

بررسی اثر انرژی تراکم، دانه‌بندی و نوع سرباره فولادی بر مشخصات تراکمی و نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)

مقاله پژوهشی - کاربردی

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
ناهید عطارجیان، استادیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران

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

دریافت: ۹۸/۱۱/۲۰ - پذیرش: ۹۹/۰۳/۲۰

صفحه ۱۵۰-۱۳۷

چکیده

امروزه فولاد از پرکاربردترین (مصالح) در صنعت است و مقدار مصرف آن سالانه در حال افزایش می‌باشد. یکی از مهمترین محصولات جانبی فولاد سازی، سرباره فولاد است. استفاده سرباره فولاد به عنوان ضایعات این صنعت، در کاربری‌های ژئوتکنیکی می‌تواند از یک طرف در کاهش حجم انباشت این محصول نقش داشته باشد و از طرف دیگر باعث کاهش اثرات زیست محیطی برداشت مصالح کوهی از طبیعت شود. بنابراین ضروری است تا مشخصات مهندسی این محصول به عنوان مصالح خاکریزهای مهندسی راه و راه آهن تعیین شود. در این مقاله، خصوصیات فیزیکی، مشخصات تراکمی و نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) سرباره فولاد به عنوان مصالح اساس و زیراساس جاده و زیربلاست راه آهن مورد مطالعه قرار گرفت. دو نوع سرباره کوره فولادسازی اکسیژنی (BOF) و کوره قوس الکتریکی (EAF) به ترتیب متعلق کارخانه‌های ذوب آهن اصفهان و فولاد مبارکه سپاهان مورد آزمایش قرار گرفتند. در این مطالعه، آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا بر روی دو نوع دانه بندی، تحت دو سطح انرژی مختلف در حالت خشک و غرقاب انجام شد. براساس نتایج به دست آمده، سرباره‌های فوق فاقد رفتار خمیری می‌باشند و وزن مخصوص حداکثر خشک بین ۱٫۹۷ تا ۲٫۷۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب و رطوبت بین ۸ الی ۱۲/۵ درصد را دارا می‌باشند. نسبت باربری کالیفرنیا برای سرباره BOF در محدوده ۸۸ الی ۱۹۹ و برای سرباره EAF در محدوده ۱۸۵ الی ۴۹۰ برای شرایط خشک و غرقاب به دست آمد. نتایج نسبت باربری کالیفرنیا نشان می‌دهد، علاوه بر تراکم‌های معمول در راهسازی با تراکم‌های کمتر نیز می‌توان از این مصالح برای اساس و زیراساس استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: سرباره فولاد، کاربرد سرباره، خصوصیات سرباره، رفتار تراکمی سرباره، نسبت باربری کالیفرنیا

۱- مقدمه

که سرباره‌ی فولاد، به عنوان یک محصول جانبی در هر دو روش تولید می‌شود. فرآیندهای کوره‌ی فولادسازی اکسیژنی و کوره‌ی قوس الکتریکی در تولید فولاد مورد استفاده قرار می‌گیرند. سرباره‌های تولید شده در این فرآیندها، به ترتیب سرباره‌ی فولاد BOF و سرباره‌ی فولاد EAF نامیده می‌شوند. در سال ۲۰۱۱، میزان تولید سرباره‌ی فولاد پس از بازیابی فلز، ۲۲۳-۱۴۹ میلیون تن در جهان برآورد شده که از

با پیشرفت‌های صورت گرفته در جهان و تولید مصالح جدید از جمله فولاد، ضایعات مرتبط با این صنایع نیز ایجاد شده و لذا دستیابی به راه‌حل‌های مناسب جهت استفاده از ضایعات این صنعت، مورد توجه پژوهشگران مختلف در سطح جهان قرار گرفته است. سرباره‌های حاصل از تولید فولاد در طول دو فرآیند فولادسازی و پالایش تولید می‌شوند. در جهان دو روش عمده‌ی فولادسازی وجود دارد

این مقدار ۱۳-۹ میلیون تن آن در ایالات متحده تولید می‌شود. از سرباره‌ی فولاد تولید شده در ایالات متحده، به عنوان سنگدانه برای ساخت جاده و روسازی (حدود ۵۰ تا ۷۰ درصد) و سایر کاربردهای گوناگون (حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد) استفاده می‌شود. سرباره‌ی فولاد باقیمانده که مورد استفاده قرار نمی‌گیرد (حدود ۱۵ تا ۴۰ درصد)، در کارخانجات فولاد انباشته شده و سرانجام به سایت‌های دفع سرباره فرستاده می‌شوند. به منظور کاهش مشکل دفع سرباره و کمک به حفظ و ذخیره‌ی منابع طبیعی در حال کاهش، برنامه‌های کاربردی جدیدی در رابطه با سرباره‌های فولاد مورد نیاز است (ایلدیریم و پرزی، ۲۰۱۶). در ایران سالیانه قریب به دو میلیون تن سرباره تولید می‌شود، که با توجه به پروژه‌های در دست احداث و طرح‌های توسعه‌ای، پیش بینی می‌شود این رقم افزایش نیز یابد. علاوه بر تولید سالیانه سرباره، میزان انباشتگی موجود در کارخانه‌های بزرگ فولادسازی کشور حدود ۴۵ میلیون تن تخمین زده می‌شود. روند روبه رشد تولید سرباره فولاد و ذپوی چند میلیون تنی سرباره‌ها در سال‌های گذشته، نگهداری و دفع این محصولات جنبی را با مشکلات فراوانی روبرو نموده است (عامری و همکاران، ۱۳۸۸). به منظور استفاده از این ضایعات به عنوان مصالح ژئوتکنیکی، آزمایش‌های محدودی در دسترس می‌باشد. آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد که منحنی تراکم دارای شکل نامنظمی (دوقله‌ای) در سرباره‌ها می‌باشد. بخش حمل و نقل ایالت پنسیلوانیا، ویژگی‌های تراکم سرباره‌های دانه‌ای را بررسی نموده و اشکال منحنی‌های با یک و نیم و دو نقطه اوج را به دست آورده است. گاهی تراکم سرباره منجر به تغییر قابل ملاحظه در نوع دانه‌بندی مصالح ناشی از خرد شدگی دانه‌ها می‌باشد. تغییر دانه‌بندی ذرات در طی تراکم ممکن است موجب بی نظمی در رابطه رطوبت-تراکم شود. بنابراین، سنجش و تعیین اثر دانه‌بندی ذرات بر ویژگی‌های تراکم مواد حائز اهمیت می‌باشد (لی و سادکمپ، ۱۹۷۲). حتی دانه‌بندی ریز سرباره هم معمولاً درصد بالایی از ذرات در اندازه شن بوده و به عنوان مصالح درشت دانه طبقه‌بندی می‌شود. بنابراین، منحنی تراکم مشخصه سرباره، عموماً شباهت بیشتری به خاک درشت دانه دارد. رابطه رطوبت - تراکم سرباره توسط تعداد بسیار کمی از محققان مطالعه شده است. براساس نتایج

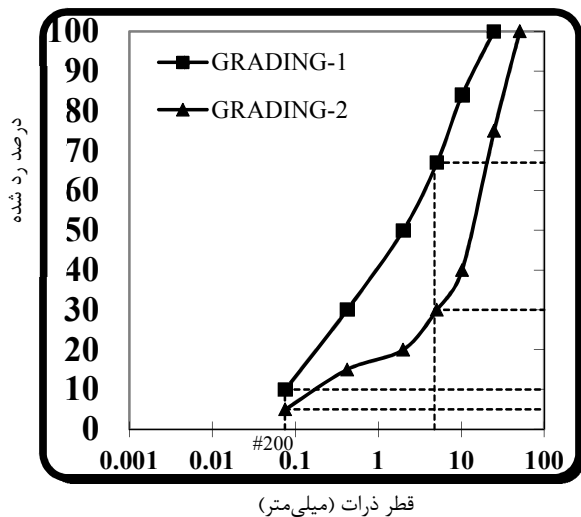
آزمایش‌های آزمایشگاهی تراکم، در مورد سرباره فولاد (نوع سرباره فولاد مشخص نشده است)، حداکثر وزن واحد خشک γ_{dmax} برابر ۲٫۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب و میزان رطوبت بهینه متناظر تقریباً ۴ تا ۶ درصدی را گزارش نموده‌اند. مقادیر وزن واحد خشک اندازه‌گیری شده به صورت درجا دارای پراکندگی زیادی می‌باشد. به طوری که این مقدار، میانگین ۲٫۳۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب را نشان داده است. منحنی تراکم ارایه شده توسط راپوسو، برای سرباره BOF دارای شکل نامنظم با مقدار تقریبی حداکثر وزن واحد خشک ۲٫۳-۲٫۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب در میزان رطوبت ۴ درصد و ۱۲ درصد بود (ایلدیریم، ۲۰۰۹). رود و همکاران (۲۰۰۳) نتایج آزمایش تراکم استاندارد انجام شده برای سرباره EAF که تقریباً ۸۵ درصد دانه‌ها در اندازه شن بود را ارایه کردند. منحنی تراکم گزارش شده دارای دو نقطه اوج در میزان رطوبت حدود ۳ و ۵ درصد و حداکثر وزن واحد خشک ۲٫۲۵/۲٫۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب و ۲٫۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. شکل نامنظم منحنی تراکم ذرات سرباره EAF، به دانه‌بندی و مواد معدنی نسبت داده می‌شود. در آزمایش دانه‌بندی سرباره EAF با خرد شدن دانه‌ها و کاهش درصد دانه‌ها در حد شن به ۶۸ درصد، کمی تغییر در خصوصیات تراکمی دیده می‌شود. برای این دانه‌بندی ریزتر، نمونه سرباره EAF، حداکثر وزن واحد خشک تقریباً ۲٫۶/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب در میزان رطوبت بهینه حدود ۶ درصد گزارش شده است. به دلیل چگالی ویژه بالا (معمولاً بیشتر از ۳) و دانه‌بندی گسترده (طیف وسیع اندازه دانه‌ها)، مقادیر گزارش شده برای حداکثر وزن واحد خشک سرباره بیشتر از مقادیر سنگدانه‌های طبیعی است (ایلدیریم، ۲۰۰۹). رفتار مصالح سرباره فولاد به عنوان بالاست و زیربالاست خطوط ریلی تحت شرایط بارگذاری دینامیکی و مونوتونیک با دستگاه سه محوری قطر بزرگ توسط آقای آرای (۱۳۹۶) بررسی شده است. کلیه نمونه‌ها با تراکم حداکثر تهیه شدند. چگالی خشک حداکثر مصالح بالاست سرباره BOF و EAF به ترتیب مشابه (به علت حفرات سطحی و داخلی) و حدود ۲۵ درصد بیش از مصالح معمولی بالاست آهنی می‌باشد. بطور کلی در مصالح سرباره با کاهش اندازه دانه‌ها، چگالی ویژه دانه افزایش می‌یابد. رفتار توری در مصالح BOF ذوب

۳- مصالح مورد استفاده

نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها دارای اندازه دانه‌هایی بین ۱۹/۰۵ میلیمتر تا ۰/۰۷۵ میلیمتر است. سرباره‌های مورد استفاده از نوع سرباره کهنه است، یعنی از زمان تولید آنها بیش از یک سال می‌گذرد. و باعث می‌شود که محدودیت‌های مربوط به وجود احتمالی آهک آزاد در آن کم شود. لذا با استفاده مصالح کهنه میزان تورم احتمالی کنترل شده است. براساس آنالیز شیمیایی سرباره‌های BOF و EAF (جدول شماره-۱)، این مصالح عمدتاً شامل اکسید آهک، اکسید سیلیسیم، اکسید آلومینیوم، اکسید منیزیم و مقدار قابل توجهی اکسید آهن است.

جدول ۱. نتایج آزمایش شیمیایی سرباره BOF و EAF

عناصر متشکل	نمونه EAF (درصد)	نمونه BOF (درصد)
کاهش وزن بر اثر سرخ شدن	۱۶/۴۲	۴/۹۵
اکسید سیلیسیم (SiO_2)	۱۸/۰۸	۲۰/۰۴
اکسید آلومینیوم (Al_2O_3)	۶/۶۵	۴/۹۰
اکسید آهن (Fe_2O_3)	۲۰/۶۰	۳۳/۶۰
اکسید کلسیم (CaO)	۳۱/۰۸	۳۴/۶۸
اکسید منیزیم (MgO)	۴/۸۰	۱/۲۰
سولفات (SO_3)	۲/۰۸	۰/۱۷
کلرید	۰/۰۱	۰/۰۲



شکل ۱. منحنی دانه بندی نوع ۱ (G1) و نوع ۲ (G2)

آهن اصفهان و EAF فولاد مبارکه مشاهده نشده است (آقایی آرای، ۱۳۹۶).

هدف اصلی این مقاله، تعیین ویژگی‌های تراکمی سرباره‌ی فولاد BOF و EAF برای استفاده از آنها به عنوان مصالح پرکننده در کاربردهای ژئوتکنیکی می‌باشد. کاربردهای ژئوتکنیکی شامل استفاده این مصالح در خاکریز راه و یا دیواره‌های خاکی است. برنامه‌ی آزمایشگاهی، شامل آزمایش‌های دانه‌بندی، حدود اتربرگ، چگالی ویژه، تراکم استاندارد، تراکم اصلاح شده و آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) بوده، که بر روی نمونه‌هایی از سرباره‌ی فولاد کهنه‌ی کوره‌ی فولادسازی اکسیژنی حاصل از کارخانه ذوب آهن اصفهان (BOF) و سرباره فولادگدازی مجتمع فولاد مبارکه (EAF) با دو نوع دانه بندی در شرایط خشک و غرقاب انجام شده است (رحمانی و همکاران، ۱۳۹۶).

۲- پیشینه تحقیق

امروزه در دنیا، تحقیقات گسترده‌ای برای بازیافت سرباره‌ها انجام گرفته که منجر به ارایه راهکارهایی برای بازیابی و کاربرد آنها در بسیاری از پروژه‌های عمرانی شده است. از این موارد می‌توان به استفاده در سیمان سرباره‌ای، سنگدانه بتن، راهسازی و روسازی راه، خاکریز مهندسی، زیر بالاست، بالاست و مواد پرکننده اشاره کرد (عامری و همکاران، ۱۳۸۸). عمده‌ترین کاربرد سرباره استفاده در راهسازی به عنوان اساس و زیر اساس و به عنوان سنگدانه در روسازی بتنی و آسفالتی می‌باشد. به طور کلی مطالعاتی که خواص ژئوتکنیکی سرباره فولاد را ارزیابی کرده باشند، محدود هستند. این امر ممکن است به دلیل خواص نامطلوب سرباره فولاد یعنی ناپایداری حجمی و چگالی بالای آن باشد. با این حال، سرباره فولاد دارای خواص مطلوب دیگری است و امکان استفاده از سرباره فولاد در مصارف ژئوتکنیکی در چند مطالعه نشان داده شده است. از آنجا که دسترسی به مصالح طبیعی همیشه ممکن نبوده، و یا در بعضی از مناطق، منابع قرضه مصالح سنگی محدود بوده و تولید آنها خسارت جبران‌ناپذیری به محیط زیست وارد خواهد کرد، لذا یافتن جایگزینی مناسب برای مصالح طبیعی الزامی به نظر می‌رسد (شکرچی‌زاده و همکاران، ۱۳۸۷).

۴- نمونه‌های آزمایشگاهی

AASHTO-T180 و نهایتاً آزمایش نسبت باریبری کالیفرنیا (CBR) براساس استاندارد AASHTO-T193 انجام شدند.

۴-۱- آزمایش دانه‌بندی

شکل ۱، منحنی‌های توزیع اندازه دانه‌ها برای نمونه‌های هر دو سرباره را نشان می‌دهد. در این تحقیق از دو دانه‌بندی مختلف استفاده شده که به ترتیب با طبقه‌بندی SP-SM (G1) و GP-GM (G2) با مشخصات ارایه شده در جدول شماره ۲، به کار گرفته شده است.

به منظور بررسی مشخصات فیزیکی سرباره ذوب‌آهن و فولاد مبارکه اصفهان آزمون دانه‌بندی در این تحقیق مطابق با استاندارد ASTM-D422، آزمایش حدود اتربرگ مطابق با استاندارد ASTM-D4318 و آزمایش چگالی ویژه ذرات بر اساس استاندارد ASTM-D854 انجام شدند. آزمایش‌های لس‌آنجلس و وزن مخصوص حداکثر و حداقل به ترتیب با استانداردهای ASTM-C131، ASTM-D4253 و ASTM-D4254، آزمایش‌های تراکم استاندارد و اصلاح شده به ترتیب طبق استاندارد AASHTO-T99 و

جدول ۲. مشخصات دانه‌بندی و طبقه‌بندی سرباره‌ها

Sample identifier	Percentage			Percentage Passing (%)									Classification
	GRAVEL	SAND	SILT	۴#	۱۰#	۴۰#	۲۰۰#	D ₁₀	D ₃₀	D ₆₀	C _u	C _c	
G1	۳۳	۵۷	۱۰	۶۷	۵۰	۳۰	۱۰	۰٫۰۷۶	۰٫۴۲	۳٫۴۷	۴۵٫۶۷	۰٫۶۸	SP-SM ₍₁₎
G2	۷۰	۲۵	۵	۳۰	۲۰	۱۵	۵	۰٫۱۷۹	۵٫۱۱	۱۷	۹۴٫۹۵	۸٫۵۶	GP-GM ₍₂₎

C_u: uniformity Coefficient

C_c: Coefficient of gradation #4

(1) = poorly graded sand with silt and gravel

(2) = poorly graded gravel with silt and sand

ویژه سرباره از مقادیر بالاتری برخوردار است که این موضوع می‌تواند ناشی از وجود اکسیدهای آهن (Fe₂O₃، FeO) و سایر فلزات سنگین موجود در سرباره‌ها باشد. در ضمن چگالی ویژه سرباره EAF از سرباره BOF بیشتر است.

۴-۱-۴- آزمایش لس‌آنجلس

آزمایش لس‌آنجلس در این تحقیق مطابق با استاندارد ASTM-C131 انجام پذیرفت. 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 دانه‌بندی نوع ۱ و ۲ به ترتیب ۲۱ و ۲۴ است. همانطور که مشاهده می‌شود مقدار مقاومت در برابر سایش سرباره EAF از سرباره BOF بیشتر است.

۴-۱-۵- آزمایش وزن مخصوص حداقل و حداکثر

آزمایش وزن مخصوص حداکثر طبق استاندارد ASTM-D4253 و آزمایش وزن مخصوص حداقل طبق استاندارد ASTM-D4254 انجام شد. وزن مخصوص حداقل و

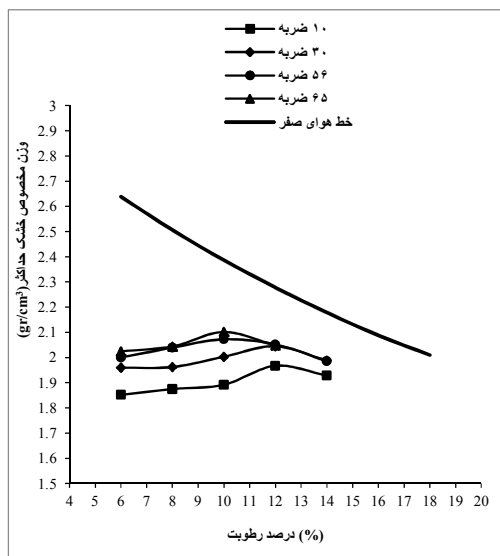
۴-۲- آزمایش حدود اتربرگ

یکی از آزمایش‌هایی که برای تعیین مشخصات خمیری خاک‌ها استفاده می‌شود، آزمایش حدود اتربرگ است. این آزمایش مطابق با استاندارد ASTM-D4318 انجام شد. با توجه به نتیجه بدست آمده از این آزمایش مشخص شد که سرباره‌های مورد استفاده هیچ گونه خاصیت خمیری نداشته و در بحث خمیری، رفتاری مشابه به مصالح دانه‌ای از خود نشان می‌دهند.

۴-۳- آزمایش چگالی ویژه (Gs)

آزمایش چگالی ویژه ذرات در این تحقیق براساس استاندارد ASTM-D854 انجام شد. چگالی ویژه نمونه‌های سرباره BOF، برای دانه‌بندی نوع ۱ و نوع ۲ به ترتیب ۲/۹۵ و ۳/۰۲ بدست آمد. چگالی ویژه بدست آمده برای سرباره EAF برای دانه‌بندی نوع ۱ و نوع ۲ به ترتیب ۳/۲۱ و ۳/۲۵ می‌باشد. چگالی ویژه خاک‌های طبیعی به طور معمول در محدوده ۲/۶ تا ۲/۹ است. لذا، با مقایسه چگالی ویژه سرباره‌های فولاد و خاک‌های طبیعی، مشاهده می‌شود چگالی

۱۲ درصد بدست آمده و فقط میزان وزن مخصوص حداکثر افزایش داشته است. برای ضربات ۵۶ و ۶۵، تقریباً مقادیر رطوبت بهینه و وزن مخصوص حداکثر یکسانی به دست آمده است. برای دانه بندی نوع ۲ در تراکم استاندارد (شکل شماره ۴) میزان رطوبت بهینه نسبتاً یکسانی برای ضربات ۱۰ و ۳۰ به دست آمده است. مقدار وزن مخصوص حداکثر در تراکم ۳۰ ضربه نسبت به ۱۰ ضربه افزایش می یابد. در این حالت در تراکم های ۵۶ و ۶۵ ضربه تقریباً دارای مشخصات یکسانی هستند. با این حال در مقایسه با تراکم ۱۰ و ۳۰ ضربه از میزان رطوبت بهینه آن ها کاسته می شود و میزان وزن مخصوص حداکثر آن ها برای ۵۶ ضربه ۲/۱۵ و برای ۶۵ ضربه ۲/۲۰ گرم بر سانتی متر مکعب به دست آمده است که نسبت به ۱۰ و ۳۰ ضربه افزایش نشان می دهد. در شکل شماره ۵ (دانه بندی نوع ۲ و تراکم اصلاح شده) نمودار تراکم ۱۰ ضربه به صورت دو قله ای است اما تراکم های ۳۰ و ۵۶ و ۶۵ ضربه به صورت تک قله ای است. با افزایش انرژی تراکم از ۱۰ ضربه به ۳۰ ضربه از میزان رطوبت بهینه کاسته شده و میزان وزن مخصوص حداکثر از ۲/۱۲ به ۲/۲۰ گرم بر سانتی متر مکعب افزایش داشته است. از میزان رطوبت بهینه در تراکم های ۵۶ و ۶۵ ضربه نسبت به تراکم های ۱۰ و ۳۰ کاسته شده است. میزان تغییرات در رطوبت بهینه در تراکم های ۵۶ و ۶۵ ضربه نسبت به تراکم های ۱۰ و ۳۰ ضربه در دانه بندی نوع ۲ در تراکم اصلاح شده نسبت به حالت های دیگر مشهودتر است.



شکل ۲. آزمایش تراکم استاندارد- دانه بندی نوع ۱

حداکثر سرباره BOF برای دانه بندی نوع ۱ به ترتیب ۱/۷۶ و ۲/۲۶ گرم بر سانتی متر مکعب و برای دانه بندی نوع ۲ به ترتیب ۱/۹۱ و ۲/۳۹ گرم بر سانتی متر مکعب به دست آمد. میزان وزن مخصوص حداقل و حداکثر برای سرباره EAF برای دانه بندی نوع ۱، ۲/۱۴ و ۲/۲۲ گرم بر سانتی متر مکعب و برای دانه بندی نوع ۲، ۲/۱۶ و ۲/۵۱ گرم بر سانتی متر مکعب می باشد. در هر دو نوع سرباره وزن مخصوص حداقل و حداکثر، دانه بندی نوع ۲ از دانه بندی نوع ۱ بیشتر بوده و همچنین سرباره EAF دارای وزن مخصوص حداقل و حداکثر بیشتری نسبت به سرباره BOF را دارا می باشد.

۵- آزمایش های تراکم (استاندارد و اصلاح شده)

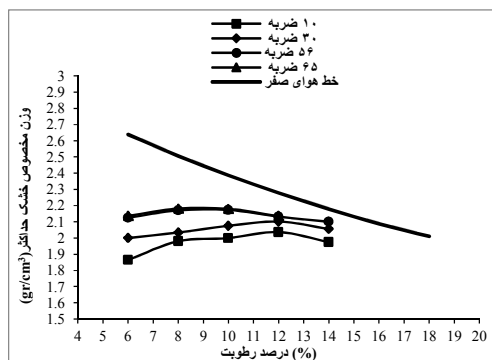
در این تحقیق برای انجام آزمایش های تراکم و تعیین مشخصات تراکمی سرباره، آزمایش های تراکم در حالت استاندارد (AASHTO-T99) و حالت اصلاح شده (AASHTO-T180) برای دو دانه بندی بر روی هر دو سرباره کوره انجام پذیرفت. در این آزمایش ها تعداد ضربات چکش اعمالی در هر لایه به ترتیب برابر با ۱۰، ۳۰، ۵۶ و ۶۵ ضربه در نظر گرفته شد. در ادامه برای هر سرباره نتایج ارایه شده است.

۵-۱- نتایج آزمایش های سرباره BOF

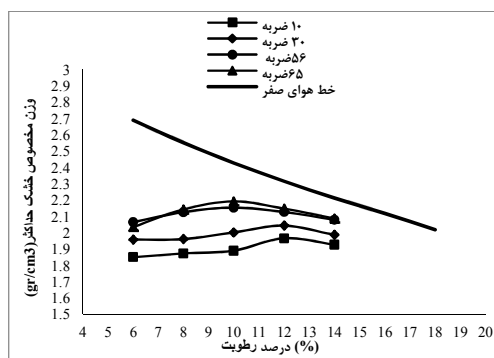
در شکل های ۲ تا ۵، منحنی های به دست آمده از آزمایش های تراکم برای دانه بندی نوع ۱ و ۲، سرباره ی فولاد BOF در تراکم استاندارد و اصلاح شده نشان داده شده است. شکل شماره ۲، مربوط به آزمایش تراکم استاندارد و دانه بندی نوع ۱ است که با افزایش تعداد ضربات، منحنی های تراکم از دو قله ای به تک قله ای تغییر پیدا کرده است. میزان رطوبت بهینه برای انرژی های تراکمی بالا ۱۰ درصد و مقدار رطوبت بهینه در ضربات ۱۰ و ۳۰، ۱۲ درصد است که با افزایش انرژی تراکم تغییری پیدا نکرده است. در این حالت با افزایش انرژی تراکم بر میزان وزن مخصوص حداکثر افزوده شده است. شکل شماره ۳، مربوط به آزمایش تراکم اصلاح شده، دانه بندی نوع ۱ است، نمودار ۱۰ ضربه به صورت دو قله ای است ولی برای ضربات ۳۰ و ۵۶ و ۶۵ نمودارها به صورت تک قله ای به دست آمده اند.

در این حالت با افزایش انرژی تراکم از ۱۰ ضربه به ۳۰ ضربه تغییری در مقدار رطوبت بهینه ایجاد نشده است و مقدار

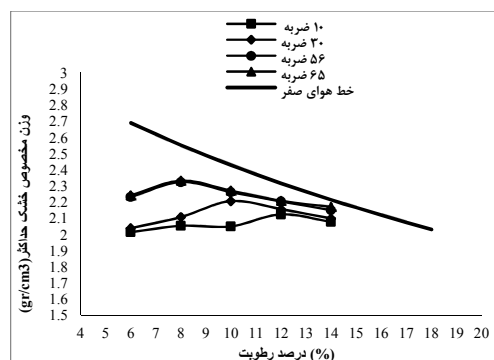
نمودار به صورت زنگوله‌ای و در تراکم اصلاح شده نمودار به صورت دو قله‌ای بدست آمده است. شکل شماره ۷ مربوط به تراکم استاندارد و اصلاح شده دانه‌بندی نوع ۱ و ۲ برای انرژی معادل ۳۰ ضربه است. در دانه‌بندی نوع ۱ با افزایش انرژی تراکم تقریباً درصد رطوبت نمونه‌ها ثابت باقی مانده و بر میزان وزن مخصوص حداکثر افزوده شده است. در این حالت نمودارها تقریباً شکل یکسانی دارند و فقط در تراکم اصلاح شده نمودار تراکم به سمت بالا منتقل شده است. در دانه‌بندی نوع ۲ با افزایش انرژی تراکم درصد رطوبت بهینه کاهش یافته و به میزان وزن مخصوص حداکثر افزایش داشته است. در دانه‌بندی نوع ۱ و ۲ در تراکم استاندارد میزان رطوبت بهینه ثابت ولی میزان وزن مخصوص حداکثر افزایش داشته است. در شکل شماره ۸، نتایج دانه‌بندی نوع ۱ و ۲ در تراکم‌های استاندارد و اصلاح شده برای انرژی معادل ۵۶ ضربه نشان داده شده است. برای دانه‌بندی نوع ۱ با افزایش انرژی تراکم میزان رطوبت بهینه کم شده است و بر میزان وزن مخصوص حداکثر افزوده شده است. در این حالت شکل نمودارها تغییر چندانی نسبت به هم نداشته‌اند و فقط در تراکم اصلاح شده نمودار به سمت بالا حرکت کرده است در دانه‌بندی نوع ۲ با افزایش انرژی تراکم میزان رطوبت بهینه کم و میزان وزن مخصوص حداکثر افزایش داشته است. شکل نمودار در این حالت در حالت اصلاح شده به صورت کله‌قندی و در تراکم استاندارد به صورت تقریباً تخت‌تر مشاهده شده است. در دانه‌بندی نوع ۱ و ۲ در تراکم استاندارد میزان رطوبت بهینه در دانه‌بندی نوع ۲ نسبت به نوع ۱ کاهش داشته و میزان وزن مخصوص حداکثر به صورت افزایشی بوده است. در دانه‌بندی نوع ۱ و ۲ در تراکم اصلاح شده میزان رطوبت بهینه در دانه‌بندی نوع ۲ نسبت به دانه‌بندی نوع ۱ کاهش و میزان وزن مخصوص حداکثر افزایش داشته است. به طور کلی در این حالت شکل نمودارها بیشتر شبیه مصالح شنی بوده است. در شکل ۹، نتایج برای دانه‌بندی نوع ۱ و ۲ در تراکم استاندارد و اصلاح شده برای انرژی معادل ۶۵ ضربه ارائه. در دانه‌بندی نوع ۱ با افزایش انرژی تراکم میزان رطوبت بهینه کاهش و میزان وزن مخصوص حداکثر افزایش داشته است. برای دانه‌بندی نوع ۲ با افزایش انرژی تراکم رطوبت



شکل ۳. آزمایش تراکم اصلاح شده - دانه‌بندی نوع ۱



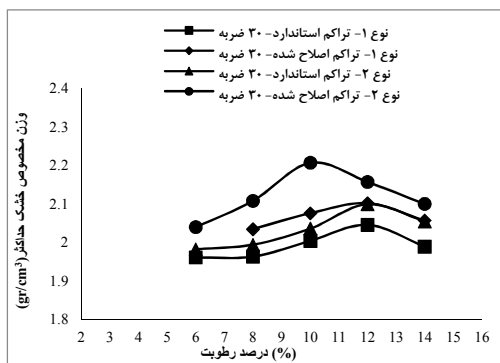
شکل ۴. آزمایش تراکم استاندارد - دانه‌بندی نوع ۲



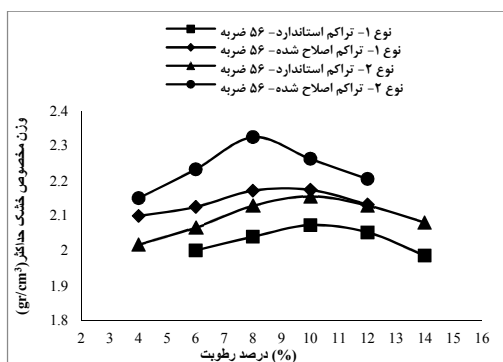
شکل ۵. آزمایش تراکم اصلاح شده - دانه‌بندی نوع ۲

در شکل‌های ۶ تا ۹، مقایسه نتایج آزمایش‌های به دست آمده از تراکم استاندارد و اصلاح شده در دو دانه‌بندی نشان داده شده است. در شکل ۶ دانه‌بندی نوع ۱ و ۲ در تراکم‌های استاندارد و اصلاح شده برای انرژی معادل ۱۰ ضربه نشان داده شده است. با افزایش انرژی تراکم در دانه‌بندی نوع ۱ و ۲ میزان رطوبت بهینه نمونه‌ها ثابت ولی به میزان وزن مخصوص حداکثر افزوده شده است. در دانه‌بندی نوع ۱ در تراکم استاندارد نمودار تک قله‌ای و برای تراکم اصلاح شده نمودار دو قله‌ای است. در دانه‌بندی نوع ۲ نیز در تراکم استاندارد

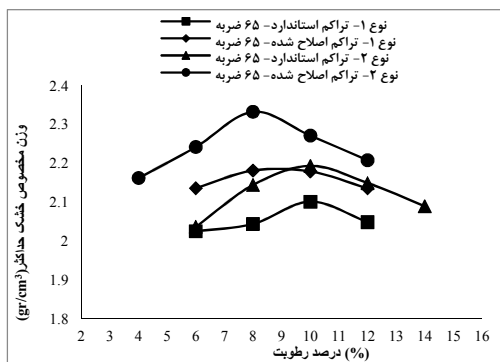
بهبود کاهش را نشان می‌دهد و میزان وزن مخصوص حداکثر به صورت افزایشی است. در دانه‌بندی نوع ۱ و ۲ در تراکم استاندارد با تغییر در نوع دانه‌بندی میزان رطوبت بهینه نسبتاً ثابت و میزان وزن مخصوص حداکثر در دانه‌بندی نوع ۲ نسبت به نوع ۱ افزایش داشته است. برای دانه بندی نوع ۱ و ۲ در تراکم اصلاح شده شکل منحنی‌ها نسبت به هم تغییری نداشته است و در دانه‌بندی نوع ۲ نسبت به نوع ۱ میزان رطوبت بهینه کم و میزان وزن مخصوص حداکثر افزایش را نشان داده است. به طور کلی نمودارها نشان می‌دهند که با تغییر در نوع دانه‌بندی و نوع تراکم در مصالح سرباره ذوب آهن اصفهان رطوبت بهینه و وزن مخصوص حداکثر دچار تغییر شده، ولی تغییرات در مقدار رطوبت بهینه بسیار ناچیز بوده است. به طوری که در بعضی موارد به صورت ثابت هم مشاهده می‌شود، با این حال تغییرات وزن مخصوص حداکثر با تغییر دانه‌بندی از نوع ۱ به ۲ و تراکم از حالت استاندارد به اصلاح شده همیشه به صورت افزایشی بوده است و این تغییرات وزن مخصوص حداکثر در ضربات ۵۶ و ۶۵ نسبت به هم مقدار کمی بوده است. به طور کلی نتایج نشان داد که منحنی‌های بدست آمده مشابه منحنی‌های تراکم خاک‌های درشت‌دانه هستند، با این تفاوت که در تعداد ضربات ۱۰ و ۳۰ بیشتر شبیه به نمودار تراکم ماسه و در ضربات ۵۶ و ۶۵ شبیه به نمودار تراکم شن است.



شکل ۷. آزمایش تراکم استاندارد و اصلاح شده - دانه‌بندی نوع ۱ و ۲ (۳۰ ضربه)



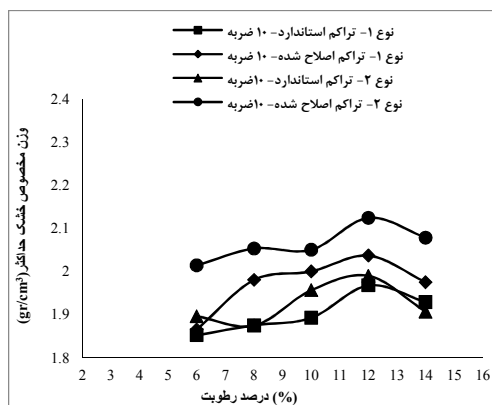
شکل ۸. آزمایش تراکم استاندارد و اصلاح شده - دانه‌بندی نوع ۱ و ۲ (۵۶ ضربه)



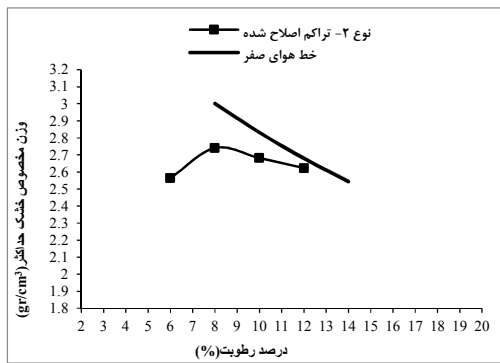
شکل ۹. آزمایش تراکم استاندارد و اصلاح شده - دانه‌بندی نوع ۱ و ۲ (۶۵ ضربه)

۵-۲- نتایج آزمایش‌های سرباره EAF

در شکل‌های شماره ۱۰ تا ۱۳ نتایج آزمایش تراکم به روش استاندارد و اصلاح شده بر روی سرباره EAF و تنها برای انرژی معادل ۵۶ ضربه آورده شده است. در شکل شماره ۱۰ نتیجه آزمایش تراکم دانه‌بندی نوع ۱ برای تراکم استاندارد نشان داده شده است. بر اساس این نمودار، میزان وزن



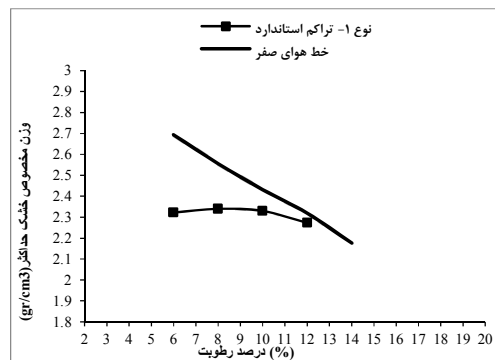
شکل ۱۰. آزمایش تراکم استاندارد و اصلاح شده - دانه‌بندی نوع ۱ و ۲ (۱۰ ضربه)



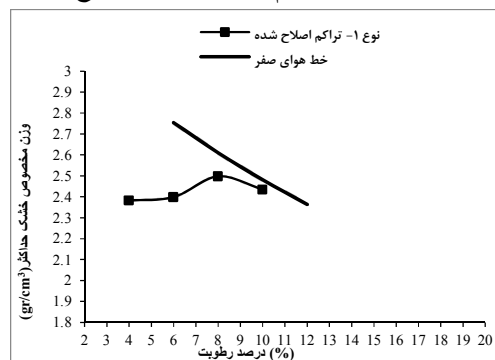
شکل ۱۳. آزمایش تراکم اصلاح شده - دانه بندی نوع ۲

نتایج آزمایش تراکم برای روی سرباره EAF در شکل شماره ۱۴ با یکدیگر مقایسه شده است. در دانه بندی نوع ۱ با تغییر میزان انرژی، تراکم از حالت استاندارد به حالت اصلاح شده، رطوبت بهینه تغییر بسیار کمی داشته است که برای حالت اصلاح شده این مقدار ۸ درصد و در حالت استاندارد ۸/۵ درصد به دست آمده است. گرچه میزان تغییر وزن مخصوص حداکثر برای حالت اصلاح شده نسبت به حالت استاندارد افزایشی بوده است. به طوری که این مقدار برای حالت اصلاح شده ۲/۴۹ و برای حالت استاندارد ۲/۳۷ گرم بر سانتی متر مکعب به دست آمده است. در دانه بندی نوع ۲ رطوبت بهینه در حالت اصلاح شده ۸ درصد و در حالت استاندارد ۸/۵ درصد به دست آمده است و میزان وزن مخصوص حداکثر برای حالت اصلاح شده ۲/۷۴ و برای حالت استاندارد ۲/۶۵ گرم بر سانتی متر مکعب است. در مرحله بعد اثر دانه بندی روی نمودارها بررسی شد به طوری که برای دانه بندی نوع ۱ و ۲ در تراکم استاندارد میزان رطوبت بهینه ثابت باقی مانده است اما میزان وزن مخصوص حداکثر برای دانه بندی نوع ۲ نسبت به نوع ۱، افزایش داشته است. در دانه بندی نوع ۱ و ۲ برای تراکم اصلاح شده رطوبت بهینه تغییری نداشته ولی وزن مخصوص حداکثر در حالت اصلاح شده نسبت به حالت استاندارد افزایش داشته است. به طور کلی اثر دانه بندی در این نوع سرباره بر روی وزن مخصوص حداکثر تاثیر گذار بوده است ولی در رطوبت بهینه اثری نداشته است. به طور خلاصه می توان گفت، با افزایش انرژی تراکم در سرباره های BOF و EAF وزن مخصوص حداکثر دچار تغییر می شود ولی میزان تغییر رطوبت بهینه ناچیز است که این امر می تواند ناشی از ناچیز بودن میزان جذب آب دانه های سرباره ها باشد که طی فرآیند تراکم رطوبت نمونه به سرعت

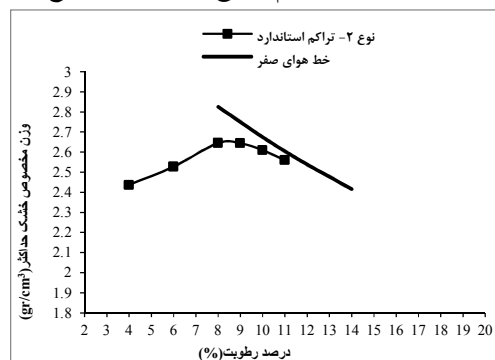
مخصوص حداکثر ۲/۳۷ گرم بر سانتی متر مکعب و رطوبت بهینه آن ۸/۵ درصد است. در شکل شماره ۱۱ که برای دانه بندی نوع ۱ و تراکم اصلاح شده ترسیم شده است، میزان وزن مخصوص حداکثر ۲/۴۹ گرم بر سانتی متر مکعب و میزان رطوبت بهینه آن ۸ درصد است. شکل های شماره ۱۲ و ۱۳ به ترتیب مربوط به دانه بندی نوع ۲ در تراکم استاندارد و اصلاح شده است. میزان وزن مخصوص حداکثر برای حالت استاندارد ۲/۶۵ و برای حالت اصلاح شده ۲/۷۴ گرم بر سانتی متر مکعب است. همچنین میزان رطوبت بهینه برای حالت استاندارد ۸/۵ درصد و برای حالت اصلاح شده ۸ درصد است.



شکل ۱۰. آزمایش تراکم استاندارد- دانه بندی نوع ۱



شکل ۱۱. آزمایش تراکم اصلاح شده - دانه بندی نوع ۱

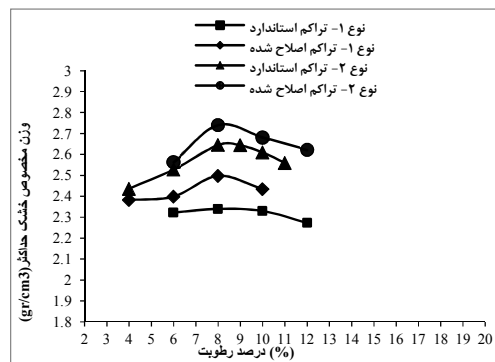


شکل ۱۲. آزمایش تراکم استاندارد- دانه بندی نوع ۲

۶-۱- نتایج آزمایش‌های سرباره BOF

آزمایش CBR در تراکم‌های ۱۰، ۳۰، ۵۶ و ۶۵ ضربه انجام شد. در این آزمایش، نمونه‌ها در حالت خشک و غرقاب مورد ارزیابی قرار گرفتند. شکل شماره ۱۵، نتایج آزمایش CBR برای دانه‌بندی نوع ۱ در تراکم استاندارد برای حالت خشک و غرقاب را نشان می‌دهد. مقادیر CBR برای حالت خشک بین ۱۸ تا ۱۱۳ و برای حالت غرقاب بین ۱۱ تا ۱۰۰ به دست آمد. براساس این نتایج غرقاب کردن نمونه باعث کاهش در نسبت CBR می‌شود و این میزان کاهش در ضربات بالاتر (۵۶ و ۶۵ ضربه) نسبت به ضربات پایین‌تر (۱۰ و ۳۰ ضربه) کمتر می‌باشد. در شکل شماره ۱۶ حالت‌های خشک و غرقاب برای دانه‌بندی نوع ۱ در تراکم اصلاح‌شده بررسی شده است. میزان اعداد CBR برای حالت خشک بین ۳۶ تا ۱۴۲ و برای حالت غرقاب بین ۱۵ تا ۱۳۰ به دست آمده است. نتایج حاکی از کاهش عدد CBR در حالت غرقاب نسبت به حالت خشک می‌باشد. میزان این تغییرات در تراکم‌های بالا کمتر از تراکم‌های پایین است. شکل شماره ۱۷ نتایج آزمایش نسبت باربری را برای دانه‌بندی نوع ۲ در تراکم استاندارد و حالت‌های خشک و غرقاب نشان می‌دهد. در این حالت مقادیر CBR در حالت خشک بین ۶۰ تا ۱۶۱ و برای حالت غرقاب بین ۵۶ تا ۱۲۷ می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد در انرژی‌های تراکمی پایین میزان عدد CBR در حالت خشک و غرقاب نزدیک به هم است ولی در تراکم‌های بالا اختلاف بین آن‌ها مشهودتر می‌باشد. در آخرین حالت که در شکل شماره ۱۸ نشان داده شده است، تغییرات عدد CBR برای دانه‌بندی نوع ۲ برای حالت خشک و غرقاب در تراکم اصلاح‌شده ارایه شده است. میزان اعداد CBR در حالت خشک ۶۶ تا ۲۵۵ و برای حالت غرقاب ۶۵ تا ۲۰۳ به دست آمد. در این حالت نیز مقادیر CBR در تراکم‌های پایین بسیار ناچیز و در تراکم‌های بالاتر مشخص‌تر است. نتایج به دست آمده از آزمایشات نشان دهنده آن است که مقادیر CBR سرباره BOF نسبت به مصالح طبیعی، مقادیر بالاتری را دار می‌باشد. شایان ذکر است، با غرقاب نمودن مصالح سرباره BOF از میزان نسبت باربری کالیفرنیا کاسته می‌شود.

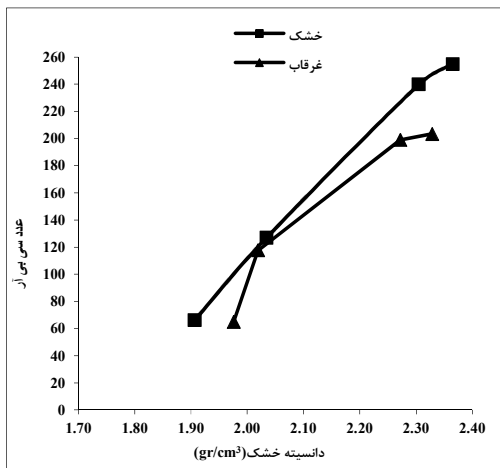
به آب آزاد بین دانه‌ها تبدیل می‌شود. اما در مصالح طبیعی میزان جذب آب نمونه‌ها بیشتر است و رطوبت به زمان بیشتری نیاز دارد که به صورت آزاد بین دانه حرکت کند. همچنین در این آزمایش‌ها مشخص شد که با تغییر نوع دانه‌بندی وزن مخصوص حداکثر تغییر نموده ولی میزان رطوبت بهینه تغییر قابل توجهی نداشته است. درباره این مورد می‌توان بیان نمود که در دانه‌بندی ریزتر، سطح مخصوص نسبت به دانه‌بندی درشت‌تر افزایش داشته است. با این حال درباره مصالح سرباره با توجه به میزان کم جذب رطوبت این مسئله تأثیر گذار نیست و با تغییر نوع دانه‌بندی فقط میزان وزن مخصوص حداکثر دارای تغییر محسوسی می‌باشد.



شکل ۱۴. آزمایش تراکم استاندارد و اصلاح‌شده - دانه‌بندی نوع ۱ و ۲ (۵۶ ضربه)

۶-۲ آزمایش تعیین نسبت باربری کالیفرنیا CBR (خشک و غرقاب)

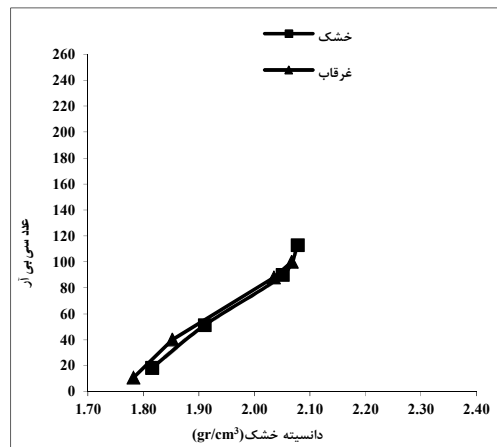
آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) از آزمایشات متداول برای تعیین مشخصات لایه‌های اساس و زیراساس می‌باشد. مطابق نشریه ۲۳۴ سازمان برنامه و بودجه حداقل میزان نسبت باربری کالیفرنیا به عنوان پارامتر مقاومتی در انتخاب لایه اساس (حداقل ۸۰) و برای لایه زیراساس (حداقل ۳۰) معرفی شده است. در این مطالعه آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا مطابق با استاندارد AASHTO T193 انجام شده است. در ادامه نتایج آزمایش‌های نسبت باربری کالیفرنیا سرباره‌های BOF و EAF به دو صورت خشک و غرقاب، برای دو سطح انرژی و دو نوع دانه‌بندی ارایه می‌شوند.



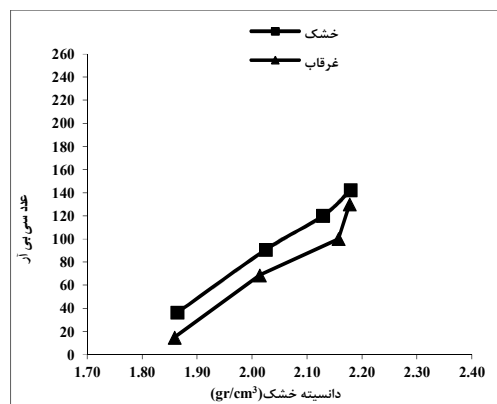
شکل ۱۸. آزمایش CBR - تراکم اصلاح شده - دانه بندی نوع ۲ - حالت خشک و غرقاب

۲-۶- سرپاره EAF

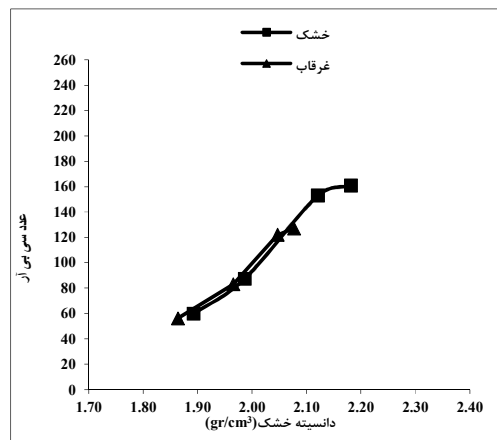
شکل های شماره ۱۹ الی ۲۲ نتایج آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا بر روی نمونه های EAF را نشان می دهد. آزمایش های CBR در انرژی های تراکم معادل ۱۰، ۳۰، ۵۶ و ۶۵ ضربه انجام شده است. همچنین همانند سرپاره BOF در این آزمایش، نمونه ها به صورت خشک و غرقاب مورد آزمایش قرار گرفتند. شکل شماره ۱۹ نتایج آزمایش CBR برای دانه بندی نوع ۱ در تراکم استاندارد و حالت های خشک و غرقاب را نشان می دهد. میزان اعداد CBR برای حالت خشک بین ۱۷ تا ۱۶۲ و برای حالت غرقاب ۱۴ تا ۱۰۵ به دست آمد. این نتایج نشان داد که غرقاب نمودن در این حالت باعث کاهش در میزان عدد CBR آن شده است و این میزان کاهش در انرژی تراکم های بالاتر (۵۶ و ۶۵ ضربه) نسبت به تراکم های پایین تر (۱۰ و ۳۰ ضربه) بیشتر می باشد. در شکل شماره ۲۰ حالت های خشک و غرقاب برای دانه بندی نوع ۱ در تراکم های اصلاح شده بررسی شده است. میزان اعداد CBR برای حالت خشک ۵۷ تا ۲۰۶ و برای حالت غرقاب بین ۷۰ تا ۳۶۳ به دست آمده است. نتایج حاکی از افزایش عدد CBR در حالت غرقاب نسبت به حالت خشک می باشد. میزان این تغییرات در تراکم های بالا بیشتر از تراکم های پایین است. شکل شماره ۲۱ نتایج آزمایش نسبت باربری را برای دانه بندی نوع ۲ در تراکم استاندارد در حالت های خشک و غرقاب نشان می دهد. در این حالت مقادیر CBR برای حالت خشک بین ۹۶ تا ۱۹۱ و برای حالت غرقاب این مقدار بین ۹۱ تا ۲۲۵ به دست آمد. این نتایج نشان



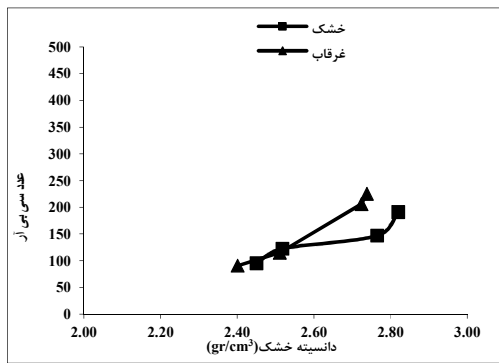
شکل ۱۵. آزمایش CBR - تراکم استاندارد - دانه بندی نوع ۱ - حالت خشک و غرقاب



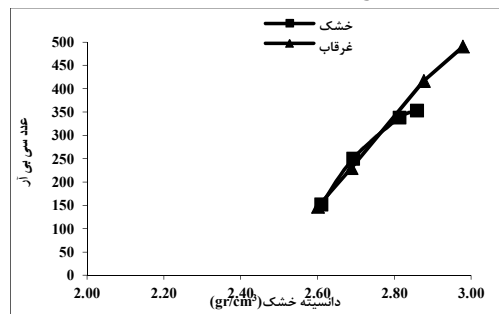
شکل ۱۶. آزمایش CBR - تراکم اصلاح شده - دانه بندی نوع ۱ - حالت خشک و غرقاب



شکل ۱۷. آزمایش CBR - تراکم استاندارد - دانه بندی نوع ۲ - حالت خشک و غرقاب



شکل ۲۱. آزمایش CBR - تراکم استاندارد - دانه بندی نوع ۲ - حالت خشک و غرقاب

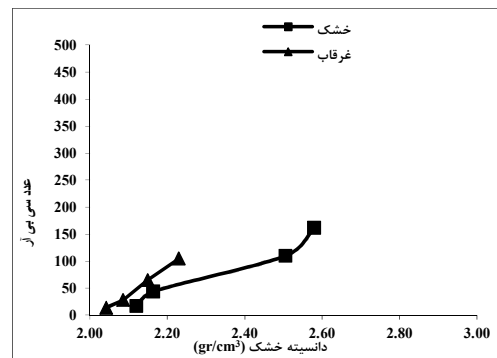


شکل ۲۲. آزمایش CBR - تراکم اصلاح شده - دانه بندی نوع ۲ - حالت خشک و غرقاب

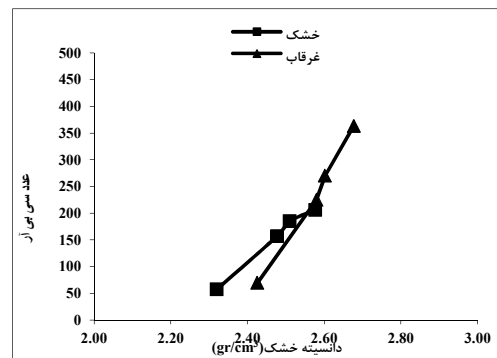
۷- نتیجه گیری

نمونه‌های سرباره‌ی BOF و EAF، در دو نوع دانه‌بندی مورد استفاده دارای چگالی ویژه سرباره در محدوده ۲/۹۵ تا ۳/۰۶ برای سرباره BOF و ۳/۲۱۳ تا ۳/۲۵ برای سرباره EAF، به دست آمد. این اعداد نشان می‌دهد که نسبت به مصالح طبیعی چگال‌تر می‌باشند و این امر می‌تواند ناشی از وجود آهن در سرباره‌ها باشد. با انجام آزمایش حدود اتربرگ روی سرباره‌های BOF و EAF مشخص شد که این مصالح هیچ‌گونه رفتار خمیری خود نشان نمی‌دهند. سرباره‌ی فولاد BOF و EAF، منحنی‌های رطوبت- دانسیته‌ی نامنظم و مقادیر وزن مخصوص حداکثر بالاتری نسبت به خاک‌های طبیعی را دارا می‌باشند. وزن مخصوص حداکثر به دست آمده، برای نمونه‌های سرباره‌ی فولادی BOF، بر اساس نتایج آزمایش تراکم (استاندارد و اصلاح‌شده)، در محدوده ۱/۹۷ تا ۲/۳۳ و برای سرباره EAF ۲/۳۷ تا ۲/۷۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب تعیین شدند. بر همین اساس رطوبت بهینه نمونه‌های سرباره‌ی فولاد BOF، بین ۸/۵ تا ۱۲/۵ درصد و برای سرباره EAF ۸ تا ۸/۵ درصد به دست آمدند. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که در دانه‌بندی نوع ۲ نسبت به دانه‌بندی

داد که در این حالت در انرژی‌های تراکمی پایین میزان عدد CBR در حالت خشک بالاتر از حالت غرقاب است و این میزان در تراکم‌های بالا معکوس می‌باشد. در شکل شماره ۲۲، تغییرات عدد CBR برای دانه‌بندی نوع ۲ برای حالت خشک و غرقاب در تراکم اصلاح‌شده نشان داده شده است. میزان اعداد CBR برای حالت خشک ۱۵۲ تا ۳۵۳ و برای حالت غرقاب ۱۴۷ تا ۴۹۰ به دست آمد. در این حالت نیز میزان اختلاف اعداد CBR در تراکم‌های پایین بسیار ناچیز و در تراکم‌های بالاتر محسوس‌تر است. بر اساس نتایج به دست آمده، با غرقاب کردن مصالح سرباره EAF از میزان نسبت باربری کالیفرنیا آن در تراکم‌های استاندارد کاسته می‌شود. گرچه در حالت تراکم اصلاح شده با غرقاب کردن نمونه‌ها میزان نسبت باربری کالیفرنیا افزایش می‌یابد. به طور کلی نتایج حاکی از آن است که CBR سرباره EAF نسبت به سرباره BOF و همچنین مصالح طبیعی دارای مقادیر بیشتری می‌باشد.



شکل ۱۹. آزمایش CBR - تراکم استاندارد - دانه بندی نوع ۱ - حالت خشک و غرقاب



شکل ۲۰. آزمایش CBR - تراکم اصلاح شده - دانه بندی نوع ۱ - حالت خشک و غرقاب

۱۰- مراجع

- عامری، م. و شهابی شهمیری، ح. و شکرچی زاده، م. (۱۳۸۸)، "بررسی تاثیر استفاده از سرباره کنورتور ذوب آهن اصفهان به عنوان جایگزین سنگدانه بر بتن غلتکی روسازی راه"، کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، هشتمین دوره.

- شکرچی زاده، م. و حسینی، مقداد. م. و ماهوتیان، م. (۱۳۸۸)، "روباره فولادی جایگزینی مناسب برای سنگدانه‌ها طبیعی در راهسازی"، نشریه انجمن بتن ایران، شماره ۲۸.

- آقایی آرابی، ع. (۱۳۹۶)، "بررسی رفتار مصالح سرباره فولاد به عنوان بالاست و زیر بالاست خطوط ریلی تحت شرایط بارگذاری دینامیکی و مونوتونیک"، پروژه تحقیقاتی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، بخش ژئوتکنیک و زیرساخت.

- رحمانی، ا. و آقایی آرابی، ع. و عطارچیان، ن. و سلامت، ا.س. و حسینی، ح. (۱۳۹۶)، "بررسی اثر غرقاب شدن، دانه‌بندی و جنس سرباره فولاد بر مشخصات فنی خاکریزهای مهندسی"، پروژه تحقیقاتی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، بخش ژئوتکنیک و زیرساخت.

- مشخصات روسازی آسفالتی راه‌های ایران (۱۳۹۰)، نشریه شماره ۲۳۴ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.

-Yildirim, Irem Zeynep, and Monica Prezzi, (2016), "Geotechnical properties of fresh and aged basic oxygen furnace steel slag." *Journal of Materials in Civil Engineering* 27, pp.12 .

-Lee, Peter Y., and Richard J. Suedkamp.,(1972) "Characteristics of irregularly shaped compaction curves of soils." *Highway Research Record* 381, pp. 1-9.

-Yildirim, Irem Zeynep, (2009), "-Experimental study of the use of steel slag as a geotechnical material". Diss, Purdue University.

نوع ۱ مقادیر وزن مخصوص حداکثر بالاتر و رطوبت‌های بهینه کمتر می‌باشد. این امر می‌تواند ناشی از درشت‌دانه‌تر بودن مصالح نوع ۲ نسبت به نوع ۱ باشد. این مسئله برای هر دو نوع سرباره صادق است. در هر دو نوع سرباره، در دانه‌بندی نوع ۲ با افزایش میزان انرژی تراکم بر میزان وزن مخصوص حداکثر افزوده شده و از میزان رطوبت بهینه کاسته یا ثابت مانده است. نتایج نشان دادند که آزمایش‌ها بیشتر روی وزن مخصوص حداکثر نمونه‌ها تاثیر گذاشته است و تغییرات درصد رطوبت بهینه خیلی چشمگیر نیست.

نتایج آزمایش‌های CBR بر روی سرباره BOF و EAF نشان می‌دهد که این مصالح دارای نسبت باربری کالیفرنایی بالاتری نسبت به مصالح طبیعی هستند. برای سرباره BOF محدوده اعداد CBR بین ۱۱ تا ۲۵۵ به دست آمد که در حالات غرقاب نسبت به حالت خشک میزان اعداد CBR کاهش یافته است. با این حال میزان تغییرات حالات خشک و غرقاب در تراکم‌های بالا کمتر می‌باشد. در مورد سرباره EAF میزان اعداد CBR بین ۱۴ تا ۴۹۰ به دست آمده است. در سرباره EAF در حالات غرقاب نسبت به حالت خشک در تراکم اصلاح‌شده میزان اعداد بالاتری می‌باشد. بر اساس نتایج حاصل از این مطالعه سرباره‌ی فولاد BOF و EAF در مقایسه با بسیاری از خاک‌های طبیعی، دارای ویژگی‌های تراکمی و مقاومتی مطلوب‌تری هستند و در صورتی که مسئله‌ی ناپایداری حجمی و همچنین اثرات زیست محیطی به درستی مورد بررسی قرار گیرد، می‌تواند به عنوان مصالح مورد نیاز در اساس و زیراساس راه مورد استفاده قرار گیرند.

۸- سپاسگزاری

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

۹- پی‌نوشت‌ها

1. Blast Oxygen Furnace (BOF)
2. Electric Arc Furnace (EAF)

- Standard, A. S. T. M. D854, (2005), "Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil solids by Water Pycnometer", ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Standard, AASHTO T99, (2010), "Standard Method of Test for Moisture-Density Relations of Soils Using a 2.5-kg (5.5-lb) Rammer and a 305-mm (12-in.) Drop".
- Standard, AASHTO T180, (2010), "Standard Method of Test for Moisture-Density Relations of Soils Using a 4.54-kg (10-lb) Rammer and a 457-mm (18-in.) Drop".
- Rohde, L., Nunez, W.P., and Ceratti, J.A.P. (2003), "Electric arc furnace steel slag- base material for low-volume roads." Transportation Research Record 1819, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp. 201-207.
- Standard, A. S. T. M. D422-63, (2007), "Standard test method for particle-size analysis of soils", ASTM International, West Conshohocken.
- Standard, A. S. T. M. D4318, (2005), "-Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils", ASTM Annual Book of Standards.

Evaluation of Compaction Energy, Soil Grain Distribution and Type of Steel Slag on the Compaction Characteristic and California Bearing Ratio (CBR)

Iraj Rahmani, Assistant Professor, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran.

Mohammad Afshari, M.Sc., Student, Central Tehran Branch, Islamic Azad University Tehran, Iran.

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

Nahid Attarchian, Assistant Professor, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran.

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

Received: February 2020-Accepted: July 2020

ABSTRACT

Today, steel is one of the most used materials in industry and its annual consumption is increasing. One of the most important by-products of steel making is steel slag. The use of steel slag as a waste of this industry, can be applied in geotechnical applications such a road embankment in order to reduce of the slag disposal, as well as preventing the destruction of natural resources, is of particular importance. It is necessary to determine the geotechnical engineering properties of steel slag produced from different steelmaking operations and assess the potential usage in road and railways embankment construction. In this paper, physical, compaction properties, California Bearing Ratio's (CBR) and characteristics of steel slag as a base and sub base of road material and sub ballast of railway were studied. Two types of steel slag, Blast Oxygen Furnace (BOF) and Electric Arc Furnace (EAF) slags which produced in Esfahan Steel Company and Esfahan's Mobarakeh Steel Company respectively are used in this research. The range of the particle size distribution of the specimens has been selected in accordance with the characteristics of the road pavement as well as the existing laboratory facilities. In this research, California Bearing Ratio (CBR) tests were carried out on two types of slags (BOF, EAF) with two types of particle size distributions and with two different compaction methods (standard and modified) in soaked and un soaked conditions. Based on obtained results mentioned slag have no plasticity index. Moreover, dry unit weight varies between 1.94 to 2.74 gr/cm³ and optimum moisture content varied between 8% and 12.5%. The CBR values varied between 88 to 199 for BOF slags and 185 to 490 for EAF slags in socked and unsocked conditions. According to CBR test results; these materials can be used in road base and sub-base layers by applying less compaction effort than in normal condition.

Keywords: Steel Slag, Slag Application, Technical Properties of Slags, California Bearing Ratio, Compaction Properties of Slag