامیده می‌شود، با توجه به قدرت باربری مصالح برحسب ضریب بر جهندگی محاسبه می‌شود. در آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران، برای محاسبه ضریب لایه‌های آسفالتی، اساس و زیراساس نمودارهایی ارائه گردیده که در شکل (۳-۴) آمده‌اند. برای محاسبه ضریب لایه اساس و زیراساس برحسب ضریب بر جهندگی در این آیین‌نامه، از روابط زیر نیز می‌توان استفاده کرد:

$$a_2 = 0.3356(\log M_R) - 0.997 \quad (۴-۳)$$

$$a_3 = 0.314(\log M_R) - 0.839 \quad (۵-۳)$$

که در آنها a_2 و a_3 ضرایب لایه اساس و زیراساس و M_R مدول برجهندگی لایه مربوطه برحسب کیلوگرم بر سانتیمتر مربع است. جهت طرح سازه راه، در گام اول با توجه به مشخصات طرح از جمله ضریب بر جهندگی لایه های روسازی و خاک بستر، عدد ضخامت لایه‌های اساس، زیراساس و خاک بستر (عدد ضخامت کل روسازی) مشخص می‌شود. در گام دوم ضخامت هر لایه با استفاده از رابطه محاسبه می‌شود. پس از محاسبه ضخامت هرلایه، عدد ضخامت واقعی به دست آمده با عدد ضخامت محاسبه شده در گام اول، مقایسه و کنترل می‌شود. با توجه به این توضیحات ملاحظه می‌شود که در طراحی روسازی به روش آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران، مدول برجهندگی در دو بخش مورد استفاده قرار می‌گیرد:

-محاسبه ضریب لایه

-محاسبه عدد ضخامت اولیه هر لایه

لذا مقادیر این ضریب تأثیر عمده ای بر ضخامت لایه‌ها داشته، به عنوان یک پارامتر مقاومتی که رابطه تنش و کرنش لایه را تحت بار ترافیک نشان می‌دهد، نقش اساسی در طراحی راه ایفا می‌کند. همانطور که بیان شد، جهت تعیین مقدار ضریب برجهندگی لایه‌های غیرآسفالتی روسازی و خاک بستر سه روش وجود دارد که در این قسمت به آنها پرداخته می‌شود.

omoorepeyman.ir

۳-۶-۲-۱- آزمایش بارگذاری سیکلی

جهت تعیین مدول برجهندگی مصالح غیر آسفالتی به روش مستقیم، آزمایش براساس استاندارد AASHTO T307 انجام می‌شود. این آزمایش، مناسب‌ترین روش تعیین این ضریب و بررسی نقش حالت تنش در مقادیر آن است. در این استاندارد، نمونه‌های لایه‌های بستر روسازی، اساس و زیراساس، تحت تنشهای انحرافی سیکلی و محدودکننده مختلف مطابق جداول (۳-۱۳) و (۳-۱۴) قرار گرفته، مقادیر ضریب بر جهندگی نمونه‌ها برای حالتهای مختلف تنش ارائه می‌شود. در این استاندارد، مصالح به دو نوع ۱ و ۲ تقسیم می‌شوند. مصالح نوع ۱ دارای این مشخصات هستند:

- درصد عبوری از الک شماره ۲۰۰ کمتر از ۱۰
- درصد عبوری از الک شماره ۱۰ کمتر از ۷۰
- دامنه خمیری کوچکتر یا برابر ۱۰

مصالح نوع ۲ نیز شامل مصالحی می‌شوند که حداقل یکی از شرایط مصالح نوع ۱ را دارا نباشد با دقت در این شرایط و مقایسه آن با مشخصات لایه‌های اساس و زیراساس در آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران، ملاحظه می‌شود که مصالح نوع ۱ تطابق بیشتری با مصالح مورد استفاده در لایه‌های اساس و زیراساس دارد(نشریه ۲۳۴، ۱۳۹۰). همچنین در جدول (۳-۱۴) الگوی بارگذاری برای مصالح اساس اصلاح شده راه (Hanifa, 2015) ارائه شده‌است.

جدول (۳-۱۳) الگوی بارگذاری نمونه‌ها در آزمایش مدول برجهندگی خاک بستر راه (AASHTO T307)

گام بارگذاری	تنش محدودکننده (kPa)	تنش محوری استاتیکی اولیه (kPa)	تنش انحرافی سیکلی (kPa)	تنش تماسی (kPa)	تعداد سیکل
۰	۴۱/۴	۲۷/۶	۲۴/۸	۲/۸	۵۰۰ تا ۱۰۰۰
۱	۴۱/۴	۱۳/۸	۱۲/۴	۱/۴	۱۰۰
۲	۴۱/۴	۲۷/۶	۲۴/۸	۲/۸	۱۰۰
۳	۴۱/۴	۴۱/۴	۳۷/۳	۴/۱	۱۰۰
۴	۴۱/۴	۵۵/۲	۴۹/۷	۵/۵	۱۰۰
۵	۴۱/۴	۶۸/۹	۶۲/۰	۶/۹	۱۰۰
۶	۲۷/۷	۱۳/۸	۱۲/۴	۱/۴	۱۰۰
۷	۲۷/۷	۲۷/۶	۲۴/۸	۲/۸	۱۰۰
۸	۲۷/۷	۴۱/۴	۳۷/۳	۴/۱	۱۰۰
۹	۲۷/۷	۵۵/۲	۴۹/۷	۵/۵	۱۰۰
۱۰	۲۷/۷	۶۸/۹	۶۲/۰	۶/۹	۱۰۰
۱۱	۱۳/۸	۱۳/۸	۱۲/۴	۱/۴	۱۰۰
۱۲	۱۳/۸	۲۷/۶	۲۴/۸	۲/۸	۱۰۰
۱۳	۱۳/۸	۴۱/۴	۳۷/۳	۴/۱	۱۰۰
۱۴	۱۳/۸	۵۵/۲	۴۹/۷	۵/۵	۱۰۰
۱۵	۱۳/۸	۶۸/۹	۶۲/۰	۶/۹	۱۰۰

توجه: برای مصالحی که در گروه یک طبقه بندی می شوند،ترکیب بار مراحل ۱۴ و ۱۵ انجام نمی‌شود.

omoorepeyman.ir

جدول (۳-۱۴)گام های بارگذاری آزمایش سه محوری سیکلی برای مصالح اساس اصلاح شده راه AASHTO T307 (Hanifa, 2015)

گام بارگذاری	تنش محدودکننده (kPa)	تنش محوری استاتیکی اولیه (kPa)	تنش انحرافی سیکلی (kPa)	تنش تماسی (kPa)	تعداد سیکل
۰	۱۰۳/۴	۱۰۳/۴	۹۳/۱	۱۰/۳	۵۰۰-۱۰۰۰
۱	۲۰/۷	۲۰/۷	۱۸/۶	۲/۱	۱۰۰
۲	۲۰/۷	۴۱/۴	۳۷/۳	۴/۱	۱۰۰
۳	۲۰/۷	۶۲/۱	۵۵/۹	۶/۲	۱۰۰
۴	۳۴/۵	۳۴/۵	۳۱	۳/۵	۱۰۰
۵	۳۴/۵	۶۸/۹	۶۲	۶/۹	۱۰۰
۶	۳۴/۵	۱۰۳/۴	۹۳/۱	۱۰/۳	۱۰۰
۷	۶۸/۹	۶۸/۹	۶۲	۶/۹	۱۰۰
۸	۶۸/۹	۱۷۹/۹	۱۲۴/۱	۱۳/۸	۱۰۰
۹	۶۸/۹	۲۰۶/۸	۱۸۶/۱	۲۰/۷	۱۰۰
۱۰	۱۰۳/۴	۶۸/۹	۶۲	۶/۹	۱۰۰
۱۱	۱۰۳/۴	۱۰۳/۴	۱۲۴/۱	۱۰/۳	۱۰۰
۱۲	۱۰۳/۴	۲۰۶/۸	۱۸۶/۱	۲۰/۷	۱۰۰
۱۳	۱۳۷/۹	۱۰۳/۴(۱۳۷/۹)	۹۳/۱(۱۲۴/۱)	۱۰/۳(۱۳/۸)	۱۰۰
۱۴	۱۳۷/۹	۱۳۷/۹(۱۷۲/۳)	۱۲۴/۱(۱۵۵/۱)	۱۳/۸(۱۷/۲)	۱۰۰
۱۵	۱۳۷/۹	۲۷۵/۸ (۳۱۰/۱)	۲۴۸/۲(۲۷۹/۱)	۲۷/۶(۱۹/۲)	۱۰۰

۳-۶-۲-۲-روابط تجربی

در سالهای اخیر تحقیقات زیادی جهت مدلسازی و ارائه روابط دقیقتر برای محاسبه مدول برجهندگی انجام شده است. در این روابط، عمدتاً ضرایب ثابتی که تابع وضعیت و شرایط فیزیکی مصالح است، به کار می‌رود. به عبارت دیگر مدول برجهندگی، با استفاده از ضرایب ثابت (نماینده خصوصیات فیزیکی خاک) و تنشهای وارد بر نمونه، محاسبه می‌شود. از جمله این روابط می‌توان به روابط تامپسون و الیوت (۱۹۸۵) اشاره کرد(AASHTO, 1993). در این روابط برای خاکهای ریزدانه یک رابطه دوگانه خطی جهت تعیین مدول برجهندگی بشرح ذیل تعریف می‌شود:

$$M_R=K_1+K_3\ (K_1-\sigma_d) \qquad \sigma_d<K_2 \qquad (۶-۳)$$

$$M_R=K_1-K_4\ (\sigma_d-K_2) \qquad \sigma_d>K_2 \qquad (۷-۳)$$

که در این رابطه، M_R مدول برجهندگی مصالح ریزدانه، و K_1 و K_4، ضرایب ثابت مصالح می‌باشند. در این روش خاکهای ریزدانه به چهار نوع نرم، متوسط، سخت و بسیار سخت طبقه‌بندی می‌شوند و ملاحظه می‌شود که مدول برجهندگی خاکهای ریزدانه، با افزایش تنش انحرافی (σ_d) کاهش می‌یابد.

اگر مصالح درشت‌دانه با رفتار الاستیک غیرخطی فرض شود، حالت تنش (θ) در تعیین مدول برجهندگی آنها باید در نظر گرفته شود. رابطه زیر یکی از روابط تعیین مدول برجهندگی خاکهای دانه‌درشت می‌باشد:

omoorepeyman.ir

$$M_R=K_1\theta^{k2} \quad (۸-۳)$$

که در این رابطه، M_R: مدول برجهندگی مصالح درشت‌دانه، K_2 ،K_1: ثابت مصالح که از روی خصوصیات فیزیکی مصالح به طور تجربی حاصل می‌شوند. θ: اولین ثابت تنش (مجموع تنشهای اصلی) یا تنش حجمی (Bulk stress) به شرح ذیل:

$$\theta=\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3 \quad (۹-۳)$$

در آزمایش سه محوری سیکلی براساس (AASHTO T307) :

$$\theta=\sigma_d+2\sigma_3 \quad (۱۰-۳)$$

طبق این رابطه، مدول برجهندگی مصالح درشت دانه تحت تنش همه جانبه یکسان، با افزایش تنش انحرافی، افزایش می‌یابد. روابط دیگری نیز در این زمینه وجود دارد که بر مبنای نتایج آزمایشگاهی و مدلسازی عددی حاصل شده است. این روابط برای مصالح اساس و زیراساس سرباره باید دوباره محاسبه شود.

برای اساس اصلاح شده (CTB یا RAP) مقادیر مدول برجهندگی وابسته به تنش تفاضلی سیکلی (σ_d) و θ است(Uzan,1985):

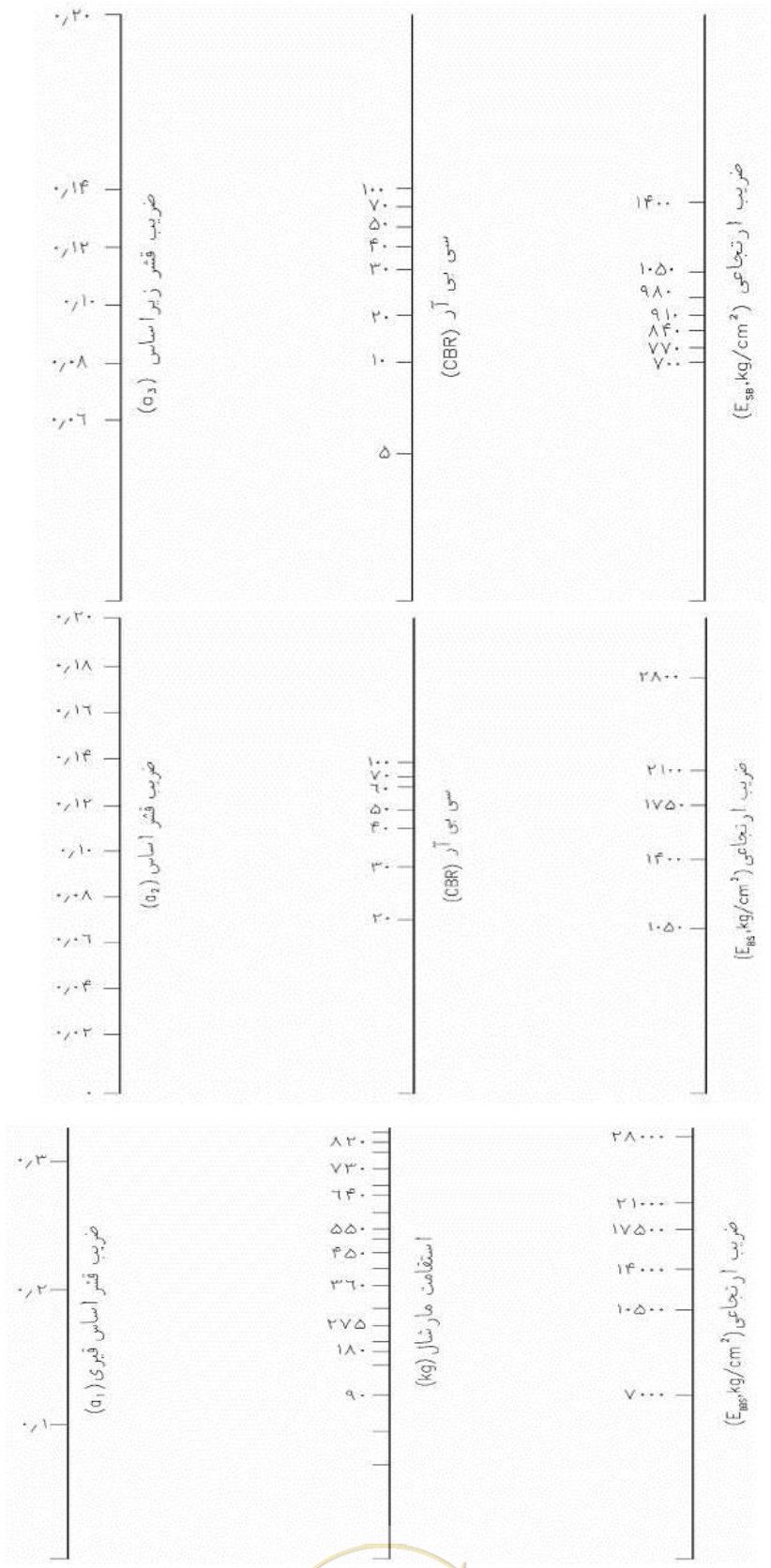
$$M_R=K_1\left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{K_2}\left(\frac{\sigma_d}{P_a}\right)^{K_3} \quad (۱۱-۳)$$

K_1، K_2 و K_3 ضرایب ثابت نمونه اصلاح شده است که از طریق برازش بر نتایج بدست می آید.

۳-۶-۲-۳-روابط همبستگی با سایر پارامترهای مقاومتی خاک

یکی از روشهای محاسبه مدول برجهندگی، تخمین آن با استفاده از روابط همبستگی بین این ضریب و سایر پارامترهای مقاومتی خاک که از آزمایش بدست آمده، می‌باشد. در این زمینه روابط متنوعی بر مبنای نتایج آزمایش نفوذ مخروط استاتیکی (CPT) و نفوذ مخروط دینامیکی (DCPT)، تغیر شکل بر مبنای وزنه افتان (FWD)، بارگذاری صفحه (PLT) و نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) وجود دارد (Kim et al., 2001). در راهنمای طراحی روسازی AASHTO و راهنمای طرح روسازیهای جدید و بازسازی شده، CBR به عنوان پارامتر اصلی مقاومتی لایه‌های روسازی مورد استفاده قرار گرفته است. در آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران نیز از پارامتر CBR جهت تخمین مدول برجهندگی لایه‌های روسازی، در صورت عدم امکان اندازه‌گیری مستقیم مدول برجهندگی (انجام آزمایش) استفاده می‌شود. در شکل (۳-۴) نمودارهای تخمین مدول برجهندگی مصالح آسفالتی و غیر آسفالتی روسازی و بستر روسازی راه از روی پارامترهای فیزیکی CBR در لایه‌های غیر آسفالتی) براساس آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران ارائه شده است. همچنین در جدول ۰ زیر تخمین مدول برجهندگی بستر روسازی با CBR خاک ارایه شده است. برای ارزش باربری خاک، مدول برجهندگی و ضریب فنر اساس و زیر اساس برحسب CBR به شکل (۳-۴) مراجعه شود. این روابط برای مصالح اساس و زیراساس سرباره باید دوباره محاسبه شود.

omoorepeyman.ir



شکل (۳-۴) تخمین مدول برجهندگی لایه‌های روسازی براساس آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران برای مصالح غیرسرباره ای

omoorepeyman.ir

جدول ۰(۳-۱۵) تخمین مدول برجهندگی بستر روسازی با CBR خاک طبیعی

ردیف	درصد CBR تر خاک بستر روسازی	مدول برجهندگی خاک بستر (kg/cm^2)
۱	CBR ≤ ۵	۱۰۵ (CBR)
۲	۵ ≤ CBR ≤۱	۵۲۵+۳۵ (CBR-۵)
۳	۱۰ ≤ CBR ≤ ۱۵	۷۰۰+۲۱ (CBR-۱۰)
۴	۱۵ ≤ CBR ≤ ۲۵	۸۰۵+۱۴ (CBR-۱۵)
۵	CBR ≤ ۲۵	به نموداراساس مراجعه شود

۳-۶-۳-روش ساده معادل اندازه گیری مدول برجهندگی

برای تعیین مدول برجهندگی نوعی خاک ریزدانه، مقایسه‌ای میان آزمایش استاندارد AASHTO T307-99 و یک روش ساده شده با آزمایش سه محوری تکراری، برای خاک‌های ریزدانه ۵ پله بارگذاری (شامل تنش محدود کننده kPa ۱۳/۸ و تنش انحرافی متناظر ۱۲/۴، ۲۴/۸، ۳۷/۳، ۴۹/۷ و ۶۲kPa) پیشنهاد شده و مدول برجهندگی بدست آمده از روش ساده پیشنهادی و آزمایش استاندارد، تقریباً یکسان هستند(Nguyen and Mohajerani, 2016). در واقع در روش ساده شده، تنش محدودکننده در کل زمان آزمایش ثابت نگاه داشته می‌شود. این مقدار تنش بر اساس «تنش همه جانبه نماینده در محل» بر بالای بستر است که از بارگذاری استاندارد تک محور۸۰kN و فشار سطح تماس چرخ kPa ۶۸۹ بدست می آید. دستورالعمل FAA برای طراحی روسازی فرودگاه حداکثر E بستر را (CBR=33) (MPa) ۳۴۵ برای طراحی توصیه می‌کند. برای رویه انعطاف پذیرE (MPa) = 10×CBR و یا PLT (رویه صلب) برای تعیین مدول استفاده می شود. برای مصالح سرباره ای EAF فولاد مبارکه و خراسان لایه زیربالاست رابطه بین E (MPa)=50×CBR و برای اساس و زیراساس E (MPa)=80×CBR توصیه می شود. برای مصالح سرباره ای BOF ذوب آهن اصفهان لایه زیربالاست رابطه بین E (MPa)=40×CBR توصیه می شود.

۳-۷-شرایط بارگذاری مصالح اساس باند فرودگاه برای تعیین مدول برجهندگی

طبق AFESC/RD (ESL-TR40-10) فرکانس بارگذاری بر طراحی و بهسازی بستر باند تاثیر دارد. فرکانس معمول بارگذاری ۱ تا ۵ هرتز است. همچنین تغییر فرکانس، اثر زیادی روی مقادیر مدول دارد به طوریکه با ۱۰ واحد افزایش در مقدار فرکانس بارگذاری، مقادیر مدول حدود ۱۰۰٪ افزایش می یابد. فرکانس بارگذاری چرخهای بوئینگ ۷۴۷ بین ۱/۶ تا ۲ هرتز و فرکانس جنگنده F-5 حدود ۲ هرتز است. تغییرات دمای مورد بهره برداری از ۱/۷-۱۲/۷°C تا ۴۶/۷°C- ۲۸/۹ می تواند متغییر باشد. لذا این بازه از تغییرات اثر زیادی بر رفتار و عمر بهره برداری روسازی دارد. مطالعات قبلی با استفاده از آزمایشهای سه محوری روی نمونه ای آسفالتی برای دمای ۵ و ۱۸°C نشان داد که با افزایش دما مقادیر مدول کاهش و استهلاک انرژی افزایش می یابد. مقدار بار فشار چرخها در گزارش PCN به ترتیب برای طبقه بندی های

omoorepeyman.ir

خیلی زیاد، زیاد، متوسط و کم به ترتیب برابر ۲/۴، ۱/۷۵، ۱/۲۵ و ۰/۵ MPa می‌باشد. برای رویه آسفالتی حداکثر فشار چرخ ۱/۷۵ MPa در نظر گرفته می شود. اثر فشار چرخ روی پی صلب ناچیز است. همچنین بار ضربه ای مورد نظر برای طراحی آزمایشهای دینامیکی ۲/۵ تا ۳ برابر بار استاتیکی نظیر برای چرخ است. حداکثر تنش دینامیکی در نظر گرفته حدود ۳/۵ MPa گزارش شده است. شکل بار هم اثر قابل توجهی بر رفتار خستگی دارد. بطور کلی عمر خستگی مصالح تحت بار مستطیلی کمتر از نصف بار سینوسی است. اما بار مثلثی ۴۵٪ نسبت به بار سینوسی عمر خستگی را افزایش می دهد. برای انجام آزمایشهای مدول برجهندگی به پیوست الف مراجعه شود. به نظر می رسد مقادیر مدول برجهندگی سرباره تقریباً ۱/۵ تا ۳ برابر مقادیر نظیر خاک طبیعی است.

۳-۷-۱- سایر ملاحظات اساس باند

یکی از ملاحظات مورد نیاز در طراحی باند مشخصات هواپیمای مورد استفاده براساس نیاز روز یا آینده است. مشخصات یکی از هواپیمای مورد استفاده فعلی کشور از نوع Airbus A300-600 به شرح زیر است: حداکثر بار بلند شدن ۱۷۱۰۰۰kg، طول بال ۴۴/۸۳ متر، طول ۵۳/۸۵، ارتفاع ۱۶/۵۲ متر، حداکثر برد ۷۵۰۰ km و ظرفیت مسافر ۲۸۰ نفر. این نوع هواپیمای که در رده هواپیمای های متوسط از لحاظ وزنی موجود در کشور (در قابل مقایسه با Airbus A380-800 با مشخصات حداکثر بار بلند شدن ۳۶۸۰۰۰ kg، طول بال ۶۳/۴ متر، طول ۷۵/۳، ارتفاع ۱۷/۲ متر، حداکثر برد ۱۴۶۰۰ km و ظرفیت مسافر ۳۰۸ نفر) خیلی بیشتر از هواپیمای طراحی یعنی C 130 E اعلامی مشاور (در سال ۱۳۴۳) با وزنی حدود ۷۰۵۰۰ kg و فشار چرخی حدود ۵/۶ kg/cm^2 برای یکی از فرودگاه کشور می باشد. لذا در طراحی زیرسازی های مرتبط، در طراحی هندسی باند جدید باید به مشخصات خریدهای فعلی و همچنین هواپیمای پهن پیکر موجود در کشور توجه داشت. طبق استانداردهای FAA برای روسازی باند با وزن هواپیمای بیش از ۴۵۳۵۰ kg تثبیت اساس و بستر لازم است.

برای طراحی رویه انعطاف پذیر، نرم افزار FAARFIELD حداکثر کرنش عمودی در بالای بستر و حداکثر کرنش افقی در پایین لایه آسفالتی را برای تعیین عمر سازه ای رویه بکار می برد. FAARFIELD مقدار ضخامت مورد نیاز برای هریک از لایه های روسازی انعطاف‌پذیر (رویه آسفالتی، اساس و زیراساس) برای تحمل ترکیبهای مختلف بار هواپیمای داده برای حصول عمر طراحی سازه ای برای یک بستر مشخص تعیین می‌کند. اما برای طراحی رویه صلب، FAARFIELD از حداکثر مقدار تنش افقی در پایین دال PCC (هم در گوشه و هم در وسط) برای تعیین عمر سازه ای رویه استفاده می کند. طبق AC 150/5320-6F حتی اگر ۵٪ وزن هواپیماهای طرح از ۴۹۸۹۵ kg تجاوز کند، تثبیت بستر و همچنین اطمینان از عملکرد دراز مدت آن لازم است. در اثر کاهش ظرفیت سازه ای، آلوده شدن اساس و زیراساس از خاک زیرین یا از طریق ترک های رویه رخ می دهد که خود باعث کاهش عمر باند می شود. استفاده از ماکادام یا ژئوسنتتیک یا شفته آهک برای جلوگیری از آلودگی زیراساس و اساس توسط خاک ریزدانه زیرین توصیه می شود. برای نواحی مستعد یخبندان روی خاک FG2 و بالاتر لایه زهکش زیر سطحی هم لازم است. برای روسازی صلب،

omoorepeyman.ir

لایه زهکش معمولاً بلافاصله زیر دال بتنی قرار می گیرد. برای روسازی انعطاف‌پذیر، لایه زهکش بلافاصله بالای زیراساس قرار می گیرد (AC 150/5320-6F). با در دست داشتن حداکثر تنش تماسی بین اساس و زیراساس از یک سو و تنش مجاز بستر از سوی دیگر و با مدول برجهندگی، می‌توان ضخامت لازم برای مصالح دانه‌ای (اساس و زیراساس) را تعیین نمود.

در اکثر فرودگاه‌های کشور لایه اساس اصلاح شده با سیمان (CTB) و زیراساس اصلاح شده مثلاً شفته آهک در مناطق گرمسیری و حتی زیراساس اصلاح شده با سیمان و آهک وجود دارد. الگوی بارگذاری برای CTB و زیراساس اصلاح شده باند در پیوست دوم ارائه شده است.

۳-۸-تنش تماسی و افقی بین روسازی/اساس و اساس/زیراساس راه

اعمال تش سیکلی ۴۰۰ و۸۰۰ kPa (به ترتیب معرف نصف و کل بار کامیون‌ها) برای شبیه سازی بار بحرانی روی سطح جاده بکار می رود (Brito et al., 2009). با بکارگیری نرم افزار KENPAVE (Huang, 1993) و با فرض لایه آسفالت ۵۰ mm با مدول یانگ ۲/۵ GPa، دامنه فشار می تواند به ترتیب به ۲۷۵ و ۵۵۰ kPa روی سطح لایه اساس کاهش یابد. در آزمایشهای (Ghotbi Siabi et al., 2018) تنش پایین ۲۷۵kPa با تعداد ۱۰۰ سیکل اعمال گردیده و در ادامه ۴۰۰ سیکل برای تنش بالا یعنی ۵۰۰ kPa اعمال شد. لازم به ذکر است معمولاً نصف مقدار تنش سیکلی اعمالی در سطح لایه در آزمایش سه محوری اعمال می شود. مقادیر تنش افقی بین ۱۳ تا ۶۰ kPa متغییر است.

۳-۹-کاربرد ژئوسنتتیک ها در اساس و زیراساس سربارهای

انواع ژئوسنتتیکها و کاربرد آنها برای راه و باند در جدول (۳-۱۶) ارائه شده است.

جدول (۳-۱۶) انواع ژئوسنتتیک‌ها و کاربرد آنها

نوع ژئوسنتتیک	عملکرد
ژئوتکستایل • بافته • نبافته	تسلیح فیلتراسیون جداسازی، انتقال مایعات
ژئوگرید	تسلیح
ژئومش	تسلیح، فیلتراسیون
ژئونت	انتقال مایعات
ژئومت	تسلیح
ژئوسل	تسلیح، محصورکنندگی
ژئوکامپوزیت	تسلیح، جداسازی، فیلتراسیون، انتقال مایعات
ژئوممبرین	ایزولاسیون، جداسازی، تسلیح

omoorepeyman.ir

استفاده از ژئوگرید دوجهته سه ضلعی یا چهارضلعی در محل مناسب سبب کاهش نشست روسازی و در نتیجه افزایش حداقل ۳۰ درصدی عمر بهره‌برداری اساس سرباره ای تا طبقه "نسبتاً کثیف" می‌شود. توصیه می‌شود اندازه چشمه های ژئوگرید چهارضلعی بیش از ۲۵ میلیمتر باشد تا مکانیزم تسلیح از طریق قفل و بست مکانیکی با دانه‌های اساس ایجاد شود. برای ژئوگرید سه ضلعی نسبت اندازه سوراخ ژئوگرید به اندازه اسمی دانه های اساس (d50) برابر d50*(۱/۱-۰/۹) برای بهترین عملکرد توصیه می‌شود.

۳-۹-۱-اثرات تسلیح با ژئوگرید

حضور یک لایه ژئوگرید در بالای بسترهای راه با CBR برابر ۳۹/۱ و نشست دائمی ۲۵ mm، حدود ۵ مرتبه عمر بهره برداری را افزایش می دهد(Bathurst and Raymond, 1987). محققین دیگر این افزایش را ۲/۵ بدست آوردند. طبق Brown و همکاران (۲۰۰۶) استفاده از ژئوگرید دوجهته و سه ضلعی برای مسلح سازی فعلاً معمول است.

در صورت استفاده از ژئوکامپوزیت، ژئوگرید به دلیل داشتن سوراخهای بزرگ (>۲۵ mm) سبب ایجاد قفل و بست مکانیکی با دانه‌های اساس ایجاد مسلح کنندگی می‌کنند و در صورتی که ژئوتکستایل غیربافته شده نقش جداکننده و اجازه زهکشی جزئی در پلان را می‌دهد. نتایج اندازه گیری های صحرایی، جابجایی و کرنش قائم لایه اساس در برابر تعداد سیکل برای انواع بستر و تسلیح کننده نشان می دهد که جابجایی قائم روی خاک آبرفتی نرم حداکثر و روی عرشه پل بتنی حداقل است. تسلیح با ژئوگرید جابجایی قائم اساس را به مقدار ۵ تا ۳۵٪ کاهش می دهد که ناشی از محصور کنندگی داخلی ناشی از اتصال بین دانه های اساس و ژئوگرید است. ژئوگرید با نسبت بازشدگی برابر d50*۱/۱-۰/۹بهترین عملکرد را دارد. اکثر کرنش‌ها بلافاصله بعد از ساخت اساس رخ می دهد زمانی که ژئوگرید به سمت زیراساس فشرده می شود و تنش کششی بین ۰/۳ تا ۲/۲٪ در ژئوگرید ایجاد می کند. کرنش بیشتر در جهت عمود بر خط نشان دهنده گسترش جانبی رویه شاید به دلیل کمی محصوریت در این جهت است.

۳-۹-۱-۱ عمق مناسب نصب ژئوگرید

عمق قرارگیری ژئوگرید در مرز تماس اساس با زیراساس توصیه می شود. برای تک لایه اساس عمق استقرار ژئوگرید در وسط لایه برای افزایش ظرفیت باربری پیشنهاد می شود. براساس مطالعات (Petriaevet al., 2017) قرارگیری ژئوسل در زیراساس برای توزیع مناسب تنشها مفید است.

۳-۱۰-نفوذپذیری اساس سرباره ای و معمولی

نفوذ مصالح بستر به درون اساس و زیراساس سبب کاهش نفوذپذیری لایه های یاد شده می شود. بررسی نفوذپذیری خاک‌ها جهت طراحی و اجرای سازه‌های ژئوتکنیکی از جمله بستر راه‌ها و خطوط ریلی از اهمیت به سزایی جهت حفظ

omoorepeyman.ir

پایداری برخوردار است. یکی از آزمایش‌های مورد استفاده جهت بررسی نفوذپذیری خاک‌های ریزدانه، آزماش "نفوذپذیری به روش بار افتان" است که مطابق با دستورالعمل Bowels نسخه سال ۱۹۸۱ انجام می‌شود.

برای نمونه سرباره EAF شرکت فولاد مبارکه اثر افزایش مقادیر ریزدانه عبوری از الک ۲۰۰ بررسی شده است. در جدول (۳-۱۷) درصد رطوبت و وزن مخصوص نمونه‌های ساخته شده جهت انجام آزمایش‌های "نفوذپذیری به روش بار افتان" به همراه مقادیر نفوذپذیری ارائه شده است.

جدول (۳-۱۷) نتایج نفوذپذیری مصالح به روش بار افتان (Bowels ۱۹۸۱) دانه‌بندی نوع ۱

مصالح	نوع تراکم	شرایط ساخت نمونه	تعداد ضربات	دانسیته خشک (گرم بر سانتیمتر مکعب)	دانسیته مرطوب (گرم بر سانتیمتر مکعب)	نفوذپذیری (سانتیمتر بر ثانیه)
سرباره EAF شرکت فولاد مبارکه	اصلاح شده	خشک	۵۶	۲/۵	۲/۶۱	۰/۰۱۸
سرباره EAF شرکت فولاد مبارکه+۲٪ ریزدانه سرباره EAF شرکت فولاد مبارکه	اصلاح شده	خشک	۵۶	۲/۵۹	۲/۷۲	۰/۰۰۱۷
سرباره EAF شرکت فولاد مبارکه+۵٪ ریزدانه سرباره EAF شرکت فولاد مبارکه	اصلاح شده	خشک	۵۶	۲/۶	۲/۷۱	۰/۰۰۰۲۶
سرباره EAF شرکت فولاد مبارکه+۸٪ ریزدانه سرباره EAF شرکت فولاد مبارکه	اصلاح شده	خشک	۵۶	۲/۷	۲/۸۳	۰/۰۰۰۲۶
سرباره EAF شرکت فولادمبارکه+۱۲٪ ریزدانه سرباره EAF شرکت فولاد مبارکه	اصلاح شده	خشک	۵۶	۲/۷۷	۲/۹۱	۰/۰۰۱۱
آهک ایرانکوه	اصلاح شده	خشک	۵۶	۲/۱۸	۲/۲۹	۰/۰۰۰۶۷
سرباره EAF شرکت فولاد خراسان	اصلاح شده	خشک	۵۶	۲/۵۸	۲/۷۱	۰/۰۱۱
آذرین انجیل آوند	اصلاح شده	خشک	۵۶	۲/۲۵	۲/۳۱	۰/۰۰۰۱۲

۳-۱۱- ملاحظات ساخت لایه اساس و زیراساس سرباره ای

پیش از اجرای زیراساس لازم است مطابق الزامات نشریه ۱۰۱ بستر با شیب عرضی مناسب (۳ درصد) کوبیده شده و به تراکم مورد نظر رسیده باشد. زیراساس نیز به تبعیت از بستر لازم است تا با همان شیب بستر اجرا شود تا امکان زهکشی آب ورودی به روسازی فراهم شود. از این جهت ضخامت اجرایی لایه‌های زیراساس پیش از تراکم توسط غلتک بهتر است از ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متر بیشتر نباشد. از منظر کنترل مشخصات زیراساس پس از اعمال تراکم نسبی حداقل ۹۵ درصد، تامین تمام مشخصات مندرج در جدول (۳-۱۸) الزامی است.

جدول (۳-۱۸) مشخصات لایه زیراساس و اساس سرباره ای حین اجرا

آزمایش	روش آزمایش	حدود مشخصات
تراکم نسبی (در رطوبت بهینه)	ASTM D1557	بیش از ۹۵ درصد
نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)	ASTM D1883	بیش از ۸۰ درصد
ضریب ارتجاعی در بارگذاری دوم (EV2)	ASTM D1195	بیش از ۳۰۰ مگاپاسکال

omoorepeyman.ir

۳-۱۱-۱- تولید سرباره

طی فرآیند تولید سرباره باید حداکثر دقت را به کار برد تا از ورود هر گونه مواد زائد نظیر خاک، سنگ، چوب، آهک و نظایر آن به دانه‌های سرباره جلوگیری شود و دپوهای 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 شود، باید از مصالح مصرفی طبق AASHTO T2 نمونه‌برداری کرده و آزمایش‌های مورد نیاز طبق این راهنما 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.

۳-۱۱-۲- 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 و منیزیم آزاد هنگام تماس با رطوبت دارند. بنابراین باید با انبار کردن سرباره‌ها در هوای آزاد به مدت 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 دپوهای مرطوب باید با انجام آزمایش‌های کنترل فرآیندهای تولید همراه باشد (آزمون تعیین درصد آهک آزاد و آزمون تعیین قابلیت انبساط بر اثر هیدراتاسیون) تا معیارهای مربوطه تأمین شود. تا زمانی‌که 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 دپوهای مرطوب ادامه یابد(FHWA,1997).

۳-۱۱-۳- آماده‌سازی بستر

قبل از اجرای عملیات، بستر روسازی راه باید عاری از هر گونه مواد زائد بوده و طبق پروفیل‌های طولی و عرضی آماده شده باشد. ناهمواری بستر با استفاده از شمشه کنترل می‌شود. در صورتی که شمشه ۴ متری در جهات مختلف بر روی بستر قرار گیرد، ناهمواری‌های آن در زیر شمشه نباید از ۲۰ میلیمتر تجاوز کرد. 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 (۳-۱۹) 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 تغییرشکل یابند، باید تا عمق لایه‌های زیرین برداشته شده و با مصالح مناسب جایگزین و یا تثبیت شوند(Wang, 2016).

omoorepeyman.ir

جدول (۳-۱۹) طبقه‌بندی خاک بستر(Wang, 2016).

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

۳-۱۱-۴- 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 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 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 (۱-۳) بایستی از سطح راه برداشته و به خارج از حریم راه حمل شود. به هنگام پخش مصالح، به وسیله گریدر 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 زیر و روکردن مصالح کاهش داد (Wang, 2016).

پس از پخش، تسطیح و تنظیم نمودن مصالح، آب‌پاشی به وسیله ماشین آب‌پاش با فشار یکنواخت آغاز می‌شود. آب‌پاشی طوری باید به نحوی انجام شود که تمام دانه‌های مصالح به طور یکنواخت مرطوب شود. توقف آب‌پاش به هنگام آب‌پاشی روی لایه اساس یا زیراساس مجاز نیست. آب‌پاشی نباید به نحوی انجام شود که موجب صدماتی به بدنه خاکی راه شود. مقدار آب لازم برای آب‌پاشی بر مبنای درصد رطوبت بهینه که با روش AASHTO T180 در آزمایشگاه به دست آمده است، تعیین می‌شود. رواداری کارگاهی مجاز آب مصرفی ۱/۵± درصد نسبت به رطوبت بهینه می‌باشد.

پس از آب‌پاشی، بلافاصله کوبیدن با غلتک ۱۰ تا ۱۲ تنی فولادی و یا غلتک‌های لاستیکی آغاز می‌شود. 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 نشود.

omoorepeyman.ir

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 لاستیکی که معمولاً روی اساس و زیراساس و خاک‌های غیر چسبنده استفاده می‌شود و (۳) غلتک‌های 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 استاتیکی (بدون لرزش) صورت گیرد. این رویکرد برای کنترل بهتر تراکم اولیه قبل از غلتک‌زنی ارتعاشی تا رسیدن به تراکم موردنیاز اجرا می‌شود. وزن و دامنه ارتعاش باید با توجه به ضخامت لایه پخش‌شده 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 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 فولادی استاتیکی در دستیابی به تراکم یکنواخت کمتر از غلتک‌های فولادی لرزشی کارآمد هستند(Wang, 2016).

عملیات تراکم از کناره‌های راه شروع و به محور آن ختم می‌شود به استثنای قوس‌ها که از داخل و از پایین‌ترین نقطه، شروع شده و به بلندترین رقوم در خارج قوس ختم می‌شود. 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 شود.

قبل از اتمام عملیات تراکم، سطح اساس یا زیراساس مجدداً کنترل می‌شود تا انطباق رقوم اجرا شده با رقوم پروژه محرز شود. در صورت لزوم با برداشتن قسمتی از مصالح در نقاط مرتفع و اضافه نمودن آن در سطوحی که کمبود مصالح دارد، ناهمواری‌ها باید اصلاح شود 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 کرد، 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

omoorepeyman.ir

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 شود 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).

۳-۱۱-۵- 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 طریقه 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 اندازه ماکزیمم 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 شود. 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[1] 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).

۳-۱۱-۶- 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 کرد (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 می‌شود. در صورتی

[1] Direct Transmission Mode

omoorepeyman.ir

که شمشه ۴ متری در جهات مختلف بر روی سطح زیراساس و اساس قرار گیرد، ناهمواری‌های آن نباید از ۱/۵ سانتیمتر تجاوز کرد.

۳-۱۱-۷- 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 ماشین آلات راهسازی از روی آن باید جلوگیری کرد.

۳-۱۱-۸- آزمایش های 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:

۳-۱۱-۸-۱- آزمایش‌های کنترل کیفیت زیر اساس

الف: در ابتدای پروژه از مصالح تهیه شده در پای کار نمونه‌برداری شده و آزمایش‌های مورد نیاز طبق این راهنما انجام شود تا در صورتی که مصالح طبق مشخصات نباشد اصلاح شود. پس از شروع پروژه باید هر یک 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 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.

۳-۱۱-۸-۲- آزمایش های کنترل کیفیت اساس

الف: از مصالح تهیه شده در پای کار نمونه‌برداری شده و آزمایش‌های مورد نیاز طبق این راهنما انجام شود تا در صورتی که مصالح طبق مشخصات نباشد اصلاح شود. پس از شروع پروژه باید هر یک ماه یکبار این آزمایش‌ها روی

omoorepeyman.ir

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 می‌شود از هر ۵۰۰ متر مکعب یکبار آزمایش دانه‌بندی، دانسیته خشک، سایش لس آنجلس و ارزش ماسه‌ای انجام می‌شود.

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

۳-۱۲- اختلاط مصالح طبیعی و سرباره های آهن و فولاد

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). فقط اختلاط مصالح سنگی آذرین مناسب با مصالح سرباره فولاد مجاز است.

۳-۱۳- تعمیر و نگهداری

مصالح سرباره فولاد با توجه به ظرفیت حرارتی بالای آن، نسبت به مصالح سنگی طبیعی معمول، حرارت را به مدت بسیار طولانی‌تر حفظ می‌کنند. ویژگی‌های حفظ گرما در مصالح سرباره فولاد می‌تواند در عملیات لکه‌گیری و ترمیم روسازی با آسفالت داغ در هوای سرد سودمند باشد (FHWA,1997).

۳-۱۴- ملاحظات ویژه برای ارزیابی فنی و اقتصادی

در ارزیابی‌های فنی و اقتصادی برای استفاده از اساس و زیراساس سرباره‌ای به عنوان جایگزین اساس و زیراساس سنگدانه‌ای باید نکات زیر مد نظر قرار گیرد:

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

omoorepeyman.ir

- به دلیل محدودیت نقاط انباشت اساس و زیراساس سرباره‌ای در کشور، لازم است فاصله حمل بهینه نسبت به محل انباشت برای هر اساس سرباره‌ای محاسبه شود.
- به دلیل محدودیت حجم انباشت اساس سرباره‌ای درکشور در بلندمدت، از منظر نگهداری و تعمیر، اضافه کردن اساس سنگدانه‌ای به اساس سرباره‌ای برای جبران کسری اساس سرباره‌ای محتمل است. از این رو رفتار سایشی و مکانیکی ترکیب این دو مصالح، می‌بایست مدنظر قرار گیرد.
- با توجه به شکل دانه‌های اساس سرباره‌ای که گاها سبب سایش بیشتر تایر لاستیک نسبت به اساس سنگدانه ای می شود، این نکته در برآورد هزینه و عمر اساس سرباره‌ای در مقایسه با اساس سنگدانه‌ای برای جاده خاکی باید مورد توجه قرار گیرد.
- در ضخامت یکسان، لایه اساس سرباره‌ای EAF بار مرده بیشتری را در مقایسه با اساس سنگی بر ابنیه فنی اعمال می‌کرد که این موضوع باید در طراحی این ابنیه مورد توجه قرار گیرد.
- مصالح سرباره کوره بلند و سرباره فولاد از مقاومت و سختی بالایی برخوردار هستند. مصالح سرباره از نظر شکل هندسی به مصالح سنگی شکسته شباهت زیادی دارند. مصالح سنگی طبیعی 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). هرچند مشاهدات میدانی برای راه های دسترسی در اطراف کارخانه های مبارکه حاکی از عملکرد مناسب استفاده از سرباره است. لیکن این موضوع نیازمند مطالعه و بررسی بیشتر است.
- مصالح سرباره نسبت به مصالح سنگدانه طبیعی معمولاً زاویه اصطکاک داخلی بیشتر، سختی بیشتر و شاخص ضربه و خردشدگی[1] 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 سنگدانه طبیعی برخوردار هستند و نسبت به شن و ماسه طبیعی می‌توانند ظرفیت باربری بالاتری فراهم کند.

[1] Impact and Crushing Value

omoorepeyman.ir

پیوست ۱

طراحی آزمون سه محوری سیکلی برای اساس و زیراساس

omoorepeyman.ir

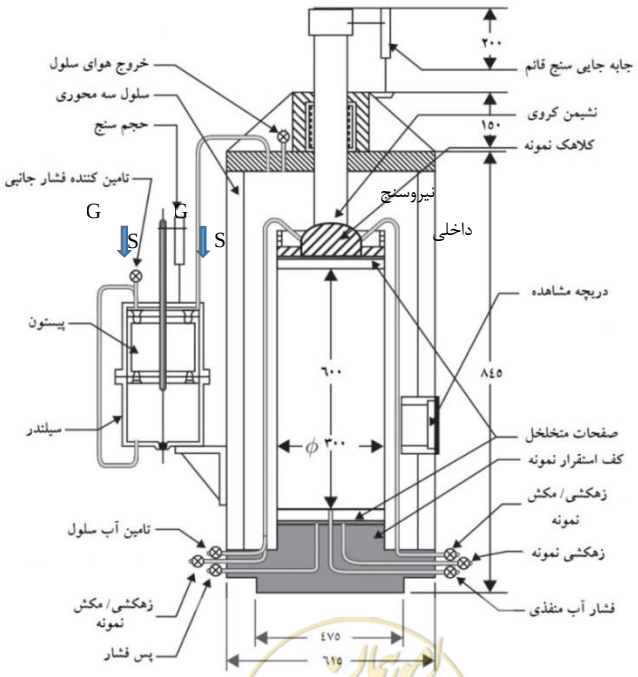
omoorepeyman.ir

پ-۱- مقدمه

یکی از بهترین آزمایش‌ها برای بررسی رفتار دینامیکی مصالح اساس و اساس/زیراساس (دولایه) شامل مدول برجهندگی و تعیین نشست، انجام آزمایش سه‌محوری سیکلی قطر بزرگ است. در این آزمایش، انتخاب حداکثر اندازه دانه، تنش محدودکننده، سربار اولیه (تنش انحرافی استاتیکی)، تنش تفاضلی سیکلی و فرکانس بارگذاری از اهمیت زیادی برخوردار است. در این فصل روش انتخاب فراسنج‌های فوق متناسب با شرایط بهره‌برداری از محور و باند به همراه مقادیر پیشنهادی برای فراسنج‌ها ارائه شده است.

پ-۱-۲- مشخصات دستگاه سه محوری

در شکل (پ-۱-۱) نمای شماتیک دستگاه سه محوری سیکلی قطر بزرگ ملاحظه می‌شود. خلاصه مشخصات فنی مورد نیاز دستگاه سه محوری قطر بزرگ دینامیکی جدول (پ-۱-۱) ارائه شده است. دستگاه باید قابلیت انجام آزمون بر روی نمونه‌های با قطر حداقل ۳۰۰ میلیمتر را دارا باشد. لازم است از نیروسنج مستغرق داخلی برای اندازه‌گیری نیروی اعمالی در بالای کلاهک (روی نمونه) و از نیروسنج بیرونی برای کنترل نیروی اعمالی استفاده شود. همچنین ضروری است جابه‌جایی‌سنج قائم، متصل به کلاهک بالای نمونه باشد و علاوه بر آن از دو عدد کرنش‌سنج غیرتماسی یا گپ‌سنسور در طرفین نمونه به طور هم‌زمان برای ثبت کرنش‌ها در جهت قائم درست مستقر روی کلاهک نمونه استفاده شود. به طور معمول برای نمونه با قطر ۳۰۰ میلیمتر از غشاء سیلیکونی یا پلی‌یوریان به ضخامت ۲٫۵ میلیمتر مطابق استاندارد ASTM D3999 استفاده می‌شود.



شکل (پ-۱-۱) نمایش شماتیک اجزاء دستگاه سه محوری قطر بزرگ دینامیکی

omoorepeyman.ir

جدول (پ-۱-۱) مشخصات دستگاه سه محوری قطر بزرگ برای انجام آزمایشهای مونوتونیک و سیکلی دینامیکی

پارامتر	حداقل ظرفیت مورد نیاز	دقت (٪)	حداقل فرکانس پاسخ ابزار (kHz)
بار محوری استاتیکی	۱۰۰ کیلو نیوتن	۰٫۲	۵
بار محوری دینامیکی	۲۵± کیلو نیوتن	۰٫۰۲	۵
فشار محصورکننده	۱۵۰ کیلوپاسال	۱	۵
پس فشار	۱۵۰ کیلوپاسال	۱	۵
تغییر حجم	۵ لیتر	۰٫۲	۵
تغییر طول (استاتیکی)	۱۰۰ میلیمتر	۰٫۰۱	۵
تغییر طول (دینامیکی)	۵± میلیمتر	۰٫۰۰۱	۱۰

پ-۱-۳- روش ساخت نمونه

برای انجام آزمون سه محوری سیکلی بر روی اساس و زیراساس معمولاً از سلول با قطر ۳۰ سانتی‌متر (۱۲ اینچ) و بزرگتر استفاده می‌شود. به طور کلی پیشنهاد می‌شود که بیشینه اندازه دانه‌های اساس به حداقل یک ششم قطر نمونه سه محوری محدود شود. برای نمونه سه محوری شامل اساس/زیراساس (دو لایه) ضخامت لایه اساس و زیراساس هرکدام ۳۰ سانتی‌متر پیشنهاد می‌شود. برای نمونه‌سازی لازم است که اساس و زیراساس در لایه‌های ۱۵ سانتی‌متر در سلول سه محوری ریخته شده و به کمک چکش تراکم برقی مجهز به صفحه نشیمن لاستیکی با فرکانس بین ۵۰ تا ۶۰ هرتز متراکم شود.

پ-۱-۴- الگوی بارگذاری

در جدول (پ-۱-۲) الگوی بارگذاری پیشنهادی برای انجام آزمایش سه‌محوری‌سیکلی بر روی مصالح اساس، اساس/زیراساس برای دوره بهره‌برداری راه ارائه شده است. برای این آزمایش، فراسنج‌های انتخابی شامل مقدار تنش محدودکننده، تنش انحرافی استاتیکی، تنش تفاضلی سیکلی، فرکانس و تعداد سیکل‌های بارگذاری است.

پ-۱-۴-۱- تعداد سیکل بارگذاری اساس و زیراساس

به طور معمول برای رسیدن به نشست تقریبا ثابت در اساس اعمال حداقل هزار تا چند میلیون سیکل بارگذاری لازم است. در این راهنما حداقل تعداد سیکل ۷۵۰۰۰ برای شرایط معمول تا ۱۰۰۰۰۰ سیکل برای اساس و اساس/زیراساس باند و مسیرهای با ترافیک سنگین پیشنهاد می‌شود. در زمان انجام آزمایش محدودیت‌های مربوط به ثبت و فراخوان داده باید در انتخاب تعداد سیکل بارگذاری نمونه، مورد توجه قرار گیرد. در شرایط حاضر توصیه می‌شود برداشت داده‌ها برای ۵۰۰۰ تا حداکثر ۱۰۰۰۰ سیکل انجام و تحلیل‌ها برای پنجره‌های ۱۰۰ سیکلی صورت‌گرفته و در بازه مذکور متوسط مقادیر پارامترها محاسبه و گزارش شود.

omoorepeyman.ir

پ-۱-۴-۲- فرکانس بارگذاری

با توجه به محدودیت سرعت به ۸۰ تا ۱۳۰ کیلومتر بر ساعت موجود برای راه، فرکانس بارگذاری ۲، ۵ و ۱۰ هرتز به ترتیب برای اساس باند فرودگاه، اساس راه برای مسیرهای با ترافیک سنگین حمل مواد معدنی و سرباره و اساس راه معمولی توصیه می‌شود.

پ-۱-۴-۳- دامنه تنش های اعمالی

باتوجه به توزیع تنش‌ها در عمق، برای شبیه‌سازی رفتار اساس/زیراساس در آزمایش سه محوری سیکلی باید متوسطی از تنش‌های قائم در عمق بر نمونه اعمال شود. میزان تنش محدودکننده در محدوده ۳۰ تا ۶۰ کیلوپاسکال برای اساس و اساس/زیراساس باند و مسیرها با ترافیک سنگین توصیه می‌شود.

شایان توجه است بعد از اعمال تنش محدودکننده و قبل از اعمال تنش سیکلی قائم، برای اجتناب از ایجاد کشش در نمونه لازم است، تنش استاتیکی قائم اولیه‌ای معادل ۵۰ درصد تفاضل دامنه تنش سیکلی و تنش محصورکننده به نمونه اعمال شود. با توجه به ماهیت دانه‌ای مصالح اساس، به منظور ایجاد سهولت در انجام آزمایش و فراهم شدن امکان اندازه‌گیری کرنش جانبی، می‌توان تنش محصورکننده را با ایجاد خلاء نسبی (مکش) در نمونه ایجاد نمود.

پ-۱-۵ روش انجام آزمون

پ-۱-۵-۱- تعیین مدول برجهندگی

برای تعیین مدول برجهندگی در لایه‌های بستر، اساس و زیراساس راه‌ها، آزمایش بارگذاری سیکلی، مطابق استاندارد AASHTO T307 برای شرایط معمول اساس و زیراساس، یا اساس/زیراساس راه انجام می‌شود. برای تعیین مدول برجهندگی لازم است تنش محدودکننده، تنش‌تماسی، تنش انحرافی استاتیکی، تنش تفاضلی سیکلی، تعداد سیکل و همچنین فرکانس بارگذاری قبل بارگذاری سیکلی انتخاب شوند. در این راهنما الگوی بارگذاری برای تعیین مدول برجهندگی و رفتار عملکردی لایه اساس و زیراساس مطابق جدول (پ-۱-۲) برای شرایط معمولی طبق گامهای بارگذاری تا ۴۵ توصیه می‌شود. برای اساس و زیراساس باند و راه عبور تراکهای سنگین انجام آزمایش مطابق جدول (پ-۱-۱-۳) پیشنهاد می‌شود. تنش مسیرهای با ترافیک در این بارگذاری‌ها ۰٫۱ دامنه تنش انحرافی استاتیکی اولیه در نظر گرفته‌شود. لذا پیشنهاد می‌شود برای لایه اساس، این محاسبات پس از ۱۰۰ سیکل بارگذاری به صورت زیر انجام شود.

$$M_R = q_{cyclic}/\varepsilon_r \qquad (پ-۱-۱)$$

که در آن، M_R مدول برجهندگی، q_{cyclic} تنش تفاضلی سیکلی و ε_r کرنش الاستیک است.

omoorepeyman.ir

جدول(پ-۱-۲)الگوی بارگذاری نمونه‌های سه محوری سیکلی بزرگ مقیاس برای تعیین مدول برجهندگی و تعیین رفتار عملکردی خاک اصلاح شده و تراشه آسفالت بازیافتی اصلاح شده با سیمان به عنوان اساس یا زیراساس سرباره ای راه و باند

گام بارگذاری	تنش محدودکننده (kPa)	تنش استاتیک انحرافی ***(kPa)	$kc=\sigma_1/\sigma_3$	مجموع تنش محوری استاتیکی (kPa)	تنش انحرافی سیکلی (kPa)	حداکثر تنش سیکلی (kPa)	حداقل تنش سیکلی (kPa)	فرکانس (Hz)	تعداد سیکل
۰	۱۰۳/۴	۱۰۳/۴	۲	۲۰۶/۸	۹۳/۱	۲۵۳/۴	۱۶۰/۳	۲	۵۰۰-۱۰۰۰
۱	۲۰/۷	۲۰/۷	۲	۴۱/۴	۱۸/۶	۵۰/۷	۳۲/۱	۲	۵۰۰۰
۲								۵	۵۰۰۰
۳								۱۰	۵۰۰۰
۴		۴۱/۴	۳	۶۲/۱	۳۷/۳	۸۰/۸	۴۳/۵	۲	۵۰۰۰
۵								۵	۵۰۰۰
۶								۱۰	۵۰۰۰
۷		۶۲/۱	۴	۸۲/۸	۵۵/۹	۱۱۰/۸	۵۴/۹	۲	۵۰۰۰
۸								۵	۵۰۰۰
۹								۱۰	۵۰۰۰
۱۰	۳۴/۵	۳۴/۵	۲	۶۹	۳۱	۸۴/۵	۵۳/۵	۲	۵۰۰۰
۱۱								۵	۵۰۰۰
۱۲								۱۰	۵۰۰۰
۱۳		۶۸/۹	۳	۱۰۳/۴	۶۲	۱۳۴/۴	۷۲/۴	۲	۵۰۰۰
۱۴								۵	۵۰۰۰
۱۵								۱۰	۵۰۰۰
۱۶		۱۰۳/۴	۴	۱۳۷/۹	۹۳/۱	۱۸۴/۵	۹۱/۴	۲	۵۰۰۰
۱۷								۵	۵۰۰۰
۱۸								۱۰	۵۰۰۰
۱۹	۶۸/۹	۶۸/۹	۲	۱۳۷/۸	۶۲	۱۶۸/۸	۱۰۶/۸	۲	۵۰۰۰
۲۰								۵	۵۰۰۰
۲۱								۱۰	۵۰۰۰
۲۲		۱۳۷/۹	۳	۲۰۶/۸	۱۲۴/۱	۲۶۸/۹	۱۴۴/۸	۲	۵۰۰۰
۲۳								۵	۵۰۰۰
۲۴								۱۰	۵۰۰۰
۲۵		۲۰۶/۸	۴	۲۷۵/۷	۱۸۶/۱	۳۶۸/۸	۱۸۲/۷	۲	۵۰۰۰
۲۶								۵	۵۰۰۰
۲۷								۱۰	۵۰۰۰
۲۸	۱۰۳/۴	۶۸/۹	۱/۶۷	۱۷۲/۳	۶۲	۲۰۳/۳	۱۴۱/۳	۲	۵۰۰۰
۲۹								۵	۵۰۰۰
۳۰								۱۰	۵۰۰۰
۳۱		۱۰۳/۴	۲	۲۰۶/۸	۹۳/۱	۲۵۳/۴	۱۶۰/۳	۲	۵۰۰۰
۳۲								۵	۵۰۰۰
۳۳								۱۰	۵۰۰۰
۳۴		۲۰۶/۸	۳	۳۱۰/۲	۱۸۶/۱	۴۰۳/۳	۲۱۷/۲	۲	۵۰۰۰
۳۵								۵	۵۰۰۰
۳۶								۱۰	۵۰۰۰
۳۷	۱۳۷/۹	۱۰۳/۴	۱/۷۵	۲۴۱/۳	۹۳/۱	۲۸۷/۹	۱۹۴/۸	۲	۵۰۰۰
۳۸								۵	۵۰۰۰
۳۹								۱۰	۵۰۰۰
۴۰		۱۳۷/۹	۲	۲۷۵/۸	۱۲۴/۱	۳۳۷/۹	۲۱۳/۸	۲	۵۰۰۰
۴۱								۵	۵۰۰۰

omoorepeyman.ir

۴۲								۱۰	۵۰۰۰
۴۳		۲۷۵/۸	۳	۴۱۳/۷	۲۴۸/۲	۵۳۷/۸	۲۸۹/۶	۲	۵۰۰۰
۴۴								۵	۵۰۰۰
۴۵								۱۰	۵۰۰۰
۴۶*	۲۰/۷	۱۲۴/۲	۹/۷	۱۴۴/۹	۱۱۱/۸	۲۰۰/۸	۸۹	۲	۵۰۰۰
۴۷*								۵	۵۰۰۰
۴۸*								۱۰	۵۰۰۰
۴۹*	۳۴/۵	۲۰۶/۸	۹/۷	۲۴۱/۳	۱۸۶/۱۲	۳۳۴/۴	۱۴۸/۲	۲	۵۰۰۰
۵۰*								۵	۵۰۰۰
۵۱*								۱۰	۵۰۰۰
۵۲*	۶۸/۹	۴۱۳/۶	۹/۷	۴۸۲/۵	۳۷۲/۲	۶۶۸/۶	۲۹۶/۴	۲	۵۰۰۰
۵۳*								۵	۵۰۰۰
۵۴*								۱۰	۵۰۰۰
۵۵*	۱۰۳/۴	۶۲۰/۴	۹/۷	۷۲۳/۸	۵۵۸/۴	۱۰۰۳	۴۴۴/۶	۲	۵۰۰۰
۵۶*								۵	۵۰۰۰
۵۷*	۱۳۷/۹	۸۲۷/۴	۹/۷	۹۶۵/۳	۷۴۴/۷	۱۳۳۷/۶	۵۹۳	۲	۵۰۰۰
۵۸*								۵	۵۰۰۰
۵۹**	۳۴/۵	۱۰۳۴	۴۴/۵	۱۰۶۸/۵	۹۳۰/۶	۱۵۳۳/۸	۶۰۳/۲	۲	۵۰۰۰
۶۰**								۵	۵۰۰۰
۶۱**	۶۸/۹	۱۶۵۴/۴	۳۵/۸	۱۷۲۳/۳	۱۴۸۹	۲۴۶۷/۸	۹۷۸/۸	۲	۵۰۰۰
۶۲**	۶۸/۹	۱۶۵۴	۳۸/۶	۱۷۲۳	۱۸۷۹	۲۶۶۲/۵	۷۸۳/۵	۲	۲۰۰۰
۶۳**	۳۴/۵	۱۶۸۹	۷۷/۲	۱۷۲۳	۱۸۷۹	۲۶۶۳	۷۸۳/۵	۲	۳۰۰۰۰

*ردیفهای ۴۶ تا ۵۸ برای خاک اساس اصلاح شده با سیمان(CTB[1]) و زیراساس اصلاح شده (شفته آهک یا با درصد مناسب سیمان و آهک) باند

**ردیف ۵۹ تا ۶۳ برای RAP تثبیت شده با سیمان برای باند فرودگاه

***توصیه می شود برای تنش محدود کننده همسان و همچنین هر غیر همسانی، اندازه گیری مدول و میرایی طبق ASTM D3999 صورت گیرد

در صورت اصلاح خاک با سیمان، آهک و آهک/سیمان، با و بدون مواد افزودنی (پلیمری- معدنی و نانو و نظایر آن)، ترانشه آسفالت بازیافتی تثبیت شده با سیمان (RAP[2]) به عنوان اساس و زیراساس باند فرودگاه باید شرایط واقعی آب و هوایی وارد بر نمونه را در موقع ساخت شبیه سازی کرد. در آن صورت انجام آزمایش طبق گامهای بارگذاری ترتیب برای ردیفهای ۴۶ تا ۵۸ و ۵۹ تا ۶۳ توصیه می شود.

برای نمونه های ۱۰۰٪ تراشه های آسفالت بازیافتی، تعیین آزمایش مدول برجهندگی در زمان عمل آوری ۲۸ روز توصیه می شود، اما برای نمونه اصلاح شده با سیمان و آهک در صورتیکه مقاومت ۷ و ۲۸ روزه تفاوتی زیادی نداشته باشند، انجام آزمایش بعد از ۱۲ روز عمل آوری طبق توضیحات بالا مانعی ندارد. برای نمونه اصلاح شده با سیمان، آهک و نظایر آن شرایط عمل آوری خشک یا آب و هوای گرم به طریق زیر عمل شود: ابتدا بعد از ۳ روز گیرش اولیه (ماندن نمونه ساخته شده در قالب شکاف دار)، نمونه به مدت ۴ روز در رطوبت ۱۰۰٪ و دمای ۲۱ درجه قرار می گیرد. سپس ۵ ساعت در آب با دمای محیط غرقاب می‌شود. در ادامه به مدت ۵۶ ساعت در دمای ۷۱ درجه (حداکثر دما در کویر

[1] Cement Treated Base

[2]. Recycled Asphalt Pavement

omoorepeyman.ir

شهداد ۷۶ درجه است) در گرمخانه قرار داده شده و بعد از ۲۴ ساعت قرار دادن در اتاق رطوبت، طبق جدول (پ-۱ -۲) تحت آزمایش قرار می گیرد.

همچنین برای شبیه سازی شرایط مرطوب و یخزدگی، نمونه بعد از ۳ روز گیرش اولیه(و ماندن آن در قالب شکاف دار)، به مدت ۲ روز در رطوبت ۱۰۰٪ و دمای ۲۱ درجه قرار می گیرد. سپس ۲۴ ساعت در آب با دمای محیط غرقاب می شود. سپس ۲۴ ساعت در دمای ۲۱- عمل آوری شده و پس ۵ ساعت در آب با دمای محیط غرقاب می شود. در ادامه به مدت ۵۶ ساعت در دمای ۲۱- درجه در سردکننده قرار داده و بعد از ۲۴ ساعت قرار دادن در اتاق رطوبت تحت آزمایش دینامیکی قرار می‌گیرد.

لازم به ذکر است باید ارزیابی کفایت مقدار هر تثبیت کننده با توجه به حداقلهای مقاومت مورد نیاز و ارزیابی دوام خشک/ترشدن و یخ زدن/ذوب مطابق استانداردهای ASTM D559 و ASTM D560 جهت تعیین نمونه با بهترین عملکرد صورت گیرد.

با توجه به روند تغییرات در مدول برجهندگی و نشست می توان در مورد ضخامت مناسب لایه اساس و زیراساس تثبیت شده و انتخاب مدول برجهندگی مناسب تصمیم گیری کرد. لازم به ذکر است که برای بررسی رفتار تغییرشکل بلند مدت مصالح می‌توان تعداد سیکل های بارگذاری را برای سطوح تنش نشان داده شده در جداول (پ-۱-۲) و (پ-۱-۳) حداقل ۵۰۰۰ سیکل و برای سطوح تنش نزدیک به متوسط تنش‌های بهره‌برداری (ردیف های ۶ و ۱۶) تا ۱۰ هزار سیکل ادامه داد.

کمینه مدول برجهندگی اساس و زیراساس سرباره خشک ۴۰۰۰ kg/cm^2 و در شرایط غرقاب ۳۰۰۰kg/cm^2 پیشنهاد می‌شود. کمینه انجام یک سری آزمایش در سال و یا به ازای هربار تغییر معدن یا تغییر دیگر شرایط برای هرمصالح طبق جداول (پ-۱-۲) و(پ-۱-۳) الزامی است.

جدول (پ-۱-۳) الگوی بارگذاری پیشنهادی برای تعیین مدول برجهندگی اساس و اساس/زیراساس سرباره‌ای باند و مسیرهای با ترافیک سنگین(کامیونهای حمل مصالح معدنی)

ردیف	تنش محصور کننده σ_3 (kPa)	تنش انحرافی استاتیکی σ_{3s} σ_{1s}-(kPa)	تنش انحرافی سیکلی q_{cyclic} (kPa)	فرکانس بارگذاری (Hz)
۱	۳۰	۱۰۰	۱۰۰	۵
۲	۳۰	۱۰۰	۱۰۰	۲
۳	۳۰	۱۰۰	۱۳۰	۵
۴	۳۰	۱۰۰	۱۳۰	۲
۵	۳۰	۱۰۰	۱۶۰	۲
۶	۳۰	۱۰۰	۲۰۰	۲
۷	۳۰	۱۳۰	۱۶۰	۲
۸	۳۰	۱۳۰	۲۱۰	۲
۹	۳۰	۱۳۰	۲۶۰	۲
۱۰	۳۰	۱۵۰	۲۴۰	۲

omoorepeyman.ir

۱۱	۶۰	۱۰۰	۱۰۰	۵
۱۲	۶۰	۱۰۰	۱۰۰	۲
۱۳	۶۰	۱۰۰	۱۳۰	۵
۱۴	۶۰	۱۰۰	۱۳۰	۲
۱۵	۶۰	۱۰۰	۱۶۰	۲
۱۶	۶۰	۱۰۰	۲۰۰	۲
۱۷	۶۰	۱۳۰	۱۶۰	۲
۱۸	۶۰	۱۳۰	۲۱۰	۲
۱۹	۶۰	۱۳۰	۲۶۰	۲
۲۰	۶۰	۱۵۰	۲۶۰	۲

پ-۱-۵-۲- تعیین مدول برشی و میرایی

به منظور شناخت رفتار دینامیکی مصالح اساس، و زیراساس و اساس/زیراساس علاوه بر تعیین مدول برجهندگی، لازم است پارامترهایی مانند مدول برشی و نسبت میرایی بررسی و تعیین شوند. این آزمایش‌ها طبق استاندارد ASTM D3999 با استفاده از دستگاه سه محوری بزرگ مقیاس دینامیکی انجام می‌شود. پیشنهاد می‌شود با انتخاب ردیف‌های ۶ و ۱۶ جدول (پ-۱-۳) برای اساس، اساس/زیراساس به عنوان الگوی بارگذاری، حداکثر تنش تفاضلی سیکلی در ۱۰ گام افزایشی به صورت پلکانی و هر گام ۱۰۰ سیکل بر نمونه اعمال شود.

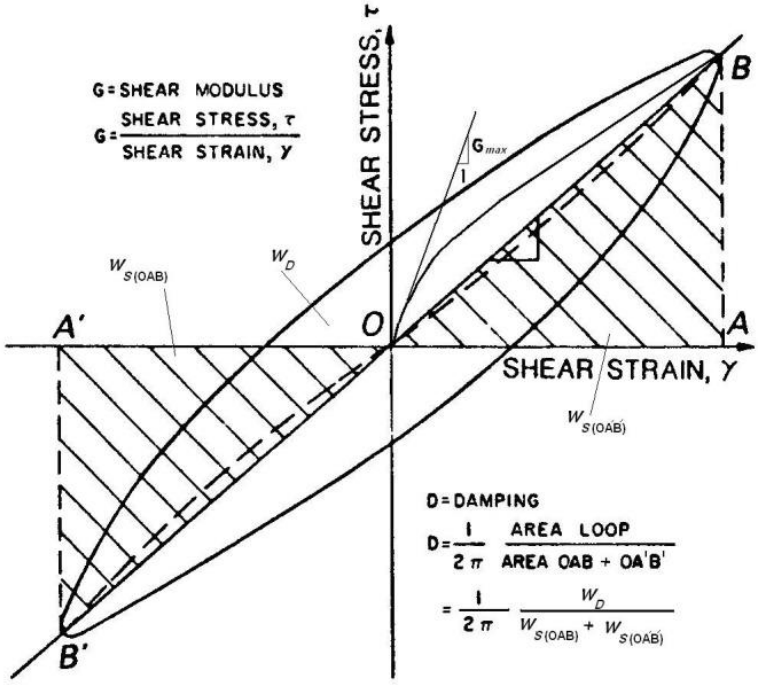
در آزمایش سه محوری دینامیکی، مقدار مدول برشی بر اساس مدول یانگ و کرنش محوری در هر گام بارگذاری تعیین می‌شود. طی آزمون، نمونه استوانه‌ای تحت اثر مجموعه‌ای از بارهای تکراری فشاری و کششی قرار گرفته و هم زمان میزان تغییرشکل قائم اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. براساس این اندازه‌گیری‌ها، متوسط مقدار مدول یانگ E و کرنش محوری حداکثر ε_a در هر ۱۰۰ سیکل بارگذاری تعیین می‌شود. پیشنهاد می‌شود که سیکل بارگذاری ۲۰ ام مبنای محاسبات مدول برشی و نسبت میرایی قرار گیرد. روش محاسبه مدول برشی و نسبت میرایی مطابق روش ارائه شده در استاندارد ASTM D3999 به شرح زیر است:

$$D = \frac{1}{2\pi}\frac{W_D}{W_{S(OAB)} + W_{S(OA'B')}} \qquad (پ-۱-۲)$$

که در آن D نسبت میرایی، W_D مساحت محصور در هر حلقه، $W_{S(OAB)}$ انرژی الاستیک در ناحیه فشاری و $W_{S(OA'B')}$ انرژی الاستیک در ناحیه کششی است. طبق تعریف، مدول برشی G برابر با مدول سکانتی معادل متناظر با شیب خط کشیده شده از نقطه انتهایی حلقه هیسترزیس می‌باشد.

با فرض تنش برشی اولیه صفر، هر سیکل کامل بارگذاری و باربرداری را می‌توان توسط حلقه بسته تنش-کرنش هیسترزیس نمایش داد (شکل پ-۱-۲). با اندازه‌گیری مساحت محصور در هر حلقه (انرژی مستهلک شده در هر سیکل) و مساحت هاشورخورده زیر خط (انرژی پتانسیل انباشته در طول سیکل)، نسبت میرایی معادل D با استفاده از رابطه (پ-۱-۲) قابل محاسبه است.

omoorepeyman.ir



شکل (پ-۱-۲) رابطه تنش-کرنش هیسترزیس

با استفاده از روابط (پ-۱-۳) و (پ-۱-۴) مقدار مدول برشی G و کرنش برشی γ قابل محاسبه است. در این روابط ν نسبت پواسون می‌باشد. برای اساس و زیراساس نسبت پواسون متناظر با حالات خشک و اشباع (زهکشی نشده) به ترتیب برابر با ۰٫۳۰ و ۰٫۵ پیشنهاد می‌شود.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \qquad (پ-۱-۳)$$

$$\gamma = \varepsilon_a/(1+\nu) \qquad (پ-۱-۴)$$

پ-۱-۵-۳- تعیین مقاومت پساسیکلی

برای تعیین حدودی از مقاومت گسیختگی، زاویه اصطکاک مصالح اساس، زیراساس و اساس/زیراساس انجام آزمایش‌های سه‌محوری طبق ASTM D7181 برای نمونه‌های خشک و ASTM D4767 برای نمونه‌های غرقاب پیشنهاد می‌شود. تنش محصورکننده موثر ۳۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده و سرعت بارگذاری در آزمایش‌های یکنوا و یکنوای پساسیکلی (آقایی آرایی و همکاران ۱۴۰۰) برابر ۰٫۵ میلیمتر بر دقیقه انتخاب شود. توصیه می‌شود برای تعیین مقاومت استاتیکی دقیق نمونه، (منحنی تنش-کرنش استاتیکی) آزمایش پسا سیکلی روی نمونه‌هایی انجام شود که در بارگذاری سیکلی، کرنش بیش از یک درصد را تجربه نکرده باشند. در عین حال لازم است که آزمایش یکنوا تا رسیدن به حالت گسیختگی یا کرنش حداقل ۱۰ درصد ادامه یابد.

omoorepeyman.ir

در جدول (پ-۱-۴) نمونه آزمایشهای مونوتونیک پساسیکلی و شکست دانه روی مصالح سرباره اساس ارائه شده که قابل مقایسه با نتایج آزمایش برش مستقیم است. تغییرات شدید تنش تفاضلی حداکثر مصالح اساس از سرباه های مختلف لزوم انجام آزمایشهای عملکردی برای مصالح سرباره ای را گوشزد می کند.

جدول(پ-۱-۴) نمونه نتایج آزمایشهای مونوتونیک پساسیکلی و شکست دانه نمونه تک لایه اساس سرباره ای

مصالح	دانسیته خشک (گرم بر سانتیمتر مکعب)	تنش محدودکننده موثر (kg/cm^2)	کرنش محوری اولیه (درصد)	تنش تفاضلی حداکثر (kg/cm^2)	زاویه اصطکاک داخلی (°)	متوسط نسبت پواسن	شاخص شکست دانه مارشال (Bg) (%)	درصد گذشته از الک #۲۰۰
EAF شرکت فولاد خراسان-دانه بندی نوع ۲	۲/۳۸	۰/۳	۹/۳۹	۱/۸۵	۴۶/۱۳	۰/۳۱	۶/۸۲	۱/۰۲
BOF شرکت ذوب آهن اصفهان	۱/۸۲	۰/۱	۰/۷۴	۲/۲۶	۵۲/۲۳	۰/۳	۲۰/۳	۱/۷
EAF شرکت فولاد مبارکه	۲/۳۳	۰/۶	۱۰/۸۶	۴/۹۳	۵۳/۵۴	۰/۲۹۵	۸/۸	۰/۴۲
		۰/۳	۳/۲۱	۵/۵۴	۶۴/۴۷	۰/۳۱۹		
EAF شرکت فولاد مبارکه	۲/۳۳	۰/۶	۱/۴	۷/۵۸	۶۷/۹۲	۰/۳۱۲	۶/۱۶	۲/۶۷
		۰/۳	۲/۸۲	۵/۵۸	۶۴/۵۵			

پ-۱-۶- گزارش آزمون

علاوه بر پارامترهای اشاره شده در بخش پ-۱-۵ لازم است در گزارش آزمون مواردی شامل فرم تغییر شکل یافته نمونه، شکل گسیختگی احتمالی، تغییرشکل‌های ماندگار قائم برحسب تعداد سیکل‌های بارگذاری و حتی درصد خردشدگی مصالح نیز گنجانده شود. خلاصه نتایج در پیوست ۳ ارائه شده است.

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

پیوست ۲

انتخاب تنشهای محدودکننده، تنش سیکلی و فرکانس بارگذاری برای آزمایشهای سه محوری سیکلی آسفالت و اساس اصلاح شده طبق CEN EN 12697-25 2005

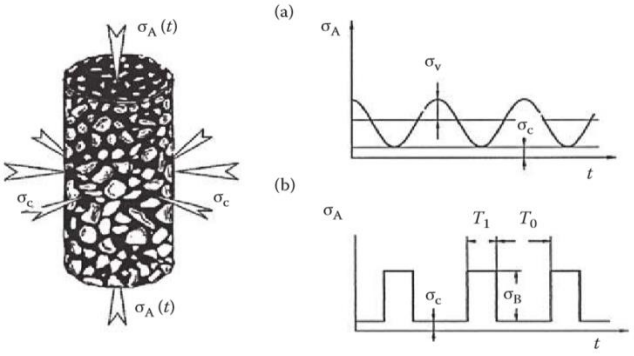
omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

آزمایش فشاری سه محوری تحت تنش محدود کننده σ_c و تنش محوری سیکلی $\sigma_A(t)$ با دامنه σ_V و سینوسی[1] با فرکانس از ۱ تا ۵ هرتز به طور معمول ۳ هرتز (CEN EN 13108-20, 2008) می‌باشد. همچنین به عنوان جایگزین می توان از بارگذاری بلاک پالس[2] با مقادیر σ_B، σ_C بهره گرفت (شکل پ-۲-۱).

اعمال تنش محدودکننده می‌تواند به شکل دینامیکی یا استاتیکی باشد که به طور معمول استاتیکی می‌باشد. در هر دو حالت بارگذاری سینوسی یا پالسی، نخست نمونه تحت پیش بارگذاری تنش محوری قرار می‌گیرد که مقدار تنش محوری به ترتیب از $0.02(2\sigma_V + \sigma_C)$ و $0.02(\sigma_B + \sigma_C)$ بیشتر نباشد.

تنش محدودکننده در دامنه ۵۰-۲۰۰ kPa می‌باشد. قطر و ارتفاع نمونه استوانه‌ای حداقل برابر ۵۰ mm اگر حداکثر اندازه اسمی مصالح کمتر از ۱۶ mm باشد. همچنین قطر و ارتفاع نمونه حداقل برابر ۷۵ mm اگر حداکثر اندازه اسمی مصالح بیش ۱۶ mm باشد. نسبت ارتفاع به قطر توصیه شده برای نمونه استوانه‌ی به ترتیب ۰/۶ و ۰/۸ می‌باشد و حداقل ۲ نمونه برای هر نوع مخلوط پیشنهاد می‌شود (CEN EN 12697-25, 2005) .



شکل (پ-۲-۱) شکل شماتیک بارگذاری سینوسی و پالسی(CEN EN 12697-25, 2005)

دمای محیط آزمایش°C ۵۰-۳۰ می‌باشد که به طور معمول ۵۰ درجه برای آسفالت سطحی و ۴۰ درجه برای آسفالت آستر (بیندر) و اساس پیشنهاد می‌شود. دامنه فشار σ_V از ۱۰۰-۳۰۰ kPa برای بارگذاری سینوسی می‌باشد. توصیه شده که دامنه فشار σ_V حدوداً ۲ تا ۳ مرتبه بزرگتر از فشار محدود باشد (CEN EN 12697-25, 2005).

برای بارگذاری پالسی دامنه فشار σ_B از ۱۰۰-۷۰۰ kPa می‌باشد. به طور معمول ۳۰۰ kPa برای آسفالت سطحی و ۲۰۰ kPa برای آسفالت آستر (بیندر) و اساس پیشنهاد می‌شود(CEN EN 12697-25, 2005). برای آسفالت سطحی و اساس اصلاح شده باند فرودگاه با توجه به فشار چرخ و وزن هواپیمای جدید مقدار دامنه فشار σ_B نیازمند تدقیق است. الگوی بارگذاری طبق پله های بارگذاری به ترتیب ۴۶ تا ۶۳ جدول(پ-۱ -۲) توصیه می شود.

[1] haversinusoidal
[2] block-pulse

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

پیوست ۳

نمونه مقادیر مدول برشی، نسبت میرایی و مدول برجهندگی،نشست لایه اساس و زیر اساس سرباره ای

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

خلاصه نتایج آزمایشهای انجام شده روی سرباره های کشور به عنوان اساس و زیراساس در جداول (پ-۳-۱) تا (پ-۳-۴) ارائه شده است. به دلیل مشابهت دانه بندی زیربالاست خطوط راه آهن به اساس و زیراساس راه و باند نتایج آزمایشهای آنها ارائه شده است.

جدول (پ-۳-۱) خلاصه نتایج آزمایش سه محوری بزرگ مقیاس شامل مدول برجهندگی، میرایی، نشست بر روی نمونه اساس یا زیراساس سرباره EAF شرکت فولاد مبارکه با γ=۲/۳۳ g/cm^3 مطابق استاندارد اصلاح شده AASHTO T307 برای بارگذاری اساس باند در σ'_3=۱/۴kg/cm^2 - σ'_3=۰/۲۱kg/cm^2 در گامهای تا ۵۰۰۰ سیکل

تعداد سیکل	σ'_3 (kg/cm^2)	kc	cyclic stress (kg/cm^2)	Frequency (Hz)	Resilient modulus(kg/cm^2)	G (kg/cm^2)	D (%)	γ(%)	Net Axial Displacement (mm)
1-5000	0.207	2	0.18	2	2772	1066	8.81	0.0050	0.014
5000-10000				5	3012	1158	19.46	0.0040	0.002
10000-15000		3	0.38	5	3331	1281	20.32	0.0073	0.023
15000-20000				2	3081	1185	9.09	0.0076	0.029
20000-25000		4	0.57	10	3933	1513	37.23	0.0093	0.020
25000-30000				5	3733	1436	20.56	0.0097	0.001
30000-35000				2	3717	1430	8.75	0.0096	0.012
35000-40000		3	0.38	10	3504	1348	36.24	0.0069	0.007
40000-45000		2	0.18	10	3178	1222	34.66	0.0041	0.008
1-5000	0.345	2	0.31	10	4056	1560	35.74	0.0050	0.004
5000-10000				5	4001	1539	19.97	0.0051	0.008
10000-15000				2	3819	1469	8.89	0.0057	0.059
15000-20000		3	0.63	10	5178	1992	36.44	0.0079	0.013
20000-25000				5	5099	1961	20.28	0.0077	0.001
25000-30000				2	5058	1946	8.42	0.0078	0.015
30000-35000		4	0.95	10	5767	2218	38.08	0.0097	0.023
35000-40000				5	5454	2098	20.57	0.0109	0.018
40000-45000				2	5322	2047	8.76	0.0113	0.036
1-5000	0.689	2	0.63	10	6756	2598	36.55	0.0058	0.002
5000-10000				5	6512	2505	19.99	0.0062	0
10000-15000				2	6516	2506	8.19	0.0061	0.042
15000-20000		3	1.26	10	7510	2888	37.64	0.0102	0.047
20000-25000				5	7217	2776	20.47	0.0110	0.048
25000-30000				2	7136	2745	8.43	0.0111	0.029
30000-35000		4	2.1	10	8903	3424	37.24	0.0098	0.114
35000-40000				5	8008	3080	20.96	0.0152	0.586
40000-45000				2	7947	3057	8.85	0.0150	0.182
1-5000	1.034	1.67	0.63	10	7574	2913	36.87	0.0052	0.007
5000-10000				5	7583	2916	20.14	0.0053	0.012
10000-15000				2	7203	2770	8.31	0.0056	0.013
15000-20000		2	0.95	10	8079	3107	37.24	0.0073	0.014
20000-25000				5	7786	2995	20.55	0.0076	0.012
25000-30000				2	7577	2914	8.45	0.0082	0.023
30000-35000		3	2.1	10	9720	3738	38.26	0.0084	0.017
35000-40000				5	8781	3377	20.83	0.0139	0.081
40000-45000				2	8873	3413	8.70	0.0137	0.065
1-5000	1.379	1.75	0.95	10	9415	3621	36.62	0.0064	0.008
5000-10000				5	9157	3522	20.17	0.0065	0.003
10000-15000				2	9180	3531	7.92	0.0064	0.050
15000-20000		2	1.26	10	9725	3740	37.96	0.0080	0.005

omoorepeyman.ir

20000-25000				5	9497	3653	20.25	0.0086	0.011
25000-30000				2	9382	3608	8.01	0.0084	0.037
30000-35000				10	12467	4795	37.61	0.0072	0.035
35000-40000		3	2.53	5	10953	4213	20.61	0.0147	0.204
40000-45000				2	10651	4096	8.70	0.0152	0.062

جدول (پ-۰-۲) خلاصه نتایج مدول برشی، نسبت میرایی و کرنش برشی نمونه‌های سه محوری قطر ۳۰ سانتیمتر اساس EAF شرکت فولاد مبارکه تک لایه با γ=۲/۳۳ g/cm^3 طبق استاندارد ASTM D3999 (اعمال ۱۰۰ سیکل در هر گام بارگذاری)

σ'_3 (kg/cm^2)	kc (σ'_1/σ'_3)	Loading frequency (Hz)	G_{max} - G_{min} (kg/cm^2)	D_{min} - D_{max} (%)	γ (G_{min} or D_{max}) (%)
0.207	1	10	1650.26 – 660.31	8.57 – 38.08	0.0103
		5	1182.56 – 597.79	8.81 – 21.98	0.0133
		2	1080.58 – 556.38	6.84 – 11.97	0.0323
	2	10	1855.82 - 1049	8.73 – 36.37	0.0067
		5	1467.75 – 886.85	9.81 – 22.01	0.0128
		2	1246.98 – 867.84	7.23 – 10.37	0.0154
	3	10	1959.56 – 1317.29	23.10 – 36.09	0.0070
		5	1794.75 – 1243.14	10.01 – 20.93	0.0083
		2	1490.86 – 1059.68	6.86 – 10.29	0.0108
	4	10	2390.51 – 1498.28	12.40 – 37.49	0.0094
		5	2025.03 – 1427.29	10.55 – 20.47	0.0104
		2	1817 – 1436.60	6.66 – 8.75	0.0098
0.345	1	10	2013.06 – 1242.60	20.93 – 36.22	0.0064
		5	1695.01 – 1007.45	10.26 – 21.59	0.0127
		2	1343.56 – 730.63	6.93 – 11.72	0.0309
	2	10	2220.21 – 1530.73	23.62 – 35.95	0.0054
		5	1928.95 – 1450.98	10.87 – 20.47	0.0072
		2	1732.91 – 1080.23	6.40 – 10.96	0.0157
	3	10	2975.65 – 1921.48	14.82 – 37.40	0.0096
		5	2565.37 – 1962.70	11.42 – 20.28	0.0078
		2	2241.52 – 1936.63	6.84 – 8.45	0.0088
	4	10	3217.40 – 2221.96	14.10 – 38.47	0.0096
		5	2667.56 – 2109.73	11.68 – 20.55	0.0117
		2	2530.32 – 2037.31	6.78 – 8.78	0.0115
0.689	1	10	2900.4 – 2061.55	12.86 – 36.73	0.0059
		5	2480.87 – 1727.52	11.52 – 21.27	0.0115
		2	2112.30 – 1310.35	6.40 – 11.22	0.0278
	2	10	3165.91 – 2589.63	14.02 – 36.62	0.0060
		5	2899.03 – 2517.94	11.95 – 19.76	0.0062
		2	2768.68 – 2089.83	6.09 – 9.53	0.0147
	3	10	3808.01 – 2902.77	16.83 – 37.87	0.0103
		5	3346.91 – 2790.15	12.54 – 20.32	0.0111
		2	3245.31 – 2739.60	6.40 – 8.36	0.0112
	4	10	4494.45 – 3427.19	14.30 – 37.48	0.0102
		5	3899.53 – 3106.98	13.35 - 21	0.0153
		2	3766.05 – 3167.79	6.08 – 8.75	0.0146
1.034	1	10	3253.14 – 2388.46	14.97 – 39.08	0.0058
		5	2696.14 – 1857.85	11.90 – 21.81	0.0125
		2	2370.30 – 1561.67	7.04 – 11.23	0.0279
	1.67	10	3459.52 – 2826.83	14.77 – 36.80	0.0060
		5	3261.28 – 2726.44	9.37 – 20.54	0.0071
		2	3182.45 – 2555.9	5.16 – 9.54	0.0117
	2	10	3772.51 – 3116.45	15.98 – 37.28	0.0077
		5	3297.73 – 3019.77	7.13 – 20.21	0.0079

omoorepeyman.ir

		2	3225.54 – 2852.80	5.07 – 8.61	0.0106
	3	10	4725.36 – 3818.67	12.91 – 38.47	0.0085
		5	4140.19 – 3225.19	6.53 – 21.33	0.0174
		2	3838.28 – 3401.01	3.94 – 8.73	0.0139
1.379	1	10	3570.06 – 3039.31	15.42 – 37.04	0.0057
		5	3266.66 – 2568.29	11.37 – 21.26	0.0106
		2	3103.56 – 2140.03	5.38 – 10.54	0.0246
	1.75	10	4393.34 – 3575.66	13.47 – 36.69	0.0068
		5	4087.31 – 3362.56	11.16 – 20.52	0.0099
		2	3866.67 – 2903.18	4.20 – 9.73	0.0210
	2	10	4491.05 – 3661.48	12.36 – 38.30	0.0080
		5	4096.06 – 3678.68	8.14 – 20.25	0.0086
		2	3809.99 – 3628.03	5.15 – 7.88	0.0084
	3	10	5727.20 – 4651.01	15.63 – 38.03	0.0076
		5	5259.77 – 4177.48	13.11 – 20.94	0.0149
		2	4874.32 – 3911.22	4.48 – 9.36	0.0185

جدول (۰-۳) خلاصه نتایج مدول برشی، نسبت میرایی و کرنش برشی نمونه‌های سه محوری قطر ۳۰cm اساس و زیراساس تک لایه سرباره

مصالح	γ (g/cm^3)	σ'_3 (kg/cm^2)	kc (σ'_1/σ'_3)	Loading frequency (Hz)	G_{max} - G_{min} (kg/cm^2)	D_{min} - D_{max} (%)	γ (G_{min} or D_{max}) (%)
EAF شرکت فولاد مبارکه	**2.33**	**0.3**	1	10	1805.21 – 1221.57	8.21 – 37.58	0.0081
				5	1410.01 – 977.32	6.02 – 22.42	0.0187
				2	1230.98 – 705.39	4.65 – 13.61	0.0454
			4.33	10	3034.04 – 2171.37	10.04 – 37.87	0.0075
				5	2633.34 – 1741.19	6.81 – 21.78	0.0187
				2	2394.23 – 1308.78	3.92 – 11.61	0.0376
			5.33	10	2798.28 – 2313.29	11.21 – 38.03	0.0076
				5	2642.17 – 1871.74	10.01 – 21.83	0.0204
				2	2395.77 – 1354.18	5.28 – 13.01	0.0519
			6	10	3202.3 – 1745.51	6.44 – 36.91	0.0075
				5	2678.15 – 1770.11	6.40 – 18.78	0.0033
				2	2421.39 – 1447.35	6.13 – 11.48	0.0401
		0.6	1	10	2497.10 – 1607.34	6.39 – 37.77	0.0078
				5	2261.05 – 1223.24	7.64 – 22.64	0.0239
				2	1826.15 – 897.68	6.04 – 13.35	0.0582
			2.67	10	3041.59 – 2353.46	6.87 – 38.56	0.0074
				5	2826.26 – 1572.11	7.27 – 22.97	0.0200
				2	2426.51 – 1035.74	7.57 – 12.03	0.0453
			3.17	10	3022.64 – 2182.70	28.52 – 39	0.0080
				5	2752.96 – 1497.85	6.61 – 22.43	0.0226
				2	2501.43 – 1379.33	5.92 – 11.42	0.0468
			3.5	10	2858.73 – 2069.26	18.52 – 37.79	0.0082
				5	2503.55 – 1614.88	8.97 – 23.27	0.0267
				2	2086.72 – 1441.55	3.59 – 11.22	0.0421
EAF شرکت فولاد خراسان	2.38	0.3	1	2	1377-683	9-13	0.057
				4	1486-780	13-21	0.029
				10	1835-996	18-38	0.01
			4.33	2	2622-1268	8-13	0.038
				4	2922-2107	12-19	0.016
				10	3268-2420	20-37	0.0089
			5.33	2	2682-1516	7-13	0.03

omoorepeyman.ir

مصالح	γ (g/cm^3)	σ′$_3$ (kg/cm^2)	kc (σ′$_1$/σ′$_3$)	Loading frequency (Hz)	G_{max} - G_{min} (kg/cm^2)	D_{min} - D_{max} (%)	γ (G_{min} or D_{max}) (%)
EAF شرکت فولاد مبارکه	2.33	0.3	1	10	1805.21 – 1221.57	8.21 – 37.58	0.0081
				5	1410.01 – 977.32	6.02 – 22.42	0.0187
				2	1230.98 – 705.39	4.65 – 13.61	0.0454
			4.33	10	3034.04 – 2171.37	10.04 – 37.87	0.0075
				5	2633.34 – 1741.19	6.81 – 21.78	0.0187
				2	2394.23 – 1308.78	3.92 – 11.61	0.0376
			5.33	10	2798.28 – 2313.29	11.21 – 38.03	0.0076
				5	2642.17 – 1871.74	10.01 – 21.83	0.0204
				2	2395.77 – 1354.18	5.28 – 13.01	0.0519
			6	10	3202.3 – 1745.51	6.44 – 36.91	0.0075
				5	2678.15 – 1770.11	6.40 – 18.78	0.0033
				2	2421.39 – 1447.35	6.13 – 11.48	0.0401
		0.6	1	10	2497.10 – 1607.34	6.39 – 37.77	0.0078
				5	2261.05 – 1223.24	7.64 – 22.64	0.0239
				2	1826.15 – 897.68	6.04 – 13.35	0.0582
			2.67	10	3041.59 – 2353.46	6.87 – 38.56	0.0074
				5	2826.26 – 1572.11	7.27 – 22.97	0.0200
				2	2426.51 – 1035.74	7.57 – 12.03	0.0453
			3.17	10	3022.64 – 2182.70	28.52 – 39	0.0080
				5	2752.96 – 1497.85	6.61 – 22.43	0.0226
				2	2501.43 – 1379.33	5.92 – 11.42	0.0468
			3.5	10	2858.73 – 2069.26	18.52 – 37.79	0.0082
				5	2503.55 – 1614.88	8.97 – 23.27	0.0267
				2	2086.72 – 1441.55	3.59 – 11.22	0.0421
				4	3037-1837	11-19	0.019
				10	3389-2152	24-38	0.0075
		0.6	1	2	1643-855	8-14	0.052
				4	1915-1089	13-20	0.028
				10	2614-1587	12-38	0.077
			2.67	2	2675-1792	6-11	0.028
				4	2996-1662	7-21	0.03
				10	3496-2513	13-38	0.079
			3.17	2	3267-2118	6-11	0.03
				4	3361-2553	14-18	0.014
				10	3813-3039	10-39	0.0074
			3.5	2	3805-2512	7-11	0.026
				4	4061-2679	12-19	0.02
				10	4479-3292	20-39	0.0084
BOF ذوب آهن اصفهان	1.82	0.3	1.67	10	2140-1200	11-31	0.006
			1		1512-1000	10-29	0.002
			4.33		3638-2000	10-31	0.008
			1.67	5	1910-1200	6-20	0.01
			1		1386-800	5-17	0.004
			4.33		2923-1500	5-17	0.02
BOF ذوب آهن اصفهان	1.82	0.3	1.67	2	1670-800	4-17	0.03
			2.34		2212-2000	4-7	0.001
			4.33		3380-1300	3.5-9	0.05

omoorepeyman.ir

جدول (۰-۴) خلاصه نتایج آزمایش سه محوری بزرگ مقیاس تعیین مدول برجهندگی بر روی نمونه تک لایه به قطر ۳۰ cm لایه اساس و زیراساس از مصالح سرباره مختلف

تعداد سیکل	مصالح	γ g/cm^3	σ'_3 kg/cm^2	kc	cyclic stress (kg/cm^2)	Frequency (Hz)	Resilient modulus (kg/cm^2)	G (kg/cm^2)	D (%)	γ(%)	Net Axial Displacement (mm)
1-5000	EAF شرکت فولاد مبارکه نشست اولیه=۰۴/ ۲ میلیمتر	2.33	0.3	4.33	1	2	4549	1750	9.28	0.0141	0.17
5000-10000					1.3	5	4599	1769	20.88	0.0137	0.05
10000-15000					1	5	4616	1775	21.50	0.0184	0.43
15000-20000					1.3	2	4526	1741	9.58	0.0187	0.03
20000-25000					1.6	2	4080	1569	10.16	0.0246	0.67
25000-30000					2.0	2	3426	1318	11.26	0.0379	1.50
30000-35000				5.33	1.6	2	4544	1748	10.09	0.0232	0.17
35000-40000					2.1	2	4026	1549	10.89	0.0328	0.69
40000-45000					2.6	2	3326	1279	12.17	0.0473	3.89
45000-50000				6	2.4	2	3634	1398	11.08	0.0415	1.27
1-5000			0.6	2.67	1	5	5389	2073	20.74	0.0117	0.05
5000-10000					1.3	2	4994	1921	9.03	0.0140	0.07
10000-15000					1	2	4799	1846	9.17	0.0173	0.04
15000-20000					1.3	5	4289	1650	21.31	0.0189	0.89
20000-25000					1.6	2	3335	1283	11.32	0.0311	0.05
25000-30000					2.0	2	3718	1430	10.96	0.0325	0.67
30000-35000				3.17	1.6	2	3974	1529	10.56	0.0255	0.80
35000-40000					2.1	2	4028	1549	10.75	0.0324	0.31
40000-45000					2.6	2	3544	1363	11.58	0.0466	0.79
45000-50000				3.5	2.4	2	3541	1362	10.68	0.0405	0.11
1-5000	EAF شرکت فولاد خراسان نشست اولیه=۲/۹ میلیمتر	2.38	0.3	4.33	1.0	4	5733	2205	17.38	0.0113	0.03
5000-10000				4.33	1.3	4	5472	2105	17.43	0.0155	0.06
10000-15000				4.33	1.0	2	5507	2118	9.09	0.0119	0.03
15000-20000				4.33	1.3	2	5208	2003	9.10	0.0158	0.01
20000-25000				4.33	2.0	2	3180	1223	12.66	0.0380	9.62
25000-30000				5.33	1.4	4	4880	1877	18.34	0.0191	0.72
30000-35000				5.33	1.4	2	4963	1909	10.39	0.0187	1.93
35000-35600				5.33	2.0	2	3245	1248	14.23	0.0319	37.23
0-5000			0.6	2.67	1.3	4	5201	2000	17.89	0.0170	0.71
5000-10000				2.37	1.3	2	5400	2077	9.40	0.0169	0.17
10000-15000				2.37	2.0	2	4708	1811	11.17	0.0280	1.89
15000-20000				3.17	1.4	4	6498	2499	17.25	0.0140	0.02
20000-25000				3.17	1.4	2	6607	2541	8.98	0.0142	0.03
25000-30000				3.17	2.0	2	6028	2319	10.31	0.0222	0.75
30000-35000				3.17	2.6	2	5472	2105	11.19	0.0298	1.19
35000-40000				3.5	2.6	2	6398	2461	10.57	0.0260	0.69
1-500000	BOF ذوب آهن * اصفهان	1.82	0.3	4.33	1.3	5	4521	1739	15.72	0.0173	0.8
1-500000		1.82	0.3	4.33	2.3	2	3756	1445	7.61	0.0424	2.67

*** با نشست اولیه ۰/۶۵ میلیمتر و ۱/۹۵ میلیمتر به ترتیب برای فرکانس ۵ و ۲ هرتز**

مطابق جدول (پ-۳-۴) مقادیر متوسط مدول برجهندگی با افزایش تنش سیکلی و افزایش غیرهمسانی به ترتیب کاهش و افزایش می یابد. روند مشابهی برای مدول برشی به‌دست آمد. دامنه تغییرات مدول برجهندگی برای σ'_3 برابر ۰/۳kg/cm^2 و ۰/۶kg/cm^2 به ترتیب بین ۳۲۴۵ kg/cm^2 تا ۵۷۳۳ kg/cm^2 و ۴۷۰۸ تا ۶۶۰۷ kg/cm^2 است. اثر فرکانس بر مقادیر

omoorepeyman.ir

مدول اندک است. اثر فرکانس بر مقادیر نسبت میرایی قابل توجه است و افزایش تنش سیکلی و غیرهمسانی سبب افزایش جزئی نسبت میرایی می شود. مقادیر کرنش برشی با افزایش تنش سیکلی و غیرهمسانی افزایش می‌یابد. افزایش تنش سیکلی بیش از ۲۰۰ kPa و کرنش برشی سیکلی بیش از ۰/۰۳۵٪ سبب کاهش شدید مدول و افزایش شدید تغییرشکل محوری نمونه تحت σ'_3=۰/۳ kg/cm^2 می‌شود. افزایش تنش سیکلی بیش از ۲۰۰ kPa و کرنش برشی سیکلی بیش از ۰/۰۲ درصد سبب کاهش مدول و افزایش تغییرشکل محوری نمونه تحت σ'_3=۰/۶kg/cm^2 می‌شود.

اثر تنش محدودکننده بر میرایی اندک است و افزایش تنش محدودکننده سبب افزایش جزئی نسبت میرایی می‌شود. افزایش تنش محدودکننده سبب کاهش اندک مدول برجهندگی مصالح اساس EAF خراسان می‌شود. افزایش تنش محدودکننده سبب کاهش تغییر شکل محوری و کاهش نرخ افزایش آن با تعداد سیکل طبق الگوی اعمالی می‌شود. افزایش تنش محدودکننده سبب افزایش کرنش اعمالی بجز حالت تغییرشکلهای زیاد لحظه گسیختگی وارد بر نمونه می‌شود.

omoorepeyman.ir

مراجع

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

AASHTO T307 (2007), "Standard Method for Detemining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials".

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.

ASTM D1195 (2021), "Standard Test Method for Repetitive Static Plate Tests of Soils and Flexible Pavement Components for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements".

ASTM D1196 (2021), "Standard Test Method for Nonrepetitive Static Plate Tests of Soils and Flexible Pavement Components for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements".

ASTM D1557 (2012), "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort".

ASTM D1883 (2021), "Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils".

ASTM D4767 (2011), "Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils".

ASTM D4792 (2013), "Standard test method for potential expansion of aggregates from hydration reactions".

ASTM D7181 (2020), "Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils".

ASTM D4694 (2009), "Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device".

ASTMD3999 (2011), "Standard Test Methods for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Apparatus".

Bathurst, R.J and Raymond, G.P.(1987), *Geogrid reinforcement of ballasted track*,Transportation Research Board, 66th Annual Meeting.

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, L.A.T., Dawson, A.R. & Kolisoja, P.J. (2009), "Analytical Evaluation of Unbound Granular Layers in Regard to Permanent Deformation. Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields", 8th International Conference, pp. 187-196.

Brown, S.F., Thom, N.H. and Kwan, J. (2006), "Optimising the geogrid reinforcement of rail track ballast, Proceedings", Railway Foundations, University of Birmingham, UK, pp.346-354.

EPA METHOD 1311 (1992), Toxicity Characteristic Leacing Procedure

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.

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.

Hanifa, K. (2015), *Design values of resilient modulus of stabilized and non-stabilized base*, Louisiana Transportation Research Center.

Huang, Y.H. (1993), *Pavement Analysis and Design*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, cop.,http://worldcat.org/isbn/0136552757.

omoorepeyman.ir

Kim, D.S., Kweon, G.C. and Rhee, S. (2001), "Alternative method of determining resilient modulus of subbase soils using a static triaxial test", Canadian Geotechnical Journal, 38, pp.117-124.

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.

Malla, R.B. and Joshi, S. (2007), "Resilient modulus prediction models based on analysis of LTPP data for subgrade soils and experimental verification", Journal of transportation engineering, 133(9).

Nguyen, B.T. and Mohajerani, A. (2016), "Resilient modulus of fine-grained soil and a simple testing and calculation method for determining an average resilient modulus value for pavement design", Transportation Geotechnics 7, 59–70 Contents lists available at ScienceDirect. 2214-3912/_ 2016 Published by Elsevier Ltd.

Petriaev, A., Konona, A. and Solovyov, V. (2017), "Performance of ballast layer reinforced with geosynthetics in terms of heavy axle load operation", Procedia Engineering, 189, pp.654- 659.

Phillip A.W. and Cameron D.A. (1995), "The influence of soil suction on the resilient modulus of expansive soil subgrades", Proceedings of the 1st international conference on unsaturated soils, Paris. 171–6.

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, 4(4)

Rasul, J. (2016), "Investigation the use of stabilized subgrade soils for road pavement in KURDISTAN", Ph.D. Thesis, The University of Birmingham, June.

Rasul, J.M., Burrow, M.P.N. and Ghataora, G.S. (2016), "Consideration of the deterioration of stabilised subgrade soils in analytical road pavement design", Transportation Geotechnics 9, pp.96–109.

Raymond, G.P. (1978), "Design for railroad ballast and subgrade support", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 104, No. GT1, January.

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.

Ricardo A., Philip, S., Kealohi, K. and Standefur, G. (2007), "Estimation of a resilient modulus model for cohesive soils using joint estimation and mixed effects", Journal of transportation engineering, 133(8).

S. M. A. Ghotbi Siabi, S. N. Moghaddas Tafreshi, A. R. Dawson and M. Parvizi Omran(2018), "Behavior of expanded polystyrene (EPS) blocks under cyclic pavement foundation loading", Geosynthetics International, doi: 10.1680/jgein.18.00033.

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.

Wang, G.C. (2016), *The utilization of slag in civil infrastructure construction*, Duxford, UK: Woodhead Publishing.

Uzan,j. (1985), "Charactrizition of granular materials", Transportation Reseach Record 1022, TRB, National Reseach Council, Washington DC, 52-59

اسماعیلی، م. و همکاران (۱۳۹۵)، *گزارش امکان‌سنجی استفاده از بالاست سرباره‌ای آهنی و مقایسه آن با بالاست سنگی*، مرکز تحقیقات و آموزش راه آهن.

omoorepeyman.ir

آقایی آرایی ع. (۱۴۰۰)، بررسی رفتار مصالح سرباره فولاد به عنوان بالاست و زیربالاست خطوط ریلی تحت شرایط بارگذاری دینامیکی و مونوتونیک، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، شماره نشر:گ-۹۶۶، چاپ اول : زمستان ۱۴۰۰، ایران.

آقایی آرایی ع.(۱۳۹۹)،"رفتار مونوتونیک-پساسیکلی سرباره های فولاد اصلاح شده با ژئوگرید و خرده لاستیک به عنوان بالاست و زیربالاست خطوط راه آهن"، فصلنامه علمی پژوهشنامه حمل و نقل، سال هفدهم دوره دوم، شماره ۶۳، تابستان.

آقایی آرایی ع.، عطارچیان ن.، رحمانی ا.، شکرچی زاده م.، سلامت ا.س.، حسنی ح. (۱۳۹۹)، *پیش نویس راهنمای استفاده از سرباره فولاد به عنوان بالاست و زیربالاست راه آهن و ارائه پارامترهای طراحی*، پروژه تحقیقاتی، گ-۸۸۱، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.

آقایی آرایی ع.، کلانتری ف.، قلندرزاده ع.، شاه‌نظری ح.، عطارچیان ن.، رحمانی ا. (۱۴۰۰)، *راهنمای انجام و تحلیل آزمایشهای استاتیکی، دینامیکی و سیکلی مقاومتی سه‌محوری(بازخوانی تجارب ۳۰۰ آزمایش انجام شده مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی)*، شماره نشر: گ-۹۱۸ چاپ اول : بهار.

آقایی آرایی ع. اسماعیلی م، قاسم زاده ح.، رحمانی ا.، شکرچی زاده م.، یزدانی طبائی س.ح.، قلندرزاده ع.، کلانتری ف.، سلامت ا.س.، منصوریان ا.، اکبری نسرکانی ع.ا.، جدیدی م.، مقدس نژاد ف.، ابراهیمی علویجه ب.، طباطبایی عقدا ط.، منصورزاده س.م.، احمدی س.، مختاری م.، حسنی ح.، نیاکی م.، آزادنور ب.، رضائی م.، لشنی‌زند ف. (۱۴۰۱) ،"مطالعات امکان‌سنجی استفاده از مصالح سرباره EAF فولاد مبارکه در پروژه های عمرانی، گزارش نهایی بخش اول-فازهای اول و دوم، مطالعات امکان سنجی استفاده از سرباره به عنوان خاکریز مهندسی(زیراساس و اساس راه)، بالاست و زیربالاست راه آهن"، کارفرما، معاون تکنولوژی تحقیق و توسعه، شرکت فولاد مبارکه، مشاور: بخش ژئوتکنیک و زیرساخت مرکز تحقیقات راه و مسکن و شهرسازی، بهمن

رحمانی،ا.، عطا آقایی آرایی، عطارچیان، ن.، سلامت، ا.س.، حسنی، ح. (۱۳۹۹) بررسی اثر غرقاب شدن، دانه بندی و جنس سرباره فولاد بر مشخصات فنی خاکریزهای مهندسی، شماره نشر: ۹۰۳، چاپ اول: مهرماه ۱۳۹۹.

معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری (۱۳۹۰)، آیین نامه روسازی آسفالتی راه های ایران، ، نشریه ۲۳۴، ایران.

معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری (۱۳۹۲)، *مشخصات فنی عمومی راه*، نشریه ۱۰۱، ایران

هاشمی طباطبایی، س.، آقایی آرایی، 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.

هاشمی طباطبایی، س.، آقایی آرایی، ع.، کاتبی، ب.، سلامت، ا.س.(۱۳۹۳)، *استفاده از سرباره فولاد جهت تثبیت در زیرسازی جاده*، پروژه تحقیقاتی، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

خواننده گرامی

امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران سازمان برنامه و بودجه کشور، با گذشت بیش از چهل سال فعالیت تحقیقاتی و مطالعاتی خود، افزون بر هشتصد عنوان نشریه تخصصی - فنی، در قالب آیین‌نامه، ضابطه، معیار، دستورالعمل، مشخصات فنی عمومی و مقاله، به‌صورت تالیف و ترجمه، تهیه و ابلاغ کرده است. ضابطه/نشریه حاضر در راستای موارد یاد شده تهیه شده، تا در راه نیل به توسعه و گسترش علوم در کشور و بهبود فعالیت‌های عمرانی به کار برده شود. فهرست نشریات منتشر شده در سال‌های اخیر در سایت اینترنتی **nezamfanni.ir** قابل دستیابی می‌باشد.

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

Guideline for usage of iron and steel slags materials as base and sub-base for roads and runways [No 877]

Authors & Contributors Committee:

Ata Aghaei Araei	Road, Housing & Urban Development Research Center	Ph.D. of Civil Eng.
Ahmad Mansourian	Road, Housing & Urban Development Research Center	Ph.D. of Civil Eng.
Ali Asghar Akbari Nasarkani	Consulting Engineer	M.Sc. of Civil Eng.
Mahmod Jadidi	Consulting Engineer	M.Sc. of Civil Eng.
Bahareh Ebrahimi Alivijeh	Yazd University	M.Sc. of Civil Eng., Ph.D. student
Iraj Rahmani	Road, Housing & Urban Development Research Center	Ph.D. of Civil Eng.
Somayeh Ahmadi	Sharif Uinversity of Technology	M.Sc. of Civil Eng., Ph.D. student
Behnam Azadnoor	University of Khajeh Nasir al-Din Toosi and Tehnology	M.Sc. of of Civil Eng
Hosain Hasani	Road, Housing & Urban Development Research Center	Associate Degree
Amir Salamat Salamat	Road, Housing & Urban Development Research Center	B.S. of Geology

Supervisory Committee:

Mohammad. Shakarzadeh	University of Tehran	Ph.D of Civil Eng.

Confirmation Committee:

Abbas Ghalandarzadeh	University of Tehran	Ph.D of Civil Eng.
Farzin. Kalantari	Khajeh Nasir al-Din Toosi University of Tehnology	Ph.D of Civil Eng.
Saeed Taha Tabatabaei Aghda	Road, Housing & Urban Development Research Center	Ph.D of Civil Eng.
Mohammad Mansourzadeh	Road, Housing & Urban Development Research Center	M.Sc. of Civil Eng., Ph.D Student
Feridon Moghaddasnejad	AmirKabir Uivercity of Technology	Ph.D of Civil Eng.
HamidRezaSahebazzamani	Consulting Engineers	Ph.D of Civil Eng.
Morteza Esmaeili	Iran Univercity of Science and Technilogy	Ph.D of Civil Eng.
Hasan Ghasemzadeh	Khajeh Nasir al-Din Toosi University of Tehnolog	Ph.D of Civil Eng.
Asghar Fotovat fard	Consulting Engineers	M.Sc. of Civil Eng.
Mohammad Sadegh Rezazadeh Jodi	Consulting Engineers	M.Sc. of Civil Eng.
Saeed Hasan Yazdani Tabaei	Islamic republic of Iran Railways	M.Sc. Metalogy

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

این نشریه/ضابطه

بـــا عنـــوان « دســـتورالعمل اســـتفاده از سرباره‌هـای آهـن و فـولاد بـه عنـوان اسـاس و زیراساس راه و باند فرودگاه» در راستای معرفی و آشنایی با انواع سـرباره هـای آهـن و فـولاد و امکان استفاده از آن مطـابق معیارهـای کنتـرل کیفیت و پذیرش در سـه فصـل و سـه پیوسـت تدوین شده که شامل: کلیات، مشخصات اساس و زیراسـاس سـرباره‌ای و معیارهـای پـذیرش ضوابط طراحی، اجـرا، تعمیـر و نگهـداری راه و باند با اسـاس و زیراسـاس سـرباره‌ای، طراحـی آزمـون سـه محـوری سـیکلی بـرای اسـاس و زیراسـاس و انتخـاب فراسـنجهای آزمایشـها و مقادیر نمونه پارامترهای مقـاومتی و عملکـردی براسـاس آزمایشـها و کلیـدواژه‌هـای مـرتبط می‌باشد.

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

Islamic Republic of Iran
Plan and Budget Organization

Guidline for Usage of Iron and Steel Slags Materials as Base and Sub-base for Roads and Runways

No 877

Last Edition: 11-04-2023

Deputy of Technical, Infrastructure and Production Affairs
Department of Technical & Executive affairs, Consultants and Contractors

nezamfanni.ir

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

bhrc.ac.ir

2023

omoorepeyman.ir