

بررسی تجربی مقاومت برشی دانه‌های سرباره فولاد BOF و EAF

در حالت خشک، غرقاب و خشک-غرقاب

مقاله علمی - پژوهشی

ایرج رحمانی*، استادیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران
محمد افشاری، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد واحد تهران مرکز، تهران، ایران

عطا آقایی آرای، دانشیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: I.Rahmani@Bhrc.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۲۳ - پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۵

صفحه ۲۳۸-۲۲۳

چکیده

یکی از مهمترین محصولات جانبی صنعت فولاد سازی، سرباره فولاد است. استفاده سرباره فولاد به عنوان ضایعات این صنعت، در پروژه‌های ژئوتکنیکی می‌تواند از یک طرف در کاهش حجم دپوهای این محصول نقش داشته باشد و از طرف دیگر باعث کاهش اثرات زیست محیطی برداشت مصالح از طبیعت شود. در این مقاله، خصوصیات مقاومت برشی سرباره‌های فولاد مورد مطالعه قرار گرفت. دو نوع سرباره‌ی کوره‌ی فولادسازی اکسیژنی (BOF) و کوره‌ی قوس الکتریکی (EAF) حاصل از کارخانه‌ی ذوب‌آهن اصفهان و فولاد مبارکه سپاهان مورد آزمایش قرار گرفتند. در این مطالعه آزمایشات برش مستقیم بر روی دو نوع دانه بندی تحت چهار تنش قائم ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال در حالت خشک، غرقاب و خشک-غرقاب انجام شد. براساس نتایج به دست آمده سرباره‌های فوق دارای مقدار زاویه اصطکاک داخلی بین ۲۸ تا ۶۸ درجه هستند و چسبندگی این مصالح در محدوده ۰ تا ۳۲ کیلوپاسکال قرار گرفت. این نتایج نشان دادند که سرباره فولاد نسبت به خاک طبیعی دارای مقاومت برشی بسیار بالاتری هستند و با توجه نتایج آزمایش‌های انجام شده می‌توان به عنوان مصالح در خاکریزهای مهندسی استفاده شوند.

واژه‌های کلیدی: کاربرد سرباره فولاد، خصوصیات سرباره، مقاومت برشی، غرقاب، خشک-غرقاب

۱- مقدمه

سرباره آهن و فولاد محصول جانبی فرآیند ساخت فولاد از سنگ آهن است. سرباره هنگامی تولید می‌شود که سیلیس (SiO₂) و سایر ترکیبات غیرآهنی در هنگام کاهش و تصفیه ذوب شده و با آهک (CaO) ترکیب شوند. محصولات آهن و فولاد به عنوان مواد مهم ساخته دست بشر که استفاده زیادی در زیر ساخت‌های حمل و نقل دارند. امروزه محصولات سرباره آهن و فولاد مشمول مدیریت تولید و کنترل کیفیت متناسب با کاربردهای خاص خود هستند تا اطمینان حاصل شود که مطابق با استانداردهای زیست محیطی قابل استفاده و اجرا هستند. آن‌ها بیشتر به عنوان اقلام سازگار با استانداردهای صنعتی ژاپن (JIS) یا محصولات سازگار با محیط زیست مشخص شده در قانون خرید سبز در بازار معرفی می‌شوند (Sasaki, T.2015). مشابه ضایعات تولید شده توسط سایر فرآیندهای صنعتی، فولادسازی نیز محصول جانبی خاص خود را دارد که یکی از ضایعات مهم آن اصطلاحاً سرباره نامیده می‌شود. تولید یک تن فولاد بسته به روش ساخت و نوع کوره مورد

- Tsakiridis, P. E., -and Perkins, D. 2004
 Papadimitriou, G. D., Tsivilis, S., and Koroneos, C. 2008
 انجام شده برای ارزیابی ویژگی‌های ژئوتکنیکی سرباره‌ی فولادی نسبتاً کم است (Ghionna, V., Pedroni, S.,)
 Pamukcu, S., and -Tenani, P., and Veggi, S. 1996
 Poh, H. Y., Ghataora, S. G., and -Tuncan, A. 1993
 2006. (Ghazireh, N., Yildirim and Prezzi, 2009) به منظور کاهش مشکل دفع سرباره و صرفه جویی در استفاده از منابع طبیعی در مهندسی ژئوتکنیک، مطالعاتی برای استفاده مناسب از سرباره‌های فولاد انجام دادند. در تحقیق دیگری توسط Rohde, 2003 رفتار سرباره کوره قوس الکتریکی (EAF) توسط یک سری آزمایش‌های دانه‌بندی، لس‌آنجلس، تراکم، نسبت باربری کالیفرنیا، مدول برجهندگی و آزمایش تورم سنجیده شد. یافتن روش موثر در استفاده از سرباره‌های فولاد به عنوان محصول فرعی فولادسازی و جلوگیری از تبدیل آن به ضایعات از اهمیت خاصی برخوردار است. در این بین، استفاده از سرباره‌های فولاد در پروژه‌های راهسازی عموماً به دلیل هزینه حمل بالا، متداول نمی‌باشد. باید در نظر داشت که PH بالای سرباره فولاد می‌تواند در تسریع خوردگی کالورت‌های مدفون، لوله‌های آلومینیومی و فولادی گالوانیزه موثر باشد، در ضمن PH بالا می‌تواند زندگی آبزیان را در نهرها و آبروهای مجاور راه‌ها به خطر بیندازد. از این رو بدون انجام آزمون‌های کافی، کاربرد سرباره فولاد در دانه‌بندی لایه اساس راه‌های ایالت واشنگتن توصیه نشده است. با توجه به ویژگی‌های سرباره‌ها اعم از دوام و پایایی مناسب، ظرفیت باربری بالا، سختی زیاد و قابلیت استفاده در شرایط آب و هوایی مختلف، استفاده و کاربری آنها در پروژه‌های مختلف به شرط تعریف و ارایه ضوابط و مشخصات فنی می‌تواند بسیار مفید باشد (WSDOT 2015, ESHB 1299, 2015). به عنوان مثال، هنگامی که از سرباره فولاد به عنوان مصالح دانه‌ای در لایه اساس یا زیراساس استفاده می‌شود، گسترش حجم ظاهری این لایه‌ها به صفر می‌رسد. در حالی که توده‌ای از مصالح استفاده، تقریباً ۲۰۰-۴۰۰ کیلوگرم سرباره تولید می‌کند. هر ساله ۴۰۰ میلیون تن سرباره در سراسر جهان تولید می‌شود (World Steel Association, 2016). سرباره‌های فولاد در طول هر دو عملیات فولادسازی و پالایش تولید می‌شوند. دو فرآیند عمده‌ی فولادسازی وجود دارد که سرباره‌ی فولاد را به عنوان یک محصول جانبی تولید می‌کنند: (۱) فرآیند کوره‌ی فولادسازی اکسیژنی (BOF) و (۲) فرآیند کوره‌ی قوس الکتریکی (EAF). سرباره‌های تولید شده از این ۲ فرآیند، به ترتیب، سرباره‌ی فولاد BOF و سرباره‌ی فولاد EAF نامیده می‌شوند. در سال ۲۰۱۹، تولید جهانی فولاد خام ۱۸۶۹ میلیون تن برآورد شده است (World Steel Association, 2020)، که از این میزان بین ۳۲۰ میلیون تا ۳۸۴ میلیون تن سرباره آهن و ۱۹۰ تا ۲۸۰ میلیون تن سرباره فولاد تولید شده است. اطلاعات مربوط به تولید واقعی سرباره آهنی ایالات متحده در دسترس نیست، اما فروش سرباره در داخل آمریکا در سال ۲۰۱۹ حدود ۱۷ میلیون تن با ارزش تقریبی ۴۷۰ میلیون دلار تخمین زده شد (USGS, 2020). کشور ایران نیز در سال ۲۰۱۹ تقریباً ۲۵,۶ میلیون تن فولاد تولید کرده است. در دهه‌های گذشته، تحقیقات انجام شده بر استفاده از سرباره‌های فولاد به عنوان مصالح سنگی درشت‌دانه و ریزدانه در مخلوط‌های آسفالتی (Xue, Y., Wu, S., Hou, H., and Zha, J., 2006-2007, Wu, S., Xue, Y., Ye, Q., -Asi, I. M., 2007-2006, Ahmedzade, P., and Sengoz, -and Chen, Y. 2007 -B. 2009, Shen, D., Wu, C., and Du, J., 2009) به عنوان مصالح سنگی بتن (Montgomery D. G., and Wang, G. 1991, Maslehuddin, M., Sharif, M. A., -Shameem, M., Ibrahim, M., and Barry, M. S. 2003, Anastasiou, E., and Papayianni, I. 2006, Manso, J. M., Polanco, J. A., Losanez, M., and Gonzales, J. 2006, Conjeaud, M.,) به عنوان افزودنی سیمان (George, C. M., and Sorrentino, F. P. 1981, -Tufekci, M., Demirbas, A., and Genc, H. 1997, Murphy, J. N., Meadowcroft, T. R., and Barr, P. 1997 -V. 2002, Altun, I. A., and Yilmaz, I. 2002) و به عنوان مصالح خام برای کلینکر سیمان (Renfrew, S.,)

سرباره‌های تولید شده در این فرآیندها، به ترتیب سرباره فولاد BOF و سرباره فولاد EAF نامیده می‌شوند. سرباره EAF در آغاز فرآیند تولید فرآیند فولادسازی ایجاد می‌شود. سرباره BOF شامل مقداری مواد ناخالص مانند SiO_2 Al_2O_3 است. برای جدا کردن این عناصر ناخالص از آهن گداخته، مقدار معینی مواد افزودنی به آن اضافه می‌گردد. این مواد افزودنی با سیلیس و آلومین ترکیب شده و سرباره مذاب تولید می‌گردد و چون این ماده از آهن گداخته سبکتر است، در بالای کوره باقی می‌ماند و سپس از کوره خارج می‌گردد. نمونه‌های مورد استفاده در این تحقیق بعد از تهیه از کارخانه‌های فولادسازی از الک‌های ۱ اینچ، ۳/۴ اینچ، نمره ۴، نمره ۱۰، نمره ۴۰ و نمره ۲۰۰ عبور داده شدند؛ سپس نسب‌های تعیین شده در آزمایشگاه با هم مخلوط و نمونه‌های مورد نظر BOF و EAF آماده شد. شکل شماره ۱ حدود اندازه نمونه‌های مورد استفاده در این تحقیق را بعد از عبور از الک‌های مورد نظر نشان می‌دهد. جدول شماره ۱ خلاصه ترکیب شیمیایی مصالح BOF و EAF را نشان می‌دهد. سرباره فولاد به عنوان ماده‌ای با مقدار اکسید کلسیم بالا طبقه‌بندی می‌شود، زیرا مقدار CaO برای BOF و EAF به ترتیب ۳۴،۶۸ و ۳۱،۰۸ درصد می‌باشد.



شکل ۱. دانه‌بندی استفاده شده برای انجام آزمایشات

جدول ۱. ترکیب شیمیایی سرباره BOF و EAF

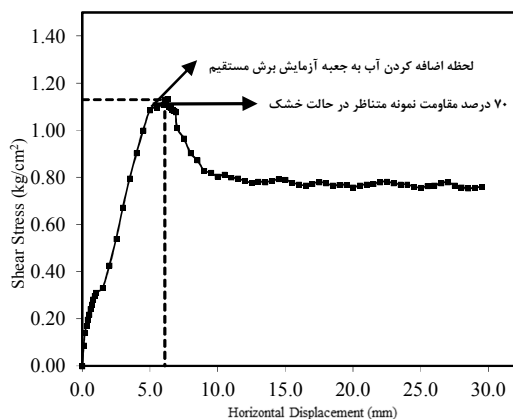
Chemical composition	BOF(%)	EAF(%)
Weight loss due to blush	4.95	16.42
SiO_2 (%)	20.04	18.08
Al_2O_3 (%)	4.90	6.65
Fe_2O_3 (%)	33.60	20.60
CaO (%)	34.68	31.08
MgO (%)	1.2	4.8
SO_3 (%)	0.17	2.08

دانه‌ای در شرایطی که به طور کامل متراکم شده باشد باز هم حاوی فضاهای خالی است (Wang G., Wang Y., and Gao Z., 2010). یکی از عمده‌ترین کاربردهای سرباره‌های فولاد در پروژه‌های راهسازی و احداث خطوط راه آهن می‌باشد (Shen, W., Zhou, M., Ma, Sure, P., Lindqvist, J., -W., Hu, J., & Cai, Z., 2009 Motz, H. and Geiseler, J. -Arm, M. et al., 2009 Foster, 1969, Holliday, 2001). بر اساس مطالعات (1997 زاویه اصطکاک داخلی سرباره‌ها بین ۴۰ و ۵۰ درجه گزارش شده است. این مطالعات هیچگونه اطلاعاتی در خصوص نوع سرباره مورد آزمایش و نیز شرایط آزمایش‌های تجربی که این مقادیر از آن حاصل شده‌اند را به طور مشخص تعیین نمی‌نماید. هدف اصلی از این مقاله، بررسی امکان استفاده از سرباره‌های فولاد به عنوان مصالح ژئوتکنیکی راه و راه‌آهن و شناسایی راه کارهایی جهت استفاده مفید از این سرباره‌ها در راستای یاد شده می‌باشد. در این تحقیق اثر غرقاب شدن، دانه‌بندی و جنس مصالح بر مشخصات مقاومت برشی خاکریزهای مهندسی راه و راه آهن با استفاده از سرباره‌های فولادی BOF و EAF محصول کارخانه ذوب آهن اصفهان و فولاد مبارکه اصفهان، مورد بررسی قرار گرفت. همچنین در این پژوهش، دو نوع دانه‌بندی در حد ماسه‌ای (G1) و در حد شن (G2) بر اساس مطالعه ضوابط فنی مربوط به توزیع دانه‌بندی لایه‌های روسازی راه‌ها و زیر بالاست راه آهن و همچنین امکانات آزمایشگاهی موجود انتخاب شد.

۲- مواد و روش‌ها

نمونه‌های سرباره BOF و EAF برای استفاده در این تحقیق توسط دو شرکت بزرگ فولادسازی در شهر اصفهان و کشور ایران تولید شده است. در جهان دو روش عمده فولادسازی وجود دارد که سرباره فولاد، به عنوان یک محصول جانبی با هر دو روش تولید می‌شود. فرآیندهای کوره فولادسازی اکسیژنی و کوره قوس الکتریکی در تولید فولاد مورد استفاده قرار می‌گیرند.

مطالعه اثر غرقاب شدن، آزمون‌ها در سه حالت خشک، غرقاب و خشک-غرقاب مورد آزمایش قرار گرفتند. در اینجا آزمون خشک به معنی آزمون تهیه شده در رطوبت بهینه بدست آمده از نتایج آزمایش تراکم می‌باشد. برای آماده‌سازی آزمون در حالت غرقاب، نمونه همانند آزمون خشک ساخته شده با توجه به دانه‌بندی آزمون‌ها که درشت‌دانه می‌باشند، آزمون‌ها به مدت ۲۴ ساعت در شرایط غرقاب قرار گرفتند. در حالت خشک-غرقاب، مشابه شرایط آزمون‌های خشک و غرقاب، نمونه ساخته شده است. سپس با اعمال سربار قائم، آزمون تحت نیروی افقی قرار گرفت. پس از اعمال نیروی برشی به آزمون، آزمایش تا رسیدن آزمون به تنش برشی معادل ۷۰ درصد مقاومت برشی حداکثر به دست آمده از مصالح در تنش نرمال مورد نظر در حالت خشک ادامه یافت. پس از رساندن آزمون به سطح تنش مذکور، آزمون با توجه به محدودیت‌های دستگاه برش مستقیم، آگیری شد، و آزمایش تا برش نهایی انجام شد. نمودار شماره ۱ نحوه انجام این روش آزمایش را نشان داده است.



نمودار ۱. شرایط انجام آزمایش برش مستقیم در حالت خشک-غرقاب

۳- نتایج و بحث

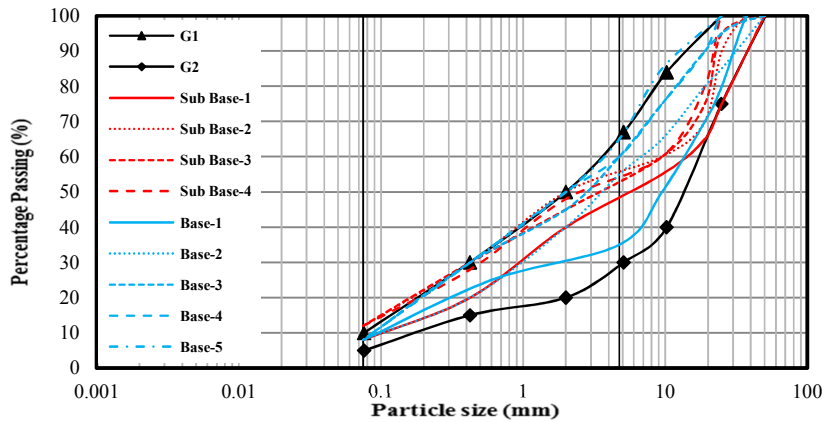
۳-۱ دانه‌بندی و طبقه‌بندی

نمودار شماره ۲ منحنی دانه‌بندی سرباره‌های مورد استفاده در این تحقیق را به همراه حدود تعیین شده در

مجموعه آزمایش‌های مهندسی انجام شده مطابق با استانداردهای بین‌المللی مربوطه انجام شده است. برای مشخص کردن توزیع اندازه ذرات (ASTMD422)، حدود اتربرگ (ASTM-D4318)، چگالی ویژه ذرات (ASTM-D854)، تراکم استاندارد (AASHTO-T99)، تراکم اصلاح‌شده (AASHTO-T180)، لس‌آنجلس (ASTM-C131)، حداقل و حداکثر وزن مخصوص خشک (ASTM-D4254-ASTM-D4253)، نسبت باربری کالیفرنیا (ASTM-D1883) و برش مستقیم (ASTM-D3080) استفاده شده است. پس از تعیین مشخصات فیزیکی و مهندسی این مصالح از جمله میزان رطوبت بهینه (OMC) و حداکثر وزن مخصوص خشک حداکثر (MDD)، نمونه‌ها برای انجام آزمایش‌های نسبت باربری کالیفرنیا و تعیین مقاومت برشی آماده شدند. نمونه‌های مورد آزمایش هم به وسیله تراکم استاندارد و هم به وسیله تراکم اصلاح‌شده متراکم شدند. برای ساخت نمونه‌های آزمایش از ۹۵ درصد OMC و OMC استفاده شده است. نمونه‌های آزمایش CBR علاوه بر ساخت در شرایط خشک (با رطوبت بهینه)، برای شبیه‌سازی بدترین شرایط، به مدت ۹۶ ساعت در حوضچه آب قرار داده شدند و سپس نمونه‌ها با سرعت ۱,۲۷ میلی‌متر در دقیقه تحت آزمایش قرار گرفتند. آزمایش‌های برش مستقیم بزرگ مقیاس (DST) برای تعیین پارمترهای مقاومت برشی نمونه‌ها در شرایط آزمایشگاهی انجام شد. نمونه‌ها در تراکم استاندارد و اصلاح‌شده و با مقادیر ۹۵ درصد OMC و MDD حاصل از آزمایش‌های تراکم در داخل جعبه برشی به ابعاد (۳۰۰ میلی‌متر عرض، ۳۰۰ میلی‌متر طول و ۱۵۰ میلی‌متر ارتفاع) متراکم شدند. جعبه برش مورد نظر دارای دو سلول یک اندازه که سلول بالای آن ثابت و سلول پایین آن متحرک، است. تنش‌های قائم اعمالی به نمونه‌ها به ترتیب ۲۵ کیلوپاسکال، ۵۰ کیلوپاسکال، ۷۵ کیلوپاسکال و ۱۵۰ کیلوپاسکال بود. نمونه‌ها با سرعت ۰,۵۴ میلی‌متر بر دقیقه تحت برش قرار گرفتند. به منظور

است (Rahmani, Iraj, Afshari, Mohammad, Aghaei) آزمایش حدود اتربرگ بر روی نمونه‌های BOF و EAF نشان از عدم وجود خاصیت خمیری می‌دهد و این متریال در بحث خاصیت خمیری همانند خاک درشت‌دانه عمل می‌کنند. نتایج بدست آمده نشان داد میزان سایش لس‌آنجلس سرباره BOF برای دانه بندی ۱ و ۲ به ترتیب برابر ۴۲ و ۳۹ درصد و برای سرباره EAF برای دانه بندی نوع ۱ و ۲ به ترتیب ۲۱ و ۲۴ به دست آمده است.

استاندارد را نشان می‌دهد. در این تحقیق از حد بالا (G1) و حد پایین (G2) استفاده شده است. دانه‌بندی‌های تعیین شده برای استفاده در این تحقیق الزامات مربوط به لایه‌های روسازی برآورده می‌کند. دانه‌بندی نوع ۱، ماسه بد دانه‌بندی شده لای دار (SP-SM) و دانه‌بندی نوع ۲، شن بد دانه‌بندی شده لای دار (GP-GM) بر طبق سیستم طبقه‌بندی USCS تعیین شده است. نتایج حاصل از دانه‌بندی انتخاب شده و سیستم‌های طبقه‌بندی بر طبق ASTM و AASHTO در این تحقیق را نشان داده شده

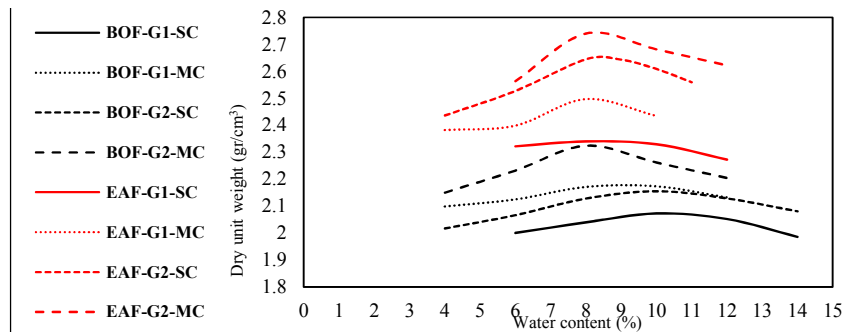


نمودار ۲. منحنی دانه‌بندی مورد استفاده برای سرباره BOF و EAF

است، با افزایش انرژی تراکم در نمونه‌های BOF و EAF و همچنین تغییر در دانه‌بندی از نوع ۱ به نوع ۲، مقادیر MDD افزایش داشته‌است ولی میزان تغییرات OMC بسیار ناچیز می‌باشد (Rahmani, Iraj, Afshari, Mohammad, Aghaei Arai, Atta, Attarchian, Nahid,2019).

۳-۲- تراکم

نمودار شماره ۳ منحنی تراکم استاندارد (SC) و اصلاح شده (MC) سرباره BOF و EAF را نشان می‌دهد. نمونه‌های BOF و EAF منحنی‌های تراکم نسبتاً منظم با یک نقطه اوج را نشان دادند. منحنی‌های تراکم دست آمده برای این نمونه‌ها، مشابه منحنی‌های تراکم خاک‌های درشت‌دانه هستند. همانطور که نشان داده شده

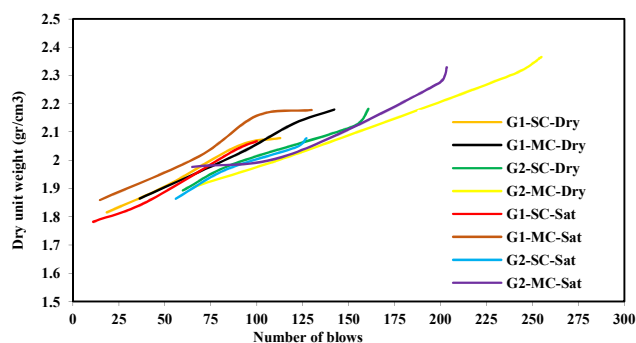


نمودار ۳. منحنی‌های تراکم استاندارد و اصلاح شده برای سرباره BOF و EAF

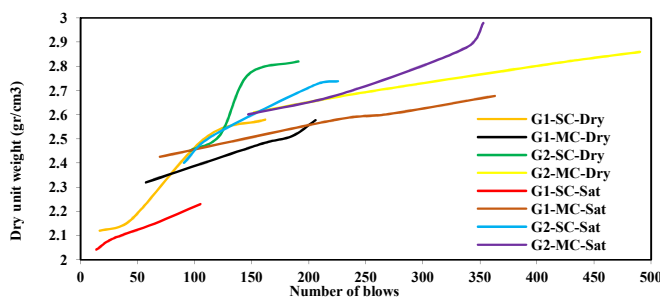
۳-۳ مقاومت باربری کالیفرنیا (CBR)

می‌باشد. این مقادیر میانگین برای نمونه EAF در حالت خشک ۱۶۸ و در حالت غرقاب ۱۸۳ به دست آمد. در نمونه‌های EAF غرقاب شدن باعث افزایش در مقادیر CBR شده است که این مسئله می‌تواند بر اثر برخورد آب و آهک آزاد (Cao) موجود در مصالح EAF باشد. آزمون‌های CBR آزمایشگاهی با استفاده از یکی از انرژی‌های تراکمی آزمایش شده، نتیجه مساوی ندارند و باید بر اساس آن از نتایج آن‌ها استفاده شود (Rahmani, Iraj, Afshari, Mohammad, Aghaei Arai, Atta, Nahid, 2019).

نمودار شماره ۴ نتایج آزمایش‌های CBR روی نمونه BOF و EAF را نشان داده است. آزمایش‌های مقاومت باربری کالیفرنیا در این تحقیق در حالت خشک (با رطوبت بهینه) و غرقاب انجام شد. مقادیر بدست آمده در نمونه BOF و EAF نشان داد که می‌تواند پارامتر CBR مجاز تعیین شده در آیین‌نامه‌ها را برای لایه‌های روسازی برآورده کند. میانگین CBR بدست آمده برای نمونه BOF در حالت خشک ۱۱۳ و در حالت غرقاب ۹۵ است. این نتایج نشان داد که غرقاب شدن نمونه‌های BOF باعث کاهش در این مقادیر



(۱)



(۲)

نمودار ۴. وزن مخصوص خشک حداکثر - ضربات - BOF (۱) و EAF (۲)

سطح تنش‌های ۵۰، ۷۵ و ۱۵۰ کیلوپاسکال برای حالت خشک-غرقاب استفاده شده است. نتایج تنش برشی - جابه‌جایی افقی همه نمونه‌های BOF و EAF در نمودارهای شماره ۵ تا ۱۲ و جدول شماره ۲ ارائه شده است.

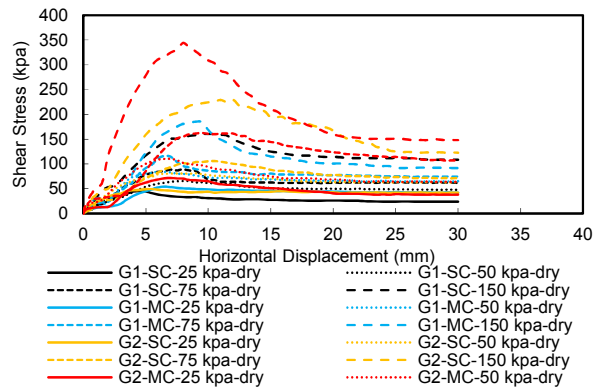
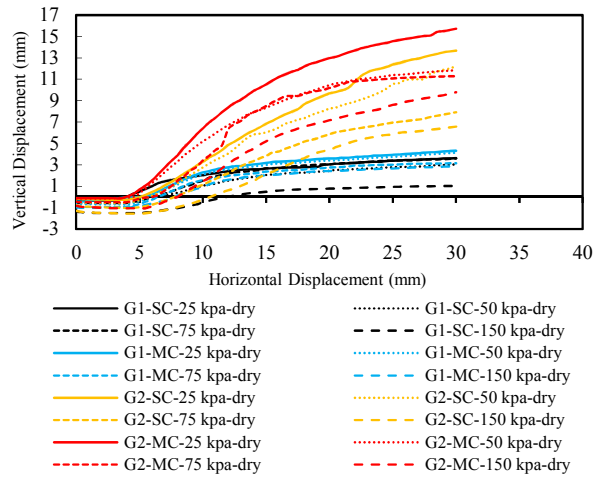
۳-۴ برش مستقیم بزرگ مقیاس

پارامترهای مقاومت برشی سرباره‌های فولاد، از جمله زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) و چسبندگی (C) با استفاده از آزمون DST تعیین شد. سطح تنش‌های ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۵۰ کیلوپاسکال برای حالت آزمایش خشک و غرقاب و

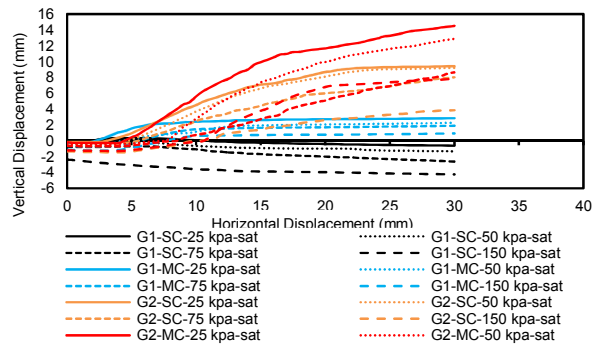
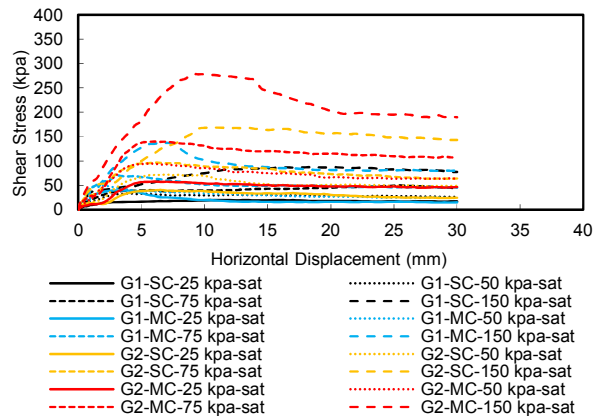
۱-۴-۳- نتایج نمونه BOF

در نمودارهای شماره ۵ تا ۸ نتایج آزمایش‌های برش مستقیم در حالت خشک، غرقاب و خشک-غرقاب برای نمونه BOF نشان داده شده است. تمام نمونه‌های مورد آزمایش تا کرنش محوری ۳۰۰ میلی‌متر برای مشخص شدن تنش پسماند ادامه پیدا کردند. حداکثر مقدار تنش‌های برشی در جابه‌جایی افقی ۴,۵ تا ۱۲ میلی‌متر رخ داده است. بیشترین مقدار تنش برشی در نمونه‌های خشک مربوط به G2-MC-150Kpa (دانه‌بندی نوع ۲- تراکم اصلاح‌شده-تنش قائم ۱۵۰ کیلوپاسکال) می‌باشد. تغییرات تنش برشی در نمونه‌ها نشان داد که پس از رسیدن به حداکثر تنش برشی در نمونه‌ها افت نمودارها شروع می‌شود و تا رسیدن به تنش ثابت ادامه پیدا می‌کند. نمونه‌ها پس از اعمال بار در ابتدای آزمایش دچار یک نشست شده‌اند و هرچه تراکم بالاتر و دانه‌بندی درشت‌تر از میزان نشست کاسته شده است. در نمونه G1-SC-150 Kpa بیشترین نشست و کمترین اتساع رخ داده است و حداکثر اتساع در حالت خشک مربوط به نمونه G2-MC-25Kpa است که با توجه به درشت‌دانه‌تر بودن دانه‌بندی نوع ۲ طبیعی به نظر می‌رسد. در نمونه‌هایی که ۲۴ ساعت در آب غرقاب شده، و سپس مورد آزمایش قرار گرفتند کاهش در مقادیر تنش‌های برشی نسبت به نمونه‌های خشک مشخص است. حداکثر مقادیر تنش‌های برشی در جابه‌جایی افقی ۲ تا ۲۵ میلی‌متر اتفاق افتاده است که نسبت به حالت خشک این مقادیر دچار تغییر شده‌اند. این تغییرات احتمالاً به خاطر تغییر در مقادیر نشست نمونه‌ها می‌باشد. بیشترین مقدار تنش برشی در نمونه‌های غرقاب مربوط به نمونه G2-MC-150Kpa می‌باشد. شیب صعودی تنش برشی نمونه‌ها در حالت غرقاب نسبت به حالت خشک ملایم‌تر بوده و پس از گسیختگی، نمونه‌ها با شیب ملایم‌تری افت مقاومت را نشان می‌دهند. نمونه‌ها پس از اعمال بار قائم دچار نشست و سپس دچار اتساع شده‌اند. این موضوع در

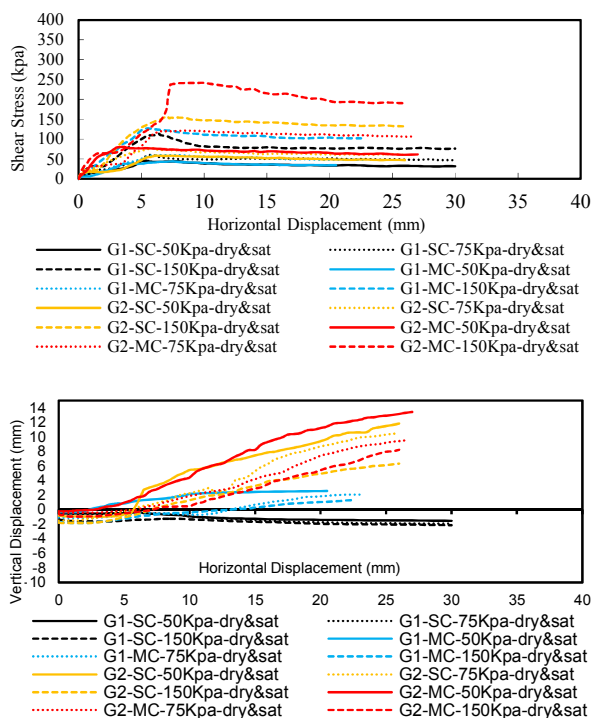
نمونه‌های G1-SC مشاهده نشده است و در این نمونه فقط شاهد نشست نمونه هستیم. بیشترین نشست نمونه‌ها در حالت غرقاب مربوط به نمونه G1-SC-150Kpa می‌باشد که حدوداً ۴ میلی‌متر می‌باشد و بیشترین مقدار اتساع ۱۴,۵ میلی‌متر مربوط به نمونه G2-MC-25Kpa می‌باشد. در آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌ها در حالت خشک-غرقاب رفتار نمونه‌ها برای زمانی در نظر گرفته شده است که نمونه در حین گسیختگی در حالت خشک به طور ناگهانی غرقاب شود و در طبیعت هم بارندگی بر روی نمونه خشک در حال گسیختگی می‌تواند چنین پدیده‌ای را ایجاد کند. حداکثر مقدار تنش برشی در جابه‌جایی ۳,۶ تا ۱۰ میلی‌متر رخ داده است که این حالت بیشتر شبیه به نمونه‌ها در حالت خشک می‌باشد. مقادیر پارامترهای مقاومت برشی در نمونه‌های خشک-غرقاب در شروع آزمایش شبیه به نمونه در حالت خشک است و وقتی که مصالح مورد نظر در حین آزمایش غرقاب می‌شوند افت ناگهانی در سطح تنش برشی مشاهده می‌شود. مقاومت برشی نمونه‌ها در این حالت در تمام تنش‌ها از حالت خشک کمتر می‌باشد ولی نسبت به حالت غرقاب روند مشخصی نشان داده نشده است. بیشترین مقدار تنش برشی در این حالت مربوط به نمونه G2-MC-150Kpa می‌باشد. نتایج چسبندگی بدست آمده در آزمایش‌های در حالت خشک، غرقاب و خشک-غرقاب روند ثابت و مشخصی از خود نشان نداده‌اند که این موضوع می‌تواند ناشی از پراکندگی مقادیر Cao در نمونه‌ها باشد که احتمالاً روی مقادیر چسبندگی تاثیر گذار خواهد بود. توصیه می‌شود مقادیر چسبندگی در رفتار مقاومت برشی نمونه‌ها حتی‌المقدور لحاظ نشود. به طور کلی مقادیر پارامترهای مقاومت برشی BOF نشان داد که این مصالح از مقاومت بسیار مطلوبی برخوردار است و حتی در مواردی این مصالح مانند یک توده سنگ رفتار از خود نشان داده‌اند. تمامی نتایج در جدول شماره ۲ نشان داده شده است.



نمودار ۵. نتایج آزمایش برش مستقیم برای سرباره BOF در حالت خشک

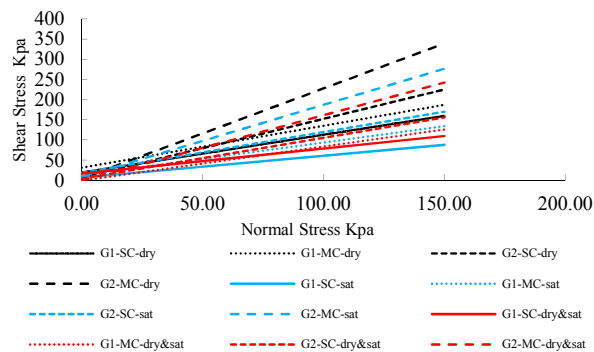


نمودار ۶. نتایج آزمایش برش مستقیم برای سرباره BOF در حالت غرقاب



نمودار ۷. نتایج آزمایش برش مستقیم برای سرباره BOF در حالت خشک-غرقاب

می‌باشد. تغییرات تنش برشی در نمونه‌ها نشان داد که پس از رسیدن به حداکثر تنش برشی در نمونه‌ها افت نمودارها با سرعت کم شروع می‌شود. نمونه‌ها پس از اعمال بار در ابتدای آزمایش دچار یک نشست شده‌اند و هرچه تراکم بالاتر و دانه‌بندی درشت‌تر از میزان نشست کاسته شده است به طوری که در بعضی از نمونه‌ها مقادیر نشست تقریباً صفر بوده است. در نمونه G1-SC-150 Kpa بیشترین نشست و حداکثر اتساع در حالت خشک مربوط به نمونه G2-MC-75Kpa است. به طور کلی رفتار اتساعی در مصالح EAF از روند مشخصی پیروی نکرده است. در نمونه‌هایی که ۲۴ ساعت در آب غرقاب شده، و سپس مورد آزمایش قرار گرفتند مانند نمونه BOF کاهش در مقادیر تنش‌های برشی نسبت به نمونه‌های خشک مشخص است. حداکثر مقادیر تنش‌های برشی در حالت غرقاب در جابه‌جایی افقی برابر با ۴ تا ۲۷ میلی‌متر اتفاق افتاده است که نسبت به حالت خشک این مقادیر دچار تغییر نسبتاً کمی شده‌اند. این تغییرات احتمالاً به خاطر تغییر در مقادیر نشست نمونه‌ها می‌باشد. بیشترین مقدار تنش برشی در نمونه‌های غرقاب مربوط به نمونه G2-MC-150Kpa می‌باشد. شیب صعودی تنش برشی نمونه‌ها در حالت غرقاب نسبت به حالت خشک ملایم‌تر بوده و پس از گسیختگی، نمونه‌ها با



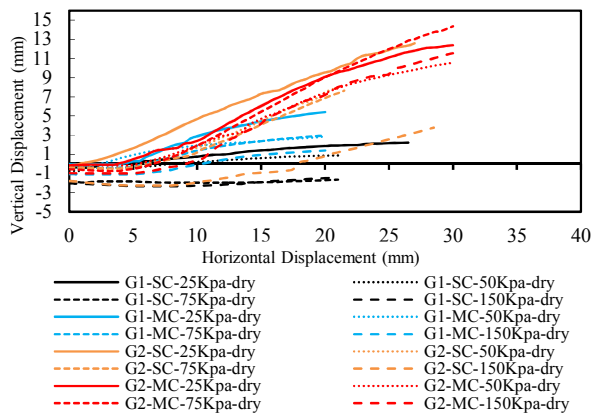
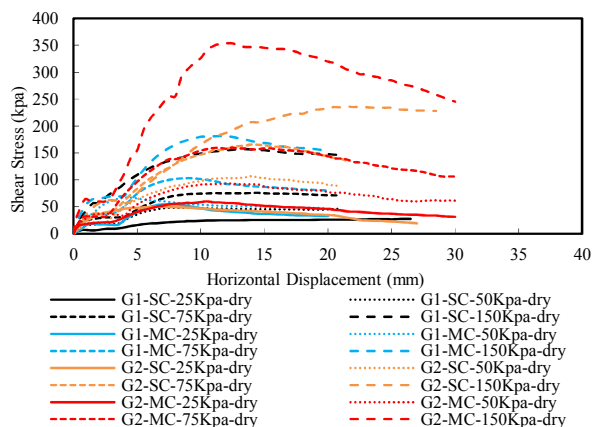
نمودار ۸. پوش گسیختگی نمونه‌های مربوط به سرباره BOF

۲-۳-۴-۳- نتایج نمونه EAF

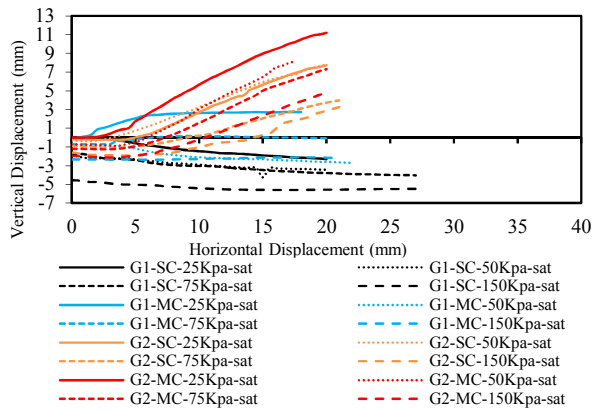
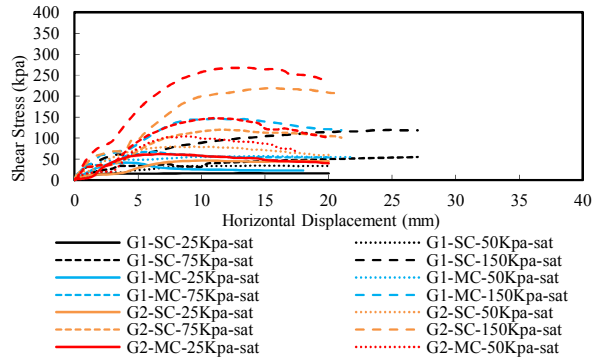
در نمودارهای ۹ تا ۱۲ نتایج آزمایش‌های برش مستقیم در حالت خشک، غرقاب و خشک-غرقاب برای نمونه EAF نشان داده شده است. تمام نمونه‌های مورد آزمایش تا کرنش محوری متناظر با گسیختگی نمونه‌ها ادامه پیدا کرد ولی امکان بدست آوردن مقادیر تنش پسماند در این نمونه‌ها وجود نداشت. حداکثر مقدار تنش‌های برشی در جابه‌جایی افقی ۴,۵ تا ۲۶,۵ میلی‌متر رخ داده است که نسبت به BOF در شرایط خشک این مقادیر افزایش داشته است. بیشترین مقدار تنش برشی در نمونه‌های خشک مربوط به G2-MC-150Kpa

شیب ملایم تری افت مقاومت را نشان می دهند. نمونه‌ها پس از اعمال بار قائم دچار نشست و سپس دچار اتساع شده‌اند. البته در بعضی از نمونه‌ها این روند اتفاق نیوفتاده است و فقط نشست نمونه‌ها در روند آزمایش دچار نشست شده‌اند. بیشترین نشست نمونه‌ها در حالت غرقاب مربوط به نمونه G1-SC-150Kpa می‌باشد و بیشترین مقدار اتساع مربوط به نمونه G2-MC-25Kpa می‌باشد. رفتار اتساعی در نمونه EAF در حالت غرقاب روند مشخصی نداشته است. در آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌ها در حالت خشک - غرقاب حداکثر مقدار تنش برشی در جابه‌جایی ۴٫۵ تا ۱۲٫۵ میلیمتر رخ داده است که این حالت نسبت به نمونه‌های خشک و غرقاب کاهش زیادی داشته است. شیب نمودارهای مقاومت برشی در شروع آزمایش شیب ملایمی از خود نشان داده است. در این نمونه‌ها اختلاف بین تنش برشی در لحظه گسیختگی با این تنش در انتهای آزمایش قابل توجه نیست. در این نمونه‌ها وقتی که نمونه مورد نظر در حین آزمایش غرقاب می‌شود افت ناگهانی در

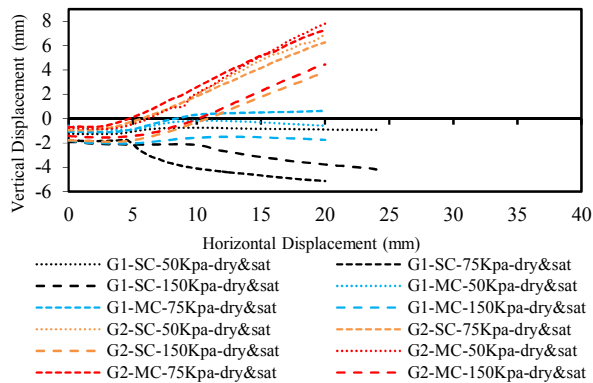
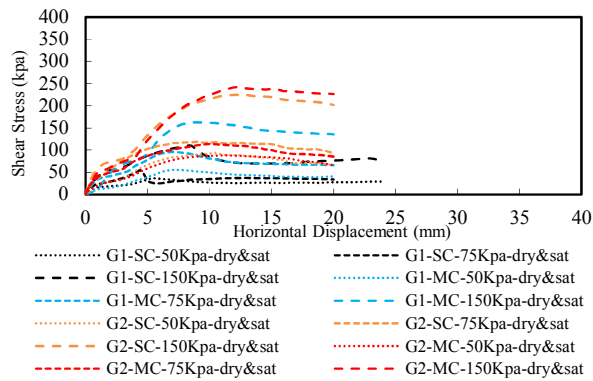
سطح تنش برشی مشاهده نمی‌شود. مقادیر مقاومت برشی نمونه‌ها در این حالت روند مشخصی نشان داده نشده است. بیشترین مقدار تنش برشی در این حالت مربوط نمونه G2-MC-150Kpa می‌باشد. نتایج چسبندگی بدست آمده در آزمایش‌های در حالت خشک، غرقاب و خشک - غرقاب همانند نمونه BOF روند ثابت و مشخصی از خود نشان نداده‌اند که این موضوع می‌تواند ناشی از پراکندگی مقادیر Cao در نمونه‌ها باشد که احتمالاً روی مقادیر چسبندگی تاثیر گذار خواهد بود. توصیه می‌شود مقادیر چسبندگی در رفتار مقاومت برشی نمونه‌ها حتی‌المقدور لحاظ نشود. به طور کلی مقادیر پارامترهای مقاومت برشی EAF نشان داد که این مصالح از مقاومت بسیار مطلوبی برخوردار است و حتی در مواردی این مصالح مانند یک توده سنگ رفتار از خود نشان داده‌اند. تمامی نتایج در جدول شماره ۲ نشان داده شده است.



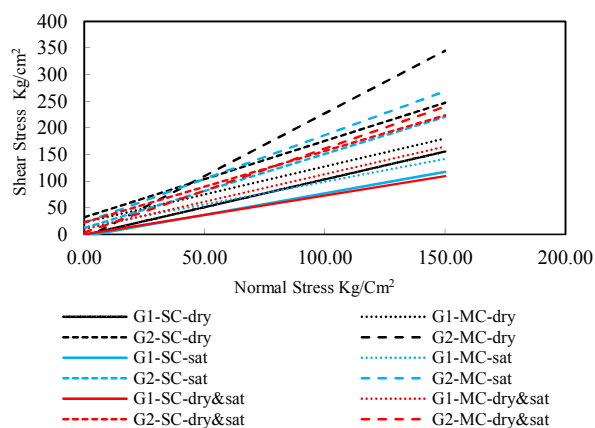
نمودار ۹. نتایج آزمایش برش مستقیم برای سرباره EAF در حالت خشک



نمودار ۱۰. نتایج آزمایش برش مستقیم برای سرباره EAF در حالت غرقاب



نمودار ۱۱. نتایج آزمایش برش مستقیم برای سرباره EAF در حالت خشک-غرقاب



نمودار ۱۲. پوش گسیختگی نمونه‌های مربوط به سرباره EAF

جدول ۲. نتایج آزمایشات برش مستقیم بر روی سرباره BOF و EAF

Sample	Normal Stress Rang (Kpa)	BOF-dry		BOF-sat		BOF-dry&sat		EAF-dry		Normal Stress Rang (Kpa)	EAF-sat		EAF-dry&sat	
		ϕ	C(Kpa)	ϕ	C(Kpa)	ϕ	C(Kpa)	ϕ	C(Kpa)		ϕ	C(Kpa)	ϕ	C(Kpa)
G1-SC	۲۵-۱۵۰	۴۳	۲۰	۲۸	۷	۳۱	۲۱	۴۶	۰	۵۰-۱۵۰	۴۰	۰	۳۶	۰
G1-MC	۲۵-۱۵۰	۴۶	۳۲	۳۹	۱۳	۴۰	۰	۴۶	۲۳	۵۰-۱۵۰	۴۱	۱۴	۴۷	۱۰
G2-SC	۲۵-۱۵۰	۵۵	۷	۴۵	۱۹	۴۵	۵	۵۵	۳۲	۵۰-۱۵۰	۵۴	۱۲	۵۶	۲۳
G2-MC	۲۵-۱۵۰	۶۶	۵	۶۱	۹	۵۸	۰	۶۸	۰	۵۰-۱۵۰	۵۹	۲۲	۵۸	۴

۴- خلاصه نتایج

EAF این محدوده برای حالت خشک ۱۷ تا ۳۵۳ و حالت غرقاب ۱۴ تا ۴۹۰ بدست آمد. نتایج آزمایش‌های DST در این تحقیق زاویه اصطکاک بالاتری را نسبت به خاک‌های معمولی نشان داده است. آزمایش‌های برش مستقیم به سه روش خشک، غرقاب و خشک-غرقاب مورد بررسی قرار گرفت. زاویه اصطکاک داخلی برای نمونه در محدوده ۳۶ تا ۶۸ درجه به دست آمده است. مقادیر چسبندگی در نمونه‌های DST در این تحقیق از روند BOF در محدوده ۲۸ تا ۶۶ درجه و برای نمونه EAF مشخصی پیروی نکرد و توصیه بر این است که از این مقادیر در کارهای عملی استفاده نشود. علت این امر هم می‌تواند مقادیر مختلف Cao در نمونه‌ها باشد. نتایج این مطالعه نشان داد که سرباره‌های فولادی BOF و EAF هر دو در مقایسه با اکثر خاک‌های طبیعی دارای ویژگی‌های مقاومتی مطلوبی هستند و می‌توانند به عنوان یک ماده ژئوتکنیکی مناسب در کاربردهای مختلف

در این تحقیق مطالعات کاملی بر روی پارامترهای مقاومتی نمونه BOF و EAF به عنوان مصالحی جدید در پروژه‌های عمرانی به وسیله آزمایش‌های CBR و DST انجام شد. در این تحقیق از منحنی‌های دانه‌بندی مطابق با استانداردهای راهسازی استفاده شده است. طبقه‌بندی BOF و EAF بر طبق سیستم USCS و AASHTO برای دانه‌بندی نوع ۱ و ۲ به ترتیب SP-SM و GP-GM (USCS) و A-1-a (AASHTO) می‌باشد. سرباره‌های فولادی BOF و EAF مقادیر وزن مخصوص خشک حداکثر بالاتری نسبت به خاک‌های طبیعی را نشان داده است. نتایج آزمایش‌های CBR در حالت خشک و غرقاب نشان داد که BOF و EAF نسبت به خاک‌های طبیعی از مقادیر CBR بسیار بالاتری برخوردار است و می‌تواند در پروژه‌های راهسازی مورد استفاده قرار گیرد. محدوده CBR نمونه BOF در حالت خشک بین ۱۸ تا ۲۵۵ و در حالت غرقاب بین ۱۱ تا ۲۰۳ می‌باشد. در نمونه

۵-سپاسگزاری

این تحقیق با کمک مالی و امکانات آزمایشگاهی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی انجام شد که بدینوسیله از آنها تشکر و قدردانی می‌گردد.

مورد استفاده قرار گیرند. نگهداری از سرباره‌های فولاد در محیط‌های باز می‌تواند تا حدودی از مشکلات تورم طولانی مدت بکاهد اما لزوماً ثبات حجمی آن را تضمین نمی‌کند.

۶- مراجع

- ASTM D3080 / D3080M-11, Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions (Withdrawn 2020), ASTM International.
- ASTM D422-63, (2007), "Standard test method for particle-size analysis of solids".
- ASTM D4253-16e1, (2016), "Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table", ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D4254-16, (2016), "Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density", ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM International, (2010), "Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer (ASTM D854-10)", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08.
- ASTM., (2005), "ASTM D4318, standard test method for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils.
- Base, G. A., Determine maximum dry density in accordance with AASHTO: T180, method D. Determination of in-place density of the base shall be in accordance with GDT", 21.
- AASHTO T99., (1986), "Moisture-density relations of soil using a 5.5-lb (2.5 kg) Rammer and a 12-in. (305 mm) drop", Standard specifications for transportation materials and methods of sampling and testing (part II).
- Ahmedzade, P., and Sengoz, B., (2009), "Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete." J. Hazard, Mater., 165 (1-3), pp.300-305.
- Altun, I. A., and Yilmaz, I., (2002), "Study on steel furnace slags with MgO additive in portland cement", Cem. Concr. Res., 32(8), pp.1247-1249.
- Anastasiou, E., and Papayianni, I., (2006), "Criteria for the use of steel slag aggregates in concrete," Measuring, monitoring and modeling concrete properties, M. S. Konsta-Gdutos, ed., Springer, Netherlands, pp.419-426.
- Asi, I. M., (2007), "Evaluating skid resistance of different asphalt concrete mixes", Build., Environ., 42(1), pp.325-329.
- ASTM C131 / C131M-20, (2020), "Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine", ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D1883-16, (2016), "Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils", ASTM International, West Conshohocken, PA.

- Pamukcu, S., and Tuncan, A., (1993), "Laboratory characterization of cement-stabilized iron-rich slag for reuse in transportation facilities." *Transportation Research Record* 1424, pp.25-33.
- Poh, H. Y., Ghataora, S. G., and Ghazireh, N., (2006), "Soil stabilization using basic oxygen steel slag fines", *J. Mater. Civ. Eng.*, 10.1061/ (ASCE)0899-1561(2006)18:2(229), pp.229-240.
- Rahmani, Iraj, Afshari, Mohammad, Aghaei Arai, Atta, Attarchian, Nahid, (2019), "Investigation of the effect of compaction energy, grain size and type of steel slag on compaction characteristics and bearing capacity of California (CBR)", *Journal of Transportation*, (in Persian).
- Renfrew, S., and Perkins, D., (2004), "Utilization of steel slag in a California cement plant." 46th Cement Industry Technical Conf., IEEE, pp.111-119.
- Rohde, L., Nunez, W.P., and Ceratti, J.A.P. (2003), "Electric arc furnace steel slag-basematerial for low-volume roads," *Transportation Research Record* 1819, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp. 201-207.
- Shen, D., Wu, C., and Du, J., (2009), "Laboratory investigation of basic oxygen furnace slag for substitution of aggregate in porous asphalt mixture", *Constr. Build. Mater.*, 23(1), pp.453-461.
- Shen, W., Zhou, M., Ma, W., Hu, J., & Cai, Z., (2009), "Investigation on the application of steel slag-fly ash-phosphogypsum solidified material as road base material", *Journal of hazardous materials*, 164(1), pp.99-104.
- Sure, P., Lindqvist, J., Arm, M. et al., (2009), "Reproducing ten years of road
- Conjeaud, M., George, C. M., and Sorrentino, F. P., (1981), "A new steel slag for cement manufacture: Mineralogy and hydraulicity", *Cem. Concr. Res.*, 11(1), pp.85-102.
- Foster, C. R., (1962), "Field Problems: Compaction," In: *Foundation Engineering*, Edited by Leonards, G. A., McGraw-Hill Book Co., Inc., New York.
- Ghionna, V., Pedroni, S., Tenani, P., and Veggi, S., (1996), "Geotechnical investigation on steel slags mixtures for landfills embankments construction." *Proc., Second Int., Congress on Environmental Geotechnics*.
- Holliday, K., (1997), "Steel Slag: The High Performance Industrial Aggregate", *Proceedings of the 13th World Meeting of the International Road Federation*, Toronto, Ontario.
- Manso, J. M., Polanco, J. A., Losanez, M., and Gonzales, J. J., (2006), "Durability of concrete made with EAF slag as aggregate." *Cem. Concr. Compos.*, 28(6), pp.528-534.
- Maslehuddin, M, Sharif, M. A., Shameem, M., Ibrahim, M., and Barry, M. S., (2003), "Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregates." *Constr. Build. Mater.*, 17(2), pp.105-112.
- Montgomery D. G., and Wang, G., (1991), "Instant-chilled steel slag aggregate in concrete-strength related properties", *Cem., Concr., Res.*, 21(6), pp.1083-1091.
- Motz, H. and Geiseler, J., (2001), "Products of steel slags an opportunity to save natural resources, *Waste Manage*, 21: pp.285-293.
- Murphy, J. N., Meadowcroft, T. R., and Barr, P. V., (1997), "Enhancement of the cementitious properties of steelmaking slag." *Can. Metall. Q.*, 36(5), pp.315-331.

- Xue, Y., Wu, S., Hou, H., and Zha, J., (2006), "Experimental investigation of basic oxygen furnace slag used as aggregate in asphalt mixture", *J. Hazard. Mater.*, 138(2), pp.261–268.
- Yildirim, I. prezzi, M., (2009), "Use of Steel Slag in Subgrade Applications", *JTRP Technical Reports*, Purdue University, Indiana.
- Sasaki, T., (2015), "Standardization of iron and steel slag products", *Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report No.*, 109, pp.189-194.
- USGS (U.S. Geological Survey), (2020), "Iron and steel slag", *Mineral Commodity Summaries*, Reston, VA.
- World Steel Association, W. (2016), "Fact sheet; steel industry by-products", <http://www.worldsteel.org>.
- World Steel Association, W., (2020), "Fact sheet; steel industry by-products", <http://www.worldsteel.org>.
- Rahmani, Iraj, Afshari, Mohammad, Aghaei Arai, Atta, Attarchian, Nahid. Investigation of the effect of compaction energy, grain size and type of steel slag on compaction characteristics and bearing capacity of California (CBR), *Journal of Transportation*, 2019 (in persian).
- ageing—accelerated carbonation and leaching of EAF steel slag, *Sci.*", *Total Environ.* 407, pp.511–518.
- Tsakiridis, P. E., Papadimitriou, G. D., Tsivilis, S., and Koroneos, C., (2008), "Utilization of steel slag for portland cement clinker production", *J. Hazard. Mater.*, 152(2), pp.805–811.
- Tufekci, M., Demirbas, A., and Genc, H. (1997), "Evaluation of steel furnace slags as cement additives", *Cem. Concr. Res.*, 27(11), pp.1713–1717.
- Wang G., Wang Y. and Gao Z., (2010), "Use of Steel Slag as a Granular Material: volume expansion prediction and usability criteria", *Journal of Hazardous Materials*, v. 184, pp. 555-560.
- WSDOT 2ESHB 1299, Section 3076, (2015), "Strategies Regarding Use of Steel Slag Aggregate in Pavements", A Report to the State Legislature in Response to 2ESHB 1299, Washington State DOT Construction Division Pavements Office.
- Wu, S., Xue, Y., Ye, Q., and Chen, Y., (2007), "Utilization of steel slag aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures." *Build. Environ*, 42(7), pp.2580–2585.

Experimental Evaluation of Shear Strength of BOF and EAF Steel Slag Aggregates in Dry, Submerged and Dry-Submerged Conditions

Iraj Rahmani, Assistant Professor, Road, Housing & Urban Development, Tehran, Iran.

Mohammad Afshari, M.Sc., Grad., Geotechnical Engineering, Faculty of Engineering, Azad University, Tehran Branch Center, Tehran, Iran.

Ata Aghaei Araei, Associate Professor, Road, Housing & Urban Development, Tehran, Iran.

E-mail: I.Rahmani@bhrc.ac.ir

Received: August 2021-Accepted: February 2022

ABSTRACT

One of the most important by-products of steelmaking and refining processes is steel slag. It is necessary to determine the geotechnical engineering properties of steel slag and assess their potential use in road and railways embankment constructions. In this paper, the shear strength properties of steel slag were studied. Two types of steel slag, Blast Oxygen Furnace (BOF) and Electric Arc Furnace (EAF) slags that generated in Esfahan Steel Company and Mobarakeh Steel Company are used in this paper. The grain size distributions range of the test specimens have been selected under the characteristics of the road pavement and the existing laboratory facilities. In this study, two slags (BOF, EAF) with two grain size distribution and two difference compaction energy (standard and modified compaction) and the effect of saturation in California bearing ratio were evaluated. The results of the atterberg limits test showed that the material is none plasticity. The results of the compactions tests showed that dry unit weight varied between 1.94 to 2.74 gr/cm³ and optimum moisture content varied between 8% and 12.5%. Based on the California Bearing Capacity (CBR) tests, the CBR varied between 88 to 199 for BOF slags and 185 to 490 for EAF slags in soaked and unsoaked conditions. In this study, direct shear experiments were performed on two types of granulation under four vertical stresses of 25, 50, 100 and 150 kPa in dry, submerged and dry-submerged. Based on the results, the above slags have an internal friction angle between 28 and 68 degrees and the adhesion of these materials was between 0 to 32 kPa. These results showed that steel slag has much higher shear strength than natural soil and, according to the results of experiments, can be used as a material in engineering embankments.

Keywords: Steel Slag Application, Slag Properties, Shear Strength, Submerged, Dry-Submerged