

مقایسه رفتار سیکلی و مونوتونیک پسا سیکلی بالاست سرباره فولاد و بالاست سنگ آهکی

مقاله علمی - پژوهشی

عطا آقایی آرایبی*، دانشیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران
بهاره ابراهیمی علویجه، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، ایران
مریم مختاری، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: aghaeiaraei@bhrc.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۸ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۰

صفحه ۷۷-۸۸

چکیده

بلاست به عنوان یکی از اجزای اصلی خطوط ریلی بالاستی معمولاً از سنگ طبیعی شکسته تهیه می‌شود. احداث خطوط بالاستی جدید و عملیات تعمیر و نگهداری خطوط ریلی موجود، نیاز به بالاست را افزایش می‌دهد. بنابراین یافتن مصالح جایگزین برای بالاست سنگی به حفاظت از محیط زیست کمک خواهد کرد. سرباره فولاد، به عنوان یک محصول جانبی در فرآیند تولید فولاد، یکی از جایگزین‌های بالاست سنگ طبیعی است. در این مطالعه با استفاده از آزمایش سه‌محوری بزرگ مقیاس، رفتار بالاست سرباره فولاد با بالاست سنگ آهکی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که بالاست آهکی مدول برشی و مدول برجهنگی بالاتری دارد. سرعت و بارمحوری مجاز برای خطوط با بالاست سرباره بیشتر از بالاست آهکی است. تنش سیکلی مجاز و کرنش آستانه تغییر شکل‌های پیش‌رونده برای بالاست سرباره به ترتیب ۲۰۰ کیلوپاسکال و ۰/۰۲۵ درصد است که این مقادیر برای بالاست آهکی به ترتیب در حدود ۱۶۰ کیلوپاسکال و ۰/۰۲ درصد است. بالاست سرباره تنش استاتیکی تفاضلی بیشینه و زاویه اصطکاک بالاتری در مقایسه با بالاست آهکی دارد. سنگدانه‌های بالاست سرباره همچنین مقاومت در برابر سایش و شکست بالاتری نسبت به بالاست آهکی نتیجه داد.

واژه‌های کلیدی: بالاست سرباره، بالاست سنگ آهکی، آزمایش سه‌محوری بزرگ مقیاس، رفتار سیکلی، رفتار مونوتونیک

پسا سیکلی

۱-مقدمه

خطوط ریلی بالاستی است که علاوه بر زهکشی و کاهش تنش اعمالی به بستر، وظیفه تأمین مقاومت طولی و جانبی خط را نیز برعهده دارد (Sadeghi, 2008). مصالح بالاست عمدتاً از مصالح سنگی شکسته تولید می‌گردد. انتخاب مصالح مناسب برای لایه‌ی بالاست یکی از چالش‌های پیش‌رو در طراحی خطوط بالاستی است. چرا که این مصالح باید پارامترهای مقاومتی و شکل‌پذیری مناسب با پروژه را تأمین کند

گسترش شهرها و افزایش جمعیت، نیاز به سیستم‌های حمل و نقل را افزایش می‌دهد. حمل و نقل ریلی باتوجه به ایمنی قابل قبول و سازگاری مناسب با محیط زیست، جایگاه ویژه‌ای در میان سیستم‌های حمل و نقلی داراست (Esmaeili and Boloukian-Roudsari, 2010). خطوط ریلی بالاستی به سبب هزینه اجرای پایین در میان سایر سیستم‌های حمل و نقل ریلی مطلوب‌تر است. لایه بالاست یکی از مهم‌ترین اجزای

عواملی است که بر پارامترهای دینامیکی مصالح سنگریزه‌ای و بالاست اثر می‌گذارد. مصالح سنگریزه‌ای در حالت ناهمسان در مقایسه با حالت همسان مدول یانگ بالاتری را تجربه می‌کنند (AghaeiAraei et al, 2010; AghaeiAraei, 2021). نسبت میرایی نیز در مصالح سنگریزه‌ای در شرایط همسان بالاتر از نمونه‌ی مشابه در شرایط ناهمسان است (AghaeiAraei, 2021). برخی پژوهش‌ها در زمینه‌ی رفتار بالاست سرباره و مقایسه با بالاست سنگ طبیعی انجام شده‌است. در این مطالعات، سرباره به دلیل مقاومت خوب در برابر سایش، شکست و ضربه، برای استفاده به‌عنوان بالاست ایده‌آل است (Chamling et al, 2020b). این مصالح به دلیل داشتن وزن مخصوص بیشتر در مقایسه با مصالح سنگی، مقاومت جانبی بالاتری در خط ریلی ایجاد می‌کنند. بالاست سرباره، همچنین مدول برجهندگی بالاتر و شکست کمتری را در مقایسه با بالاست سنگ طبیعی (گرانیت) تجربه کرده و تغییرشکل دائمی در این مصالح سریع‌تر به حالت پایدار رسیده‌است (Delgado et al, 2021). مصالح سرباره فولاد مبارکه نسبت به تغییرات تنش حساس هستند و برای استفاده در سرعت‌ها و بارهای محوری بالا مناسب نیستند. محدودیت تنش تفاضلی سیکیلی در مصالح سرباره فولاد مبارکه در حدود ۲۰۰ کیلوپاسکال است (EbrahimiAlavijeh et al, 2024). با توجه به محدود بودن منابع، ترکیب بالاست سنگ طبیعی و سرباره یک راهکار مناسب است. برخی پژوهشگران با بررسی ویژگی‌های فیزیکی و رفتار سیکیلی نمونه‌های ترکیبی، نمونه‌ی ۷۰ درصد سرباره و ۳۰ درصد سنگ طبیعی را پیشنهاد دادند (Esmaeili and Askari, 2023; Jing et al, 2020). زاویه اصطکاک حاصل از آزمایش‌های مونوتونیک پساسیکیلی برای بالاست سرباره کوره قوس الکتریکی در حدود ۵۷ تا ۶۰ درجه و برای بالاست آهکی در حدود ۶۲ درجه به‌دست آمده‌است (AghaeiAraei, 2020). با بررسی ادبیات فنی موجود می‌توان گفت که رفتار بالاست سرباره تحت بارگذاری سیکیلی و در دانه‌بندی واقعی، به‌طور کامل شناخته شده نیست و نیاز به مطالعه‌ی بیشتر دارد. در بسیاری از مطالعات انجام شده از تکنیک دانه‌بندی موازی برای پیش بینی خواص بالاست سرباره استفاده شده‌است (Chamling et al, 2020a, 2020b; Delgado et al, 2019a, 2021). در این مطالعه رفتار سیکیلی و مونوتونیک پساسیکیلی بالاست سرباره فولاد مبارکه بررسی و با بالاست سنگ طبیعی مقایسه

(Esmaeili and Boloukian-Roudsari, 2010). از میان مصالح سنگی، سنگ‌های آذرین (گرانیت، بازالت، کوارتز، دیوریتو ...) به‌عنوان گزینه مناسب برای استفاده به‌عنوان بالاست در نظر گرفته می‌شوند. سنگ آهکی در صورتی که الزامات موجود در نشریه ۳۰۱ را تأمین کند، قابل استفاده خواهد بود. سنگ‌های آهکی به دلیل مقاومت مکانیکی و شیمیایی کمتر در مقایسه با سنگ‌های آذرین بهتر است برای خطوط با سرعت و بار محوری کم استفاده شود. همچنین سنگ‌های رسوبی لایه‌ای و همچنین مصالحه و ازده برای استفاده به‌عنوان بالاست مناسب نیستند (Sadeghi, 2008). از آن‌جا که تولید بالاست سنگ طبیعی می‌تواند برای محیط زیست خطر آفرین باشد، یافتن جایگزینی برای آن ضروری به نظر می‌رسد. سرباره فولاد که یک محصول جانبی در فرآیند تولید فولاد است، یکی از گزینه‌های پیشنهادی است. سرباره‌های فولادی نیز به شرط برآورده کردن الزامات موجود در آیین‌نامه‌ها (AREMA, 2010; AghaeiAraei et al, 2023) قابلیت استفاده در لایه بالاست را دارا هستند. برای انتخاب مصالح بالاست، علاوه بر شناخت ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی، آگاهی از رفتار مصالح تحت بارگذاری‌های مونوتونیک و سیکیلی نیز اهمیت دارد. عوامل گوناگونی از جمله ویژگی سنگدانه‌های تشکیل‌دهنده، خواص حجمی دانه‌ها، مشخصات بارگذاری و زایل‌شدگی سنگدانه‌ها، در پاسخ مکانیکی لایه‌ی بالاست اثرگذار است (Salim, 2004). فرکانس بارگذاری، تنش محدودکننده و ناهمسانی بر رفتار دینامیکی مصالح سنگریزه‌ای اثر گذار است (AghaeiAraei et al, 2010, 2012). افزایش نسبت میرایی (AghaeiAraei, 2021)، افزایش کرنش محوری و کرنش حجمی (Thakur et al, 2013)، کاهش مدول برجهندگی (Thakur et al, 2013) و کاهش زاویه اصطکاک معادل (Sun et al, 2018) از اثرات افزایش فرکانس بارگذاری در پژوهش‌های پیشین است. به ازای هر تنش محدودکننده، محدوده‌ای به‌عنوان فرکانس بحرانی وجود دارد. در فرکانس‌های پایین‌تر از محدوده بحرانی، مدول برجهندگی تقریباً پایدار است و با گذشت از محدوده بحرانی، افزایش فرکانس مدول برجهندگی را کاهش می‌دهد. افزایش فرکانس بارگذاری همچنین می‌تواند سبب شود که بالاست در تنش‌های سیکیلی پایین‌تری به مرحله گسیختگی برسد. این نتیجه نشان می‌دهد که در سرعت‌های بالا، بار محوری مجاز برای بالاست باید کاهش یابد (Sun et al, 2018). اعمال ناهمسانی از جمله

۳- برنامه‌ی آزمایش‌ها

آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه سه‌محوری بزرگ مقیاس مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی انجام شده‌است. این دستگاه توانایی انجام آزمایش به صورت کنترل تنش و کنترل کرنش را دارد. محدوده‌ی فرکانس از ۰/۱ تا ۱۰ هرتز است. امکان اعمال بار به صورت سینوسی، مستطیلی و مثلثی وجود دارد. سیستم کامپیوتری گیرنده اطلاعات از یک سو به واحد کنترل و از سوی دیگر به یک دستگاه کامپیوتر وصل بوده و امکان ثبت اطلاعات را در هر بازه زمانی دلخواه دارد. بنابراین میزان تنش تفاضلی، تنش محدودکننده، کرنش‌های محوری و جانبی در طول آزمایش ثبت و ذخیره می‌گردد. نمونه‌های آزمایش در قطر ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر ساخته شدند. مصالح بر اساس دانه‌بندی ارائه شده در شکل (۱) و چگالی خشک بیشینه (جدول ۱) آماده شدند. مصالح پس از دانه‌بندی و توزین به خوبی مخلوط شده و در ۶ لایه مساوی در قالب دستگاه تراکم شد. برای محصورکردن نمونه و محافظت قابل اعتماد در برابر نشست از یک غشا سیلیکونی با ضخامت ۲/۵ میلی‌متر استفاده شد (AghaeiAraei et al, 2012). برای تراکم از چکش دستی و ارتعاشی و به‌منظور جلوگیری از شکست ذرات از یک ضربه‌گیر لاستیکی به ضخامت ۵ میلی‌متر استفاده شد. پس از ساخت نمونه و اطمینان از پایداری نمونه (با اعمال وکیوم)، قالب شکافدار از اطراف نمونه خارج شده و نمونه در دستگاه سه محوری قرار می‌گیرد.

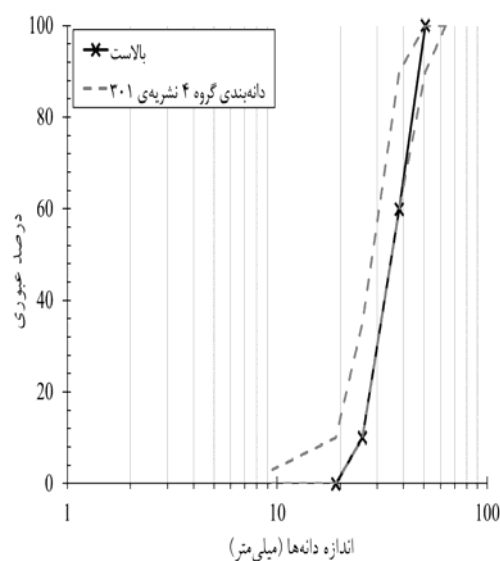
جدول ۱. ویژگی‌های مصالح استفاده شده

استاندارد	سنگ آهکی	سربراره EAF	مشخصات	
			سنگدانه‌های ۵۰ تا ۲۵ میلی‌متر	سایش لس آنجلس
ASTM C535	۲۴/۸۵	۱۱/۵	سنگدانه‌های ۱۹ تا ۳۷/۵ میلی‌متر	دور ۱۰۰۰ (%)
	۲۵/۷۱	۱۴/۳۵		
ASTM D5731	۳/۴۷	۵	شاخص بار نقطه‌ای	
ASTM D4253	۱/۳۱۵	۱/۶۱	دانسیته خشک حداقل (گرم بر سانتی متر مکعب)	
	۱/۴۶	۱/۸	دانسیته خشک حداکثر (گرم بر سانتی متر مکعب)	
ASTM C127	۲/۶۳	۳/۲	وزن مخصوص (Gs)	

شده‌است. مدول برشی، نسبت میرایی، مدول برجهندگی، تغییرشکل محوری دائمی، کرنش محوری، بیشینه تنش تفاضلی و زاویه اصطکاک از جمله پارامترهای اندازه‌گیری شده در این مطالعه است. نتایج این مطالعه به تعیین محدوده‌ی سرعت و بار مجاز برای طراحی خطوط بالاستی آهکی و سربراره کمک می‌کند.

۲- مشخصات مصالح مصرفی

در این پژوهش، سربراره کوره قوس الکتریکی (EAF) فولاد مبارکه اصفهان و سنگ آهک ایرانکوه به‌عنوان بالاست استفاده شد. وجود آهک نشکفته (CaO) در ترکیب سربراره‌های استفاده شده، احتمال ایجاد اتساع و ناپایداری‌های حجمی را در این مصالح ایجاد می‌کند. با این وجود، رفتار تورمی در این مصالح مشاهده نشده و میزان انبساط حجمی در شرایط آزمون ASTM D4792 در محدوده مجاز است (AghaeiAraei, 2020). دانه‌بندی بالاست در این مطالعه براساس نشریه ۳۰۱ و راهنمای استفاده از سربراره ایران (AghaeiAraei et al, 2023) انتخاب و در شکل ۱ ارائه شده‌است. دانه‌بندی انتخابی در محدوده گروه ۴ نشریه ۳۰۱ ایران قرار دارد. برخی از ویژگی‌های مصالح استفاده شده در جدول ۱ ارائه شده‌است. ویژگی‌های مصالح استفاده شده در محدوده مجاز بیان شده در نشریه ۳۰۱ ایران و راهنمای استفاده از سربراره است، بنابراین مصالح استفاده شده، ویژگی‌ها و معیارهای پذیرش بالاست را دارند.



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی بالاست استفاده شده

تحلیل پاسخ لرزه‌ای کاربرد دارند (AghaeiAraei and Ghodrati, 2017). مدول و نسبت میرایی در این مطالعه مطابق با روش استاندارد ASTM D3999 محاسبه شده است. بر این اساس مدول برشی بر اساس مدول یانگ محاسبه شده به دست می‌آید. مقدار نسبت پواسون برای مصالح ۰/۳ فرض شده است.

جدول ۳. الگوی بارگذاری برای بررسی رفتار سیکلی و عملکردی بالاست آهکی و سرباره برای ۵۰۰۰ سیکل بارگذاری

شماره آزمایش	تنش محدودکننده (کیلوپاسکال)	ناهمسانی (σ'_1/σ'_3)	فرکانس بارگذاری (هرتز)	تنش سیکلی تفاضلی (q_{cyc}) (kPa)
۱	۳۰	۴/۳۳	۵	۱۰۰
۲				۱۳۰
۳				۱۰۰
۴				۱۳۰
۵				۱۶۰
۶				۲۰۰
۷	۶۰	۲/۶۷	۵	۱۰۰
۸				۱۳۰
۹				۱۰۰
۱۰				۱۳۰
۱۱				۱۶۰
۱۲				۲۰۰

سختی برشی مصالح برای طیفی از کرنش‌های برشی معمولاً با نسبت مدول برشی بیان می‌گردد. مشابه مصالح سنگریزه‌ای (AghaeiAraei, 2012) در بالاست سرباره و آهکی نیز در کرنش‌های برشی کوچک، مقادیر مدول برشی تقریباً ثابت است و با افزایش کرنش برشی مدول برشی کاهش می‌یابد. روند نزولی بسته به شرایط بارگذاری از کرنش بین ۰,۰۰۰۵ تا ۰,۰۰۲٪ شروع می‌شود. افزایش فرکانس بارگذاری باعث کاهش این کرنش بر شیمی شود. در شکل ۲، اثر فرکانس بارگذاری و تنش محدودکننده بر مقادیر مدول برشی برای محدوده‌ای از کرنش‌های برشی ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌گردد، به‌طور کلی افزایش فرکانس بارگذاری در هر دو بالاست سرباره و آهکی سبب افزایش مدول برشی شده است. افزایش تنش محدودکننده نیز مقادیر مدول برشی را افزایش داده است. افزایش

در این مطالعه ابتدا مقادیر مدول برشی و نسبت میرایی مصالح در بازه‌ای از کرنش‌های برشی براساس استاندارد ASTM D3999 اندازه‌گیری شد. الگوی بارگذاری در این بخش در جدول ۲ ارائه شده است. بدین منظور بار سیکلی در حداقل ده گام به صورت پله‌ای و در ۱۰۰ سیکل به نمونه‌ها اعمال شد. پس از آن رفتار سیکلی و عملکردی بالاست در الگوی بارگذاری ارائه شده در جدول ۳ و در گام‌های ۵۰۰۰ سیکلی برای تنش محدودکننده ۳۰ و ۶۰ کیلوپاسکال و براساس استاندارد ASTM D5311 بررسی شد.

پس از انجام آزمایش‌های سیکلی، آزمایش‌های پساسیکلی بر روی نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM D7181 انجام شد. سرعت بارگذاری در آزمایش‌های مونوتونی کپساسیکلی بر ابر ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب گردید. همه آزمایش‌ها در شرایط خشک انجام شد.

جدول ۴. الگوی بارگذاری برای اندازه‌گیری مدول برشی و نسبت میرایی بالاست آهکی و سرباره در محدوده‌ای از کرنش‌های برشی

شماره آزمایش	تنش محدودکننده (کیلوپاسکال)	ناهمسانی (σ'_1/σ'_3)	فرکانس بارگذاری (هرتز)
۱	۶۰	۲/۶۷	۲
۲			۵
۳			۱۰
۴	۳۰	۴/۳۳	۲
۵			۵
۶			۱۰

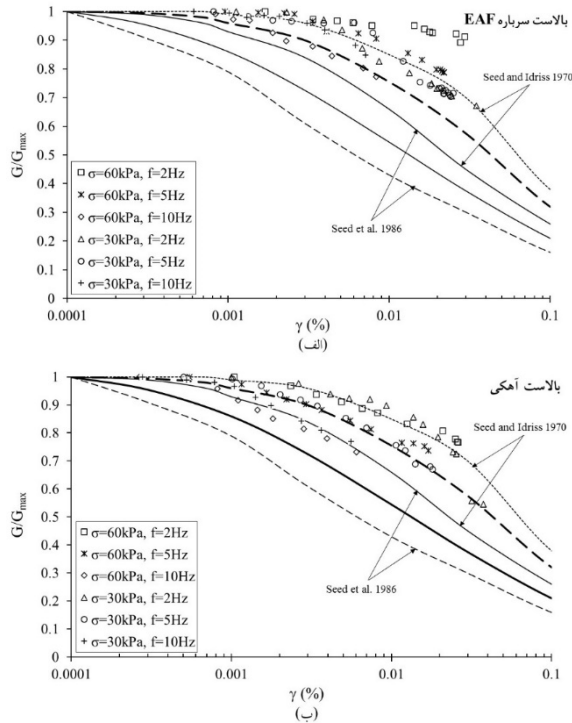
۴- نتایج آزمایش‌ها

برای ارزیابی عملکرد بالاست در شرایط بهره‌برداری لازم است رفتار مصالح تحت بارگذاری‌های سیکلی و استاتیکی بررسی شود. در این بخش نتایج آزمایش‌های سیکلی و پساسیکلی انجام شده بر روی بالاست سرباره فولاد و بالاست سنگ آهکی ارائه می‌گردد.

۴-۱- نتایج مدول برشی و نسبت مدول برشی

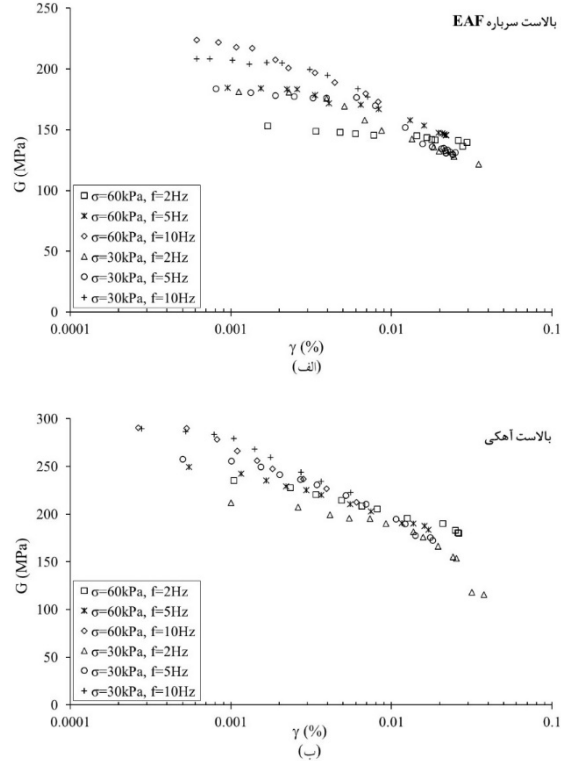
نمودارهای مدول برشی و نسبت میرایی بر حسب کرنش برشی در تحلیل عددی مدلسازی‌های ژئوتکنیکی و یا سایر مطالعات

قرار گرفته است. در فرکانس‌های پایین‌تر و به‌ویژه فرکانس ۲ هرتز رفتاری خارج از محدوده ادبیات فنی مشاهده شده است.



شکل ۳. مقادیر نسبت مدول برشی بر حسب کرنش برشی برای (الف). بالاست *FEA* و (ب) بالاست آهکی

قابل توجه مدول بر شیبها افزایش تنش محدودکننده برای مواد سنگریزه دردیگر پژوهش‌ها نیز مشاهده شده است (Zhou et al, 2017). در همهی شرایط بارگذاری بررسی شده، بالاست سنگ آهکی مدول برشی بزرگتری نتیجه داده است.



شکل ۴. مقادیر مدول برشی بر حسب کرنش برشی برای (الف). بالاست *FEA* و (ب) بالاست آهکی

۴-۲- نتایج نسبت میرایی

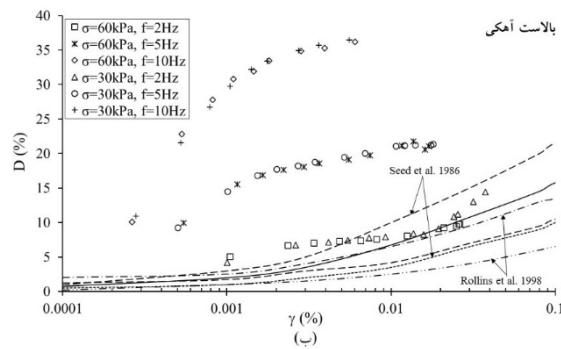
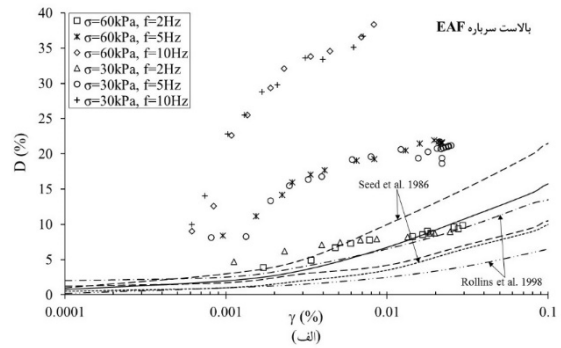
نسبت میرایی میزان انرژی تلف شده توسط مصالح را ارائه می‌کند. اصطکاک میان ذرات خاک، اثر نرخ کرنش و رفتار غیرخطی خاک از مکانیزم‌های موثر در نسبت میرایی خاک است (Zhang et al, 2005). شکل ۴ نسبت میرایی مصالح بررسی شده را برای محدوده‌ای از کرنش‌های برشی ارائه می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که فرکانس بارگذاری اثرگذارترین عامل در مقادیر نسبت میرایی است. نسبت میرایی در همهی نمونه‌ها با افزایش کرنش برشی افزایش یافته است. به‌منظور مقایسه‌ی نسبت میرایی مصالح بالاست با مصالح ماسه و شن، محدوده ارائه شده در مطالعه‌ی Seed و همکاران (۱۹۸۶) و Rollins و همکاران (۱۹۹۸) در نمودارها رسم گردید است. مشاهده می‌گردد که در هر دو مصالح بررسی شده افزایش تنش محدودکننده اثری در تغییرات نسبت میرایی ندارد. بیشترین مقادیر نسبت میرایی اندازه‌گیری شده در فرکانس ۲، ۵ و ۱۰ هرتز برای سرباره در حدود ۱۰، ۲۱ و ۳۸ درصد و برای مصالح آهکی در حدود ۱۴،

در شکل ۳ مقادیر نسبت مدول برشی بر حسب کرنش برشی برای بالاست سرباره و بالاست سنگ آهکی ارائه شده است. افزایش فرکانس بارگذاری به‌طور کلی نسبت مدول برشی را کاهش داده است. افزایش تنش محدودکننده در نمونه‌های بررسی شده روند مشخصی در تغییرات نسبت مدول برشی ایجاد نکرده است. در شرایط بارگذاری یکسان مقادیر نسبت مدول برشی برای بالاست سرباره بیشتر از بالاست سنگ آهکی برآورد شده است. برای اهداف مقایسه‌ای محدوده‌ی نسبت مدول برشی مصالح ماسه (Seed and Idriss, 1970) و مصالح شنی (Seed et al, 1986) نیز در این نمودارها ارائه شده است. مقادیر نسبت مدول برشی مربوط به نمونه بالاست آهکی در مقایسه با بالاست سرباره بیشتر در محدوده ادبیات فنی ارائه شده

در این رابطه، تنش سیکلی تفاضلی و کرنش ϵ_r کرنش برگشت پذیر (الاستیک) در یک سیکل بارگذاری است. شکل ۵ و شکل ۶ نتایج آزمایش های عملکردی را به ترتیب برای تنش محدودکننده ۳۰ و ۶۰ کیلوپاسکال ارائه می کند. مقادیر نشست ارائه شده، نشست های تجمعی خالص در هر گام بارگذاری است. بنابراین برای هر تنش محدودکننده این نشست ها از صفر محاسبه شده و مقادیر نشست اولیه ناشی از بارگذاری های استاتیکی و سیکلی اولیه در نظر گرفته نشده است. مشاهده می گردد که مقادیر نشست در هر دو تنش محدودکننده برای مصالح سنگ آهکی بیش از سرباره است. در بالاست آهکی در تنش های بیشتر از ۱۶۰ کیلوپاسکال نشست های پیشرونده مشاهده شده است. به طور کلی می توان گفت در هر دو مصالح افزایش تنش محدودکننده، نشست های محوری تجمعی نهایی را کاهش داده است. در مصالح آهکی در فرکانس های ۵ هرتز با وجود تنش های کمتر از ۱۳۰ کیلوپاسکال، افزایش در مقادیر نشست مشاهده شده که نشان دهنده این موضوع است که این مصالح برای سرعت های بالا مناسب نیستند. در مصالح سرباره نیز در تنش های سیکلی بالاتر از ۲۰۰ کیلوپاسکال تغییر شکل های پیشرونده مشاهده شده است. به طور کلی تنش سیکلی تفاضلی آستانه تغییر شکل های پیشرونده برای مصالح سرباره فولاد مبارکه در حدود ۲۰۰ کیلوپاسکال است (EbrahimiAlavijeh et al, 2024). کرنش محوری نظیر شروع این تغییر شکل ها برای مصالح سرباره و آهکی به ترتیب در حدود ۰/۰۲۵ و ۰/۰۲ درصد است. در هنگام ایجاد تغییر شکل های پیشرونده و نزدیک شدن به مرحله گسیختگی کاهش در مدول برجهنگی و افزایش در نسبت میرایی مشاهده می گردد (EbrahimiAlavijeh et al, 2024). با وجود این که در آزمایش های انجام شده به طور کلی مدول برجهنگی در مصالح آهکی بیشتر از سرباره برآورد شده، در تنش محدودکننده ۳۰ کیلوپاسکال و در دو گام پایانی (تنش تفاضلی ۱۶۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال) کاهش در مدول برجهنگی مصالح آهکی مشاهده شده است. در مطالعه Delgado و همکاران (۲۰۲۱)، مدول برجهنگی بالاست سرباره در مقایسه با بالاست گرانیتی بیشتر برآورد شده است. مقادیر نسبت میرایی در آزمایش های عملکردی نیز بیش از هر عامل دیگر تحت تأثیر فرکانس بارگذاری است.

در تنش محدودکننده ۳۰ کیلوپاسکال جز دو گام پایانی که مصالح آهکی به حالت گسیختگی رسیده است، تفاوت چندانی

۲۱ و ۳۶ درصد است. مقادیر نسبت میرایی در فرکانس ۵ و ۱۰ هرتز برای هر دو مصالح خارج از محدوده ادبیات فنی مربوط به مصالح شن و ماسه است. با این حال برای فرکانس ۲ هرتز و در محدوده کرنش های ۰/۰۰۳ تا ۰/۰۰۵ درصد به بالا رفتاری مشابه با مطالعه Seed و همکاران مشاهده شده است.



شکل ۴. مقادیر نسبت میرایی بر حسب کرنش برشی برای الف). بالاست FEA و ب). بالاست آهکی

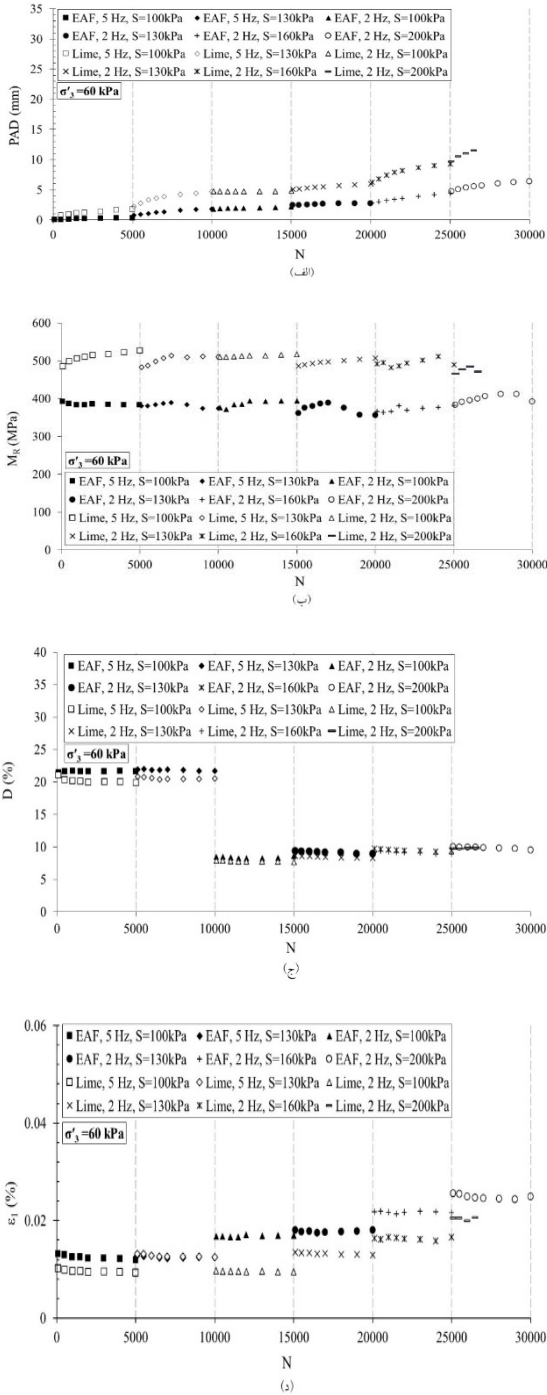
۴-۳- نتایج آزمایش های سیکلی و عملکردی

به منظور بررسی رفتار عملکردی بالاست در بارگذاری های سیکلی، تغییر شکل محوری دائمی (PAD)، مدول برجهنگی (M_R)، نسبت میرایی (D) و کرنش محوری سیکلی (ϵ_r) اندازه گیری شده است. مقادیر مدول برجهنگی، تغییر شکل محوری دائمی، کرنش محوری سیکلی و نسبت میرایی در گام های بارگذاری ۵۰۰۰ سیکلی مطابق با جدول ۳ محاسبه شد. مدول برجهنگی (M_R) با استفاده از رابطه ی زیر محاسبه می گردد.

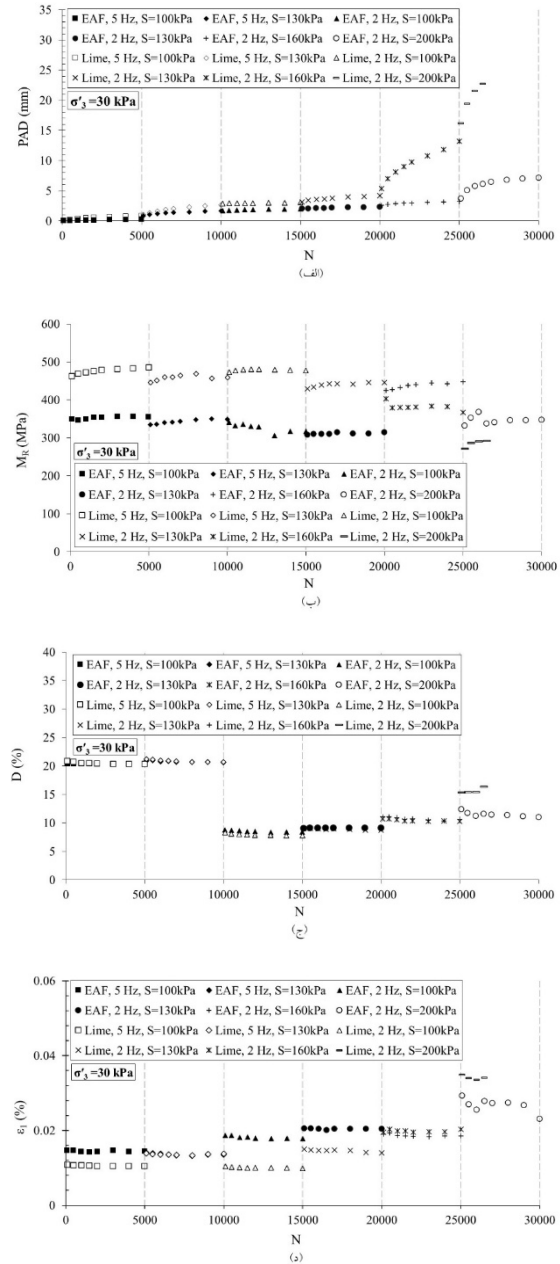
(۱)

$$M_R = \frac{q_{cyc}}{\epsilon_r}$$

در نسبت میرایی دو مصالح مشاهده نشده‌است. اما در تنش محدودکننده ۶۰ کیلوپاسکال و به‌ویژه در فرکانس ۵ هرتز، بالاست سرباره نسبت میرایی بالاتری نسبت به بالاست آهکی دارد.



شکل ۶. اثر فرکانس و تنش سیکی تفاضلی بر (الف) تغییرشکل محوری دائمی، (ب) مدول برجهنگی، (ج) نسبت میرایی و (د) کرنش محوری دائمی بالاست سرباره و بالاست آهکی در تنش محدودکننده ۶۰ کیلوپاسکال



شکل ۵. اثر فرکانس و تنش سیکی تفاضلی بر (الف) تغییرشکل محوری دائمی، (ب) مدول برجهنگی، (ج) نسبت میرایی و (د) کرنش محوری دائمی بالاست سرباره و بالاست آهکی در تنش محدودکننده ۳۰ کیلوپاسکال

نتایج آزمایش مونوتونیک پساسیکی

پس از انجام آزمایش‌های سه‌محوری سیکلی، بر روی نمونه‌ها آزمایش مونوتونیک انجام شد که نتایج آن در شکل ۷ ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌گردد به سبب آن‌که پیش از انجام آزمایش‌های مونوتونیک نمونه‌ها تحت بارگذاری سیکلی بوده‌اند؛ کرنش محوری اولیه دارند. زاویه اصطکاک با فرض چسبندگی صفر از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

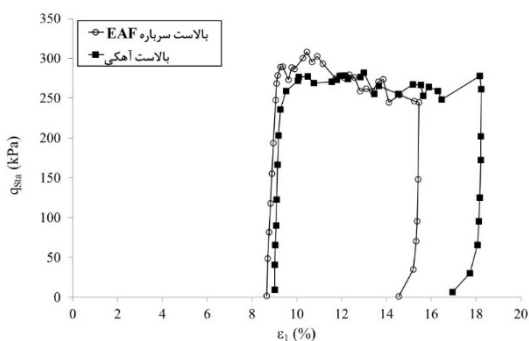
(۲)

$$\sin\phi' = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3}$$

در این رابطه، σ'_1 و σ'_3 به ترتیب تنش‌های اصلی حداکثر و حداقل هستند. در بالاست مبارکه بارگذاری از کرنش بیش از ۸ درصد شروع و تا کرنش بیش از ۱۴ درصد ادامه پیدا کرده است. در بالاست آهکی بارگذاری از کرنش ۹ درصد آغاز و تا کرنش بیش از ۱۸ درصد ادامه یافته است. نکته قابل توجه آن‌که بالاست سرباره در کرنش کوچکتری به مقدار بیشینه خود رسیده است. بیشینه تنش تفاضلی در مصالح سرباره و آهکی به ترتیب در حدود ۳۰۸ و ۲۸۲ کیلوپاسکال است. با توجه به رابطه ارائه شده و تنش محدوده کننده اعمالی (۳۰ کیلوپاسکال)، زاویه اصطکاک برای مصالح سرباره و مصالح آهکی به ترتیب در حدود ۵۷/۰۹ و ۵۵/۸۴ درجه برآورد شده است. زاویه اصطکاک در مطالعه آقای آرایی (۲۰۲۰) برای بالاست سرباره EAF ۵۷/۴ تا ۶۰/۷ درجه است. در این مطالعه مقدار زاویه اصطکاک برای بالاست آهکی ۶۲/۱ درجه گزارش شده است. پس از باربرداری مقداری از کرنش‌ها برگشت پذیر خواهد بود. کرنش برگشت پذیر برای بالاست سرباره و بالاست آهکی در حدود ۰/۹۱ و ۱/۲۱ درصد است. برخی از پژوهشگران از نسبت تنش سیکلی برای توصیف پاسخ سیکلی مصالح استفاده کردند (Delgado et al, 2021; Suiker et al, 2005). نسبت تنش سیکلی از نسبت تنش تفاضلی سیکلی بیشینه به تنش تفاضلی استاتیکی بیشینه که از آزمایش مونوتونیک حاصل می‌گردد، به دست می‌آید. با توجه به نتایج حاصل از آزمایش سیکلی و پساسیکی می‌توان گفت، تغییر شکل‌های پیش‌رونده متوسط (بزرگ) برای بالاست سرباره و آهکی در این مطالعه به ترتیب در نسبت تنش‌های ۰/۶۵ (۰/۸۴) و ۰/۵۹ (۰/۶۴) مشاهده شده است. در مطالعه دلگادو و همکاران (۲۰۱۹)، در نسبت تنش سیکلی بالای ۰/۸۲ مصالح در خزش پلاستیک برای مدت طولانی باقی ماندند. با توجه به نتایج حاصل می‌توان گفت برای هر نمونه یک حد نهایی از تنش

سیکلی وجود دارد که برای تنش‌های بالاتر از آن نمونه به سمت گسیختگی پیش می‌رود. بر اساس آزمایش‌های انجام شده و با توجه به راهنمای استفاده از سرباره ایران، وزن واگن مجاز برای بالاست سرباره EAF کمتر از ۱۰۰ تن است. حداکثر سرعت مجاز برای این مصالح در واگن‌های با وزن کمتر از ۱۰۰ تن، کمتر از ۱۶۰ کیلومتر بر ساعت است. برای بالاست آهکی با توجه به نتایج به دست آمده، وزن واگن مجاز کمتر از ۸۰ تن است.

شکستگی بالاست به عنوان یکی از پارامترهایی در نظر گرفته می‌شود که بر عملکرد مسیرهای بالاست تاثیر می‌گذارد. بیشتر مقادیر شکستگی در نمونه‌ها مربوط به مرحله ساخت است. مقادیر شکست مواد را می‌توان با روش‌های مختلفی محاسبه کرد. در این تحقیق از شاخص شکست Bg (Marsal, 1967) و BBI (Indraratna et al, 2011) استفاده شده است. مقادیر شاخص Bg برای بالاست سرباره و آهکی به ترتیب ۴/۶۲ و ۵/۲۵ درصد است. شاخص BBI نیز برای این مصالح به ترتیب ۰/۲۳۸ و ۰/۱۱۱ است. باید توجه شود که مصالح سرباره تعداد سیکل‌های بالاتری را تجربه کرده با این حال شاخص شکست در بالاست آهکی بیشتر است. این مسئله نشان می‌دهد که مصالح سرباره در مقایسه با مصالح آهکی مقاومت بالاتری در برابر شکست تحت بارگذاری‌های سیکلی و استاتیکی دارد.



شکل ۷. نتایج آزمایش مونوتونیک پساسیکی

۵- نتیجه‌گیری

بلاست یکی از اجزای مهم خطوط بالاستی است که آگاهی از رفتار سیکلی این مصالح در طراحی بهینه و کارآمد خطوط بالاستی ضروری است. استفاده از مصالح بازیافتی و یافتن

۱۴/۰۴/۱۴۰۰) با عنوان "مطالعات امکان سنجی استفاده از مصالح سرباره EAF فولاد مبارکه در پروژه‌های عمرانی" مربوط به شرکت فولاد مبارکه-معاون محترم تکنولوژی و با ابلاغ داخلی بخش اول توسط مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی (به شماره ۱۴۴۳۵-۲۲-۰۰ مورخ ۱۴۰۰/۰۸/۲۶) با عنوان "مطالعات امکان سنجی استفاده از سرباره به عنوان خاکریز مهندسی(زیراساس و اساس راه)، بالاست و زیربالات راه آهن" کد بودجه ۸۱۴۱ است. بدین وسیله از شرکت فولاد مبارکه و همچنین همکاران بخش ژئوتکنیک و زیرساخت مرکز تحقیقات تشکر می‌گردد.

۷-پی‌نوشت‌ها

1. AREMA: American Railway Engineering and Maintenance of Way Association
2. BBI: Ballast Breakage Index
3. EAF: Electric Arc Furnace
4. PAD: Permanent Axial Deformation

۸-مراجع

-Aghaei Araei, A., Razeghi, H. R., HashemiTabatabaei, S., & Ghalandarzadeh, A. (2010). Dynamic properties of gravelly materials. *ScientiaIranica*, 17(4), 245-261.

-Aghaei Araei, A., Razeghi, H. R., Tabatabaei, S. H., & Ghalandarzadeh, A. (2012). Loading frequency effect on stiffness, damping and cyclic strength of modeled rockfill materials. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 33(1), 1-18.

-Araei, A. A., & Ghodrati, A. (2017). Predictive models for normalized shear modulus and damping ratio of modeled rockfill materials. *Acta Geodyn. Geromater*, 14(1), 27-41

-Aghaei Araei, A. (2020). Post-Cyclic Monotonic Behavior of Steel Slags Materials Modified By Geogrid and Tire Chips As Railway Ballast and Sub Ballast. *Transportation Research*, 2(63), 97-108. (In Persian)

-Aghaei Araei, A. (2021). Assessment behavior of steel slag materials as railway ballast and subballast under dynamic and monotonic loading conditions. Retrieved from Research report, BHRC publication. (In Persian)

جایگزین بالاست‌های سنگ طبیعی یک اقدام ضروری برای کمک به حفظ محیط زیست است. در این مطالعه رفتار سیکلی و پساسیکلی بالاست سرباره فولاد مبارکه به‌عنوان یکی از جایگزین‌های پیشنهادی بالاست سنگی بررسی شده و با مصالح سنگ آهکی ایرانکوه مقایسه شده‌است. در این راستا ابتدا پارامترهای دینامیکی مصالح در گام‌های ۱۰۰ سیکلی اندازه‌گیری شده و سپس رفتار عملکردی مصالح در گام‌های ۵۰۰۰ سیکلی بررسی شده‌است. در انتها رفتار پساسیکلی مصالح برای یافتن بیشینه تنش تفاضلی پساسیکلی مورد بررسی قرار گرفته‌است. نتایج اصلی این مطالعه در زیر ارائه شده‌است.

-افزایش فرکانس بارگذاری و تنش محدودکننده سبب افزایش مقادیر مدول برشی شده‌است. افزایش فرکانس بارگذاری نسبت مدول برشی را کاهش داده اما افزایش تنش محدود کننده روند مشخصی در تغییرات نسبت مدول برشی ایجاد نکرده‌است.

-در بررسی تغییرات نسبت میرایی بر حسب کرنش برشی و یا تعداد سیکل بارگذاری، فرکانس بارگذاری اثرگذارترین عامل است. نسبت مدول برشی در فرکانس بارگذاری ۲، ۵ و ۱۰ هرتز در این مطالعه حداکثر ۱۴، ۲۱ و ۳۸ درصد گزارش شده‌است.

-مقادیر مدول برجهندگی و نشست‌های اندازه‌گیری شده در بالاست آهکی در این مطالعه بیشتر از بالاست سرباره است. تنش سیکلی تفاضلی نظیر شروع تغییرشکل‌های پیشرونده در بالاست آهکی و بالاست سرباره به‌ترتیب در حدود ۱۶۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال است. کرنش محوری نظیر شروع تغییرشکل‌های پیشرونده برای این مصالح نیز به‌ترتیب در حدود ۰/۰۲۵ و ۰/۰۲ درصد است. حداکثر وزن واگن مجاز برای بالاست سرباره و آهکی به‌ترتیب کمتر از ۱۰۰ تن و کمتر از ۸۰ تن است.

-بالاتر آهکی در فرکانس‌های ۵ هرتز نیز نشست‌های تا حدود بیش از ۲ میلی‌متر را در ۵۰۰۰ سیکل تجربه کرده و بنابراین این مصالح برای سرعت‌های بالا مناسب نیست.

-بالاتر سرباره تنش تفاضلی پساسیکلی و زاویه اصطکاک بالاتری در مقایسه با بالاست آهکی دارد. بالاست آهکی پس از بارگذاری‌های سیکلی و پساسیکلی شاخص شکست بالاتری را نتیجه داده‌است.

۶-سپاسگزاری

این مقاله بخشی از پروژه تحقیقاتی (با شماره ۴۸۵۰۲۴۳۵ شماره ابلاغیه شماره ۰۴/۵۴۵۵۰-۰۴/۱۴۰۰-۹۶۲۵۰۰۱۰ مورخ

- Delgado, B. G., da Fonseca, A. V., Fortunato, E., & Maia, P. (2019). Mechanical behavior of inert steel slag ballast for heavy haul rail track: Laboratory evaluation. *Transportation Geotechnics*, 20, 100243 .
- Delgado, B. G., da Fonseca, A. V., Fortunato, E., Paixão, A., & Alves, R. (2021). Geomechanical assessment of an inert steel slag aggregate as an alternative ballast material for heavy haul rail tracks. *Construction and Building Materials*, 279, 122438.
- Ebrahimi Alavijeh, B., Mokhtari, M., & Araei, A. A. (2024). Behavior of fresh and recycled slag ballast under cyclic and post-cyclic monotonic loadings using large-scale triaxial tests. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 182, 108720.
- Esmaeili, M., & Askari, A. (2023). Laboratory investigation of the cyclic behavior of rock ballast mixed with slag ballast for use in railway tracks. *Construction and Building Materials*, 365, 130136 .
- Esmaeili, M., & Boloukian-Roudsari, N. (2010). *Track Geotechnology & Substructure Management* Isfahan, Iran: University of Isfahan.
- Indraratna, B., & Nimbalkar, S. (2011). Implications of ballast breakage on ballasted railway track based on numerical modelling .
- Jing, G., Wang, J., Wang, H., & Siahkouhi, M. (2020). Numerical investigation of the behavior of stone ballast mixed by steel slag in ballasted railway track. *Construction and Building Materials*, 262,120015.
- Marsal, R. J. (1967). Large scale testing of rockfill materials. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 93(2), 27-43.
- M.a.P.O.o. Iran, Leaflet No 301: Technical and general specification of ballasted railway, MPO, Tehran Iran, (2005).
- Rollins, K. M., Evans, M. D., Diehl, N. B., & Daily, W. D. (1998). Shear modulus and damping relationships for gravels. *Journal of geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(5), 396-405.
- Aghaei Araei, A., Esmaeili, M., Ghasemzadeh, H., Atarchian, N., Rahmani, I., Yazdani, S. H., Shekarchizadeh, M., Ghalandarzadeh, A., Kalantari, F., & Salamat, A. S. (2023). Guideline for usage of steelslags materials as railway ballast and sub ballast. Retrieved from BHRC Publication. (In Persian)
- AREMA.(2010). Manual for railway engineering, Ballast gradations.
- ASTM C535.(2009). Standard test method for resistance to degradation of large-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine.
- ASTM D3999. (2011). Standard test methods for the determination of the modulus and damping properties of soils using the cyclic triaxial apparatus.
- ASTM D7181. (2011). Standard test method for consolidated drained triaxial compression test for soils.
- ASTM C127. (2012). Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate.
- ASTM D4792, Standard test method for potential expansion of aggregates from hydration reactions, 2013.
- ASTM D5311. (2013). Standard test methods for load controlled cyclic triaxial strength of soil. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM D4253. (2014). Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table.
- ASTM D5731. (2016). Standard test method for determination of the point load strength index of rock and application to rock strength classifications.
- Chamling, P. K., Haldar, S., & Patra, S. (2020a). Behaviour of steel slag ballast for railway under cyclic loading. In *Geotechnical Characterization and Modelling*, Springer. 709-722.
- Chamling, P. K., Haldar, S., & Patra, S. (2020b). Physico-chemical and mechanical characterization of steel slag as railway ballast. *Indian Geotechnical Journal*, 50(2), 267-275 .

- Thakur, P. K., Vinod, J. S., & Indraratna, B. (2013). Effect of confining pressure and frequency on the deformation of ballast. *Géotechnique*, 63(9), 786-790 .
- Zhang, J., Andrus, R. D., & Juang, C. H. (2005). Normalized shear modulus and material damping ratio relationships. *Journal of geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(4), 453-464 .
- Zhou, W., Chen, Y., Ma, G., Yang, L., & Chang, X. (2017). A modified dynamic shear modulus model for rockfill materials under a wide range of shear strain amplitudes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 92, 229-238 .
- Sadeghi, J. M. (2008). Ballasted railway tracks, fundamental of analysis and design. Thran, Iran, *Iran University of Science and Technology*.
- Salim, W. (2004). Deformation and degradation aspects of ballast and constitutive modelling under cyclic loading .
- Seed, H. B. (1970). Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses. *Reoprt, EERC 70-10* .
- Seed, H. B., Wong, R. T., Idriss, I., & Tokimatsu, K. (1986). Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils. *Journal of geotechnical engineering*, 112(11), 1016-1032 .
- Suiker, A. S., Selig, E. T., & Frenkel, R. (2005). Static and cyclic triaxial testing of ballast and subballast. *Journal of geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(6), 771-782 .
- Sun, Y., Nimbalkar, S., & Chen, C. (2018). Grading and frequency dependence of the resilient modulus of ballast. *Géotechnique letters*, 8(4), 305-309 .

Comparison of Cyclic and Post-Cyclic Monotonic Behavior of Steel Slag Ballast and Limestone Ballast

Ata Aghaei Araei, Associate Professor, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran.

Bahareh Ebrahimi Alavijehb, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

Maryam Mokhtari, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

E-mail: aghaeiarai@bhrc.ac.ir

Received: June 2024- Accepted: September 2024

ABSTRACT

The ballast layer is one of the most important components of the ballasted track, which is composed of natural crushed rock materials. The construction of new ballasted tracks and maintenance operations of existing railway tracks increase the need for ballast. Therefore, finding alternative materials for rock ballast would be essential for the protection of the environment. Steel slag, as a by-product of the steel production process, is one of the alternative materials to natural rock ballast. In this study, the behavior of steel slag ballast has been compared with limestone ballast, using large-scale triaxial tests. The results show that limestone ballast has a higher shear modulus and resilient modulus. The allowable speed and axial load for ballasted tracks with slag ballast is higher than that of limestone ballast. The allowable cyclic stress and threshold strain of progressive deformations for slag ballast are about 200 kPa and 0.025%, respectively, and these values are about 160 kPa and 0.02% for limestone ballast, respectively. Slag ballast has a higher maximum static deviator stress and a higher friction angle compared to limestone ballast. Slag aggregates also resulted in higher abrasion and breakage resistance than limestone aggregates.

Keywords: Slag Ballast, Limestone Ballast, Large-Scale Triaxial Test, Cyclic Behavior, Post-Cyclic Monotonic Behavior