جمهوری اسلامی ایران

سازمان برنامه و بودجه کشور

دستورالعمل استفاده از سرباره‌های آهن و فولاد به عنوان بالاست و زیربالاست خطوط راه آهن

ضابطه شماره ۸۷۶

آخرین ویرایش: ۱۳-۰۸-۱۴۰۲

معاونت تولیدی، فنی و زیربنایی

امور نظام فنی اجرایی، مشاوران و پیمانکاران

nezamfanni.ir

وزارت راه و شهرداری

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

bhrc.ac.ir

۱۴۰۲

نظام فنی و اجرایی کشور

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

اصلاح مدارک فنی

خواننده گرامی:

امور نظام فنی اجرایی، مشـــاوران و پیمانکاران معاونت تولیدی، فنی و زیربنایی ســـازمان برنامه و بودجه کشـــور، 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 شـما خواننده‌ی گرامی صـمیمانه تقاضـا دارد در صـورت مشـاهده هر گونه ایراد و اشـکال 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

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 بالاست و زیربالاست خطوط ریلی همیشه امکان پذیر نیست و در بعضی مناطق، منابع قرضه سنگی 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 و راه آهن می‌باشد. یکی از مصالحی که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است، سرباره‌های کارخانه های آهن و فولاد می‌باشند. در حال حاضر، به علت انباشت بخش قابل توجهی از انواع مختلف مصالح سرباره های آهن و فولاد در مناطق اطراف کارخانه‌ها، امکان ایجاد مشکلات زیست محیطی و اشغال زمین وجود دارد. علیرغم اشاره به استفاده از سرباره فولاد به عنوان بالاست و زیربالاست در نشریه های ۳۰۱، ۳۵۵ و ۳۹۴، برخلاف AREMA معیارهای پذیرش کنترل کیفی اولیه، و پذیرش نهایی برای استفاده آنها ارائه نشده است. آزمایش‌های اولیه مکانیک خاک و همچنین آزمایشهای سیکلی و دینامیکی روی سرباره های تعدادی از کارخانه های فولاد کشور نشان داد که با درجاتی بر حسب نوع خط و وزن قطار و سرعت ، تعدادی از این مصالح مشخصات اولیه مورد نیاز به عنوان بالاست و زیربالاست را دارا می‌باشند. با توجه به نیاز احداث خطوط راه‌آهن جدید در کشور و افزایش سرعت قطارها، تعیین مشخصات فنی بالاست و زیربالاست‌ها به منظور کنترل نشست و ارتعاش منتقل شده به محیط اطراف و نیز کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیر آن‌ها، ضروری است.

در این راستا و در گام نخست «پیش نویس راهنمای استفاده از سرباره های فولاد به عنوان بالاست و زیربالاست برای راه آهن» در بخش ژئوتکنیک و زیرساخت مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی تهیه و برای استفاده عموم منتشر شده است. با انجام پروژه های متعدد در بخش ژئوتکنیک و زیرساخت مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی و دانشگاه های

کشور خصوصاً دانشکده راه آهن دانشگاه علم و صنعت کشور ، برای اولین بار در کشور با کمک جمعی از صاحب نظران و اساتید کشور، رفتار نشست و شکست تحت بار دینامیکی و مقاومت جانبی و راهکارهای نوین افزایش عمر بهره برداری از طریق کاهش نشست محوری تحت بارهای سیکلی زیاد شامل استفاده از ژئوگرید و مقایسه عملکرد مصالح سرباره ای با مصالح معمول بررسی گردید. نتایج نشان داد مصالح سرباره‌ای می‌توانند جایگزین مناسب مصالح طبیعی برای فواصل بهینه حمل خصوصا در مواقع عدم دسترسی به مصالح با کیفیت باشند. لازم به ذکر است بالاست سرباره‌ای به طور آزمایشی تحت نظارت اداره کل راه آهن اصفهان در قسمتی از بلاک دیزیچه-حسن‌آباد اجرا شده است.

با توجه به مطالب فوق الذکر مرکز تحقیقات راه مسکن و شهرسازی تهیه «دستورالعمل استفاده از سرباره‌های آهن و فولاد به عنوان بالاست و زیربالاست راه آهن» 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 (Nezamfanni.ir) 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.

از مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی خصوصاً بخش ژئوتکنیک و زیرساخت آن به علت انجام این مطالعات و آزمایش‌های مرتبط از سال ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۲ تشکر می‌گردد. از شرکت ملی فولاد و همچنین شرکتهای فولادی کشور از جمله شرکت ذوب آهن اصفهان، شرکت فولاد خراسان برای تهیه مصالح سرباره و خصوصاً شرکت فولاد مبارکه اصفهان به جهت تهیه مصالح و کمک مالی برای انجام آزمایشها و مطالعات تشکر می گردد.

تهیه و کنترل «دستورالعمل استفاده از سرباره‌های آهن و فولاد به عنوان بالاست و زیربالاست راه آهن» [ضابطه شماره ۸۷۶]

تهیه‌کننده پیش‌نویس اولیه:

عطا آقایی آرایی	مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی	دکترای مهندسی عمران-خاک و پی

اعضای داوری پیش‌نویس اولیه:

مرتضی اسماعیلی	دانشگاه علم و صنعت	دکترای مهندسی عمران- خاک و پی
حسن قاسم‌زاده	دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی	دکترای مهندسی عمران- خاک و پی

اعضای کمیته تدوین و بازخوانی نهایی(به ترتیب حروف الفباء):

عطا آقایی آرایی	مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی	دکترای مهندسی عمران-خاک و پی
مرتضی اسماعیلی	دانشگاه علم و صنعت	دکترای مهندسی عمران- خاک و پی
ناهید عطارچیان	مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی	دکترای مهندسی عمران- زلزله
ایرج رحمانی	مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی	دکترای مهندسی عمران- خاک و پی
محمد شکرچی زاده	دانشکده فنی دانشگاه تهران	دکترای مهندسی عمران- تکنولوژی بتن
حسن قاسم‌زاده	دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی	دکترای مهندسی عمران- خاک و پی
سید حسین یزدانی طبائی	شرکت راه آهن جهموری اسلامی ایران	کارشناسی ارشد مواد-متالوژی

اعضای گروه نظارت:

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

اعضای گروه تایید کننده (کمیته تخصصی و داوری نسخه نهایی دستورالعمل):

دکترجبارعلی ذاکری	دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران	دکترای مهندسی عمران-راه و ترابری
فریدون مقدس نژاد	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	دکترای مهندسی عمران-راه و ترابری
دکتر خیرالله خادمی	شرکت مادر تخصصی ساخت و توسعه زیربناهای حمل و نقل	دکترای مهندسی عمران- سازه های آبی
عباس قلندرزاده	دانشکده فنی، دانشگاه تهران،	دکترای مهندسی عمران- خاک و پی
فرزین کلانتری	دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی	دکترای مهندسی عمران- خاک و پی

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول- کلیات ۱

۱-۱- مقدمه..... ۳

۱-۲- دامنه کاربرد..... ۳

۱-۳- طبقه‌بندی خطوط بالاستی..... ۳

۱-۴- نیروهای وارد بر خطوط راه‌آهن..... ۴

۱-۵- محدوده دانه بندی مصالح بالاست و زیربالاست..... ۵

۱-۵-۱- محدوده دانه بندی مصالح بالاست سرباره‌ای..... ۵

۱-۵-۲-محدوده دانه‌بندی مصالح زیربالاست..... ۶

۱-۶- مشخصات هندسی لایه‌های بالاست و زیربالاست..... ۷

فصل دوم-مشخصات بالاست و زیربالاست 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 بالاست و زیربالاست سرباره‌ای..... ۱۲

۲-۵- ترکیبات شیمیایی سرباره ها..... ۱۳

۲-۵-۱- کنترل میزان انبساط مصالح سرباره ای..... ۱۴

۲-۵-۲- ملاحظات فنی در خصوص شیرابه سرباره ها..... ۱۵

۲-۶- مقاومت الکتریکی سرباره..... ۱۶

فصل سوم- ضوابط طراحی، اجرا، تعمیر و نگهداری خط ریلی با بالاست سرباره‌ای ۱۹

۳-۱- طراحی..... ۱۹

۳-۱-۱- سختی بستر ریل..... ۱۹

۳-۱-۱-۱- تخمین سختی بستر ریل بر اساس مدل هرمی..... ۲۰

۳-۱-۲- مدول بستر ریل..... ۲۱

۳-۱-۲-۱- تعیین مدول بستر ریل به روش تالبوت اصلاح شده..... ۲۴

۳-۱-۳- معیار تغییر مکان قائم خط و ریل..... ۲۶

۳-۱-۴- مقاومت جانبی بالاست..... ۲۷

۳-۱-۴-۱- اندازه‌گیری مقاومت جانبی تراورس منفرد..... ۲۸

۳-۱-۵-تنش تماسی بین تراورس/بالاست، بالاست/زیربالاست ۲۹
۳-۱-۶-توزیع بار قائم چرخ بر روی تراورس‌ها ۳۱
۳-۲- اجراء ۳۱
۳-۲-۱- ملاحظات اجرایی برای لایه زیربالاست ۳۱
۳-۲-۲- استفاده از صفحات زیرتراورس برای کاهش تنش تماسی ۳۲
۳-۲-۳-تسلیح بالاست با ژئوگرید برای افزایش عمر بهربرداری ۳۲
۳-۲-۳-۱ عمق مناسب نصب ژئوگرید ۳۳
۳-۲-۴-کثیفی بالاست و نفوذ پذیری ۳۳
۳-۳- تعمیر و نگهداری ۳۴
۳-۳-۱- بازیافت بالاست سرباره ای ۳۴
۳-۳-۲- سایش ادوات تعمیر و نگهداری ۳۴
۳-۳-۳- ملاحظات ویژه برای ارزیابی فنی و اقتصادی ۳۵
پیوست ۱- طراحی آزمون سه محوری سیکلی برای بالاست و زیربالاست ۵۱
پ-۱- مقدمه ۳۹
پ-۱-۲- مشخصات دستگاه سه محوری ۳۹
پ-۱-۳- روش ساخت نمونه ۴۰
پ-۱-۴- الگوی بارگذاری ۴۱
پ-۱-۴-۱- تعداد سیکل بارگذاری بالاست توسط یک بوژی ۴۱
پ-۱-۴-۲- فرکانس بارگذاری ۴۱
پ-۱-۴-۳- دامنه تنش های اعمالی ۴۲
پ-۱-۵ روش انجام آزمون ۴۲
پ-۱-۵-۱- روش انجام آزمون به منظور تعیین مدول برجهندگی ۴۲
پ-۱-۵-۲- روش انجام آزمون به منظور تعیین مدول برشی و میرایی ۴۴
پ-۱-۵-۳- روش انجام آزمون به منظور تعیین مقاومت پساسیکلی ۴۶
پ-۱-۶- گزارش آزمون ۴۶
پیوست ۲-برآورد سختی لایه های زیرسازی خطوط ریلی به روش هرمی ۴۷
پ-۲-۱- برآورد سختی لایه بالاست بالایی، پایینی و زیربالاست ۴۸
پ-۲-۲- برآورد سختی صفحات زیر ریل ۴۹
پ-۲-۳- برآورد سختی لایه بستر ۴۹

پیوست ۳- نمونه مقادیر مقاومت جانبی بالاست ۵۳
پیوست ۴- محاسبه ضخامت لایه بالاست و زیر بالاست به روش AREMA ۵۹

فهرست شکل ها

عنوان **صفحه**

شکل (۱-۱) منحنی های دانه‌بندی مصالح بالاست و زیر بالاست مطابق نشریه ۳۰۱ (۱۳۸۴)..... ۵

شکل (۲-۱) فرآیندهای تولید آهن و فولاد و انواع سرباره تولید شده (قاسم زاده، ۱۳۹۲)..... ۱۲

شکل (۳-۱) استفاده از تغییرمکان‌های ناپیوسته در محاسبه مدول بستر ریل (صادقی، ۱۳۸۷)..... ۱۹

شکل (۳-۲) مجموعه فنرهای خطی در مدل هرمی (Esmaeili et al., 2015)..... ۲۱

شکل (۳-۳) تغییرمکان مورد استفاده برای محاسبه مدول بستر ریل مطابق روش تالبوت اصلاح شده (صادقی ۱۳۸۷).۲۶

شکل (۳-۴) مقادیر نشست خط آهن در مناطق مختلف جهان (Shenton, 1984)..... ۲۶

شکل (۳-۵) معیار تغییر مکان قائم خط با توجه به ملاحظات پایداری و دوام (Lundgren et al. 1970)..... ۲۷

شکل (۳-۶) منابع مقاومت جانبی تراورس در تماس با بالاست (Esmaeili et al., 2015)..... ۲۷

شکل (۳-۷) تجهیزات و روش اندازه گیری مقاومت جانبی تراورس منفرد (Esmaeili et. al., 2015)..... ۲۹

شکل (۳-۸) نحوه توزیع بار قائم بین تراورس‌ها بر حسب فاصله تراورس‌ها (آقایی آرایی و همکاران، ۱۳۹۹)..... ۳۱

شکل (۳-۹) تغییرات بیشینه نرخ بارندگی منطقه با حداکثر مقدار مجاز کثیفی بالاست (Selig and Waters, 1994)... ۳۴

شکل (پ-۱-۱) نمایش شماتیک اجزاء دستگاه سه محوری قطر بزرگ دینامیکی..... ۴۰

شکل (پ-۱-۲) رابطه تنش-کرنش هیسترزیس..... ۴۶

شکل (پ۲-۱) جزئیات هندسی مدل هرمی برای محاسبه مدول بستر ریل (Ahlbeck et al., 1978)..... ۴۸

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول (۱-۱) طبقه بندی خطوط بالاستی راه‌آهن ایران مطابق نشریه ۳۰۱ (۱۳۸۴)..... ۴

جدول (۱-۲) درصد وزنی عبوری از الک‌های مختلف برای مصالح بالاست مصرفی در خطوط بالاستی راه‌آهن ایران (نشریه ۳۰۱، ۱۳۸۴)..... ۶

جدول (۱-۳) دانه بندی مجاز از الک‌های مختلف زیربالاست مصرفی خطوط بالاستی راه‌آهن ایران..... ۷

جدول (۲-۱) آزمون های کنترل کیفیت و معیارهای پذیرش مصالح زیربالاست سرباره‌ای..... ۱۳

جدول (۲-۲) آزمون‌های کنترل کیفیت و معیارهای پذیرش مصالح بالاست سرباره‌ای..... ۱۴

جدول (۲-۳) مشخصات شیمیایی سرباره های آهن و فولاد..... ۱۵

جدول (۲-۴) میزان مجاز غلظت آلاینده‌ها (mgL^{-1}) در شیرابه سرباره‌ها به روش EPA 1311..... ۱۶

جدول (۳-۱) محدوده مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و بسیج شده برای مصالح بالاست و زیربالاست سرباره‌ای(Li et al., 2016)..... ۲۱

جدول (۳-۲) مقادیر نمونه مدول بستر ریل در شرایط مختلف (اصلاح شده (Hay, 1982)..... ۲۲

جدول (۳-۳) مقادیر مدول بستر ریل برای پنج نوع خط آهن مختلف (Ahlf, 1975)..... ۲۳

جدول (۳-۴) وضعیت کیفی خط و مدول بستر ریل(Esveld, 2001)..... ۲۳

جدول (۳-۵) سهم بالاست های کف، آخوری و شانه در تامین مقاومت جانبی (Selig and Waters, 1994)..... ۲۹

جدول (۳-۶) مقادیر حداکثر تنش تما سی در را ستای قائم و افقی بین تراورس/بالا ست و بالا ست/زیربالا ست در خطوط اصلی راه آهن..... ۳۰

جدول (۳-۷) حدود مجاز مشخصات لایه زیر بالاست سرباره ای حین اجرا..... ۳۲

جدول (۳-۸) محدوده مقادیر سختی انواع صفحات زیرتراورس..... ۳۲

جدول (۳-۹) مقادیر ضریب نفوذپذیری بالاست بر مبنای شاخص کثیفی (Selig and Waters, 1994)..... ۳۳

جدول (پ-۱-۱) مشخصات دستگاه سه محوری قطر بزرگ برای انجام آزمایشهای مونوتونیک و سیکلی دینامیکی..... ۴۰

جدول (پ-۱-۲) الگوی بارگذاری پیشنهادی برای تعیین مدول برجهندگی بالاست و بالاست/زیربالاست..... ۴۳

جدول (پ-۱-۳) الگوی بارگذاری پیشنهادی برای تعیین مدول برجهندگی زیربالاست، زیربالاست/بستر بهسازی شده. ۴۴

جدول (پ-۲-۱) مقادیر C_0 برحسب ($10^{-6}kN/mm^3$) حاصل از آزمایش بارگذاری صفحه بر روی ماسه(Terzaghi, 1955)..... ۵۰

جدول (پ-۲-۲) مقادیر C_0 برحسب ($10^{-6}kN/mm^3$) حاصل از آزمایش بارگذاری صفحه بر روی رس پیش تحکیم یافته (Terzaghi, 1955)..... ۵۰

جدول (پ-۳-۱) مقاومت جانبی روش تراورس منفرد بالاســت EAF و آهکی ایرانکوه با عمق ۳۰، ۴۰ و ۵۰ cm، شــانه با عرض ۳۰ و ۴۰cm با و بدون شانه با ارتفاع ۱۰cm (اصلاح شده Esmaeili et al., 2015)..... ۵۵
جدول (پ-۴-۱) مقادیر تنش مجاز بستر (**Pc**) (Selig and Waters, 1994)..... ۶۰

A

abrasion **سایش** *(خردایش)*

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

American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (AREMA) ***انجمن مهندسی و تعمیرو نگهداری راه آهن آمریکا***

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

محصول جانبی تولید فولاد در کوره‌های اکسیژن بازی است.

ballast ***بالاست***

لایه‌ای از مصالح درشت دانه (سنگی یا سرباره کوره‌های ذوب آهن) با ابعاد ۲۰ تا ۶۰ میلیمتر است که بعنوان یک تکیه‌گاه مناسب برای تثبیت تراورس‌ها است

ballast fouling ***کثیفی بالاست***

میزان درصد عبوری مصالح بالاست از الک‌های شاخص(الک ۴# و ۲۰۰#) است.

ballast particle brakage ***شکست دانه‌های بالاست***

خردشدگی دانه‌های بالاست حین عملیات ساخت، بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری (زیرکوبی) است.

ballast shoulder ***شانه بالاست***

بخشی از مصالح بالاست که در دو انتهای تراورس قرار می‌گیرد و عرض شانه‌ها و شیب شیروانی‌های طرفین لایه بالاست در این بخش اعمال می‌شود.

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

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

crib-ballast between the sleepers ***بالاست بین تراورس‌ها(آخوری)***

بالاستی که میان دو تراورس مجاور و بالاتر از تراز ارتفاعی کف تراورس‌ها قرار می‌گیرد

رفتار دینامیکی بالاست و زیربالاست **dynamic behavior of ballast and subballast**

یک واژه عمومی برای تعریف رفتار مصالح بالاست و زیربالاست تحت بارهای عبوری ناوگان ریلی 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)، تعیین معیارهای گسیختگی لایه‌های بالاست و زیربالاست است.

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

محصول جانبی تولید فولاد در کوره قوس الکتریکی است.

ژئوگرید **geogrid**

ورقه‌ای با ساختار شبکه‌ای از مواد پلیمری از خانواده ژئوسنتتیک است که برای ایجاد درگیری با خاک، سنگ و مصالح اطراف به عنوان مسلح‌کننده عمل می کند.

ژئوسنتتیک **geosynthetic**

محصولی نازک، انعطاف پذیر و ورقه‌ای، از مواد ترکیبی پلیمری بافته و نبافته است که در ساخت خاکریزهای مهندسی متشکل از خاک یا سنگ کاربرد دارد.

نیروهای افقی وارد بر خطوط بالاستی **lateral forces on ballasted track**

بارهای افقی شامل نیروهای افقی ناشی از حرکت چرخ و بار عکس‌العمل کمانشی ناشی از تغییرات حرارت است.

مقاومت جانبی خط بالاستی **lateral resistance of ballasted track**

مجموع مقاومت جانبی اجزای خط بالاستی به ازای مقدار مشخصی از جابجایی افقی. به‌طور کلی مقاومت جانبی بالاست ۵۰ تا ۷۰ درصد، کل مقاومت کمانشی خط را تشکیل می‌دهد.

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

برابر با بیشینه تنش قائم اعمالی بر وسط لایه بالاست ناشی از عبور قطار 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 بالاست و زیربالاست **resilent modulus of ballast and subballast**

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

مدول عکس العمل بستر **rail support modulus**

نسبت تنش فشاری وارد بر سطح تماس بین صفحه بارگذاری شده مستقر روی لایه‌های زیرسازی به نشست حاصل از بارگذاری است.

سرباره‌های فولاد **steel slags**

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

زیربالاست **subballast**

لایه میانی بین بستر خط و لایه بالاست است که از شن، ماسه و خاک ریزدانه و سرباره تشکیل شده و مانع نفوذ و فرورفتن دانه‌های بالاست در بستر روسازی و نیز موجب توزیع بهتر بارهای خارجی و تسریع زهکشی آب باران می‌شود.

زیرسازه خط بالاستی **substructure of ballasted tracks**

منظور از زیرسازه خط بالاستی، بالاست، زیربالاست و بستر اصلاح شده و زمین طبیعی می‌باشد.

روسازه خط بالاستی **superstructure of ballasted tracks**

منظور از روسازه خط بالاستی، ریلها، تراورسها و ادوات اتصال می باشد.

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.

کمیته تحقیقات حمل و نقل **Transportation Research Board (TRB)**

صفحات زیر تراورس **under sleeper pads**

صفحاتی ارتجاعی از جنس مصالح لاستیکی بازیافتی با اندازه دانه ۳-۱ mm چسبانده شده با الاستومر پلی اورتان با ضخامت بین ۱۰ تا ۶۰ mm است. صفحه زیر تراورس قطع نظر از نوع بستر بهترین راه حل برای کمینه کردن نیروی ضربه‌ای ناشی از عبور قطار در محل با سختی زیاد مثل پل‌ها است.

فصل ۱

کلیات

۱-۱- مقدمه

در این فصل ضمن ارائه دامنه کاربرد راهنما و محدوده مجاز استفاده از مصالح سرباره آهن و فولاد به عنوان بالاست و زیربالاست در خطوط راه‌آهن ایران، کلیاتی پیرامون مفاهیم مرتبط با طبقه‌بندی خطوط بالاستی، نیروهای وارد بر خطوط راه‌آهن، محدوده دانه‌بندی مصالح بالاست و زیربالاست و همچنین مشخصات هندسی لایه‌های بالاست و زیربالاست در خطوط بالاستی ارائه شده است.

۱-۲- دامنه کاربرد

مصالح مورد اشاره در این راهنما شامل مصالح سرباره آهن و فولاد حاصل از کوره‌های اکسیژنی و قوس الکتریکی است که می‌تواند برای تعمیر خطوط موجود یا ساخت خطوط جدید (مثل خطوط ریلی درون شهری) در راستای ضوابط و توصیه‌های نشریه‌های ۲۷۹، ۳۰۱، ۳۵۵ و ۳۹۴ امور نظام فنی و اجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور برای بیشینه بار محوری ۲۵ تن و بیشینه سرعت ۱۶۰ کیلومتر بر ساعت با در نظر گرفتن فاصله حمل بهینه استفاده شود. با توجه به انباشت مصالح سرباره در نقاط مشخصی از کشور، فاصله بهینه حمل این مصالح با لحاظ بهای کمتر 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.

در راهنمای حاضر مطابق (AREMA,2010) 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 بالاست و زیربالاست را شامل نمی‌شود. بنابراین باید تمهیدات لازم در این خصوص به ویژه در هنگام به کارگیری در فضاهای بسته مانند تونل‌ها مدنظر قرارگیرد.با توجه به سابقه اندک استفاده از این مصالح در خطوط ریلی کشور، توصیه می‌شود به هنگام به کارگیری این مصالح به عنوان مصالح لایه بالاست و زیربالاست، برنامه مدونی برای پایش خطوط دارای این مصالح از منظر رفتارسنجی و همچنین نگهداری و تعمیر در یک دوره زمانی کامل تا سرند بالاست و یا تعویض زیربالاست 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.

۱-۳- طبقه‌بندی خطوط بالاستی

طبقه‌بندی خطوط بالاستی راه‌آهن را می‌توان براساس معیارهای زیر انجام داد:

۱. کاربرد و عملکرد
۲. وضعیت فیزیکی و کیفیت
۳. بار محوری
۴. بار ترافیکی
۵. سرعت سیر

از نظر کاربرد و عملکرد، خطوط راه‌آهن را می‌توان به ۵ دسته تقسیم کرد که به ترتیب عبارتند از: خطوط اصلی (تردد قطارهای مسافری و باری)، خطوط فرعی (دسترسی به معادن و پادگان‌ها)، خطوط صنعتی و تجاری (دسترسی به کارخانه ها و بنادر)، خطوط مانوری و انشعابات. همچنین از نظر کیفیت و وضعیت فیزیکی، خطوط به سه دسته، خطوط جدید با عمر کمتر از ۱۰ سال، خطوط با عمر متوسط و خطوط قدیمی تقسیم می‌شوند. طبقه‌بندی خطوط بالاستی راه‌آهن ایران براساس بار ترافیکی و سرعت سیر در جدول (۱-۱) ارائه شده است. این طبقه‌بندی برحسب بیشینه سرعت ناوگان و بار ناخالص عبوری سالیانه مربوط به سال دهم بهره‌برداری است.

جدول (۱-۱) طبقه بندی خطوط بالاستی راه‌آهن ایران مطابق نشریه ۳۰۱ (۱۳۸۴)

تناژ ناخالص عبوری سال دهم بهره‌برداری (میلیون تن)	سرعت (کیلومتر بر ساعت)			
	۱۶۰-۲۰۰ (A)	۱۲۰-۱۶۰ (B)	۸۰-۱۲۰ (C)	کمتر از ۸۰ (D)
بیش از ۱۵	A1	B1	C1	D1
۱۰~۱۵	A2	B2	C2	D2
۵~۱۰	A3	B3	C3	D3
کمتر از ۵	A4	B4	C4	D4

خطوط صنعتی و تجاری منشعب از ایستگاه‌های خطوط ریلی با بار ناخالص عبوری سالیانه کمتر از ۲ میلیون تن و سرعت کمتر از ۶۰ کیلومتر بر ساعت به عنوان خط فرعی محسوب شده و با علامت (E) مشخص می‌شوند.

۱-۴- نیروهای وارد بر خطوط راه‌آهن

برای تحلیل و طراحی زیرسازه خط بالاستی باید نوع و مقدار نیروهای اعمالی بر بالاست، زیربالاست و بستر در دوره بهره‌برداری تعیین شوند. نیروهای ناشی از سکون، حرکت و توقف قطارها (اندرکنش چرخ-ریل و تراورس) ترکیبی پیچیده از نیروهای استاتیکی و دینامیکی است که از طریق روسازه بر زیرسازه وارد می‌شوند.

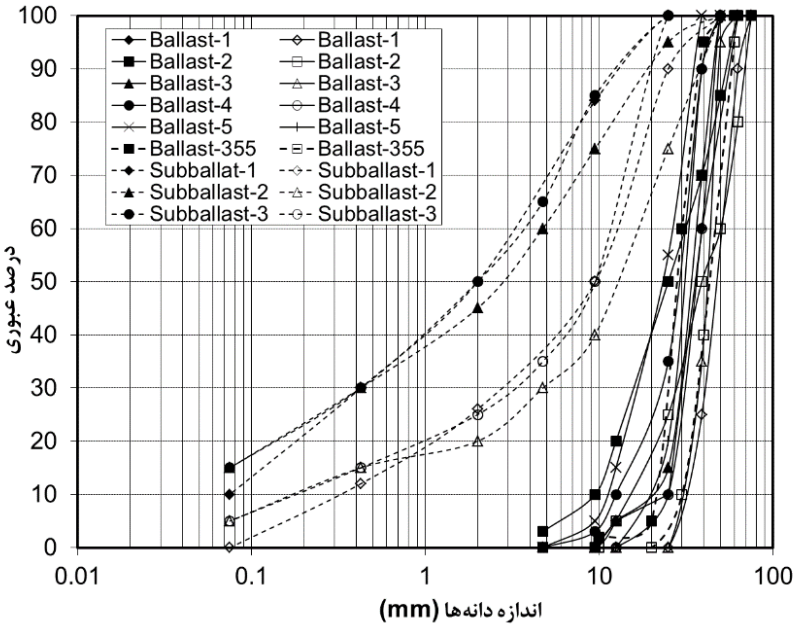
نیروهای وارد بر خطوط راه‌آهن را می‌توان از نظر راستای تاثیر به سه دسته کلی تقسیم بندی کرد:

- نیروهای قائم (از جمله وزن قطار، ضربه ناشی از بریدگی چرخ، ناهمواری ریل یا افتادگی خط)
- نیروهای جانبی (نیروی افقی عمود بر راستای خط مانند نیروی گریز از مرکز، نیروی ناشی از تغییرات دما، نیروی گهواره‌ای، باد و زلزله)

- نیروهای طولی (در راستای طول خط مانند نیروهای ناشی از شتاب‌گیری و ترمز، شیب و فراز، تغییرات دما و آیرودینامیک)

۱-۵- محدوده دانه بندی مصالح بالاست و زیربالاست

محدوده منحنی دانه‌بندی مصالح بالاست و زیربالاست در راه آهن ایران، مطابق با نشریه ۳۰۱ امور نظام فنی و اجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور (۱۳۸۴)، در شکل (۱-۱) ارائه شده‌است. محدوده منحنی‌های دانه‌بندی مصالح بالاست و زیربالاست در جداول (۱-۲) و (۱-۳) ارائه شده است.



شکل (۱-۱) منحنی های دانه‌بندی مصالح بالاست و زیر بالاست مطابق نشریه ۳۰۱ (۱۳۸۴)

۱-۵-۱- محدوده دانه بندی مصالح بالاست سرباره‌ای

طبق نشریه ۳۰۱ اندازه دانه‌های بالاست باید بین ۲۰ تا ۶۰ میلیمتر و از سنگ شکسته، تیزگوشه با سطوح زبر بوده و حالت پولکی و سوزنی نداشته باشد. گروه‌های دانه‌بندی ۱ تا ۵ بالاست مطابق نشریه ۳۰۱ به ترتیب مشابه گروه‌های 24، 25، 3، 4A و 4 آیین نامه (AREMA, 2010) برای خطوط راه‌آهن اصلی است (جدول ۱-۲). از میان گروه‌های بالا، کاربرد دانه‌بندی ۴ بسیار گسترده بوده و گروه ۱ امروزه در خطوط باری سنگین و خطوط جوشکاری شده طویل (CWR[1]) با تراورس‌های بتنی استفاده می‌شود. طبق پیشنهاد کمیته تحقیقات حمل و نقل (TRB[2]) گروه‌های دانه‌بندی ۱ ، ۲ و ۳ (جدول ۱-۲) برای خطوط با تراورس بتنی و گروه‌های دانه‌بندی ۴ و ۵ (جدول ۱-۲) برای خطوط با تراورس چوبی قابل استفاده است. مطابق نشریه ۳۰۱ استفاده از بالاست گروه ۴ برای خطوط راه آهن ایران توصیه می‌شود.

---

[1] Continuous Welded Rail

[2] Transportation Research Board

جدول (۱-۲) درصد وزنی عبوری از الک‌های مختلف برای مصالح بالاست مصرفی در خطوط بالاستی راه‌آهن ایران (نشریه ۳۰۱، ۱۳۸۴)

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

۱-۵-۲-محدوده دانه‌بندی مصالح زیربالاست

مصالح زیربالاست باید ضمن برخورداری از مدول برجهندگی بالا و کرنش پلاستیک پایین برای تحمل بارهای وارده و محدود کردن نشست درحد قابل قبول، می‌بایست قابلیت تخلیه آب ورودی از لایه بالاست و یا لایه بستر را به طرفین خط، دارا باشند. به این منظور لازم است که دانه‌بندی مصالح زیربالاست از نظر اندازه بین مصالح بالاست و بستر قرار گیرد.

همانند زیربالاست سنگی، زیربالاست سرباره‌ای نیز می‌بایست معیارهای فیلتراسیون و زهکشی مطابق روابط (۱-۱) و (۱-۲) میان بالاست (فیلتر)-زیربالاست (خاک محافظت شده) و زیربالاست (فیلتر)-بستر(خاک محافظت شده) را برآورده نماید. نظر به مشخص بودن منحنی دانه‌بندی بستر، در ابتدا لازم است منحنی دانه‌بندی مصالح زیربالاست به عنوان فیلتر مصالح بستر با توجه به معیارهای فوق انتخاب شود. در ادامه با توجه به نقش بالاست به عنوان فیلتر زیربالاست لازم است حد پایین منحنی دانه‌بندی مصالح بالاست ($D_{15(f)}$) به اندازه کافی از حد بالای منحنی دانه‌بندی مصالح زیربالاست ($D_{85(ps)}$) کوچک‌تر باشد (رابطه ۱-۱). همچنین برای زهکشی مناسب آب ورودی به خط بالاستی لازم است حد میانی منحنی دانه‌بندی مصالح بالاست ($D_{50(f)}$) به اندازه کافی از حد میانی منحنی دانه‌بندی مصالح زیربالاست ($D_{50(ps)}$) 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 بالاست، زیربالاست 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.

علاوه بر معیار فوق، می‌توان از معیارهای ارائه شده توسط (Raut and Indraratna,2008)، (Lone et al., 2005)، (Trani, 2009) برای کنترل معیار فیلتر و زهکشی در مصالح زیربالاست و بالاست نیز استفاده نمود. در صورت وجود بستر ریزدانه ممکن است یک لایه زیربالاست نتواند به تنهایی معیارهای بالا را برآورده نماید، در این صورت استفاده از زیربالاست دولایه‌ای با رعایت معیارهای فوق الزامی است. در صورت عدم دسترسی به مصالح مناسب برای لایه زیربالاست درتماس با بستر می توان از مصالح ژئوسنتتیک مانند ژئوتکستایل یا ژئوکامپوزیت به عنوان جایگزین استفاده نمود.

جدول (۱-۳) دانه بندی مجاز از الک‌های مختلف زیربالاست مصرفی خطوط بالاستی راه‌آهن ایران

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

حین ارتعاش قالب استوانه‌ای مخصوص تراکم که با مصالح زیربالاست 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 آلودگی بالاست شود. از این رو توصیه می‌شود مقدار بیشینه ۲۰ درصد ماسه (زیر ۰٫۲۱ میلیمتر) در دانه‌بندی مصالح زیربالاست مطابق نشریه ۳۰۱ به کمتر از ۵ درصد و درصد عبوری از الک شماره ۲۰۰، به کمتر از ۲ درصد محدود شود.

۱-۶- مشخصات هندسی لایه‌های بالاست و زیربالاست

مهمترین مشخصه‌های هندسی لایه‌های بالاست و زیربالاست که بر عملکرد خط آهن به عنوان یک سازه تاثیرگذارند عبارتند از: ضخامت لایه‌های بالا ست و زیربالا ست، عرض شانه‌ها و شیب طرفین لایه بالا ست. مجموع ضخامت لایه‌های بالا ست و زیربالا ست باید تنش‌های قائم وارد بر بستر را تا حد مجاز قابل تحمل تو سط بستر(برای عدم بروز گسیختگی بر شی و نیز برای کاهش ن ش ست‌ها) کاهش دهد. همچنین ضخامت زیربالا ست باید به گونه ای انتخاب شود تا از نفوذ مصالح ریزدانه بستر به درون لایه بالا ست جلوگیری کند. AREMA و نشریه ۳۰۱ برای خطوط اصلی با عرض استاندارد کمینه ضخامت لایه بالا ست را ۳۰ سانتی‌متر پیشنهاد می‌کنند. لیکن بهتر ا ست برای بالا بردن خا صیت ارتجاعی خط دارای تراورس بتنی، حداقل ضخامت بالاست در زیر تراورس ۳۵cm منظور شود.

از سوی دیگر برای تامین پایداری جانبی خط در قوسها، نباید ضخامت بالاست در زیر تراورس از ۵۰ سانتی‌متر تجاوز کند (نشریه۳۰۱ و نشریه ۳۹۴). براساس AREMA کمینه ضخامت زیربالاست برابر ۱۵ سانتی‌متر برای جداسازی لایه بالاست از بستر ضروری است. همچنین براساس AREMA شیب عرضی این لایه نباید از ۲٫۵ درصد کمتر و از ۴درصد بیشتر باشد. در صورتیکه نشریه ۳۰۱ این شیب را ۳ درصد پیشنهاد می‌کند. AREMA و نشریه ۳۰۱ در خطوط راه‌آهن با عرض استاندارد، کمینه عرض شانه بالاست را به ترتیب ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر توصیه کرده‌اند. AREMA و نشریه ۳۰۱ مقدار شیب طرفین بالاست را به ترتیب ۱:۲ (۱ قائم و۲ افقی) و ۱:۱/۵ توصیه می‌کنند.

فصل ۲

مشخصات بالاست و زیربالاست

سرباره‌ای و معیارهای پذیرش

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 بالاست و زیربالاست ارائه شده است. در ادامه، ملاحظات مربوط به ترکیب شیمیایی سرباره‌ها، کنترل میزان انبساط مصالح، ترکیب شیمیایی شیرابه سرباره‌ها و معیار حداقل مقاومت الکتریکی 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 فازهای آهندار از وزن مخصوص نسبتاً بالایی برخوردار است، از آنجایی‌که 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. حدود ۷۰ درصد فولاد ایران از طریق EAF و حدود ۳۰ درصد از طریق BOF تولید می‌شود.

سرباره کوره‌های قوس الکتریکی حاصل شارژ آهک و دولومیت به منظور تصفیه و کنترل فرآیند فولادسازی و ناخالصی‌های موجود[4] در ترکیب آهن اسفنجی مصرفی است. 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 می‌گردد. سرباره پس از تخلیه در هوا، معمولاً به کمک پاشش آب خنک شده و سپس به محل‌های انباشت (دپو) منتقل می‌شود.

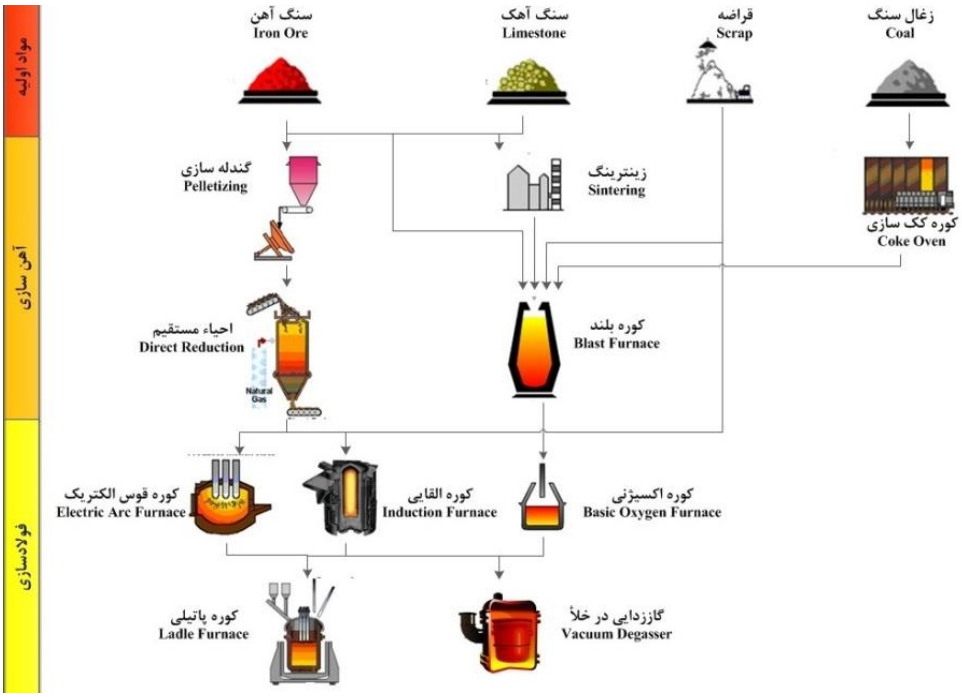
---

[1] Blast Furnace

[2] Basic Oxygen Furnace

[3] Electric Arc Furnace

[4] Gangue



شکل (۲-۱) فرآیندهای تولید آهن و فولاد و انواع سرباره تولید شده (قاسم زاده، ۱۳۹۲)

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 بالاست و زیربالاست خطوط راه‌آهن 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 بالاست و زیربالاست، این مصالح باید خرد شده و دانه‌بندی گردد.

۲-۴- آزمایشهای کنترل کیفیت و معیارهای پذیرش بالاست و زیربالاست سرباره‌ای

خلاصه آزمایش‌های کنترل کیفی مصالح زیربالاست و بالاست به همراه معیارهای پذیرش به ترتیب در جداول (۲-۱) و (۲-۲) ارائه شده است. پس از فرآوری سرباره به صورت بالاست و زیربالاست لازم است طبق نشریه ۳۰۱ از هر ۱۸۰ تن بالاست 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، تعیین سائیدگی، 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 براساس این راهنما، باید گواهینامه فنی تایید محصول را از مراجع معتبر اخذ نمایند. چنانچه نتایج کنترل کیفیت زیربالاست و بالاست سرباره‌ای مطابق جداول (۲-۱) و (۲-۲) در آستانه پذیرش مقادیر مجاز 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.

جدول (۲-۱) آزمون های کنترل کیفیت و معیارهای پذیرش مصالح زیربالاست سرباره‌ای

نوع آزمایش	مقدار مجاز	روش آزمایش
آزمایش دانه بندی	مطابق جدول (۱-۳)	ASTM C136
درصد مصالح ریزتر از الک شماره ۲۰۰	≤ ۲	ASTM C117
درصد مصالح ریزتر از الک شماره ۷۰	≤ ۵	ASTM C117
CBR	مطابق جدول(۳-۷)	بند ۳-۲-۱
درصد سایش لس‌آنجلس برای ۱۰۰۰ دور	≤ ۲۵	ASTM C131
درصد سایش میکرودوال	≤ ۱۸	ASTM D7428
pH	≤ ۱۱٫۵	ASTM G51
درصد آهک نشکفته	≤ ۳	ASSHTO T219
درصد انبساط حجمی	≤ ۰٫۵	ASTM D4792
غلظت آلاینده ها و مواد سمی در شیرابه	مطابق جدول (۲-۴)	EPA METHOD 1311

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 می‌تواند تغییر کند. محدوده ترکیبات شیمیایی سرباره‌های آهن و فولاد بسته به روش تولید در جدول (۲-۳) نشان داده شده است. مقادیر وزنی ترکیبات شیمیایی موجود در مصالح از طریق تحلیل اجزا توسط فلورانس اشعه ایکس[1] (XRF) قابل تعیین است.

به منظور استفاده از سرباره‌های آهن و فولاد به عنوان بالاست و زیربالاست در خطوط ریلی 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.

[1] X-ray Fluorescence

جدول (۲-۲) آزمون‌های کنترل کیفیت و معیارهای پذیرش مصالح بالاست سرباره‌ای

نوع آزمایش	مقدار مجاز			روش آزمایش
	سرباره آهن	سرباره فولاد		
	(BF)	(BOF)	(EAF)	
آزمایش دانه بندی	مطابق جدول (۱-۲)			ASTM C136
درصد مصالح ریزتر از الک شماره ۲۰۰	≤ ۱	≤ ۱	≤ ۱	ASTM C117
وزن مخصوص	≥ ۲٫۳	≥ ۲/۴	≥ ۲/۹	ASTM C127
درصد جذب آب	≤ ۵	≤ ۲	≤ ۲	ASTM C127
درصد کلوخه‌های رسی و سنگدانه‌های شکننده	≤ ۰٫۵	≤ ۰/۵	≤ ۰/۵	ASTM C142
درصد سایش لس‌آنجلس برای ۱۰۰۰ دور	≤ ۴۰	≤ ۴۰	≤ ۳۰	ASTM C535 ASTM C131
درصد افت وزنی در برابر سولفات سدیم برای ۵ دوره متوالی خشک و تر شدن	≤ ۵	≤ ۵	≤ ۵	ASTM C88
درصد افت وزنی در اثر ذوب و یخ (۱۲ دوره ذوب و یخ)	≤ ۸	≤ ۸	≤ ۸	ASSHTO T103
درصد تطویل و تورق	≤ ۵	≤ ۵	≤ ۵	ASTM D4791
درصد سایش میکرودوال	≤ ۲۲	≤ ۲۲	≤ ۱۸	ASTM D6928 ASTM D7428
pH	≤ ۱۱/۵	≤ ۱۱/۵	≤ ۱۱٫۵	ASTM G51
درصد آهک نشکفته	≤ ۴	≤ ۴	≤ ۴	ASSHTO T219
درصد انبساط حجمی	≤ ۰٫۵	≤ ۰٫۵	≤ ۰/۵	ASTM D4792
غلظت آلاینده ها و مواد سمی در شیرابه	مطابق جدول (۲-۴)			EPA METHOD 1311

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 جابه‌جایی‌های نابرابر در لایه‌های روسازی شود. از این رو لازم است بیشینه مقدار آهک آزاد در سرباره‌ها برای به کارگیری به عنوان لایه بالاست و زیربالاست به ترتیب به ۴ و 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 مطابق روش متداول پیشنهادی توسط (ASTM D4792, 2013) ارزیابی شود. براین اساس لازم است میزان انبساط مصالح سرباره‌ای در اثر غوطه‌وری ۷ روزه در آب ۷۰ درجه سانتی‌گراد کمتر از ۰٫۵ درصد باشد.

جدول (۲-۳) مشخصات شیمیایی سرباره های آهن و فولاد

اجزای تشکیل‌دهنده	مقدار ترکیب (درصد)		
	سرباره آهن	سرباره فولاد	
	(BF)	(BOF)	(EAF)
CaO	۳۲-۴۱	۲۶-۵۷	۱۷-۴۰
گروه FeO	۰-۴	۲۰-۳۰	۲۱-۴۵
SiO_2	۳۱-۳۹	۹-۱۸	۱۱-۲۰
MnO	۱-۲/۵	۴-۵	۰/۲-۵/۷
×MgO	۶-۱۲	۱-۷/۵	۶-۱۲
Al_2O_3	۵-۱۵	۰/۵- ۸	۳- ۸
P_2O_5	--	۱/۲-۵	< ۲/۵
TiO_2	۳-۵	۰/۵-۳/۵	< ۲/۵
V_2O_5	--	۰/۵-۳	< ۲
SO_3	۰-۳	<۱	< ۲/۵
K_2O	< ۱/۵	< ۰/۵	<۱
Na_2O	<۱	< ۰/۵	<۱
درصد افت وزنی در اثر حرارت LOI	< ۱۰	< ۱۵	< ۱۵

×برای تعیین منیزیم اکسید (MgO) آزمایش می‌بایست مطابق EN 196-2 انجام و نتایج آن ارائه شود. اگر میزان منیزیم اکسید 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

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

با هدف ارزیابی تاثیرات زیست‌محیطی استفاده از سرباره‌ها به عنوان مصالح بالاست و زیربالاست راه‌آهن، 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 ریل خطوط راه‌آهن موثر باشد. همچنین pH بالا می‌تواند از منظر زیست محیطی، زندگی آبزیان را در نهرها و آبروهای مجاور خطوط ریلی به خطر اندازد. برای ارزیابی غلظت آلاینده‌ها و مواد سمی در شیرابه سرباره فولاد، لازم است شیرابه‌گیری و اندازه‌گیری غلظت مواد سمی[۱] (TCLP) مطابق EPA Method 1311 انجام شود. در جدول (۲-۴) میزان غلظت مجاز آلاینده‌ها در شیرابه سرباره‌های فولاد فولاد ارائه شده است.

[۱] Toxicity characteristic Leaching Procedure

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

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

۲-۶- مقاومت الکتریکی سرباره

تامین مقاومت الکتریکی کافی توسط مصالح بالاستی به منظور کنترل خوردگی ریل و همچنین برقراری ارتباطات مدار خط ایمن، ضروری ا ست. مقدار مقاومت الکتریکی به روش ۴ الکترود ورنر مطابق ASTM G57 اندازه‌گیری و تعیین می شود. کمینه مقاومت الکتریکی در یک خط بالاستی معمولی مطابق پیشنهاد انجمن ملی سرباره آمریکا، باید حدود ۲ اهم-کیلومتر باشد. این مقدار توسط اداره خط و بهره‌برداری استرالیا (ARTC) ۱/۵ اهم-کیلومتر پیشنهاد شده است.

فصل ۳

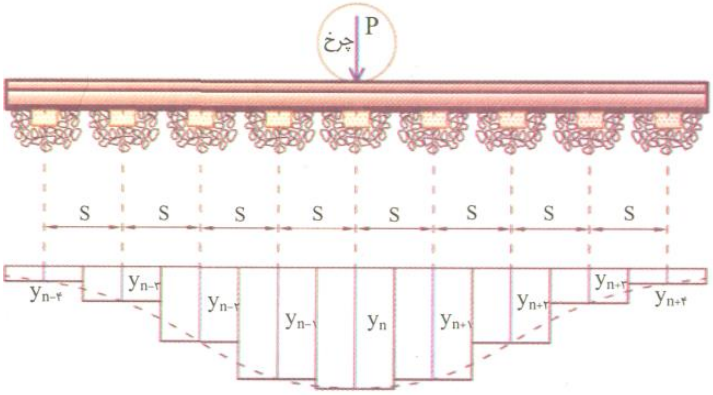
ضوابط طراحی، اجرا، تعمیر و نگهداری خط ریلی با بالاست سرباره‌ای

۳-۱- طراحی

۳-۱-۱- سختی بستر ریل

سختی بستر ریل برابر است با مقدار نیروی لازم برای ایجاد تغییرمکان واحد در بستر تکیه‌گاهی ریل که بر حسب کیلونیوتن بر میلی‌متر تعریف می‌شود. با اعمال بار استاتیکی یک چرخ منفرد (P_s) به ریل، تغییرمکان بوجود آمده در محل هر تراورس اندازه‌گیری شده و کل تغییرمکان‌های قائم بستر تکیه‌گاهی ریل با استفاده از رابطه (۳-۱) محاسبه می‌شود. مطابق شکل (۳-۱)، معمولاً ۹ عدد تراورس یا ۳ متر از هر طرف محل اعمال بار، مبنای سنجش سختی بستر ریل، در نظر گرفته می‌شود.

$$y = \sum_{m=0}^{m=\infty} y_{n\pm m} \qquad (۳-۱)$$



شکل (۳-۱) استفاده از تغییرمکان‌های ناپیوسته در محاسبه مدول بستر ریل (صادقی، ۱۳۸۷)

در رابطه فوق $y_{n\pm m}$ تغییرمکان قائم ریل در تراورس m ام در اثر اعمال بار چرخ به تراورس n ام می‌باشد. با تقسیم نیروی اعمال شده (P_s) بر کل تغییرمکان بوجود آمده در بستر تکیه‌گاهی ریل (y) سختی بستر ریل بدست می‌آید:

$$k_s = \frac{P_s}{y} \qquad (۳-۲)$$

سختی بستر ریل در طول خط متغیر است لیکن تغییرات آن در طول خط باید به حدی باشد که ضمن حفظ تغییرشکل‌ها و تنش‌های اجزاء خط در حد مجاز، موجب کاهش طول عمر اجزاء خط و افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری نشود. سختی بستر ریل بر میزان گسترش بار چرخ در طول خط موثر است. سختی کم، منجر به توزیع گسترده‌تر بار چرخ بر روی ریل، گسترش حوضچه تغییرشکل و در نتیجه کاهش تنش تماسی بین تراورس و بالاست می‌شود. افزایش تغییرشکل ریل، ضمن ایجاد خستگی در ریل و پابندها، منجر به خرابی بالاست (سایش و خردشدن دانه‌ها)، گل‌زدگی، تغییرشکل‌های ماندگار و در مجموع افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری خط می‌شود. در خط خیلی سخت، با کاهش توزیع بار چرخ بر روی ریل، تنش تماسی وارده به تراورس و بالاست افزایش می‌یابد. در زیرسازی‌های ضعیف، افزایش تنش تماسی در زیر

تراورس منجر به افزایش نشست در محل تراورس‌ها و آسیب اجزاء خط نظیر ریل‌ها و پابندها می‌شود. درصورتی که سختی بالای خط باعث ایجاد مشکلاتی برای خط و ابنیه فنی شود، می‌توان با استفاده از فرش بالاست[1]، صفحات زیر تراورس و اختلاط خرده لاستیک (حداکثر ۵٪ وزنی بالاست) با بالاست، نسبت به اصلاح آن اقدام نمود.

(Esveld, 2001) مقدار بهینه سختی خط بالاستی را برابر با ۵۵ کیلونیوتن بر میلیمتر پیشنهاد می‌دهد. این در حالی است که (Lichtberger 2005) محدوده سختی بهینه خط را بین ۵۰ تا ۱۰۰ کیلونیوتن بر میلیمتر معرفی می‌نماید. (Hasan, 2018) محدوده مناسب برای سختی خط بالاستی را بین ۴۵ تا ۸۹ کیلونیوتن بر میلیمتر پیشنهاد نموده است. از سوی دیگر (Pita et al., 2004) براساس هزینه تعمیر و نگهداری و میزان مصرف انرژی قطارها، محدوده ۷۰ تا ۸۰ کیلونیوتن بر میلیمتر را مناسب می‌دانند. بر این اساس، سختی خط بالاستی در محدوده ۵۰ تا ۹۰ کیلونیوتن بر میلیمتر برای مقاصد کاربردی مناسب به نظر می‌رسد.

برای اندازه‌گیری سختی خط روش‌های مختلف میدانی و میدانی-نظری قابل استفاده است. در عین حال می‌توان سختی خط را بصورت گسسته و یا به صورت پیوسته در شرایط میدانی اندازه‌گیری کرد. در میان روش‌های اندازه‌گیری میدانی گسسته می‌توان به روش بارگذاری تک محوره و از میان روش‌های اندازه‌گیری میدانی پیوسته می‌توان به روش‌های آکادمی علوم راه‌آهن چین (CARS[2])، روش دانشگاه نبراسکا (UNL[3])، روش دانشگاه دلف هلند (ZOYON[4]) و روش مرکز فناوری حمل و نقل آمریکا (TTCI[5]) اشاره نمود. در میان روش‌های میدانی-نظری می‌توان به روش هرمی اشاره کرد که در آن به جای سختی خط، سختی بستر ریل محاسبه می‌شود.

۳-۱-۱-۱- تخمین سختی بستر ریل بر اساس مدل هرمی

(Ahlbeck et al., 1978) با استفاده از مدل هرمی، تخمینی از مقادیر سختی اجزای خط آهن و مدول بستر ریل را ارائه کردند. روش هرمی روشی نظری است که مقدار سختی سیستم در آن، براساس مدل توزیع تنش در عمق و مقادیر مشخصات مکانیکی لایه‌های زیرسازی برآورد می‌شود. براساس این روش تنش ناشی از اعمال بار، بر لایه های بالاست و زیربالاست به صورت خطی و با شیب مشخص توزیع می‌شود. مطابق شکل (۳-۲) در این مدل هر یک از اجزای تکیه‌گاهی ریل با یک فنر مدلسازی می‌شوند.

---

[1] Under Ballast Mat

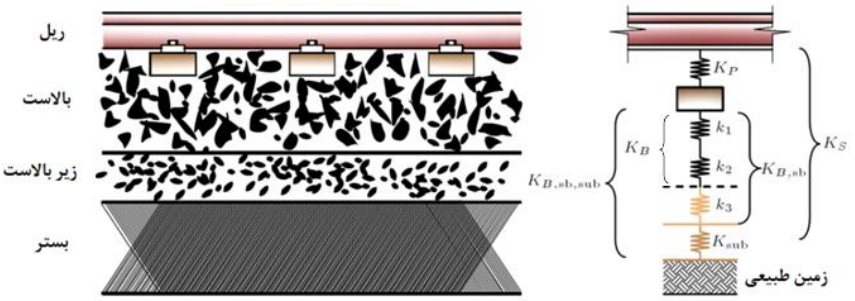
[2] China Academy of Railway Sciences

[3] University of Nebraska at Lincoln

[4] ZOYON Technology Co., Ltd of Wuhan University and Delft University of Technology

[5] Transportation Technology Center Inc.

در شکل (۳-۲) k_P سختی صفحه فولادی یا لاستیکی زیر ریل،k_1 و k_2 به ترتیب سختی لایه‌های بالایی[1] و پایینی بالاست[2]، k_3 سختی لایه زیربالاست و k_{sub} برابر با سختی بستر می‌باشد. جزئیات نحوه برآورد سختی هر یک لایه‌های فوق الاشاره در پیوست ب ارائه شده است.



شکل (۳-۲) مجموعه فنرهای خطی در مدل هرمی (Esmaeili et al., 2015)

مقدار زاویه اصطکاک داخلی بسیج شده لایه‌های بالاست و زیربالاست از رابطه (۳-۳) محاسبه می‌شود:

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

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.

در جدول (۳-۱) محدوده زاویه اصطکاک داخلی و بسیج شده برای مصالح بالاست و زیربالاست سرباره فولاد ارائه شده است.

جدول (۳-۱) محدوده مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و بسیج شده برای مصالح بالاست و زیربالاست سرباره‌ای(Li et al., 2016)

مشخصات مصالح	زاویه اصطکاک داخلی ($\emptyset$) (درجه)	محدوده زاویه اصطکاک بسیج شده ($\emptyset_m$) (درجه)
بالاست سرباره‌ای	۵۵-۶۵	۳۵-۴۵
زیربالاست سرباره‌ای	۴۵-۶۰	۲۵-۴۰

پس از برآورد سختی هر یک از لایه‌ها مطابق پیوست "ب"، مقدار سختی بستر ریل k_s از رابطه (۳-۴) محاسبه می‌شود.

$$\frac{1}{k_s} = \frac{1}{k_p} + \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \frac{1}{k_{sub}} \qquad (۳-۴)$$

۳-۱-۲- مدول بستر ریل

[1] Top-Ballast
[2] Bottom-Ballast

مدول بستر ریل برابر است با نیروی تکیه‌گاهی وارد بر واحد طول ریل، به ازای تغییرمکان واحد ریل در راستای قائم که برحسب نیوتن بر میلیمتر مربع یا مگاپاسکال تعریف می‌شود. مدول بستر ریل شاخصی از پاسخ سیستم سازه‌ای و نشانه‌ای از کیفیت خط راه‌آهن می‌باشد و استفاده از آن در تحلیل و طراحی خطوط راه‌آهن با اهمیت است. به طور مثال، مدول بستر ریل در تعیین مقادیر تغییرمکان قائم و لنگر خمشی ریل در روش تحلیل تیر بر روی بستر ارتجاعی کاربرد دارد. از تقسیم سختی بستر ریل k_s به فاصله بین تراورس‌ها S، مدول بستر ریل u بدست می‌آید.

$$u = \frac{k_s}{S} \qquad (۵-۳)$$

حدود مقادیر مدول بستر طبق (AREMA, 2010) بین ۳٫۵ تا ۶۲ مگاپاسکال می‌باشد. در جدول (۳-۲) مقادیر نمونه مدول بستر ریل در شرایط مختلف بر اساس (Hay, 1982) ارائه شده است. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد، مقادیر مدول بستر خط می‌تواند از یک تراورس به تراورس بعدی به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر نماید. مقادیر مدول بستر ریل برای پنج نوع خط آهن مختلف، مطابق (Ahlf, 1975) در جدول (۳-۳) ارائه شده است.

جدول (۳-۲) مقادیر نمونه مدول بستر ریل در شرایط مختلف (اصلاح شده (Hay, 1982)

جرم واحد طول ریل (kg/m)	ابعاد هندسی تراورس (mm)	شرایط خط و مصالح بالاست	مدول بستر ریل MPa
۴۲	۱۷۸×۲۲۹×۲۵۹۰	۱۵۰mm بالاست از جنس سرباره ریزدانه نامرغوب بر روی بستری از جنس مخلوط شن، ماسه و رس	۳٫۷
۴۲	۱۷۸×۲۲۹×۲۵۹۰	۱۵۰mm بالاست از جنس سرباره ریزدانه نسبتاً خوب بر روی بستری از جنس مخلوط شن، ماسه و رس	۵٫۲
۴۲	۱۵۲×۲۰۳×۲۴۴۰	۱۵۰mm بالاست از جنس سنگ آهک بر روی بستری از جنس مخلوط شن، ماسه و رس در شرایط خوب پیش از زیرکوبی	۶٫۷
۴۲	۱۵۲×۲۰۳×۲۴۴۰	۳۰۰mm بالاست از جنس سنگ آهک بر روی بستری از جنس مخلوط شن، ماسه و رس در شرایط خوب پس از زیرکوبی	۷٫۵
۴۲	۱۷۸×۲۲۹×۲۴۴۰	۳۰۰mm بالاست از جنس سنگ آهک بر روی بستری از جنس مخلوط شن، ماسه و رس در شرایط خوب پس از زیرکوبی	۷٫۳
۴۲	۱۷۸×۲۲۹×۲۵۹۰	۶۰۰mm بالاست از جنس سنگ آهک بر روی بستری از جنس مخلوط شن، ماسه و رس	۸٫۳
۶۴	۱۷۸×۲۲۹×۲۵۹۰	۶۰۰mm بالاست از جنس شن به علاوه ۲۰۰ mmسنگ آهک سنگین بر روی لایه بستر خوب متراکم شده	۲۰٫۵
۵۵	۱۷۸×۲۲۹×۲۴۴۰	بالاست از جنس سنگ چخماق بر روی لایه بستر کاملاً پایدار	۲۰
۵۵	۱۷۸×۲۲۹×۲۴۴۰	بالاست از جنس سنگ آهک بر روی لایه بستر کاملاً پایدار	۳۵٫۴

بر اساس مقادیر ارائه شده در جداول، مدول بستر ریل برای بالاست با ضخامت ۱۵۰ میلیمتر برای وضعیت کیفی مصالح بالاست ضعیف (مثل سرباره)، نسبتاً خوب و سالم، به ترتیب برابر با ۷، ۱۴ و ۲۱ مگاپاسکال پیشنهاد می‌شود. به منظور حصول اطمینان از عملکرد مناسب خط آهن در زیر بار ترافیک محققینی مانند (Selig and Waters, 1994) پیشنهاد دادند که حداقل مقدار مدول بستر ریل باید برابر با ۲۸ مگاپاسکال باشد. لذا درصورتی که از پروفیل ریل UIC-60 استفاده شود، این مقدار معادل با سختی خط ۵۵ کیلونیوتن بر میلیمتر به ازای هر ریل است. محدوده مدول خط تعریف شده توسط (Esveld, 2001) به ترتیب برای خط نرم (ضعیف) و خط سخت (خوب) برابر با ۶ و ۹۰ مگاپاسکال می‌باشد (جدول ۳-۴).

جدول (۳-۳) مقادیر مدول بستر ریل برای پنج نوع خط آهن مختلف (Ahlf, 1975)

وضعیت کیفی تراورس	ضخامت لایه بالاست (mm)	وضعیت کیفی مصالح بالاست	وضعیت کیفی لایه بستر	مدول بستر ریل (MPa)
ضعیف	۱۵۰	نسبتاً ضعیف و آلوده به گل	سست و بد زهکشی شده	۶٫۹
نسبتاً خوب	۱۵۰	نسبتاً خوب و بدون گل	نیمه متراکم و نسبتاً زهکشی شده	۱۳٫۸
خوب	۱۵۰	سنگ شکسته سالم و بدون گل	نیمه متراکم و نسبتاً زهکشی شده	۲۰٫۷
خوب	۳۰۰	سنگ شکسته سالم و بدون گل	نیمه متراکم و نسبتاً زهکشی شده	۲۷٫۶
خوب	۴۵۰	سنگ شکسته سالم و تمیز	کاملاً متراکم و خوب زهکشی شده	۳۴٫۵

جدول (۳-۴) وضعیت کیفی خط و مدول بستر ریل(Esveld, 2001)

وضعیت کیفی خط	مدول بستر ریل (MPa)
خیلی سخت	۹۴ <
سخت /خیلی خوب	۳۴-۴۹
خوب	۲۳-۳۲
بد/ نرم	۶-۸
خیلی ضعیف/خیلی نرم	۶ >

مطابق اندازه‌گیری‌های انجام شده به روش افت و خیزسنج ضربه‌ای (FWD[1]) در چهار سایت مختلف در انگلستان، محدوده مطلوب تغییرات مدول بستر ریل بین ۱۰ تا ۵۰ مگاپاسکال است (Powrie and Louis, 2016).

بررسی‌های میدانی انجام شده توسط (Esmaeili et al, 2017) نشان داده است که در مصالح سرباره فولاد EAF (فولاد مبارکه) و بالاست سنگی آهکی مدول بستر ریل به ترتیب برابر با ۱۰۰ و ۶۱ مگا پاسکال است. لذا برای شرایط مشابه از

[1] Falling Weight Deflectmeter

نظر زیرسازه و بستر، مدول بستر ریل با بالاست سرباره‌ای ۱٫۶۴ برابر بیشتر از بالاست آهکی است. هرچند در عمل، ریل‌ها به صورت تیر بر روی تکیه گاه‌های مجزا هستند اما براساس نظر (Ahlbeck et al., 1978) تا زمانی که فاصله محور تا محور تراورس‌ها از طول مشخصه (L) (رابطه ۳-۶) بیشتر نباشد، می‌توان با تقریب مناسبی از نتایج مدل تیر بر روی بستر ارتجاعی پیوسته به جای نتایج مدل تیر بر روی تکیه گاه های مجزا استفاده نمود.

$$L = \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt[4]{\frac{4EI}{u}} \qquad (۶-۳)$$

که در آن:

EI: سختی خمشی ریل برحسب کیلونیوتن در میلیمتر مربع

u: مدول بستر ریل برحسب کیلونیوتن بر میلیمتر مربع

برای اندازه‌گیری مدول بستر ریل روش‌های مختلف میدانی و نظری و میدانی-نظری قابل استفاده است. از جمله روش‌های محاسبه و اندازه‌گیری مدول بستر ریل می‌توان به روش kerr روش محاسبه حوضچه تغییر شکل، روش ثابت ارتجاعی، روش زیمرمن و روش آرما و کلارک اشاره نمود.

همچنین با مدل‌سازی عددی می‌توان بستر ریل را به صورت لایه‌های ارتجاعی در نظر گرفت و از طریق اعمال بار بر ریل و محاسبه خیز آن، نسبت به تعیین سختی و مدول بستر ریل اقدام کرد. در این شرایط، محاسبه سختی یا مدول برجهندگی مصالح خاکی و سنگی زیر ریل از طریق اندازه‌گیری‌های میدانی به روش‌هایی مانند روش افت و خیزسنج ضربه‌ای (FWD)، روش تحلیل طیفی موج‌های سطحی (SASW[1])، روش انکسار لرزه‌ای (SRT[2]) و روش پاسخ ضربه (IR[3]) اشاره نمود.

۳-۱-۲-۱- تعیین مدول بستر ریل به روش تالبوت اصلاح شده

این روش توسط انجمن مهندسین راه‌آهن ایالات‌متحده آمریکا به سرپرستی آقای تالبوت تدوین شد و توسعه روشی نوین برای اندازه‌گیری و تعیین مدول بستر ریل است. در روش تالبوت با استفاده از تعادل نیروها در راستای قائم، مدول بستر ریل براساس نسبت مجموع تمامی بارهای چرخ وارد بر خط به مساحت محصور در بین منحنی‌های تغییرشکل ریل قبل و پس از بارگذاری محاسبه می‌شود. چنانچه مجموع بار تمامی چرخ‌های واگن با $\sum p$ و فشار عکس‌العمل و رو به بالای بستر تکیه‌گاهی ریل با $p(x)$ نشان داده شود، از تعادل نیروها در راستای قائم، می‌توان نوشت:

$$\sum p - \int_{-\infty}^{+\infty} p(x)dx = 0 \qquad (۶-۳)$$

---

[1] Spectral Analysis of Surface Waves

[2] Seismic Refraction Tomography

[3] Impulse Response

با فرض یکسان بودن مقدار مدول بستر ریل در تمامی نقاط خط آهن، فشار عکس‌العمل $p(x)$ برابر است با $u.y(x)$ و رابطه (۳-۶) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\sum p - u\int_{-\infty}^{+\infty} y(x)dx = 0 \qquad (۳-۷)$$

با حل رابطه جدید مقدار مدول بستر مطابق رابطه (۳-۸) محاسبه می‌شود.

$$u = \frac{\sum p}{\int_{-\infty}^{+\infty} y(x)dx} \qquad (۳-۸)$$

در رابطه (۳-۸) عبارت انتگرالی در مخرج کسر، مساحت محصور در بین منحنی‌های شکل تغییریافته ریل پس از اعمال بار و وضعیت مستقیم ریل پیش از قرارگیری واگن بارگذاری بر روی آن است. پارامتر $y(x)$ مقادیر تغییر مکان قائم ریل را نشان می‌دهد که در محل هر یک از تراورس‌ها اندازه‌گیری شده است.

بروز خرابی‌هایی همچون لقی پیچ اتصال ریل به تراورس و یا وجود فضای خالی بین تراورس و لایه بالاست به دلیل عدم تراکم کافی مصالح بالاست، همچنین کیفیت پایین انجام عملیات زیرکوبی تراورس‌ها و امکان جابجایی قائم و غیرمجاز ریل نسبت به تراورس، موجب می‌شود که هر یک از اجزای خط (به ویژه ریل و تراورس) بتواند در راستای قائم، به طور آزادانه و بدون ایجاد تغییرمکان در تکیه‌گاه مستقیم زیر خود (ریل نسبت به تراورس و تراورس نسبت به لایه بالاست) جابجا شود. چنین پدیده‌ای، اندازه‌گیری مدول بستر ریل را با خطا همراه می‌سازد. برای اصلاح این موضوع، روش تالبوت اصلاح شده پیشنهاد شده است. در این روش بارگذاری به‌صورت دومرحله‌ای و با استفاده از یک واگن سبک (واگن خالی) و یک واگن سنگین (واگن پر)، انجام می‌شود. در نتیجه برای محاسبه مدول بستر ریل از تفاضل مقادیر تغییر مکان ناشی از بارگذاری سبک و سنگین مطابق رابطه (۳-۹) استفاده می‌شود.

$$u = \frac{\sum(P_h - P_i)}{s.\sum_{i=1}^{m}(y_i^h - y_i^l)} \qquad (۳-۹)$$

در رابطه فوق مخرج کسر مساحت ناحیه هاشور خورده در شکل (۳-۳) می‌باشد، سایر پارامترهای موجود در این رابطه، به شرح زیر تعریف می‌شوند.

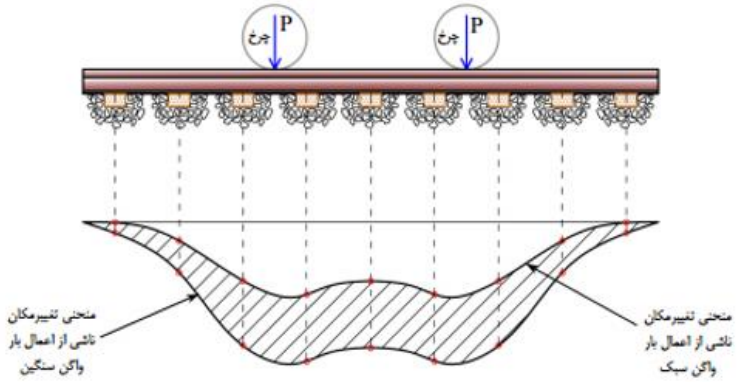
P_h : بار چرخ واگن سنگین بر حسب کیلونیوتن

P_i : بار چرخ واگن سبک بر حسب کیلونیوتن

S : فاصله مرکز به مرکز تراورس‌ها بر حسب میلیمتر

y_i^h : تغییر مکان تراورس i ام در اثر اعمال بار واگن سنگین بر حسب میلیمتر

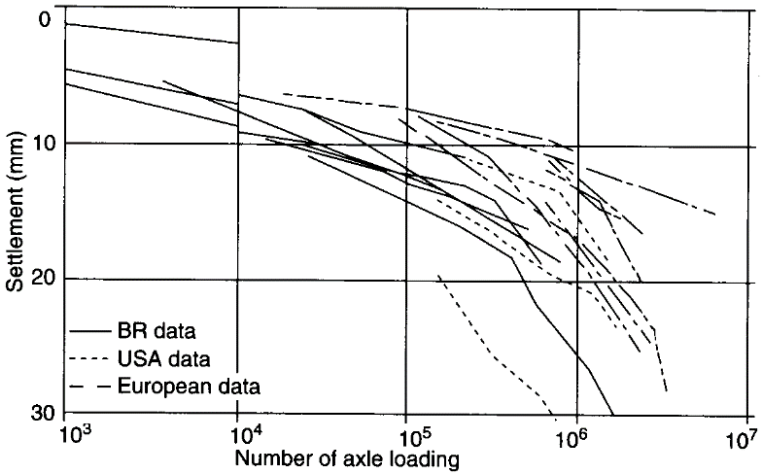
y_i^l : تغییر مکان تراورس i ام در اثر اعمال بار واگن سبک بر حسب میلیمتر



شکل (۳-۳) تغییرمکان مورد استفاده برای محاسبه مدول بستر ریل مطابق روش تالبوت اصلاح شده (صادقی ۱۳۸۷)

۳-۱-۳- معیار تغییر مکان قائم خط و ریل

با توجه به اندازه‌گیری‌های صحرایی در راه‌آهن انگلستان، آمریکا و اروپا (شکل ۳-۴)، بسته به تعداد بار محور عبوری، نشست خط راه‌آهن بالاستی عموماً بین ۱۰ تا ۳۰ میلیمتر متغیر است که می‌توان حدود ۵۰ درصد آن را ناشی از نشست لایه بالاست دانست. به هنگام استفاده از مصالح بالاست و زیربالاست سرباره‌ای، ممکن است در ماه‌های ابتدایی بهره‌برداری، نشست کلی خط و رسیدن به مقدار حدی ۳۰ میلیمتر در زمان کوتاه‌تری نسبت به بالاست سنگی رخ دهد که این موضوع توجه به زیرکوبی[1] اولیه پس از بهره‌برداری از خط و امکان تزریق بالاست[2] زیر تراورس برای جبران نشست‌ها را برای حفظ ایمنی ضروری می‌سازد.



شکل (۳-۴) مقادیر نشست خط آهن در مناطق مختلف جهان (Shenton, 1984)

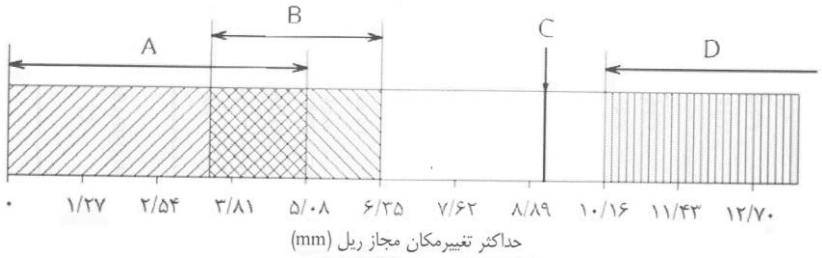
از سوی دیگر هنگام عبور قطار، تغییرشکل ارتجاعی ریل تحت اثر بار چرخ با لحاظ مسائل پایداری و دوام می‌تواند بین صفر تا ۱۲٫۷ میلیمتر متغییر باشد. در شکل (۳-۵) حدود تغییرشکل‌های قائم براساس توانایی خط در تامین مقاصد طراحی، با صرفنظر از آزادی حرکت و جابه‌جایی بین ریل و صفحه زیرریل و یا صفحه زیرریل و تراورس، نشان داده شده

---

[1] Tamping

[2] Ballast Blowing

است. از سوی دیگر AREMA دو مقدار حدی کمینه (۳٫۱۷۵ میلیمتر) و بیشینه (۶٫۳۵ میلیمتر) را برای تغییرمکان قائم ریل، مجاز دانسته است. توجه به تغییر سختی بالاست سرباره‌ای در مقایسه با بالاست سنگی می‌تواند تاثیراتی در سختی کل خط و به طبع آن تغییرمکان ارتجاعی ریل داشته باشد که این موضوع می‌بایست در مباحث مطرح شده در بخش ۴-۱ مدنظر قرار داده شود.



A: محدوده تغییرمکان برای خطی که مدت نامعلومی از بهره برداری آن می‌گذرد.

B: بیشینه مجاز تغییرمکان خطوطی با سازه سنگین که به طور همزمان قادر به انعطاف‌پذیری و سختی مورد نیاز است.

C: حد مجاز تغییرمکان خطوط راه‌آهنی که در آن از ریل‌های نسبتاً سبک (سبک‌تر از ۵۰ kg/m) استفاده شده باشد.

D: محدوده تغییرمکان در خطوطی که عملیات نگهداری و تعمیر در آنها از کیفیت ضعیفی برخوردار است.

شکل (۳-۵) معیار تغییر مکان قائم خط با توجه به ملاحظات پایداری و دوام (Lundgren et al. 1970)

۳-۱-۴- مقاومت جانبی بالاست

مقاومت جانبی خط ریلی، مقاومت در برابر نیروهای جانبی اعمالی به موازات محور تراورس‌ها یا عمود بر محور اصلی ریل می‌باشد. مقاومت جانبی خط ریلی، متشکل از مقاومت جانبی تراورس‌ها در تماس با بالاست، مقاومت خمشی ریل‌ها حول محور ضعیف و مقاومت پیچشی پابندها است. در خطوط جوشکاری شده طویل تأمین مقاومت جانبی خط در برابر نیروهای جانبی ناشی از نیروهای تماسی چرخ و ریل، تغییرات حرارت، نیروهای ناشی از کمانش و نیروهای گریز از مرکز در قوس‌های با شعاع ۴۰۰ متر و کمتر، بسیار مهم است.

مقاومت جانبی تراورس در تماس با بالاست، ناشی از اصطکاک کف تراورس با بالاست، اصطکاک اطراف تراورس با بالاست (ناحیه آخوری) و بالاست انتهایی تراورس (شانه) تأمین می‌شود (شکل ۳-۶). اصطکاک کف تراورس تحت تأثیر نوع تراورس، وزن آن و بار قائم وارده بر آن می‌باشد. مقاومت اصطکاکی در اطراف تراورس نیز به طول تراورس و مقدار ارتفاعی از تراورس که در بالاست فرو رفته بستگی دارد. مقاومت بخش انتهایی تراورس (شانه) از یک سو، متاثر از هندسه شانه (ضخامت، عرض و شیب بالاست انتهای تراورس) و از سوی دیگر متاثر از پارامترهای مقاومتی بالاست و وزن مخصوص آن است.

شکل (۳-۶) منابع مقاومت جانبی تراورس در تماس با بالاست (Esmaeili et al., 2015)

مقاومت کف تراورس حدوداً ۳۵ تا ۴۰ درصد از کل مقاومت جانبی تراورس تک را شامل می‌شود. مقاومت بخش کناری تراورس (قسمت آخوری) نیز ۳۰ تا ۳۵ درصد از کل مقاومت جانبی را شامل می‌شود. سهم مقاومت بخش انتهایی تراورس (اثر شانه) از مقاومت کل برای تراورس‌های بتنی، فلزی و چوبی به ترتیب برابر با ۲۸ ، ۱۸ و ۲۷ درصد است. به‌طور کلی مقاومت جانبی تراورس در تماس با بالاست ۵۰ تا ۷۰ درصد (با متوسطی در حدود ۶۵ درصد) کل مقاومت جانبی خط را تشکیل می‌دهد والباقی آن توسط مقاومت خمشی ریل‌ها حول محور ضعیف و مقاومت پیچشی پابندها تامین می‌شود.

برای تحلیل پایداری خط در برابر نیروهای جانبی، تعیین مقاومت جانبی تراورس در تماس با بالاست از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای این منظور به کارگیری روش اندازه‌گیری مقدار مقاومت جانبی تراورس منفرد (STPT[1]) توسط محققین مختلف پیشنهاد شده است. تحقیقات انجام شده پیرامون مقاومت جانبی تراورس در تماس با بالاست سرباره‌ای (Esmaeili et al, 2015) نشان دهنده آن است که با بکارگیری بالاست EAF، مقاومت جانبی تراورس منفرد به طور متوسط ۲۷ درصد بیشتر از بالاست سنگ آهکی است. این موضوع می‌تواند ناشی از وزن مخصوص این نوع بالاست از یک سو و از سوی دیگر زاویه اصطکاک اندکی بالاتر آن نسبت به بالاست آهکی باشد که می‌توان از آن، در کاهش ضخامت بالاست و کاهش عرض شانه بهره برد. توصیه می‌شود در تحلیل پایداری خط در برابر نیروهای جانبی، مسئله تغییر مقاومت جانبی در بالاست سرباره‌ای، در مقایسه با بالاست‌های سنگی مبتنی بر نتایج آزمایش بارگذاری جانبی تراورس منفرد، مد نظر قرار گیرد.

۳-۱-۴-۱- اندازه‌گیری مقاومت جانبی تراورس منفرد

یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای سنجش مقاومت جانبی تراورس، استفاده از روش تراورس منفرد می‌باشد. در روش تراورس منفرد، تراورس بتنی از ریل آزاد شده و به صورت کاملاً مجزا تحت بارگذاری عرضی (در راستای طول تراورس) قرار می‌گیرد. در این حالت با اعمال نیرو توسط جک هیدرولیکی بر یک انتهای تراورس، میزان جابجایی یا تغییرمکان جانبی در انتهای دیگر، توسط تغییرمکان‌سنج (مثلاً LVDT[2] و یا حسگر غیرتماسی) اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۳-۷). این ادوات قابل نصب بر روی شانه پابند پاندرول می‌باشند. برای انجام تست ابتدا فنرهای هر چهار پابند تراورس مورد نظر باز شده و جک و تغییرمکان‌سنج بر روی تراورس نصب می‌گردد. نیروی فشاری به وسیله نوک فلزی جک هیدرولیکی به جان ریل اعمال شده و تراورس را در راستای طولی خود به بیرون از خط می‌راند. در طرف دیگر تغییرمکان‌سنج که به جان ریل مقابل تکیه داده، با تغییرمکان تراورس جابجا شده و میزان جابجایی آن ثبت می‌گردد. جک و تغییرمکان‌سنج به یک پردازنده نصب شده و مقدار نیرو و جابجایی به طور خودکار ثبت می‌شود. لازم به ذکر است که در این روش، معمولا گام‌های ثبت جابه‌جایی برابر با ۰/۲ میلیمتر است و اعمال بار به تراورس تا رسیدن به حداقل ۱ و حداکثر ۷ میلیمتر جابه‌جایی عرضی ادامه می‌یابد. توصیه می شود محاسبات اندازه گیری مقاومت جانبی بالاست برای حداکثر ۰/۵ میلیمتر بیشتر از

[1] Single Tie Push Test

[2] Linear Variable Displacement Transducer

قسمت تقریباً خطی منحنی نیرو-جابجایی یا ۱ میلیمتر انجام شود. در جدول (۳-۵) سهم بالاست‌های کف، آخوری و شانه در تامین مقاومت جانبی در دو حالت با و بدون بار قائم ترافیک ارائه شده است. نمونه مقادیر مقاومت جانبی بالاست در پیوست "ج" ارائه شده است.

جدول (۳-۵) سهم بالاست های کف، آخوری و شانه در تامین مقاومت جانبی (Selig and Waters, 1994)

جزء مقاوم جانبی	محدوده درصد مقاومت	
	بدون بار قائم	با بار قائم
بالاست کف	۵۰-۶۰	۹۵-۱۰۰
بالاست آخوری	۱۰-۲۰	۰-۵
بالاست شانه	۳۰-۴۰	۰-۵

الف) جک هیدرولیکی بارگذاری

ب) سنسور تغییرمکان سنج

ج) دستگاه ثبت خودکار مقدار نیرو و جابجایی

شکل (۳-۷) تجهیزات و روش اندازه گیری مقاومت جانبی تراورس منفرد (Esmaeili et. al., 2015)

۳-۱-۵-تنش تماسی بین تراورس/بالاست، بالاست/زیربالاست

بیشینه تنش تماسی بین تراورس/بالاست به عوامل زیادی از جمله بار محور استاتیکی، سرعت قطار و جنس بالاست بستگی دارد. بار محور استاتیکی بسته به نوع وسیله نقلیه ممکن است از ۷۰ تا ۳۵۰ کیلو نیوتن تغییر کند (Esveld,2001). در جدول (۳-۶) مقادیر حداکثر تنش تماسی اندازه‌گیری شده در راستای قائم و افقی بین تراورس/بالاست و

بالاست/زیربالاست ارائه شده است. تنش تماسی روی بالاست با افزایش بار محور و سرعت قطار (فرکانس بارگذاری) افزایش می‌یابد. همچنین توزیع تنش تماسی بین تراورس و بالاست در طول تراورس ثابت نیست. توزیع تنش بستگی به صلبیت بالاست و تراورس دارد و هرچه تراورس صلب‌تر باشد توزیع تنش در زیر آن یکنواخت‌تر خواهد بود. همچنین به مرور زمان توزیع تنش زیر تراورس تغییر می‌کند.

جدول (۳-۶) مقادیر حداکثر تنش تماسی در راستای قائم و افقی بین تراورس/بالاست و بالاست/زیربالاست در خطوط اصلی راه آهن

راستای تنش	موضع تنش	بار محوری (ton)	حداکثر تنش تماسی اندازه‌گیری شده* (kPa)
تنش قائم	تراورس/بالاست	کمتر از ۲۰	۲۰۰-۳۰۰
		۲۰/۵ تا ۳۰	۲۶۰-۳۷۰
		۳۵	۴۲۰-۵۰۰***
	تراورس/بالاست (محل پل)	کمتر از ۲۵	۵۹۰**
	بالاست/زیربالاست	کمتر از ۲۰	۷۵-۱۷۵
		۲۰/۵ تا ۳۰	۱۲۰-۲۱۰
		۳۵	۲۰۰-۳۱۰***
تنش افقی	بالاست/زیربالاست	کمتر از ۲۰	۱۳-۲۵
	بالاست/زیربالاست	تا ۲۵ تن	۲۵-۵۰

*رجوع شود به (آقایی آرایی و همکاران ۱۳۹۹)، ** برای تراورس چوبی مقدار مذکور kPa ۴۴۵ است،

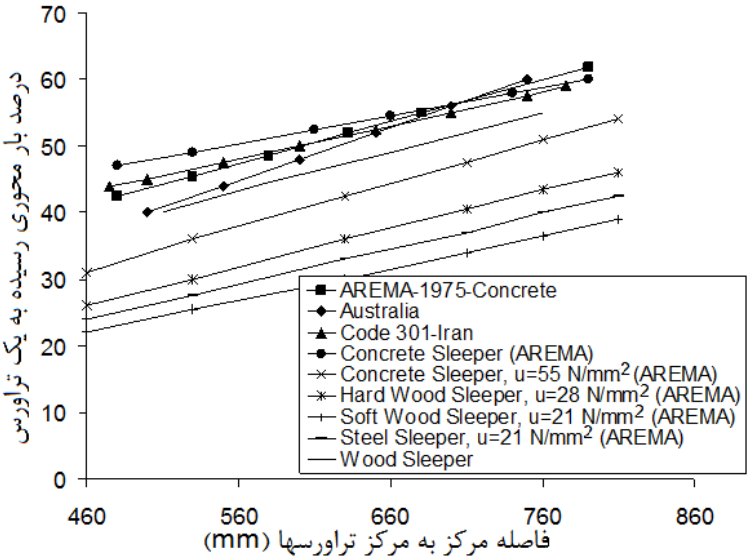
*** برای حداقل و حداکثر سرعت به ترتیب حدود km/h ۱۴۶ و km/h ۷۳

پس از عملیات زیرکوبی تراورس‌ها و ایجاد تراکم در توده بالاست، دو بخش انتهایی تراورس بیشترین سهم باربری را دارد و بخش مرکزی سهم کمتری از بار تراورس را متحمل است. با بازگشایی خط و عبور ترافیک، نشستی در دو انتهای تراورس ایجاد می‌شود که منجر به انتقال تنش به ناحیه مرکزی تراورس می‌گردد و در نتیجه توزیع تنش تماسی بین تراورس و بالاست، یکنواخت‌تر می‌شود. میزان کاهش تنش تماسی در عمق وابسته به مقدار بار محور است. براساس مطالعات (Navaratnarajah and Indraratna, 2018) برای بار محور ۲۵ و ۳۵ تن، مقدار کاهش تنش قائم در عمق ۰٫۳ متری (روی لایه زیربالاست) به ترتیب ۶۶ و ۵۰ درصد اندازه‌گیری شده است.

در صورت استفاده از بالاست سرباره‌ای، می‌توان انتظار داشت که توزیع تنش تماسی بین تراورس و بالاست تقریباً یکنواخت باشد. در مطالعه موردی انجام شده، میزان تنش تماسی بین تراورس و بالاست سرباره‌ای در مقایسه با بالاست سنگی درحدود ۳۰ درصد کاهش نشان داده است (اسماعیلی و همکاران، ۱۳۹۵). با در دست داشتن حداکثر تنش تماسی بین تراورس و بالاست از یک سو و تنش مجاز بستر از سوی دیگر، می‌توان با استفاده از روابط ارائه شده در پیوست "د" ضخامت لازم برای مصالح دانه‌ای (بالاست و زیربالاست) را تعیین نمود.

۳-۱-۶-توزیع بار قائم چرخ بر روی تراورس‌ها

نحوه توزیع بار قائم بین تراورس‌ها به عواملی چون فاصله و نوع تراورس‌ها و جنس بالاست بستگی دارد (شکل ۳-۸). برای بالاست سرباره کوره قوس الکتریکی (EAF) با فاصله تراورس بتنی ۶۰ سانتی‌متر، بار محوری رسیده به یک تراورس در حدود ۶۴ درصد است که در مقایسه با بالاست سنگی درحدود ۱۰ یا ۱۵ درصد افزایش یافته است (Esmaeili et al., 2017). با توجه به اینکه اندازه‌گیری سهم بار در سایر فواصل تراورس برای بالاست سرباره‌ای گزارش نشده است، لذا پیشنهاد می‌شود از پوش نمودار تغییرات سهم بار با فاصله تراورس (شکل ۳-۸) برای مقاصد طراحی استفاده شود. در مجموع با توجه به افزایش سهم بار قائم تراورس از یک سو و افزایش مقاومت بالاست سرباره‌ای نسبت به بالاست سنگی از سوی دیگر، انتخاب فاصله مرکز به مرکز تراورس ها برابر ۶۰ سانتی متر مناسب به نظر می رسد.



شکل (۳-۸) نحوه توزیع بار قائم بین تراورس‌ها بر حسب فاصله تراورس‌ها (آقایی آرایی و همکاران، ۱۳۹۹)

۳-۲- اجراء

۳-۲-۱- ملاحظات اجرایی برای لایه زیربالاست

پیش از اجرای زیر بالاست لازم است مطابق الزامات نشریه ۳۰۱ بستر با شیب عرضی مناسب (۳ درصد) کوبیده و به تراکم مورد نظر رسانده شده باشد. زیربالاست نیز به تبعیت از بستر لازم است تا با همان شیب بستر اجرا شود تا امکان زهکشی آب ورودی به خط فراهم گردد. از این جهت ضخامت اجرایی لایه‌های زیربالاست پیش از تراکم توسط غلطک بهتر است از ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متر تجاوز ننماید. از منظر کنترل مشخصات زیربالاست پس از اعمال تراکم ۹۵ درصد، تامین کلیه حدود مجاز مندرج در جدول (۳-۷) الزامی است.

جدول (۳-۷) حدود مجاز مشخصات لایه زیر بالاست سرباره ای حین اجرا

نوع آزمایش	روش آزمایش	مقدار مجاز
آزمایش تراکم (در رطوبت بهینه)	ASTM D1557	۱۰۰ درصد
آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)	ASTM D1883	بیش از ۸۰ درصد*
ضریب ارتجاعی در بارگذاری دوم (EV2)	ASTM D1195	بیش از ۲۰۰ مگاپاسکال

*برگرفته از رحمانی و همکاران ۱۳۹۹، هاشمی طباطبایی و همکاران ۱۳۹۴

۳-۲-۲- استفاده از صفحات زیرتراورس برای کاهش تنش تماسی

با هدف تعدیل سختی خط، افزایش عمر ادوات روسازی خط، کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری، کاهش ارتعاشات مخرب همچنین افزایش ظرفیت بار و سرعت ناوگان، استفاده از صفحات ارتجاعی زیر تراورس[1] در خطوط ریلی کشورهای پیشرفته، توسعه یافته است (Le Pen et al., 2018). استفاده از صفحات زیر تراورس می‌تواند منجر به کاهش سختی خط، توزیع بهتر بار چرخ، کاهش تنش تماسی بین تراورس و بالاست و توزیع یکنواخت‌تر تنش شود. استفاده از این صفحات در محل روی پل، سوزن‌ها و تقاطع‌ها متداول است.

صفحات ارتجاعی زیرتراورس با سختی و قابلیت جذب انرژی متنوع در انواع بسیار نرم تا سخت (مطابق جدول ۳-۸) از جنس پلی‌یورتان، لاستیک، لاستیک فرسوده(خرد شده با اندازه دانه۱ تا ۳ میلیمتر) و یا اتیل‌وینیل‌استات[2]، با ضخامت معمول بین ۱۰ تا ۶۰ میلیمتر تولید شده و در تمام و یا بخشی از کف تراورس‌ها نصب می‌گردند. با توجه به افزایش سختی گزارش شده توسط اسماعیلی و همکاران (۱۳۹۵) در خطوط با بالاست سرباره EAF، استفاده از صفحات نرم تا بسیار نرم برای جبران اضافه سختی ایجاد شده مناسب به نظر می‌رسد. آزمایش‌های مورد نیاز برای کنترل کیفی این صفحات در استانداردهای (DIN 45673-6, 2013)، (BS EN 16730 ,2016) و (IRS 70713-1, 2018) ارائه شده است.

جدول (۳-۸) محدوده مقادیر سختی انواع صفحات زیرتراورس

انواع صفحات زیرتراورس	سختی (MPa)
سخت	۰/۲۵ ≤ k ≤ ۰/۳۵
متوسط	۰/۱۵ ≤ k ≤ ۰/۲۵
نرم	۰/۱۰ ≤ k ≤ ۰/۱۵
خیلی نرم	k < ۰/۱۰

۳-۲-۳-تسلیح بالاست با ژئوگرید برای افزایش عمر بهربرداری

استفاده از ژئوگرید دوجهته سه ضلعی یا چهارضلعی در محل مناسب سبب کاهش نشست خط و در نتیجه افزایش حداقل ۳۰در صدی عمر بهره‌برداری بالا ست سرباره ای تا "نسبتاً کثیف" می شود. برر سی (Selig and Waters, 1994)

[1] Under Sleeper Pads

[2] Ethyl Vinyl Acetate (EVA)

حاکی از عملکرد مناسب ژئوگرید در کاربری خطوط ریلی بعد از سه سال بهره‌برداری است. توصیه می شود ابعاد چشمه های ژئوگرید چهار ضلعی بیش از ۲۵ میلیمتر باشد تا مکانیزم تسلیح از طریق قفل و بست مکانیکی با دانه‌های بالاست ایجاد شود. برای ژئوگرید سه ضلعی نسبت اندازه سوراخ ژئوگرید به اندازه اسمی دانه های بالاست (d50) برابر d50*(۱/۱-۰/۹) برای بهترین عملکرد توصیه می‌شود.

۳-۲-۳-۱ عمق مناسب نصب ژئوگرید

در صورت استفاده از یک لایه ژئوگرید توصیه می شود آنرا در بالای مرز تماس لایه زیربالاست-زیربالاست وداخل لایه بالاست نصب شود و حداقل فاصله آن از مرز مشترک بزرگترین مقدار ۵۰ میلیمتر یا حداکثر اندازه دانه بالاست سرباره ای اســـت. بهرحال عمق قرارگیری ژئوگرید در زیر لایه تراورس برای عملیات تعمیر و نگهداری بعدی نباید کمتر از ۲۵۰ میلیمتر باشد.

۳-۲-۴-کثیفی بالاست و نفوذ پذیری

منابع مختلف کثیفی بالاست عبارتند از: شکستگی مصالح بالاست، نفوذ مصالح از سطح بالاست (گرد و خاک، ماسه‌های روان، ریزش مصالح از واگن‌ها مانند پودر ذغال سنگ)، سایش و خوردگی تراورس، نفوذ زیربالاست به درون بالاست و نفوذ مصالح بستر به درون بالاست. به طور معمول، بالاست مورد استفاده برای اجرا نباید بیش از ۲ درصد وزنی کثیفی داشته باشد. معیارهای مختلفی برای بیان کثیفی بالاست توسط افراد و موسسات مختلف توصیه شده که به طور نمونه می‌توان به رابطه پیشنهادی(Selig and Waters, 1994) اشاره نمود:

$$FI=P_4+P_{200} \qquad (۱۰-۳)$$

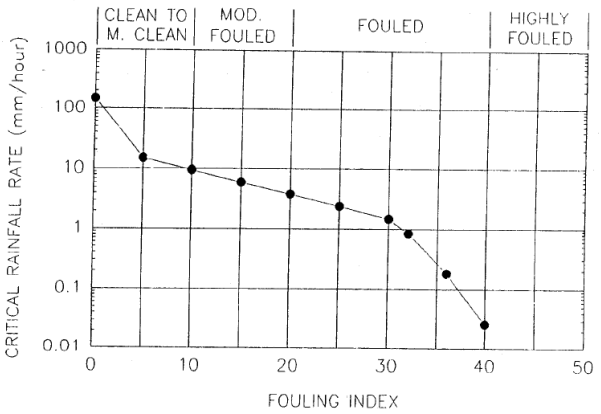
که در آن، P_4 درصد گذشته از الک نمره ۴ (۴/۷۵ mm) و P_{200} درصد گذشته از الک نمره ۲۰۰ (۰/۰۷۵ mm) است. شاخص کثیفی بالاست مطابق تعریف رابطه فوق، تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر ضریب نفوذپذیری بالاست دارد و این تاثیر به صورت کمی در جدول (۳-۹) نشان داده شده است. تعیین مقدار بارندگی بحرانی که باعث اشباع‌شدگی بالاست می‌شود، به شدت تابع شاخص کثیفی بالاست است.

جدول (۳-۹) مقادیر ضریب نفوذپذیری بالاست بر مبنای شاخص کثیفی (Selig and Waters, 1994)

میزان کثیفی	شاخص کثیفی (%)	مقادیر ضریب نفوذ پذیری (mm/sec)
تمیز	<۱	۲۵-۵۰
نسبتاً تمیز	۱۰-۱	۲/۵-۲۵
نسبتاً کثیف	۱۰-۲۰	۱/۵-۲/۵
کثیف	۲۰-۴۰	۰/۰۰۵-۱/۵
خیلی کثیف	> ۴۰	<۰/۰۰۵

برای مقاصد طراحی، با داشتن نرخ بارندگی بیشینه منطقه طرح، می‌توان حداکثر مقدار مجاز برای شاخص کثیفی را از شکل (۳-۹) مشخص نمود.از مقدار حداکثر مجاز برای شاخص کثیفی بالاست می‌توان به عنوان معیاری برای تعیین

زمان سرند بالاست استفاده کرد. مطالعات انجام شده بر روی بالاست سرباره‌ای نشان می‌دهد که میزان شکست این ذرات به عنوان یکی از معیارهای تاثیرگذار بر شاخص کثیفی بالاست بیش از دو برابر بالاست سنگی بوده است (اسماعیلی و همکاران، ۱۳۹۵). این موضوع می‌تواند در سرعت رسیدن به شاخص کثیفی بحرانی از یک سو و از سوی دیگر کاهش فاصله زمانی سرند بالاست به منظور اصلاح شرایط زهکشی موثر باشد.



شکل (۳-۹) تغییرات بیشینه نرخ بارندگی منطقه با حداکثر مقدار مجاز کثیفی بالاست (Selig and Waters, 1994)

با توجه به بافت متخلخل بالاست سرباره‌ای نسبت به بالاست سنگی و امکان احتباس بیشتر آب باران در ذرات بالاست سرباره‌ای، استفاده از مقادیر پیشنهادی نمودار فوق محافظه کارانه به نظر می‌رسد.

۳-۳- تعمیر و نگهداری

۳-۳-۱- بازیافت بالاست سرباره ای

در صورت نیاز به سرند بالاست سرباره‌ای به منظور عملیات تعمیر و نگهداری خط، به دلیل تفاوت مشخصات بالاست‌های سرباره‌ای کارخانه‌های مختلف، جایگزینی بخش خرد شده با بالاست سرباره‌ای منبع اولیه ارجح است. در صورت عدم دسترسی به منبع قرضه با حجم مناسب بالاست سرباره‌ای، می‌توان بالاست سنگی آذرین را جایگزین بخش خرد شده بالاست سرباره‌ای نمود.

۳-۳-۲- سایش ادوات تعمیر و نگهداری

مقاومت سایشی ادوات تعمیر و نگهداری چون کلنگ زیرکوب از جنس فولاد سخت‌کاری شده و ناخن سرند بالاست (از جنس کاربید تنگستن) با ساینده‌های سرباره‌ای یا سنگی، با انجام آزمایش ماسه خشک-چرخ لاستیکی (DSRW[1]) طبق استاندارد ASTM G65 تعیین می‌شود. در این آزمایش حداقل اندازه ذرات ساینده (ماسه خشک) ۷۰ میکرومتر، با بیشینه نیروی تماسی ۱۳۰ نیوتن و حداکثر تعداد دور چرخش چرخ لاستیکی برابر ۶۰۰۰ توصیه می‌شود. برای محاسبه میزان

[1] Dry Sand Rubber Wheel

سایش ادوات تعمیر و نگهداری بهتر است کاهش حجم ناشی از سایش به ازای هر ۵۰۰ دور چرخش چرخ لاستیکی برداشت شود. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که میزان سایش ادوات تعمیر و نگهداری در تماس با بالاست سرباره‌ای EAF به طور متوسط بیش از ۲٫۵ برابر سایش ایجاد شده توسط بالاست سنگی است. این موضوع در برآورد هزینه‌های چرخه عمر بالاست سرباره‌ای در مقایسه با بالاست سنگی می‌بایست مورد ملاحظه قرار گیرد. در مجموع استفاده از ادوات تعمیر ونگهداری با جنس تنگستن کاربید در خطوط ریلی با بالاست سرباره‌ای توصیه می‌شود.

۳-۳-۳- ملاحظات ویژه برای ارزیابی فنی و اقتصادی

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

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

۲- به دلیل محدودیت نقاط انباشت بالاست سرباره‌ای در کشور، لازم است فاصله حمل بهینه نسبت به محل انباشت برای هر بالاست سرباره‌ای محاسبه شود.

۳- به دلیل محدودیت حجم انباشت بالاست سرباره‌ای درکشور در بلندمدت، از منظر نگهداری و تعمیر، اضافه کردن بالاست سنگی به بالاست سرباره‌ای برای جبران کسری بالاست سرباره‌ای محتمل است. از این رو رفتار سایشی و مکانیکی ترکیب این دو مصالح، می‌بایست مدنظر قرار گیرد.

۴- با توجه به سایش بیشتر ادوات تعمیر و نگهداری در تماس با بالاست سرباره‌ای نسبت به بالاست سنگی، این نکته در برآورد چرخه عمر بالاست سرباره‌ای در مقایسه با بالاست سنگی باید مورد توجه قرار گیرد.

۵- در شرایطی که مشخصات مکانیکی بالاست سرباره‌ای نسبت به بالاست سنگی بهتر باشد، می‌توان نسبت به کاهش ضخامت لایه بالاست و کاهش عرض شانه بالاست با ملحوظ نمودن معیارهای طراحی و تعمیر و نگهداری اقدام نمود.

۶- در ضخامت یکسان، لایه بالاست سرباره‌ای EAF بار مرده بیشتری را در مقایسه با بالاست سنگی بر ابنیه فنی اعمال می‌نماید که این موضوع باید در طراحی این ابنیه مورد توجه قرار گیرد.

پیوست ۱

طراحی آزمون سه محوری سیکلی برای بالاست و زیربالاست

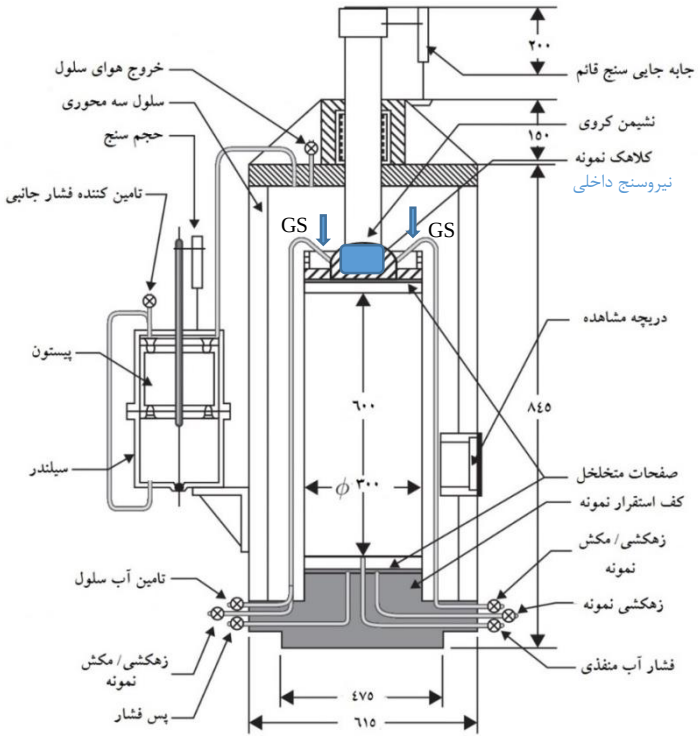
پ-۱- مقدمه

شناخت رفتار مصالح بالاست تحت بارهای عبوری ناوگان ریلی نیازمند اندازه‌گیری مدول برجهندگی، تعیین رفتار خستگی تحت بارهای تکراری از نظر میزان خردشدگی، مقدار کرنش‌های قائم ماندگار و تعیین تنش آستانه گسیختگی است. به طور ایده آل بالاست‌ها باید در خطوط ریلی تحت شرایط بارگذاری واقعی آزمایش شوند، لیکن به علت هزینه بر و زمان بر بودن، مختل کردن ترافیک عبوری و همچنین عدم امکان کنترل تعداد زیاد متغیرهای تاثیر گذار در شرایط میدانی، از آزمایش‌های آزمایشگاهی مانند سه‌محوری سیکلی، جعبه بالاست و آزمایش ادئومتری برای شبیه‌سازی رفتار بالاست استفاده می‌شود.

یکی از بهترین آزمایش‌ها برای بررسی رفتار دینامیکی مصالح بالاست و بالاست/زیربالاست 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 خط ریلی (سرعت و بار محوری) 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. اجزاء این دستگاه بر روی شکل معرفی شده‌اند. خلاصه مشخصات فنی دستگاه سه محوری قطر بزرگ دینامیکی مورد نیاز در 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

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 kN	۰/۲	۵
بار محوری دینامیکی	±۲۵ kN	۰/۰۲	۵
فشار محصورکننده	۱۵۰ kPa	۱	۵
پس فشار	۱۵۰ kPa	۱	۵
تغییر حجم	۵ lit	۰/۲	۵
تغییر طول (استاتیکی)	۱۰۰ mm	۰/۰۱	۵
تغییر طول (دینامیکی)	±۵ mm	۰/۰۰۱	۱۰

پ-۱-۳- روش ساخت نمونه

برای انجام آزمون سه محوری سیکلی بر روی بالاست معمولاً از سلول با قطر ۳۰ سانتی‌متر (۱۲ اینچ) و بالاتر استفاده می‌شود. به طور کلی پیشنهاد می‌شود که بیشینه اندازه دانه‌های بالاست به یک ششم قطر نمونه سه محوری محدود گردد. برای نمونه سه محوری شامل بالاست/زیربالاست (دو لایه) ضخامت لایه بالاست و زیربالاست هرکدام ۳۰ سانتی‌متر پیشنهاد می‌شود. برای نمونه‌سازی لازم است که بالاست و زیربالاست 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. بنابر پیشنهاد AREMA نباید دانسیته خشک نمونه بالاستی از ۱/۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب کمتر باشد.

پ-۱-۴- الگوی بارگذاری

در جدول (پ-۱-۲) الگوی بارگذاری پیشنهادی برای انجام آزمایش سه محوری سیکلی بر روی مصالح بالاست، بالاست/زیربالاست برای دوره بهره‌برداری از خط ریلی ارائه شده‌است. 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 بالاست توسط یک بوژی

برای تعیین تعداد سیکل معادل باید بار ناخالص عبوری به میلیون تن (MGT) طبق جدول (۱-۱) تعیین شود. بار ناخالص سال دهم بهره‌برداری (میلیون تن) را می‌توان با استفاده از ترافیک خط مورد نظر طبق رابطه (پ-۱-۱) محاسبه کرد.

$$MGT = 7300\ A_t . N_a . N_w . \alpha\ . 10^{-6} \qquad (پ-۱-۱)$$

که در آن:

MGT: بار ناخالص عبوری به میلیون تن

A_t : بار محوری به تن (بین ۲۲/۵ تا ۳۳/۷۵ تن)

N_a : تعداد محورهای یک بوژی (۲ یا ۳)

N_w : تعداد واگن‌های یک قطار

α : تعداد قطار عبوری از خط مورد نظر در روز

بعد از محاسبه MGT ، تعداد سیکل بارگذاری و باربرداری بوژی معادل (N) از رابطه (پ-۱-۲) به دست می‌آید.

$$N=MGT.10^6/(A_t.2N_a) \qquad (پ-۱-۲)$$

به طور معمول مطابق ادبیات فنی برای رسیدن به نشست تقریبا ثابت در بالاست اعمال حداقل ۱۰۰ هزار سیکل بارگذاری پیشنهاد می‌شود. در زمان انجام آزمایش محدودیت‌های مربوط به ثبت داده و فراخوان آن می‌بایست در انتخاب تعداد سیکل بارگذاری نمونه، مورد ملاحظه قرارگیرد. در شرایط حاضر توصیه می‌شود برداشت داده‌ها برای ۱۰ هزار سطرانجام و تحلیلها برای پنجره های ۲۵۰ سیکلی صورت گرفته و در بازه مذکور متوسط مقادیر برای ۱۰۰ سیکل محاسبه و گزارش شود.

پ-۱-۴-۲- فرکانس بارگذاری

به طور معمول با داشتن فاصله محور تا محور بوژی‌ها و سرعت حرکت قطار می‌توان از رابطه زیر، فرکانس بارگذاری را محاسبه نمود:

$$f = V/L \qquad (پ-۱-۳)$$

که در آن:

f: فرکانس بارگذاری (هرتز)

V: سرعت متوسط حرکت قطار (متر برثانیه)

L: فاصله متوسط محور تا محور بوژی (متر)

با توجه به محدودیت سرعت به ۱۶۰ کیلومتر بر ساعت در این راهنما، فرکانس بارگذاری بین ۲ تا ۴ (یا۵) هرتز توصیه می‌شود.

پ-۱-۴-۳- دامنه تنش های اعمالی

باتوجه به توزیع تنش‌ها در عمق، برای شبیه‌سازی رفتار بالاست/زیربالاست در آزمایش سه محوری سیکلی باید متوسطی از تنش‌های قائم در عمق بر نمونه اعمال شود. از نظر تئوری می‌توان با توجه به میزان بار رسیده به تراورس زیر یک چرخ‌محور، سرعت عبور قطار و مساحت کف تراورس، میزان تنش تماسی بین تراورس و بالاست را محاسبه نمود. با فرض رفتار الاستیک برای بالاست می‌توان از رابطه توزیع تنش بوسینسک برای تعیین توزیع تنش در عمق و ضخامت لایه بالاست بهره برد. با توجه به محدودیت حداکثر فشار تماسی بین تراورس و بالاست به ۵۸۵ کیلوپاسکال توسط AREMA، میزان تنش قائم اعمالی بر نمونه سه محوری نباید از ۵± ۵۰درصد این مقدار بیشتر انتخاب شود.

با توجه به اندازه‌گیری‌های میدانی صورت گرفته، همچنین میزان تناژ قطار عبوری و جنس مصالح بالاست، انتخاب میزان تنش محدودکننده در محدوده ۲۵ تا ۳۵ کیلوپاسکال 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 بالاست، 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.

لازم به ذکر است که در آزمایش سه محوری سیکلی، به طور معمول مصالح سنگی و بالاست سرباره BOF در n (نسبت تنش سیکلی به مقاومت استاتیکی بیشینه) بزرگتر از ۰٫۸ از خود گسیختگی نشان داده و برای مقادیر کمتر از این، از خود رفتار پایدار نشان می‌دهند. از سوی دیگر، نسبت یاد شده برای بالاست سرباره EAF حدوداً برابر ۰٫۵ گزارش شده است.

پ-۱-۵ روش انجام آزمون

پ-۱-۵-۱- روش انجام آزمون به منظور تعیین مدول برجهندگی

برای تعیین مدول برجهندگی در لایه‌های بستر، اساس و زیراساس راه‌ها، آزمایش بارگذاری سیکلی، مطابق استاندارد AASHTO T307 انجام می‌شود. برای مصالح بالاست و زیربالاست، استاندارد مشخصی توسط مراجع معتبر برای تعیین مدول برجهندگی ارائه نشده‌است. برای تعیین مدول برجهندگی لازم است تنش محدودکننده، تنش تماسی، 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 بالاست مطابق جدول (پ-۱-۲)، زیربالاست و بالاست/زیربالاست مطابق جدول (پ-۱-۳) پیشنهاد می‌شود.

جدول (پ-۱-۲) الگوی بارگذاری پیشنهادی برای تعیین مدول برجهندگی بالاست و بالاست/زیربالاست

ردیف	تنش محصور کننده σ_3(kPa)	تنش انحرافی استاتیکی $\sigma_{1s}-\sigma_{3s}$ (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
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	۲۴۰	۲

تنش تماسی در این بارگذاری‌ها ۰/۱ دامنه تنش انحرافی استاتیکی اولیه در نظر گرفته‌شود. بطورکلی مقادیر مدول برجهندگی در سیکل اول کم و با تکرار بارگذاری به علت کاهش تخلخل و افزایش تراکم، افزایش می‌یابد. لذا پیشنهاد می‌شود برای بالاست، 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.

جدول (پ-۱-۳) الگوی بارگذاری پیشنهادی برای تعیین مدول برجهندگی زیربالاست، زیربالاست/بستر بهسازی شده

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

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 و جدول پ-۱-۲ یا ردیف های ۵ و ۱۱ جدول پ-۱-۳) تا ۱۰ هزار سیکل ادامه داد.

کمینه مدول برجهندگی بالاست و زیربالاست خشک ۲۲۰۰ kg/cm^2 و در شرایط غرقاب ۱۵۰۰kg/cm^2 پیشنهاد می‌شود. کمینه انجام یک سری آزمایش در سال و یا هر تغییر معدن یا تغییر دیگر شرایط برای هرمصالح طبق جداول (پ-۱-۲) و (پ-۱-۳) الزامی است.

پ-۱-۵-۲- روش انجام آزمون به منظور تعیین مدول برشی و میرایی

به منظور شناخت رفتار دینامیکی مصالح بالاست، و زیربالاست و بالاست/زیربالاست 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-۱-۲) برای بالاست و ردیف‌های ۵ و ۱۱ جدول (پ-۱-۳) برای زیربالاست و بالاست/زیربالاست 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:

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

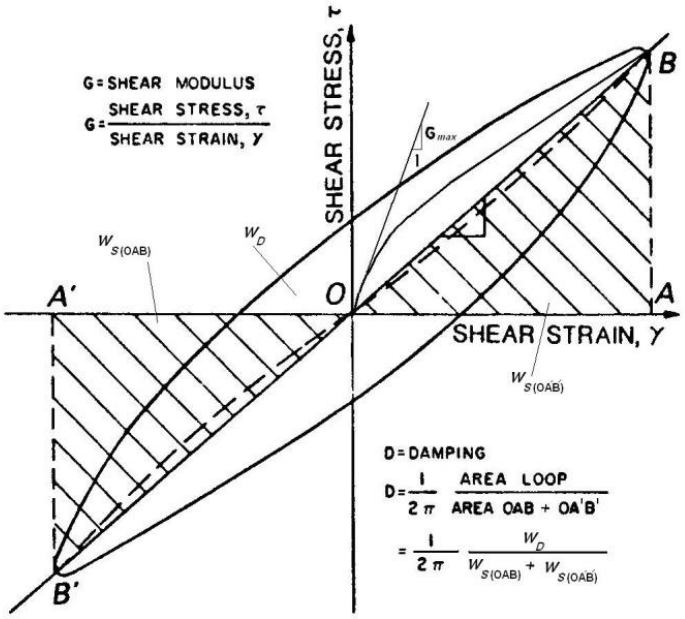
که در آن D نسبت میرایی، W_D مساحت محصور در هر حلقه، $W_{S(OAB)}$ انرژی الاستیک در ناحیه فشاری و $W_{S(OA'B')}$ انرژی الاستیک در ناحیه کششی است. طبق تعریف، مدول برشی G برابر با مدول سکانتی معادل متناظر با شیب خط کشیده شده از نقطه انتهایی حلقه هیسترزیس می‌باشد.

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.

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 بالاست و زیربالاست نسبت پواسون متناظر با حالات خشک و اشباع (زهکشی نشده) به ترتیب برابر با ۰٫۳۰ و ۰٫۵ پیشنهاد می‌شود(آقایی آرایی ۱۴۰۰).

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

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



شکل (پ-۱-۲) رابطه تنش-کرنش هیسترزیس

پ-۱-۵-۳- روش انجام آزمون به منظور تعیین مقاومت پساسیکلی

برای تعیین حدودی از مقاومت گسیختگی، زاویه اصطکاک مصالح بالاست، زیربالاست و بالاست/زیربالاست انجام آزمایش‌های سه‌محوری طبقASTM D7181 برای نمونه‌های خشک وASTM 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 گردد. 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(آقایی آرایی ۱۴۰۰). در عین حال لازم است که آزمایش یکنوا تا رسیدن به حالت گسیختگی یا کرنش حداقل ۱۰ درصد ادامه یابد.

پ-۱-۶- گزارش آزمون

علاوه بر پارامترهای اشاره شده در بخش پ۱--۵ لازم است در گزارش آزمون مواردی شامل فرم تغییر شکل یافته نمونه، شکل گسیختگی احتمالی، تغییرشکل‌های ماندگار قائم برحسب تعداد سیکل‌های بارگذاری و درصد خردشدگی مصالح نیز گنجانده شود.

پیوست ۲

برآورد سختی لایه های زیرسازی خطوط ریلی به روش هرمی

پ-۲-۱- برآورد سختی لایه بالاست بالایی، پایینی و زیربالاست

در شکل (ب-۱) جزئیات هندسی مدل هرمی برای برآورد سختی بستر ریل ارائه شده است. طول قاعده بالایی برابر با L (طول موثر تراورس برابر با یک سوم طول تراورس برحسب میلیمتر) و عرض آن برابر با B (عرض کف تراورس در محل نشیمن گاه ریل بر حسب میلیمتر) می‌باشد. حداقل و حداکثر عرض کف تراورس‌های چوبی به ترتیب ۲۴۰ و۳۰۵ میلیمتر است (نشریه ۳۰۱، ۱۳۸۴). این مقدار برای تراورسهای بتنی مطابق توصیه AREMA به ترتیب برابر با ۲۰۰ تا ۳۳۰ میلی‌متر است.

در روش هرمی لازم است که پس از محاسبه ضرایب افزایش طول هر یک از اضلاع قاعده‌های تحتانی هرم‌ها، مساحت قاعده تحتانی محاسبه شده (روابط پ۲-۱-۱ تا پ-۲-۳) و مقادیر سختی هر یک از لایه‌های بالاست بالایی، پایینی و زیربالاست به ترتیب مطابق روابط (ب-۴) تا (ب-۶) برآورد می‌شود. در این روابط $\emptyset_{mb1}$، $\emptyset_{mb2}$ و $\emptyset_{msb}$ شیب دیواره هر یک از هرم‌ها نسبت به راستای قائم به ترتیب برابر با زاویه اصطکاک داخلی بسیج شده برای لایه بالاست بالایی، پایینی و زیر بالاست بر حسب درجه می‌باشد که نحوه برآورد آنها در جدول (۳-۱) ارائه شده است. x_1، x_2، x_3 و x_t به ترتیب ضخامت لایه‌های بالاست‌های بالایی و پایینی، زیر بالاست و مجموع ضخامت لایه‌های بالاست و زیر بالاست بر حسب میلیمتر می‌باشد.

- برای لایه بالاست بالایی با $c_1 = 2\tan\emptyset_{mb1}$ و $0 \le x \le x_1$:

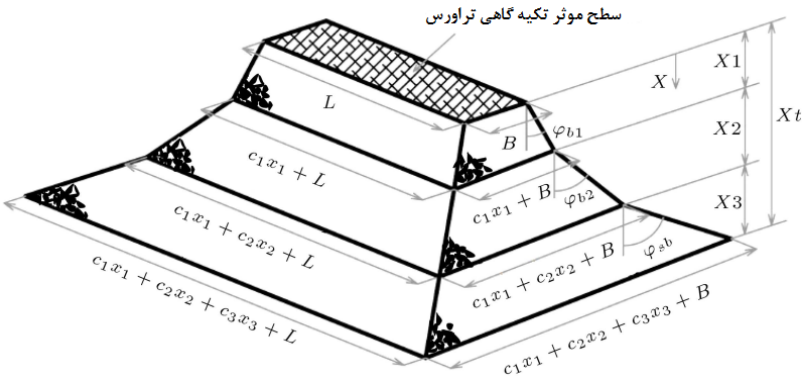
$$A_1(x) = (c_1x_1 + B)(c_1x_1 + L) \qquad \text{(پ-۲-۱)}$$

- برای لایه بالاست پایینی با $c_2 = 2\tan\emptyset_{mb2}$ و $z_1 \le x \le x_2$:

$$A_2(x) = (c_1x_1 + c_2x_2 + B)(c_1x_1 + c_2x_2 + L) \qquad \text{(پ-۲-۲)}$$

- برای لایه زیربالاست با $c_3 = 2\tan\emptyset_{msb}$ و $x_2 \le x \le x_3$:

$$A_3(x) = (c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + B)(c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + L) \qquad \text{(پ-۲-۳)}$$



شکل (پ-۲-۱) جزئیات هندسی مدل هرمی برای محاسبه مدول بستر ریل (Ahlbeck et al., 1978)

$$k_1 = \frac{c_1(L - B).E_b}{\ln\frac{L(c_1x_1 + B)}{B(c_1x_1 + L)}} \qquad \text{(پ-۲-۴)}$$

$$k_2 = \frac{c_2(L-B).E_b}{\ln\frac{(L+c_1x_1)(c_1x_1+c_2x_2+B)}{(B+c_1x_1)(c_1x_1+c_2x_2+L)}} \quad (پ-۲-۵)$$

$$k_3 = \frac{c_3(L-B).E_{sb}}{\ln\frac{(c_1x_1+c_2x_2+L)(c_1x_1+c_2x_2+c_3x_3+B)}{(c_1x_1+c_2x_2+B)(c_1x_1+c_2x_2+c_3x_3+L)}} \quad (ب-۶)$$

در این روابط E_b و E_{sb} مقادیر متوسط مدول الاستیسیته بالاست و زیربالاست به ترتیب برابر با ۲۰۰ و ۱۵۰ مگاپاسکال فرض می‌شود.

پ-۲-۲- برآورد سختی صفحات زیر ریل

سختی صفحات زیر ریل براساس رابطه (ب-۷) قابل محاسبه است.

$$k_p = \frac{EA}{t} \quad (پ-۲-۷)$$

که در آن:

k_p: سختی صفحات زیر ریل بر حسب کیلونیوتن بر میلیمتر

E: مدول یانگ صفحه بر حسب مگاپاسکال

A: مساحت صفحه بر حسب میلیمتر مربع

t: ضخامت صفحه بر حسب میلیمتر

در صورت عدم استفاده از روش‌های تجربی و آزمون‌های نیرو-تغییرشکل برای تعیین سختی صفحات زیر ریل، می‌توان به صورت تقریبی مقدار سختی صفحات زیر ریل را برابر با نصف سختی لایه بالاست در نظر گرفت.

پ-۲-۳- برآورد سختی لایه بستر

سختی بستر k_{sub} با استفاده از ضریب واکنش بستر C_s قابل محاسبه است. مطابق (Terzaghi, 1955) ضریب واکنش بستر از رابطه (پ-۲-۸) محاسبه می‌شود:

$$C_s = \frac{q}{y} \quad (پ-۲-۸)$$

که در آن q تنش فشاری وارد بر سطح تماس بین تیر یا دال بارگذاری شده مستقر روی بستر بر حسب کیلوپاسکال و y نشست حاصل از بارگذاری بر حسب میلیمتر است. معمولاً ضریب واکنش بستر بر اساس ضریب واکنش بستر مبنا C_0 حاصل از انجام آزمایش بارگذاری روی صفحه مربعی به ابعاد ۳۰ سانتی‌متر یا بر اساس مقادیر پیشنهادی در جداول (پ-۲-۱) و (پ-۲-۲) به ترتیب برای ماسه و رس محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است که تفاوت میان مقادیر محاسبه شده براساس نتایج آزمایش بارگذاری و مقادیر پیشنهادی در جداول فوق، نباید بیش از ۲ تا ۳ برابر باشد. در غیر این صورت لازم است محاسبات مجدداً کنترل شود.

جدول (پ-۲-۱) مقادیر C_0 برحسب ($10^{-6}kN/mm^3$) حاصل از آزمایش بارگذاری صفحه بر روی ماسه(Terzaghi, 1955)

میزان تراکم نسبی ماسه	سست	متوسط	متراکم
محدوده مقادیر برای ماسه خشک یا مرطوب	۷-۲۱	۲۱-۱۰۵	۱۰۵-۳۵۰
مقدار پیشنهادی برای ماسه خشک یا مرطوب	۱۴	۴۵	۱۷۵
مقدار پیشنهادی برای ماسه اشباع	۸	۲۸	۱۰۵

جدول (پ-۲-۲) مقادیر C_0 برحسب ($10^{-6}kN/mm^3$) حاصل از آزمایش بارگذاری صفحه بر روی رس پیش تحکیم یافته (Terzaghi, 1955)

میزان استحکام رس	سفت	بسیار سفت	سخت
مقادیر q_u (kPa)	۱۰۷-۲۱۴	۲۱۴-۴۲۸	> ۴۲۸
محدوده تغییرات C_o	۱۷-۳۴	۳۴-۶۸	> ۶۸
مقدار پیشنهادی C_o	۲۵٫۵	۵۱	۱۰۲

در صورتی که مصالح بستر رس سفت و یا ماسه نسبتاً متراکم باشد، ضریب واکنش بستر مبنا C_0 با استفاده از رابطه (پ-۲-۹) به ضریب واکنش بستر C_s تبدیل می‌شود:

$$C_s = C_0 \frac{(m + 0.5)}{1.5m} \qquad (ب-۹)$$

که در آن m نسبت طول به عرض ناحیه بارگذاری شده بستر (سطح تماس لایه زیربالاست و بستر) مطابق رابطه (ب-۱۰) می‌باشد.

$$m = \frac{(c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + L)}{(c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + B)} \qquad (پ-۲-۱۰)$$

در این روش ضریب واکنش بستر به صورت استاتیکی (و نه دینامیکی مطابق شرایط بارگذاری خط راه‌آهن) محاسبه می‌شود. در نهایت سختی لایه بستر از حاصل‌ضرب مساحت سطح تماس لایه زیربالاست و بستر در C_s بدست می‌آید:

$$k_{sub} = C_sA_3(x) = C_s(c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + L)(c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + B) \qquad (پ-۲-۱۱)$$

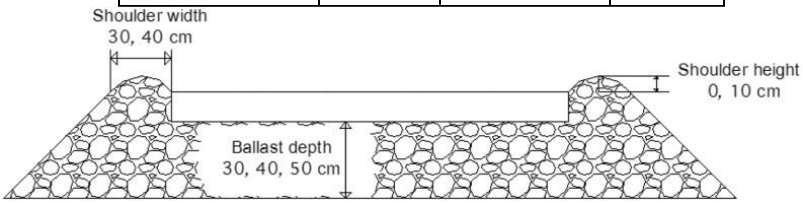
پیوست ۳

نمونه مقادیر مقاومت جانبی بالاست

در شـرایط تراکم سـسـت برای هر دو تراورس بتنی و چوبی، مقاومت جانبی بالاسـت با افزایش اندازه دانه کاهش می یابد(Bartlett, 1960). مقاومت جانبی تراوسـهای بتنی و چوبی به ترتیب بین ۳٫۲ تا ۸٫۸ کیلونیوتن و ۱٫۱ تا ۴٫۵ کیلونیوتن متغیر اسـت (Powelland Shenton, 1973). بطورکلی بعد از انجام عملیات زیرکوبی، مقدار مقاومت جانبی تراورس کاهش می یابد، اما با عبور بار ترافیکی، به تدریج به مقادیر پیش از زیرکوبی نزدیک می‌شـود. با توجه به لزوم کنترل بیشینه جابجایی طولی انتهای ریل (۹/۵ mm) لازم است، برای بالاست از جنس سنگ شکسته، بیشینه مقاومت در برابر حرکت تراورس‌ها به ۵٫۴ کیلو نیوتن محدود شـود (AREMA ۲۰۰۶). در جدول (پ-۳-۱) مقاومت جانبی روش تراورس منفرد بالاسـت EAF و آهکی ایرانکوه با عمق ۳۰، ۴۰ و ۵۰ cm، شـانه با عرض ۳۰ و ۴۰cm با و بدون شـانه با ارتفاع ۱۰cm ارائه شده است.

جدول (پ-۳-۱) مقاومت جانبی روش تراورس منفرد بالاست EAF و آهکی ایرانکوه با عمق ۳۰، ۴۰ و ۵۰ cm، شانه با عرض ۳۰ و ۴۰cm با و بدون شانه با ارتفاع ۱۰cm (اصلاح شده Esmaeili et al., 2015)

BT- BD-BW-SH (عدد به cm)	مقاومت (kN) برای جابجایی (mm)		
	۰/۵	۱/۰	۲/۰
LB-30-30-0	۴	۵	۶
SB-30-30-0	۳/۵	۵	۷
LB-30-30-10	۴/۵	۵/۵	۶/۵
SB-30-30-10	۳/۸	۶	۷
LB-30-40-0	۴	۵	۶
SB-30-40-0	۴/۵	۵/۵	۷
LB-30-40-10	۴/۲	۵	۶/۵
SB-30-40-10	۴/۵	۵/۶	۷/۵
LB-40-30-0	۶	۶/۵	۸
SB-40-30-0	۷	۹	۱۲
LB-40-30-10	۶	۶/۵	۸/۵
SB-40-30-10	۷	۹	۱۳/۵
LB-40-40-0	۸	۱۱	۱۳/۵
SB-40-40-0	۱۱	۱۴/۵	۱۷
LB-40-40-10	۸	۱۱	۱۴
SB-40-40-10	۱۱	۱۵	۱۷
LB-50-30-0	۶	۶/۵	۸
SB-50-30-0	۶	۸	۱۲
LB-50-30-10	۶	۷/۵	۸/۵
SB-50-30-10	۶	۸/۵	۱۲
LB-50-40-0	۶	۸/۵	۱۱/۵
SB-50-40-0	۸/۲	۱۱	۱۱/۵
LB-50-40-10	۶	۸/۲	۱۱/۵
SB-50-40-10	۸/۲	۱۱/۵	۱۳/۵



BT : نوع بالاست، **SB**: بالاست سرباره، **LB** : بالاست سنگ آهکی، **BD**: عمق بالاست، **SW**: عرض شانه، **SH** : ارتفاع شانه

برای دانه‌بندی نوع IV، افزایش مقاومت جانبی بالاست سرباره‌ای EAF فولاد مبارکه(با بیشینه و کمینه وزن خشک به ترتیب ۱٫۷۹ و ۱٫۵۷ کیلوگرم بر سانتی متر مکعب) نسبت به بالاست معمولی سنگ آهکی ایرانکوه اصفهان (با بیشینه و کمینه وزن خشک به ترتیب ۱٫۵۱ و ۱٫۲۷ کیلوگرم بر سانتی متر مکعب) برای جابه‌جایی‌های ۱ و ۲ میلیمتر در حدود ۲۷ و ۱۰ در صد است (جدول پ-۳-۱). با توجه به بیشینه مقاومت جانبی مجاز (۵٫۴ نیوتن)، بیشینه ضخامت و عرض شانه بالاست سرباره‌ای EAF به ترتیب به ۳۰ سانتی‌متر و ۳۰ تا ۴۰ سانتی متر محدود می شود. افزایش ارتفاع شانه تا ۱۰سانتی متر سبب افزایش بیشینه ۵/۸٪ و ۳/۲٪ به ترتیب برای بالاست معمول آهکی و بالاست سرباره‌ای EAF است.

پیوست ۴

محاسبه ضخامت لایه بالاست و زیر بالاست به روش AREMA

با فرض آنکه توزیع بار در عمق مستقل از جنس و اندازه مصالح دانه‌ای باشد، می‌توان مجموع ضخامت لایه بالاست و زیربالاست برای محاسبه فشار روی بستر به عنوان یک لایه در نظر گرفت. AREMA کمینه مجموع ضخامت لایه بالاست و زیربالاست را، ۴۶ سانتی‌متر پیشنهاد می‌نماید. Raymond (۱۹۷۸) ضخامت لایه زیربالاست برای راه‌آهن آمریکای شمالی، بین ۱۰ تا ۳۰٫۵ سانتی‌متر پیشنهاد داده است. بنا به پیشنهاد AREMA می‌توان، مجموع ضخامت لایه بالاست و زیربالاست را براساس رابطه تجربی تالبوت به صورت زیر محاسبه کرد:

$$h = 0.24\left(\frac{P_m}{P_c}\right)^{0.8} \qquad \text{(پ-۴-۱)}$$

که در آن:

h: ضخامت مصالح دانه‌ای (مجموع ضخامت لایه بالاست و زیربالاست) برحسب متر

P_m: تنش قائم اعمالی روی سطح بالاست برحسب کیلوپاسکال (رابطه د-۲)

P_c: تنش مجاز قابل اعمال بر روی سطح بستر اصلاح شده برحسب کیلوپاسکال

AREMA مقدار P_c را برابر با ۱۳۸ کیلوپاسکال پیشنهاد می‌نماید. مقدار تنش مجاز بستر (P_c) را می‌توان با انجام آزمایش افت‌خیزسنج ضربه‌ای (ASTM D4694) در محل، یا با انجام آزمایش بارگذاری صفحه چرخه‌ای (ASTM D1196) و اعمال ضریب اطمینان مناسب بر نتایج آن بدست آورد. در صورت عدم دسترسی به مقدار دقیق P_c، می‌توان از مقادیر پیشنهادی در جدول (پ-۴-۱) بسته به جنس مصالح بستر اصلاح شده و میزان تراکم آن استفاده کرد. لازم به یادآوری است که مقادیر تنش مجاز بستر در جدول (پ-۴-۱)، نظیر بارگذاری استاتیکی ارائه شده‌اند و با درنظر گرفتن ماهیت دینامیکی و تکرارشونده بار قطار می‌توان از ۵۰ درصد مقادیر ارائه شده، در محاسبات استفاده نمود.

تنش قائم اعمالی روی سطح بالاست (P_m) مطابق رابطه (پ-۴-۲) محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است که مقدار P_m در تراورس‌های چوبی و بتنی به ترتیب نباید از ۴۵۰ و ۵۹۰ کیلوپاسکال تجاوز نماید.

$$P_m = \left[\frac{2P\left(1+\frac{IF}{100}\right)\left(\frac{DF}{100}\right)}{A}\right] \qquad \text{(پ-۴-۲)}$$

که در آن:

P: برابر با بار چرخ برحسب کیلونیوتن

DF: ضریب توزیع بار چرخ بین تراورس‌ها برحسب درصد (مطابق توضیحات بخش ۳-۱-۶- پیرامون توزیع بار قائم چرخ بر روی تراورس ها، انتخاب شود)

A: مساحت موثر کف تراورس برحسب متر مربع (در تراورس بتنی، کل مساحت کف و در تراورس چوبی $\frac{2}{3}$ مساحت کف)

IF: برابر با ضریب ضربه برحسب درصد (رابطه پ-۴-۳)

$$IF = 5.21\frac{V}{D} \qquad \text{(پ-۴-۳)}$$

که در آن:

V: سرعت برحسب کیلومتر بر ساعت

D: قطر چرخ برحسب میلیمتر

جدول (پ-۴-۱) مقادیر تنش مجاز بستر (P_c) (Selig and Waters, 1994)

شرح لایه زیرسازی	میزان تراکم	تنش مجاز بستر (kPa)
مخلوط خوب دانه‌بندی شده ریزدانه و درشت دانه (SC ،GC ،GW-GC)	خیلی متراکم	۴۵۰-۶۹۰
شن، مخلوط شن و ماسه، مخلوط شن و قلوه سنگ (GW ،GP ،SW ،SP)	خیلی متراکم	۳۸۰-۵۹۰
	تراکم متوسط	۲۸۰-۴۱۰
	سست	۱۷۰-۳۵۰
ماسه درشت تا متوسط، ماسه با اندکی شن (SW ،SP)	خیلی متراکم	۲۱۰-۳۵۰
	تراکم متوسط	۱۷۰-۲۱۰
	سست	۱۰۰-۱۷۰
ماسه ریز تا متوسط، ماسه سیلتی یا رسی متوسط تا درشت (SW ،SC ،SM)	خیلی متراکم	۱۷۰-۲۸۰
	تراکم متوسط	۱۰۰-۲۱۰
	سست	۶۰-۱۰۰
ماسه ریز، ماسه ریز تا متوسط سیلتی یا رسی (SP ،SC ،SM)	خیلی متراکم	۱۷۰-۲۱۰
	تراکم متوسط	۱۰۰-۱۷۰
	سست	۶۰-۱۰۰
رس غیرآلی همگن، رس ماسه‌ای یا سیلتی (CH ،CL)	خیلی سفت تا سخت	۱۷۰-۳۵۰
	سفتی متوسط	۶۰-۱۷۰
	نرم	۳۰-۶۰
سیلت غیرآلی، سیلت رسی و ماسه‌ای (MH ،ML)	خیلی سفت تا سخت	۱۰۰-۲۱۰
	سفتی متوسط	۶۰-۱۷۰
	نرم	۳۰-۶۰

مراجع

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

Ahlbeck, D.R., Meacham, H.C. and Prause, R.H. (1978), *The development of analytical models for railroad track dynamics, Ed. Kerr, A.D., Railroad Track Mechanics & Technology, Pergamon Press, Oxford*.

Ahlf, R.E. (2003), *Chapter "Overview of TrackStructure." In Fundamentals of RailwayEngineering*, Light Rail Transit, Rapid Transit, and Commuter Rail Systems. Illinois, the USA:O 5.

AREMA (2010), *Manual for Railway Engineering*, Vol. 1 Track.

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

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

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

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

ASTM D3999 (2011), Standard Test Methods for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Apparatus.

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 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 G57 (2020), Standard Test Method for Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method.

ASTM G65 (2016),Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus.

BS EN 16730 (2016), Railway applications. Track. Concrete sleepers and bearers with under sleeper pads.

Bartlett, D.L. (1960), "The stability of long welded rails", Civil Eng. and Public Works, Review, Vol.55, No.649, 1033-1035, No.650, 1170-1171, No. 651, 1299-1303, No.563, 1591-1593.

DIN 45673-6 (2013), *Resilient Elements Used In Railway Tracks* - Part 6: Laboratory Test Procedures For Under-Sleeper Pads Of Concrete Sleepers

Esmaeili, M. Zakeri, J.A. Kaveh, A. Bakhtiary A.and Khayatazad M. (2015), *Designing granular layers for railway tracks using ray optimization algorithm*, Scientia Iranica, Transactions A: Civil Engineering (22), pp.47-58.

Esmaeili M, Nouri R and Yousefian K. (2015), "Experimental comparison of the lateral resistance of tracks with steel slag ballast and limestone ballast materials", Proc IMechE, Part F: J Rail and Rapid Transit; 231, pp.175–184.

Esmaeili M, Yousefian K. Nouri R and (2017), "Vertical load distribution in ballasted railway tracks with steel slag and limestone ballastd", *International Journal of Pavement Engineering*, 20(1), pp.1-8

Esveld, C. (2001) Modern Railway Technology. MRT-Productions. The Netherlands.

EPA METHOD 1311 (1992) Toxicity Characteristic Leacing Procedure

Hasan, N. (2019) Qualification of Track Parameters Based on a Review of Previous Studies, *International Journal of Railway Research*, Vol. 6, No. 2, (2019), 13-22

Hay, W.W. (1982) Railroad Engineering. JohnWiley and Sons. New York, USA, (1982).

Indraratna,B. Salim, W. Rujikiatkamjorn, Ch. (2011) Advanced rail geotechnology–ballasted track *CRC Press by Taylor and Francis Group, LLC*

IRS 70713-1-2ed. Railway Application - Track & Structure "Under Sleeper Pads (USP) - Recommendations for Use

Kerr AD. (2000), "On the determination of the rail support modulus",. International Journal of Solids and Structures, 37(32), pp.4335-51.

Le Pen, L. Watson, G. Hudson, A. and Powrie, W. (2018), "Behaviour of under sleeper pads at switches and crossings –Field measurements", Proc IMechE Part F: J Rail and Rapid Transit, 232(4), pp.1049–1063.

Lichtberger, B.(2006), *Track Compendium:Formation*, Permanent Way, Maintenance,Economics. Eurailpress. Germany.

Lone, M. Hussain, B, and Asawa, G. (2005), "Filter Design Criteria for Graded Cohesionless Bases", Geotech. Geoenviron. Eng., 131(2), pp.251–259.

Li, D., Hyslip, J., Sussmann, T., Chrismer, S. (2016), *Railway Geotechnics*, CRC Press, Taylor & Francis Group.

Lundgren, J.R., Martin, G.C., and Hay, W.W. (1970), A simulation model of ballast support and the modulus of track elasticity, *(Masters Thesis)*, Civil Engineering Studies, Transportation Series, No.4, University of Illinios.

Navaratnarajah, S.K. and Indraratna, B.(2018), "Use of rubber mats to improve the deformation and degradation behavior of rail ballast under cyclic loading", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 143 (6).

Raut, A. and Indraratna, B. (2008) "urther Advancement in Filtration Criteria through Constriction-Based Techniques", Geotech. Geoenviron. Eng., 134(6), pp.883–887

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

Pita, L. Teixeira, A. Robuste P.F. (2004), High speed and track deterioration: the role of vertical stiffeness of the track, Proc. Instn Mech. Engrs, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 218, pp 31-40.

Powerie, W. and Le Pen, L. (2016) A Guide to Track Stiffness, Produced by the Cross Industry Track Stiffness Working Group

Selig, E. T. and Waters, J. M. (1994), Track geotechnology and substructure management, London: Thomas Telford.

Shenton, M.J. (1984) Ballast deformation and track deterioration, In: Track Technology, Proc. of a Conf. organized by the Inst. of Civil Engineers and held at the Univ. of Nottingham, 242-252.

Shenton, M. J. and Powell, M.C. (1973) The resistance offered by the ballast to lateral movement of sleepers, Summary of BR Tests, ORE D 117 (Unpublished Draft).

Terzaghi, K. (1955) Evaluation of Coefficients of Subgrade Reaction, *Goetechnique*, 297-326.

Trani, Laricar D., (2009) Application of constriction size based filtration criteria for railway subballast under cyclic conditions, *Doctor of Philosophy thesis, School of Civil, Mining and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, University of Wollongong*.

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. (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. 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. 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 : زمستا ، ایران.

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

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.

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.

قاسم زاده، ح. (۱۳۹۲)، *آشنایی با صنعت آهن و فولاد*، انتشارات لوح فکر، تهران، ایران.

نشریه ۳۰۱ (۱۳۸۴)، *مشخصات فنی و عمومی روسازی بالاستی راه آهن*، امور نظام فنی و اجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور

نشریه ۳۵۵ (۱۳۸۵)، *دستورالعمل نظارت بر اجرای روسازی راه آهن*، ایران، امور نظام فنی و اجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور

نشریه ۳۹۴ (۱۳۸۶)، *دستورالعمل طراحی و نظارت بر روسازی راه آهن سریع‌السیر*، امور نظام فنی و اجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور

نشریه ۲۷۹(۱۳۷۹)، *مشخصات فنی عمومی زیرسازی راه‌آهن*، امور نظام فنی و اجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور

میرمحمد صادقی، س.ج. (۱۳۸۷)، *اصول تحلیل و طراحی خطوط بالاستی راه‌آهن*، دانشگاه علم و صنعت، تهران.

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.

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.

Guidelinefor usage of steel slags materials as railwayballast and sub ballast [No. 876]

Author of Preliminary Draft:

Ata Aghaei Araei	Road, Housing & Urban Development Research Center	Ph.D. of Civil Eng.

Preliminary Draft Referees:

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.

Editing & proofreading Committee:

Ata Aghaei Araei	Road, Housing & Urban Development Research Center	Ph.D. of Civil Eng.
Morteza Esmaeili	Iran Univercity of Science and Technilogy	Ph.D of Civil Eng.
Nahid Attarchian	Road, Housing & Urban Development Research Center	Ph.D. of Civil Eng.
Iraj Rahmani	Road, Housing & Urban Development Research Center	Ph.D. of Civil Eng.
Amir Salamat Salamat	Road, Housing & Urban Development Research Center	B.S. of Geology
Saeed Hasan Yazdani Tabaei	Islamic republic of Iran Railways	M.Sc. Metalogy

Supervisory Committee:

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

Confirmation Committee:

Jabbarali Zakeri	Iran Univercity of Science and Technilogy	Ph.D of Civil Eng.
Feridon Moghaddasnejad	AmirKabir Uivercity of Technology	Ph.D of Civil Eng.
Khairollah Khademi	Parent Company Specialized in Construction and Development of Transportation Infrastructure	Ph.D of Civil Eng.
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.

این نشریه/ضابطه

با عنوان «دستورالعمل استفاده از سرباره‌های آهن و فولاد به عنوان بالا ست و زیربالا ست راه آهن » در راســـتای معرفی و آشـــنایی با انواع سرباره های آهن و فولاد و امکان استفاده از آن مطابق معیار های کنترل کیفیت و پذیرش در سه فصل و چهار پیوست تدوین شده که شامل: کلیات، مشـــخصـــات بالاســـت و زیربالاســـت سرباره‌ای و معیارهای پذیرش، ضوابط طراحی، اجرا، تعمیر و نگهداری خط ریلی با بالاســـت سرباره‌ای، طراحی آزمون سه محوری سیکلی برای بالاست، برآورد سختی لایه های زیرسازی خطوط ریلی بـه روش هرمی، نمونـه مقـادیر مقاومت جانبی بالاســـت، پیوســـت، محاســـبه ضخامت لایه بالاست و زیر بالاست و کلیدواژه‌ها می‌باشد.

Islamic Republic of Iran
Plan and Budget Organization

Guidelinefor usage of steel slags materials as railwayballast and sub ballast

No. 876

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