بهسازی خاک‌های ریزدانه منطقه فولاد مبارکه جهت استفاده در راه‌سازی با استفاده از سربارههای فولادی

علمی - پژوهشی

روح الله صالحی*، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده علوم پایه، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
رسول اجل لوییان، استاد، دانشکده علوم پایه، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Ro.Salehi@msc.ir

دریافت: ۱٤۰۱/۰۳/۲۷- پذیرش: ۱٤۰۱/۱۰/۱۵
صفحه ۳۰۲-۲۸۵

چکیده

بهسازی خواص فیزیکی خاک با استفاده از ضایعات صنعتی، همواره مورد توجه محققان بوده و اهمیت آن وقتی بیشتر می‌شود که انباشت حجم عظیم خاک قرضه حاصل از توسعهٔ پروژه‌های عمرانی به دلیل خواص مهندسی نامناسب جهت استفاده مجدد در پروژه‌های عمرانی؛ مخاطره آمیز باشد. از طرفی با توجه به این که کشور ایران یکی از قطب‌های تولید فولاد است و سالانه حجم عظیمی از سربارههای فولادی در این کشور تولید و انباشت می‌شود، لازم است به منظور بازیافت بهینه این پسماندها، تحقیقات جامعی در حوزه‌های مختلف علوم و صنعت صورت پذیرد. یکی از موارد هدف برای مصرف بهینه این پسماندها، استفاده از آنها در بهسازی خاک جهت استفاده در راه‌سازی است. تحقیق حاضر برمبنای بهسازی خاک ریزدانهٔ انباشت شده منطقه فولاد مبارکه با استفاده از سربارههای فولادی فرآوری شده در اندازهٔ ۰ تا ۲۵ میلی‌متر، جهت استفاده در راه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است. ویژگی‌های مهندسی خاک قرضهٔ موجود در کارخانه فولاد مبارکه (ناحیهٔ سبا) شامل حدروانی و شاخص خمیری، دانه‌بندی و طبقه‌بندی، پس از نمونه‌برداری از قسمت‌های مختلف و آماده‌سازی و انجام آزمایش در آزمایشگاه، مورد بررسی اولیه قرار گرفت که با توجه به الزامات نشریه‌های راه‌سازی، خاک نامناسب تشخیص داده شد. سرانجام با انجام مرحله به مرحله آزمایشات، اقدام به اصلاح ویژگی‌های مهندسی خاک با استفاده از درصدهای مختلف سرباره فولادی تارسیدن به مخلوط مناسب جهت استفاده در راهسازی و مقایسهٔ ویژگی‌های ژئوتکنیک شامل نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) و مقاومت برشی در خاک و نمونه‌های مخلوط خاک و سرباره، گردید.

واژه‌های کلیدی: بهسازی خاک، راه‌سازی، سربارههای فولادی، نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)، مقاومت برشی

۱- مقدمه

تثبیت و بهسازی خواص فیزیکی و مکانیکی خاک‌ها با استفاده از ضایعات صنعتی، موضوعی است که همواره مورد توجه محققان قرار گرفته است و می‌توان به تثبیت یا بهسازی خاک‌های مسأله‌دار در پروژه‌های عمرانی با استفاده از ضایعات صنعتی مانند سربارههای فولادی، ضایعات بتنی، آهکی و ... اشاره کرد که در بهبود خصوصیات مکانیکی خاک‌ها در مقابل بارهای وارده، به عنوان یک راه حل بهینه به حساب می‌آید. از طرفی یکی از مسائلی که با رشد روزافزون صنعت دامن‌گیر زندگی بشری بوده و همواره ذهن او را به خود مشغول نموده است، حفظ محیط زیست و رهایی از پسماندهای ناشی از

فعالیت‌های صنعتی بوده است؛ به طوری که می‌توان گفت که کاهش و چرخه مجدد ضایعات در صنعت بیشتر از تولید آنها حائز اهمیت است. همان طوری که بیان گردید از جمله پسماندهای صنعتی، سرباره فولادی است. در یک توصیف کلی می‌توان گفت سرباره‌های فولادی یک مادهٔ سخت، چگال، مقاوم و تیره رنگ است که در فرایند تولید فولاد به وجود می‌آید. این ماده دارای مقدار قابل توجهی آهن آزاد است که باعث افزایش چگالی و مقاومت آن می‌شود. این ویژگی‌ها، سرباره‌های فولاد را سنگدانهٔ مناسبی برای استفاده در ساخت جاده تبدیل می‌کند (کندهال و هافمن، ۱۹۹۷). از طرفی عمل‌آوری سربارهٔ فولاد و پروسهٔ تکنولوژی آن، برای دودههٔ اخیر به خوبی گسترش یافته، به طوری که آن را برای مصرف جایگزین مصالح دانه‌ای اساس و زیراساس در مقیاس‌های بزرگ ممکن ساخته است. با این وجود حقیقت این است که مصالح دانه‌ای سربارهٔ فولاد به طور گسترده در ساخت و ساز، بخصوص به عنوان مصالح دانه‌ای، مورد استفاده قرار نگرفته است. دلیل اصلی برای مصرف کم آن، کمبود ضوابط مشخص برای راهنمایی مصرف مناسب یک سربارهٔ فولاد خاص در یک کاربرد مشخص می‌باشد. بدین منظور بنا نهادن ضوابط متفاوت برای مصارف متفاوت، ضروری است. استفاده از مصالح فولاد به عنوان مصالح دانه‌ای به سبب دلایل زیر می‌باشد:

۱- مقادیر بیشتری از سربارهٔ فولاد می‌تواند به عنوان مصالح دانه‌ای در مقایسه با سایر مصارف مورد استفاده قرار گیرد.

۲- فرایند استفاده از این ماده برای مصالح دانه‌ای از نظر فنی ساده و پیشرفته به نظر می‌رسد.

۳- نگرانی‌های کمتری در مورد مقاومت بلند مدت در اساس و زیراساس غیرچسبندهٔ دانه‌ای راه‌ها وجود دارد.

٤- صنعت سربارهٔ فولاد به طور کامل تولید و بازاریابی خود را روی مصالح دانه‌ای برای مصارف نامحدود متمرکز می‌کند. امروزه سرباره در کارخانه‌های بزرگ تولید فولاد جهان به فراوانی و در حجم زیاد تولید و انباشت می‌شود که این موضوع می‌تواند در کنار انباشت حجم عظیم خاک حاصل از توسعهٔ روزافزون کارخانه‌ها، مشکلات زیادی را از نظر زیست محیطی و اشغال سطح وسیعی از این کارخانه‌ها ایجاد کند (وانگ و همکاران،۲۰۱۰).

در سال ۲۰۱۱، میزان تولید سرباره پس از بازیابی فلز ۱٤۹تا ۲۲۳ میلیون تن در جهان برآورد شده که از این مقدار ۹ تا ۱۳ میلیون تن آن در ایالات متحده تولید می‌شود. از سربارهٔ فولاد تولید شده در ایالات متحده، به عنوان سنگدانه برای ساخت جاده و روسازی (حدود ۵۰ تا ۷۰ درصد) و سایر کاربردهای گوناگون (۱۰ تا ۱۵ درصد) استفاده می‌شود. سربارهٔ فولاد باقی مانده که مورد استفاده قرار نمی‌گیرد (حدود ۱۵ تا ٤۰ درصد)، در کارخانجات انباشته شده و سرانجام به سایت‌های دفع سرباره فرستاده می‌شوند. به منظور کاهش مشکل دفع سرباره و کمک به حفظ و ذخیرهٔ منابع طبیعی در حال کاهش، برنامه‌های کاربردی جدیدی در رابطه با سرباره‌های فولاد مورد نیاز است (بیلدیریم و همکاران، ۲۰۱٦). در ایران سالیانه قریب به دو میلیون تن سرباره تولید می‌شود که با توجه به پروژه‌های در دست احداث و طرح‌های توسعه‌ای، پیش‌بینی می‌شود این رقم نیز افزایش یابد. علاوه بر تولید سالیانه سرباره، میزان انباشتگی موجود در کارخانه‌های بزرگ فولادسازی کشور حدود ٤۵ میلیون تن تخمین زده شده است. روند رو به رشد تولید سرباره فولاد و دپوی چند میلیون تنی سرباره‌ها در سال‌های گذشته، نگهداری و دفع این محصولات جنبی را با مشکلات فراوانی روبرو نموده است (عامری و همکاران، ۱۳۸۸). با توجه به مقدار تولید سرباره، استفاده از ضایعات صنعتی از جمله سرباره‌های فولادی در صنایع مختلف بخصوص در زمینهٔ بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک، همواره مورد توجه محققان بوده است.

بررسی‌های انجام شده در مورد استفاده از سرباره فولادسازی جهت افزایش مقاومت خاک‌های ریزدانه نشان داده است که مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های تثبیت شده با ترکیب همزمان آهک و سرباره در مقایسه با نمونه‌های تثبیت شده با آهک و یا سرباره به تنهایی، افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته است و افزایش مقاومت فشاری تابعی از مقدار آهک و سرباره موجود در مخلوط و همچنین مدت زمان عمل آوری بوده است. (چرخیاری و عبدی، ۱۳۸۸).

اصلاح مقاومت خاک با افزودن ۸ درصد سرباره به خاک باعث افزایش ٤۰ درصدی CBR و رسیدن مقاومت فشاری محصور

نشده به ٦٦/٧ کیلو نیوتن بر متر مربع می‌گردد. این در حالی است که حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری به ترتیب ٦/٣، ٤/٠ و ٢/٣ درصد کاهش یافت که تبادل کاتیونی بین خاک و سرباره به عنوان عامل اصلی بهبود خواص مهندسی خاک در اثر افزودن سرباره در نظر گرفته شده است. همچنین افزودن سرباره‌های فولادی به خاک‌های لاتریتی، حدود آتربرگ و درصد رطوبت بهینه را کاهش و وزن واحد حجم خشک خاک، مقدار CBR اشباع و غیراشباع، مقاومت فشاری تک محوری و نفوذپذیری خاک را افزایش می‌دهد (اکینومی، ٢٠١٤).

بهسازی مصالح خاکریزی را با استفاده از آهک و سرباره نشان می‌دهد مقدار CBR مخلوط سرباره، آهک و رس پس از ٢٨ روز عمل آوری نمونه‌ها، تا ٤٦ برابر افزایش یافته است. همچنین مقاومت فشاری محصور نشده نمونهٔ مخلوط سرباره، آهک و رس در مقایسه با نمونهٔ مخلوط آهک و رس، بیشتر است (کاواک و بیلکن، ٢٠١٦).

افزودن مقداری سرباره و آهک به خاک، ضمن کاهش حد روانی و افزایش حد خمیری، شاخص خمیری خاک را کاهش می‌دهد (گناوالا و همکاران، ٢٠١٩).

ارزیابی مشخصات ژئوتکنیکی دو نوع سربارهٔ EAFS و LFS و مخلوط از آنها را برای استفاده در راه‌سازی، نشان داد منحنی‌های دانه‌بندی نمونه‌های LFS و LFS50+EAFS50 به طور کامل با الزامات راه‌سازی مطابقت دارند. در این مطالعه مخلوط LFS50 + EAFS50 به منظور بهبود خواص مهندسی EAFS از نظر دانه‌بندی ضعیف و عدم وجود ذرات ریز، و همچنین افزایش خصوصیات مقاومتی LFS با سنگدانه‌های مقاوم EAFS، آماده گردید. در نهایت خصوصیات ژئوتکنیکی مانند دانه‌بندی و CBR نمونه مورد نظر، برای استفاده به عنوان اساس و زیراساس در روسازی راه بهبود پیدا کرد؛ به گونه‌ای که EAFS که دارای مقادیر نسبتاً پایین CBR و دانه‌بندی ضعیف بود، برای استفاده در پروژه‌های با میزان حساسیت کمتر مانند زیراساس در روسازی راه، پرکننده پروژهای مهندسی، مناسب است (مغول و همکاران، ٢٠١٩). نتایج تحقیق ویژگی‌های تراکمی دونوع سربارهٔ کوره فولادسازی اکسیژنی BOF و کوره قوس الکتریکی BAF برای استفاده به عنوان مصالح پرکننده در کاربردهای ژئوتکنیکی نشان داد سرباره‌های مذکور فاقد رفتار خمیری می‌باشد و وزن مخصوص حداکثر خشک بین ١/٩٧ تا ٢/٧٤ گرم بر سانتی‌متر مکعب و رطوبت بهینه بین ٨ الی ١٢/٥ درصد است. همچنین نسبت باربری کالیفرنیا برای سربارهٔ BOF در محدودهٔ ٨٨ الی ١٩٩ و برای سربارهٔ EAF در محدودهٔ ١٨٥ الی ٤٩٠ برای شرایط خشک و اشباع، نشان می‌دهد علاوه بر تراکم‌های معمول در راهسازی برای تراکم‌های کمتر نیز می‌توان از این مصالح برای اساس و زیراساس استفاده نمود (رحمانی و همکاران، ١٣٩٩).

امکان سنجی ساخت بتن با سرباره فولاد نشان داده است که استفاده از سنگدانه سرباره‌ای در بتن از نظر مقاومت فشاری مطلوب است هرچند که مقاومت خمشی را نسبت به بتن معمولی اندکی کاهش می‌دهد؛ اما جمع شدگی نسبت به بتن معمولی کمتر می‌شود (لیو و همکاران، ٢٠١١).

با توجه به مطالب بیان شده و با عنایت به این که کشور ایران یکی از قطب‌های تولید فرآورده‌های فلزی خصوصاً فولاد می‌باشد و قسمت قابل توجهی از پسمانده‌های این صنعت، سرباره‌های کوره‌های تولید فولاد می‌باشد، لازم است به منظور بازیافت بهینه این پسماندها، تحقیقات جامعی در حوزه‌های مختلف علوم و صنعت صورت پذیرد. یکی از موارد هدف برای استفاده بهینه این پسماندها، استفاده از آنها در بهسازی خاک در ساختمان جاده می‌باشد. این در حالی است که کارخانه‌های تولید فولاد مانند شرکت فولاد مبارکه جهت نگهداری و توسعه شبکه راه‌های خود نیاز به منابع قرضه مناسب فراوانی داشته و در کنار آن میزان زیادی سرباره تولید می‌نماید که این موضوع به همراه هزینه‌های حمل و نقل مصالح قرضه طبیعی و از طرفی انباشت و نگهداری یا معدوم سازی سرباره‌های تولیدی، نیاز مبرم تحقیق در این زمینه را گوشزد می‌نماید. در این تحقیق تلاش شده است تا امکان بهسازی خاک قرضهٔ شرکت فولاد مبارکه در ناحیه سبا که اغلب ریزدانه هستند با استفاده از سرباره برای ساخت جاده‌ها مورد بررسی قرار گیرد.

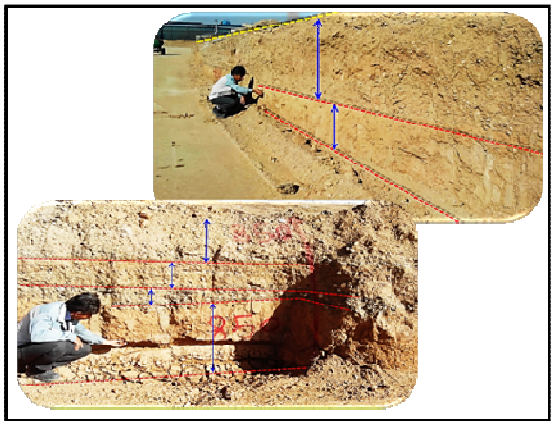
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- نمونهٔ خاک مورد تحقیق

خاک استفاده شده در این پژوهش، از یک منبع گستردهٔ خاک قرضه واقع در شرکت فولاد مبارکه (ناحیه فولاد سبا)، تهیه شده است. پس از بررسی مطالعات ژئوتکنیک، تحقیقات محلی و بازدیدهای بعمل آمده از محل انباشت خاک در ناحیهٔ سبا، این نتیجه حاصل شد که خاک انباشت شده در این ناحیه با حجم بالغ بر یک میلیون متر مکعب، حاصل خاکبرداری‌های گسترده طرح‌های توسعهٔ شرکت ذوب آهن و بخصوص شرکت فولاد مبارکه (ناحیهٔ سبا) در طی سالیان زیاد می‌باشد که سطح وسیعی از زمین‌های این کارخانه را اشغال کرده است (شکل ۱). وضعیت زمین‌شناسی این منطقه به گونه‌ای است که نهشته‌های کواترنری در محدوده منطقه مورد مطالعه، از دو بخش عمده نهشته‌های بادبزنی یا رسوبات کوهپایه‌ای‌و نهشته‌های زاینده‌رود تشکیل شده‌اند (شرکت مهندسین‌مشاور میهن خاک، ۱۳۹۱). این نهشته‌ها در ناحیهٔ سبا بیشتر از نوع رودخانه‌ای بوده که به صورت گسترده برروی یکدیگر انباشت شده‌اند و حجم زیادی از آنها را خاک‌های ریزدانه با خصوصیات مکانیکی نامناسب جهت استفاده در روسازی جاده تشکیل داده است.

در شکل ۲ می‌توان توالی آبرفت‌های ریزدانه را در مقطع خاک‌برداری شده یکی از پروژه‌های راه‌سازی ناحیهٔ سبا مشاهده کرد. نمونه‌برداری برای انجام آزمایش‌های مرتبط با این پژوهش، از قسمت‌های مختلف قابل دسترس منبع قرضه و در عمق بیش از ۵۰ سانتی‌متر انجام شده است. نمونه‌های تهیه شده پس از حمل به آزمایشگاه، به طور کامل با یکدیگر مخلوط (همگن) شده تا یک نمونه که نمایندهٔ واقعی تمام خاک موجود باشد، ایجاد گردد. بعد از نمونه‌برداری و آماده‌سازی نمونه، ابتدا ویژگی‌های ژئوتکنیکی شامل دانه‌بندی، حدود آتربرگ، حداکثر دانسیتهٔ خشک، رطوبت بهینه و ظرفیت باربری خاک مورد بررسی قرار گرفت.

شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منبع خاک قرضهٔ شرکت فولاد مبارکه (ناحیهٔ سبا)



شکل ۲. توالی آبرفت‌های ریزدانه در مقطعی از ناحیهٔ سبا

۲-۲- ارزیابی اولیه خاک مورد تحقیق

نتایج به دست آمده از بررسی خصوصیات ژئوتکنیکی نمونهٔ اولیه خاک در آزمایشگاه در جدول ۱ و همچنین نتایج دانه‌بندی خاک در شکل‌های ۳ و٤، نشان داده شده است. با مقایسه ویژگی‌های ژئوتکنیک خاک با جدول ۲ و و محدودهٔ مجاز برای استفاده به عنوان روسازی راه (اساس و زیراساس)، می‌توان دریافت که نمونهٔ اولیه خاک مورد تحقیق، جهت استفاده به عنوان روسازی راه مناسب نمی‌باشد. این در حالی است که بررسی‌های میدانی نشان می‌دهد استفاده از آن به عنوان خاکریز زیر جاده، بخصوص در صورت بهینه نبودن رطوبت خاک، می‌تواند موجب ترک خوردگی و عدم پیوستگی لازم بین ذرات خاک، در حین اجرا و تراکم شود.

جدول ۱. مشخصات ژئوتکنیکی خاک مورد مطالعه

Geotechnical properties of unmodified soil	Properties	Quantity / Description	Remark
Gradation / Classification	Gravel(>4.75 %), %	21.73	ASTM D422
	Sand (0.075 - 4.75 mm), %	46.53	ASTM D422
	Silt and Clay (< 0.075 mm), %	31.74	ASTM D422
	AASHTO Soil Classification System	A – 2 - 7	AASHTO M145-91
	Unified Soil Classification System	SC	ASTM D2487
Physical	Liquid Limit (%)	44.5	ASTM D4318
	Plastic Limit (%)	24.94	ASTM D4318
	Plasticity Index (%)	19.56	ASTM D4318
	Maximum Dry Unit weight (gr/Cm^3)	1.97	ASTM D1557
	Optimum Moisture Content (%)	11.44	ASTM D1557
	Specific Gravity	2.65	ASTM D854
Strength	Soaked CBR (%)	20.87	ASTM D1883
	Cohesion resistance (kg/cm^2)	0.85	ASTM D3080
	Friction resistance	39	ASTM D3080

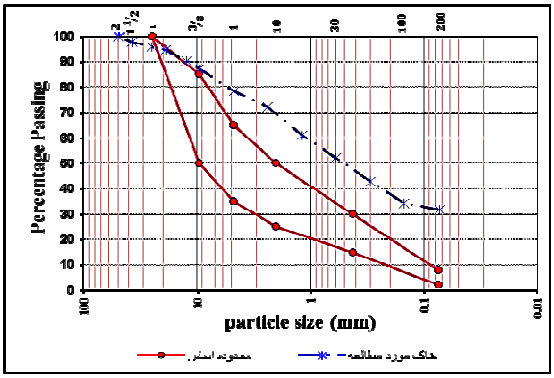
۲-۳- مشخصات مصالح روسازی راه

ویژگی‌های ژئوتکنیک بررسی شدهٔ خاک جهت استفاده در روسازی راه (اساس و زیراساس) مطابق با نشریه‌های راه‌سازی (آیین‌نامه اجرایی۱۰۱ سازمان مدیریت و راه‌سازی کشور ۱۳۹۲، آیین‌نامهٔ روسازی آسفالتی راه‌های ایران ۲۳٤ ، ۱۳۹۰) و مطابق با جدول ۲ و شکل‌های ۳ و ٤، مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است. همانطوری که اشاره گردید، مقایسهٔ مشخصات ژئوتکنیک خاک با مشخصات مصالح روسازی راه در جدول ۲، بیانگر این است که این خاک برای استفاده در روسازی راه نامناسب است و نمودار دانه‌بندی مربوط به آنها در شکل‌های ۳ و ٤ نیز نشان می‌دهد که منحنی دانه‌بندی خاک، با اختلاف زیاد و نداشتن یکنواختی مناسب، خارج از محدودهٔ مجاز دانه‌بندی مصالح ٤ زیراساس و ۵ اساس که نزدیک‌ترین محدوده به خاک مورد مطالعه است، قرار داشته دارد.

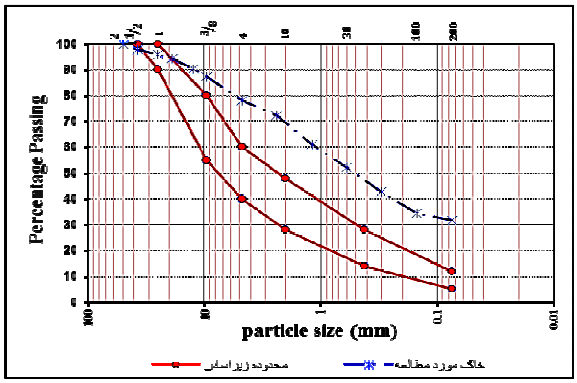
جدول ۲. مشخصات مصالح اساس و زیراساس

(آیین‌نامه اجرایی۱۰۱ سازمان مدیریت و راه‌سازی کشور،۱۳۹۲، و آیین‌نامهٔ روسازی آسفالتی راه‌های ایران ۲۳٤، ۱۳۹۰)

ردیف	آزمایش	مشخصات		شماره استاندارد	
		اساس	زیراساس	AASHTO	ASTM
۱	دانه بندی	شکل ۳	شکل ٤	-	D 422
۲	حد روانی (٪)	حداکثر ٤	حداکثر ٦	T 90	D 4318
۳	شاخص خمیری (٪)	حداکثر ۲۵	حداکثر ۲۵	T 89	D 4318
٤	ارزش ماسه (٪)	حداقل ٤۰	حداقل ۳۰	T 176	D 2419
۵	سایش لس آنجلس (٪)	حداکثر ٤۵	حداکثر ۵۰	T 96	C 131
٦	نسبت باربری کالیفرنیا (٪)	حداقل ۸۰	حداقل ۳۰	T 193	D 1883



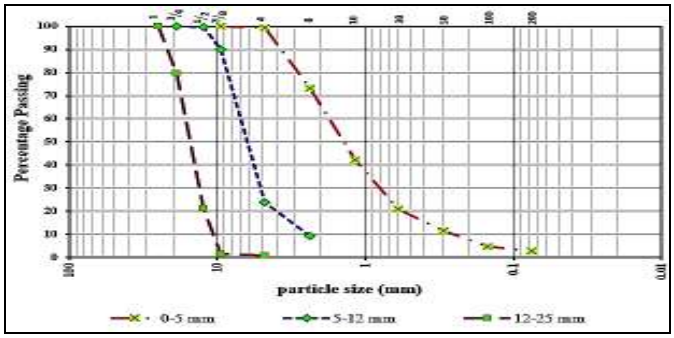
شکل ۳. نمودار دانه‌بندی خاک مورد مطالعه و مقایسه با محدوده اساس راه



شکل ٤. نمودار دانه‌بندی خاک مورد مطالعه و مقایسه با محدوده زیراساس راه

۲-٤- سرباره فولادی و بررسی ویژگی‌های آنها

بهبود و اصلاح خصوصیات ژئوتکنیکی خاک، نیازمند مصالح با کیفیتی است که به فراوانی در دسترس باشد و بتوان با افزودن آنها به خاک، خصوصیات مهندسی خاک را بهبود بخشید. به همین جهت از سرباره‌های سرد فولادی انباشت شده در شرکت فولاد مبارکه استفاده گردید که در اندازه‌های ۰-۵، ۵-۱۲، ۱۲-۱۹ و ۱۲-۲۵ میلی‌متر در حال فرآوری می‌باشد. در این راستا پس از نمونه‌برداری و حمل به آزمایشگاه و آماده‌سازی سرباره‌های فولادی، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آنها مورد بررسی قرار گرفته است. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مصالح سرباره در نمودار شکل ۵ و در جدول شماره ۳ نشان داده شده است.



شکل ۵. نمودار دانه‌بندی مصالح سرباره شرکت فولاد مبارکه

جدول ۳. ویژگی‌های فیزیکی و ترکیب شیمیایی سنگدانه‌های سرباره

ویژگی‌های فیزیکی		ویژگی‌های شیمیایی			
-	حد روانی (٪)	۳۵/۰۹	۳۳/۵۰	۲۹/٤۰	CaO
-	حد خمیری (٪)	۱۰/۷۰	۹/۳۰	۱۳/۱٤	Mgo
بدون خمیری (Non PI)	شاخص خمیری (٪)	۲۷/۰۵	۳۱	۲۷/۰۵	FeO
٦۸	ارزش ماسه (٪)	٤/۰٤	۳/۳۰	۵/٦۹	Al2O3
۱٤	سایش لس آنجلس (٪)	۱/۹۹	۰/٦۰	۲/۷۷	MnO
۳/٦	وزن مخصوص	۱۹/٦۵	۱٦/۱۰	۲۱/٦۹	Si2O
۱	جذب آب (٪)	۰/۷۸	۰/۹۰	۰/۹۰	P2O5
۰/۲	ساندنس (٪)	–	۱/۲۱	–	TiO2

۳- نتایج

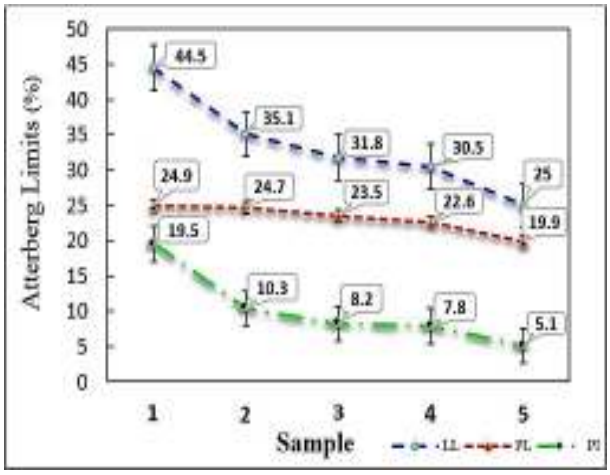
با افزودن درصدهای متفاوت سرباره در اندازه‌های مختلف، به صورت مرحله به مرحله به نمونهٔ اولیه خاک، خصوصیات ژئوتکنیکی مخلوط خاک و سرباره بهبود زیادی پیدا کرد و در نهایت چند ترکیب با ویژگی مناسب روسازی راه به دست آمد که ویژگی‌های ژئوتکنیکی در آنها با یکدیگر مقایسه و ارزیابی شده است.

۳-۱- بهبود حدود آتربرگ خاک با افزودن سرباره

باتوجه به اینکه حدروانی و شاخص خمیری خاک مورد تحقیق، اختلاف زیادی نسبت به حدروانی و شاخص خمیری مصالح راه‌سازی (اساس و زیراساس) دارد و همچنین شاخص خمیری مصالح ریزدانهٔ سرباره صفر است؛ از مصالح ریزدانهٔ عبوری از الک ٤۰ و ۲۰۰ ماسه سرباره (۰-۵ میلی‌متر) برای بهبود حدود آتربرگ خاک استفاده گردیده است. لازم به ذکر است که دراصلاح حدود آتربرگ خاک با ماسه سرباره، از درصد کم ذرات عبوری از الک شماره ۲۰۰ مصالح سرباره‌ای در اندازه ۵-۱۲ و ۱۲-۱۹ میلی‌متر که بعداً جهت اصلاح دانه‌بندی از آنها استفاده می‌شود و قطعاً در بهبود حدود آتربرگ خاک تأثیرگذار خواهد بود، به دلیل افزایش سرعت انجام آزمایشات صرفنظر گردیده است. پس از انجام آزمایش تعیین حدود آتربرگ برروی نمونه‌های متعدد مخلوط خاک و ماسه سرباره، چهار مخلوط با درصدهای مختلف خاک و ماسه سرباره به دست آمده است که نتایج آزمایش تعیین حدروانی و شاخص خمیری آنها در جدول٤ نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نسبت ماسه سرباره به خاک، این دو ویژگی در خاک کاهش یافته؛ به گونه‌ای که الزامات مقدار حدود آتربرگ مصالح روسازی راه برای زیراساس را در نمونه شماره ٤ برآورده کرده است و به احتمال زیاد درصد عبوری از الک شمارهٔ ۲۰۰ برای اندازه‌های دیگر مصالح سربارهٔ مصرفی در اصلاح دانه‌بندی(۵-۱۲ و ۱۲-۱۹ میلی‌متر) می‌تواند شاخص خمیری را تا کمتر از عدد ۵/۱ درصد که مربوط به نمونه شماره ٤ است، برای مصالح اساس کاهش دهد و آن را قابل استفاده به عنوان اساس خواهد کرد. همچنین تغییرات مربوط به حدود آتربرگ با افزایش درصد سرباره را در شکل ٦ می توان مشاهده نمود. همانطوری که در این شکل نشان داده شده است افزایش درصد سرباره در خاک باعث کاهش حدود آتربرگ شده که این تغییرات در نمودار حدروانی بیشتر از حد خمیری بوده و بیانگر این است که تأثیر سرباره در کاهش حدروانی و شاخص خمیری، بیشتر از حد خمیری است. شاید بتوان تأثیر بیشتر ماسه سرباره بر حدروانی نسبت به حد خمیری خاک را به مقدار کم درصد ذرات عبوری از الک شماره ٤۰ و بخصوص شماره ۲۰۰ در ماسه سرباره نسبت به خاک، مربوط دانست که درصد کم این ذرات در بین ذرات خاک، نتوانسته تأثیر قابل توجهی بر حد خمیری خاک داشته باشد و بیشتر بر روانی خاک تأثیرگذار بوده است.

جدول ٤. نتایج آزمایش حدروانی و شاخص خمیری مخلوط خاک و ماسهٔ سرباره

شماره نمونه	مصالح		نسبت سرباره به مخلوط	حد روانی (LL)	حد خمیری (PL)	شاخص خمیری (PI)
	خاک	سرباره (۰-۵ میلی‌متر)				
	گرم	گرم	٪	٪	٪	٪
۱	۱۰۰	۰	۰	٤٤/۵	۲٤/۹٤	۱۹/۵٦
۲	۱۰۰	۵۰	۳۳	۳۵/۱	۲٤/۷۱	۱۰/۳۹
۳	۱۰۰	۷۰	٤۱	۳۱/۸	۲۳/۵٤	۸/۲٦
٤	۱۰۰	۸۳	٤۵	۳۰/۵	۲۲/٦۱	۷/۸۹
۵	۱۰۰	۱۰۰	۵۰	۲۵	۱۹/۹	۵/۱



شکل ٦. نمودار تغییرات حدود آتربرگ با افزایش درصد سرباره در خاک

۳-۲- بهبود دانه‌بندی خاک پس از افزودن سرباره

همانطوری که قبلاً در شکل ۳ و٤ در بند ۲-۳ نشان داده شده است دانه‌بندی خاک علاوه بر اینکه از یکنواختی مناسب برخوردار نمی‌باشد؛ در محدوده مجاز دانه‌بندی مصالح روسازی راه(اساس و زیراساس)، نیز قرار نمی‌گیرد. جهت بهبود و قرار گرفتن منحنی دانه‌بندی در محدودهٔ مجاز مصالح روسازی راه مطابق با نشریه‌های راه‌سازی، دو محدوده ٤ قشر زیراساس و ۵ قشر اساس که نزدیکی نسبی به منحنی دانه‌بندی خاک دارد، انتخاب شده است. مخلوط‌هایی با ترکیب متفاوت از خاک و مصالح سربارهٔ فولاد در اندازه‌های ۵-۰، ۱۲-۵ و ۱۹-۱۲ میلی‌متر در آزمایشگاه تهیه و آماده‌سازی گردید و آزمایش‌های دانه‌بندی برروی آنها انجام گرفته است. پس از ساخت مخلوط‌های مختلف از خاک و مصالح سرباره و انجام آزمایش‌های دانه‌بندی متعدد، ٤ ترکیب از خاک و مصالح سرباره (با رعایت مقدار مورد نیاز ماسه سرباره نسبت به خاک جهت اصلاح حدود آتربرگ) به دست آمد که منحنی دانه‌بندی آنها تا حد زیادی در محدودهٔ مجاز مصالح راه‌سازی قرار گرفته است. همچنین منحنی دانه‌بندی این مخلوط‌ها، علاوه بر قرار گرفتن در محدودهٔ مجاز، از یکنواختی بهتری نسبت به منحنی اولیهٔ خاک، برخوردار است. جهت مقایسهٔ پارامترهای مکانیکی در نمونهٔ اصلی و ٤ مخلوط خاک و سرباره حاصل شده، به‌طور قراردادی نمونه‌ها به صورت زیر و برحسب درصدهایی که در جدول ۵ نشان داده شده است، نامگذاری شده است.

S) نمونهٔ خاک اصلی و فاقد سرباره (۱۰۰ درصد خاک)

A) ٤۰ درصد نمونه خاک اصلی +٦۰ درصد سرباره

B) ۳۵ درصد نمونه خاک اصلی + ٦۵ درصد سرباره

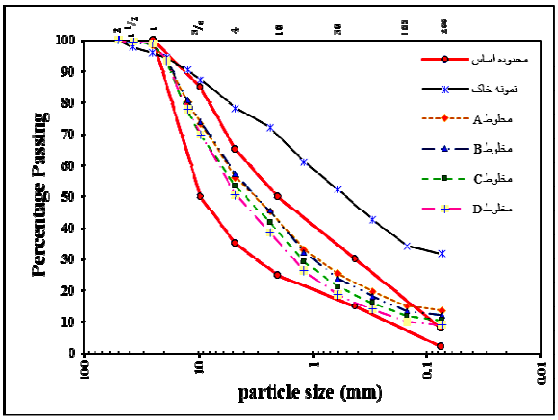
C) ۳۰ درصد نمونه خاک اصلی + ۷۰ درصد سرباره

D) ۲۵ درصد نمونه خاک اصلی + ۷۵ درصد سرباره

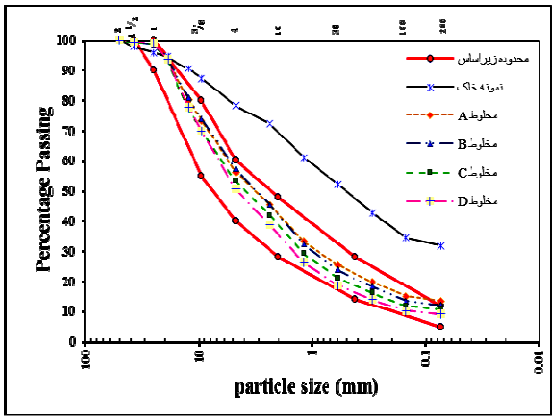
جدول ۵. نامگذاری نمونه‌ها برحسب درصد سرباره

نمونه	خاک	سرباره (٪)		
	(٪)	۵-۰	۱۲-۵	۲۵-۱۲
S	۱۰۰	۰	۰	۰
A	٤۰	۲۰	۲۰	۲۰
B	۳۵	۲۵	۲۰	۲۰
C	۳۰	۲۵	۲۰	۲۵
D	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵

موقعیت منحنی دانه‌بندی ٤ مخلوط به دست آمده (A، B، C و D) در محدوده مجاز مصالح قشر اساس و زیراساس در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. لازم به یادآوری است که طرح اصلاح دانه‌بندی و رسیدن به مخلوط‌های خاک و سرباره (A، B، C و D)، به گونه‌ای انجام شده که در چهار طرح مخلوط، نسبت وزنی ماسه سرباره به خاک در جهت اصلاح حدود آتربرگ مطابق با نمونه‌های ۲، ۳، ٤ و ۵ جدول ٤ بند ۳-۱؛ رعایت شده است.



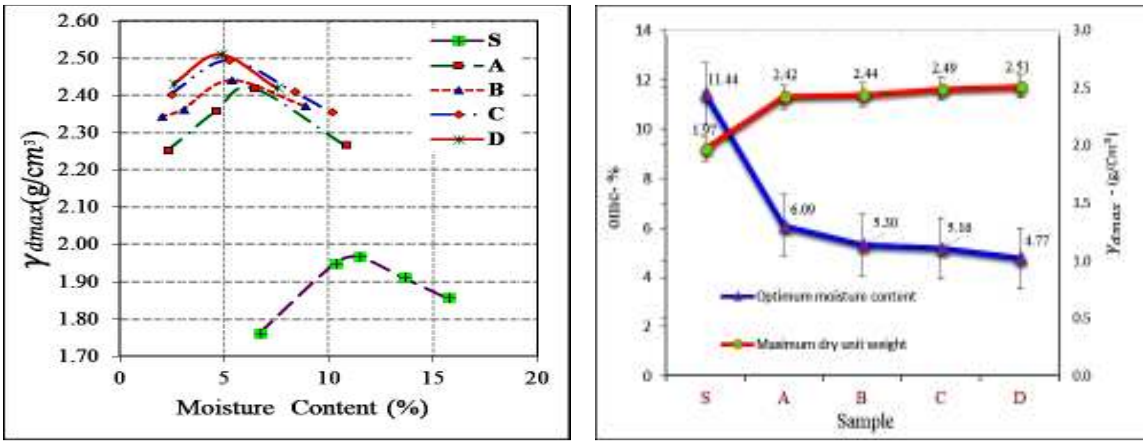
شکل ۷. نمودار دانه‌بندی مخلوط‌های A، B، C و D و مقایسه با محدوده ۵ اساس



شکل ۸. نمودار دانه‌بندی مخلوط‌های A، B، C و D و مقایسه با محدوده ٤ زیراساس

۳-۳- بهبود حداکثر وزن واحد حجم خشک و رطوبت بهینه

از ویژگی‌های مکانیکی دیگری که در نمونهٔ خاک مورد مطالعه (قبل از آزمایش نسبت باربری)، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است، حداکثر وزن واحد حجم خشک و رطوبت بهینه است. از آنجائیکه ویژگی‌های مکانیکی خاک شامل حدود آتربرگ و دانه‌بندی در مراحل قبل مورد اصلاح و بهبودی قرار گرفته و نتایج در قالب چهار مخلوط در دسترس است؛ آزمایش تراکم خاک به روش اصلاح شده برروی نمونهٔ اصلی و چهار نمونهٔ مخلوط بهینه شده، انجام و نتایج به دست آمده در جدول ٦ بند ٤ نشان داده شده است. نتایج حاصل نشان دهندهٔ افزایش قابل توجه وزن واحد حجم خشک و کاهش درصد رطوبت بهینه با افزایش درصد سرباره در نمونهٔ اولیهٔ خاک می‌باشد (شکل ۹) که ناشی از چگالی زیاد و همچنین جذب آب کم ذرات سربارهٔ جایگزین شده با ذرات خاک است.



شکل۹. کاهش رطوبت بهینه و افزایش وزن واحد حجم خشک با افزایش درصد سرباره

۳-٤- بهبود نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)

یکی دیگر از ویژگی‌هایی که باید در خاک مورد تحقیق جهت استفاده به عنوان روسازی راه، مورد اصلاح و بهبودی قرار گیرد، نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) است. این ویژگی نیز در نمونهٔ اولیه خاک و چهار مخلوط به دست آمده در مراحل قبلی، در

حالت اشباع و متراکم شده با ۱۰، ۳۰ و ٦٥ ضربه چکش پروکتور انجام، و مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل از انجام آزمون به صورت نمودار در درصد تراکم مختلف شرح زیر است :

۳-٤-۱- نسبت CBR در ۱۰ ضربه تراکم(شکل ۱۰)

۱- عدد CBR با افزایش درصد سرباره در مخلوط‌های مختلف، تا نمونهٔ C افزایش و بعد از آن در مخلوط D، با کاهش روبرو می‌شود و در مجموع عدد CBR در همهٔ مخلوط‌ها نسبت به نمونهٔ خاک اولیه به دلیل تأثیر افزایش مصالح سرباره، افزایش می‌یابد که این افزایش در مخلوط D، ناچیز است.

۲- شیب نمودار فشاردر برابر جابجایی (نفوذ سنبهٔ فولادی)، با یک ترتیب مشخص در نمونه‌های A، B و C روند افزایشی داشته و پس از آن در نمونهٔ D مقدار آن کاهش می‌یابد.

۳- در این حالت فقط عدد CBR نمونهٔ C، الزامات ظرفیت باربری زیراساس را (طبق جدول ۲) فراهم می‌کند.

۳-٤-۲- نسبت CBR در ۳۰ ضربه تراکم (شکل ۱۱)

۱- عدد CBR مانند نمونه‌های با ۱۰ ضربه تراکم، با افزایش درصد سرباره در مخلوط‌های مختلف، تا نمونهٔ C افزایش و بعد از آن در مخلوط D، با کاهش روبرو می‌شود؛ با این تفاوت که اعداد CBR به دست آمده دارای مقادیر بیشتری نسبت به ۱۰ درصد تراکم است و در نمونه‌های A، B و C به یکدیگر نزدیک شده که این افزایش در مخلوط D، نسبت به ۱۰ ضربه تراکم، چشمگیرتر بوده است.

۲- شیب نمودار فشاردر برابر جابجایی (نفوذ سنبهٔ فولادی)، در نمونه‌های A، B و C روند افزایشی داشته و پس از آن در نمونهٔ D مقدار آن کاهش می‌یابد، ولی این افزایش به گونه‌ای است که نمودارها به یکدیگر نزدیک و تداخل می‌کنند.

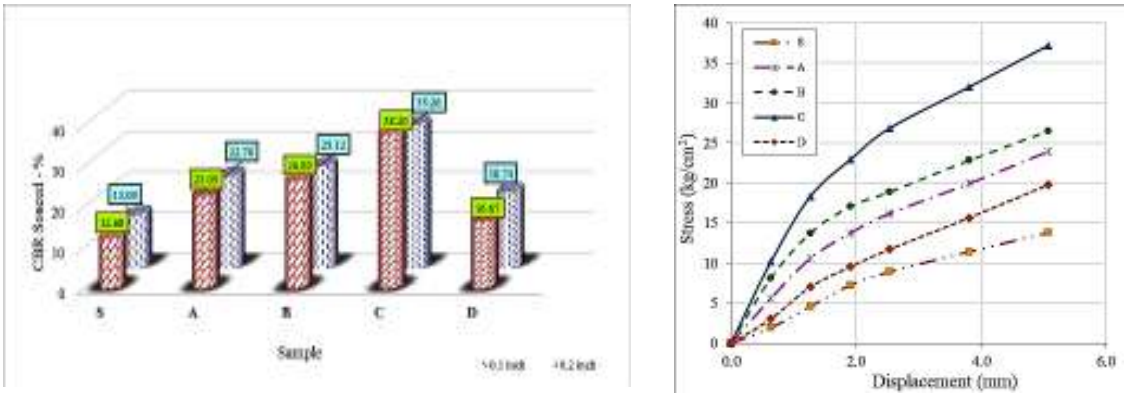
۳- مقدار عدد CBR به دست آمده در ۳۰ ضربه تراکم در مخلوط A، B، الزامات مربوط به ظرفیت باربری مصالح اساس و در سه مخلوط A، B و C الزامات مربوط به ظرفیت باربری اساس را برآورده می‌کند. این در حالی است که ظرفیت باربری مخلوط D، همچنان الزامات مصالح روسازی راه را برآورده نمی‌کند.

۳-٤-۳- نسبت CBR در ٦٥ ضربه تراکم(شکل ۱۲)

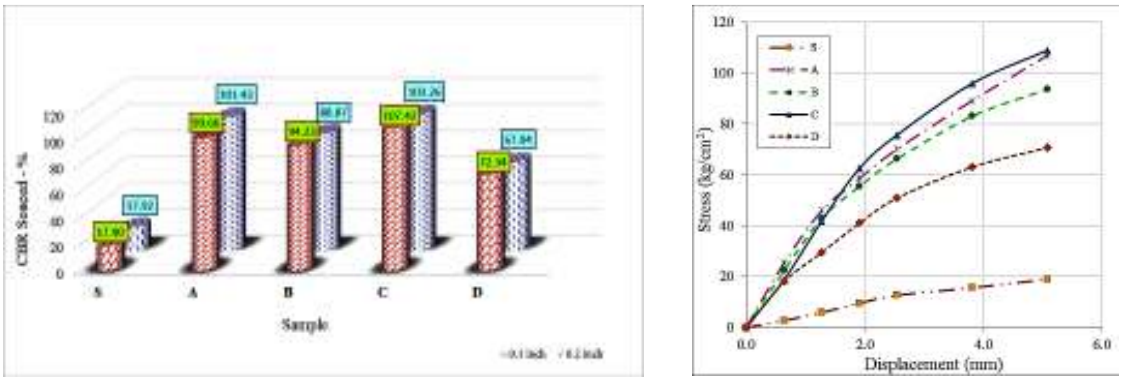
با توجه به ایجاد تراکم زیاد در ٦٥ ضربه، تغییرات عدد CBR در ٦٥ ضربه تراکم با چکش پروکتور فقط در ۰/۱ اینچ نفوذ سنبهٔ فولادی مورد بررسی قرار گرفته است. در این حالت مانند دوحالت قبل، عدد CBR با افزودن سرباره به خاک در همهٔ نمونه‌های مخلوط، افزایش یافته است؛ با این تفاوت که :

۱- عدد CBR برای همهٔ نمونه‌های مخلوط خاک – سرباره به مقدار بسیار زیاد (شیب زیاد نمودار فشار – جابجایی) افزایش یافته است و میزان تغییرات برای همهٔ نمونه‌های مخلوط پس از افزایش قابل ملاحظهٔ عدد CBR نسبت به نمونهٔ اصلی، تقریباً یکسان و نزدیک به هم است.

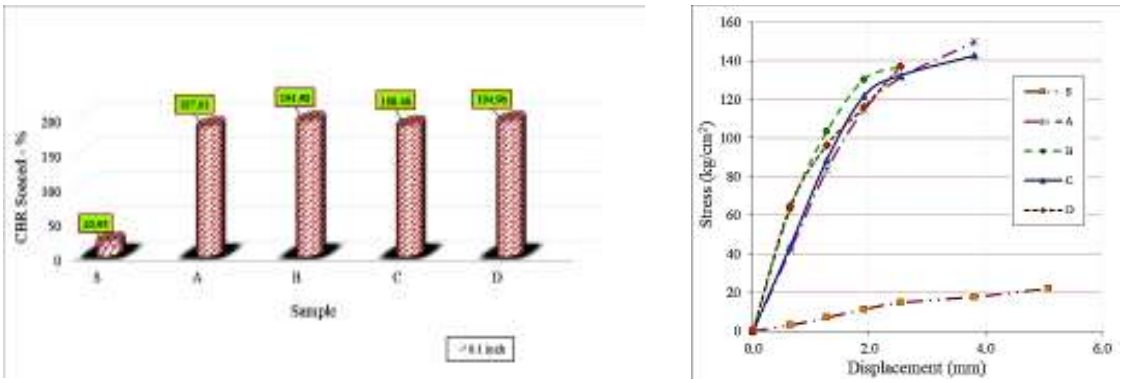
۲- در نمونهٔ D نه تنها مقدار عدد CBR کاهش نیافته، بلکه به عدد CBR نمونه‌های A تا C تقریباً نزدیک شده و به مقدار حداکثر رسیده است.



شکل ۱۰. نمودار فشار- جابجایی و مقایسهٔ نتایج آزمایش CBR در ۱۰ ضربه تراکم



شکل ۱۱. نمودار فشار- جابجایی و مقایسهٔ نتایج آزمایش CBR در ۳۰ ضربه تراکم



شکل ۱۲. نمودار فشار- جابجایی و مقایسهٔ نتایج آزمایش CBR در ٦٥ ضربه تراکم

٤- بررسی تکمیلی خصوصیات ژئوتکنیکی

بـه منظـور بررسـی سـایر ویژگـی‌هـای ژئـوتکنیکی خـاک با افزایش درصد سرباره و مطابق با چهار مخلوط بهینه به دست آمده، آزمایشات تکمیلی برروی این نمونه‌ها انجام شده است تا بتوان با استفاده از نتایج آنها و سایر نتـایج آزمـایش‌هـای قبلـی مرتبط با مصالح راهسازی و روابط آنها، تأثیر افزایش سرباره را بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی دیگر خاک مـورد تحلیـل و ارزیـابی قرار داد. در ادامه کلیهٔ نتایج آزمایش‌هـای انجـام گرفتـه جهـت انجام مقایسهٔ بهتر در جدول ٦ نشان داده شده است.

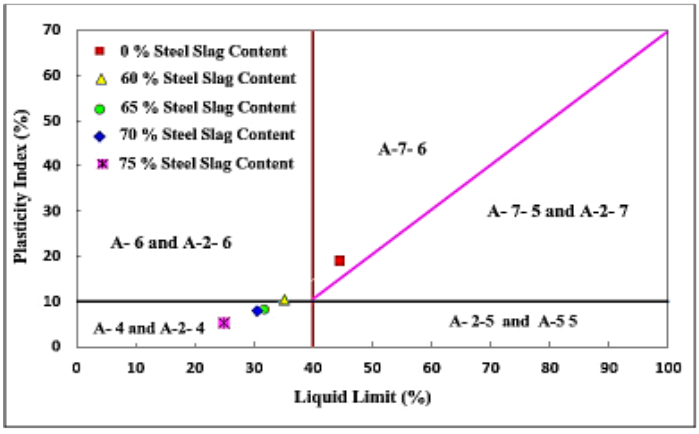
٤-۱- بهبود در طبقه‌بندی خاک

پس از دست‌یابی به ٤ مخلوط مناسب از خاک و سرباره براساس حدود آتربرگ و دانه‌بندی، طبقه‌بندی آنها در سیستم آشتو و یونیفاید (UCSC) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مربوط به طبقه‌بندی که در جدول ٦ و شکل ۱۳ نشان داده شده است، بیانگر بهبود طبقه‌بندی خاک در این نمونه‌ها نسبت به نمونهٔ اولیه خاک است. لازم بذکر است با توجه به شکل ۱۳ حد خمیری زیاد نمونهٔ اولیه خاک (S)، آن را در طبقه‌بندی AASHTO در ردهٔ A-7 (خاک رس دار) قرار می‌دهد؛ ولی با توجه به اینکه این خاک در طبقه‌بندی متحده (UCSC)، در ردهٔ ماسهٔ رس‌دار (SC) قرار گرفته است، در اینجا خاک مورد تحقیق در طبقه‌بندی AASHTO در ردهٔ A-2-7 (ماسهٔ رس‌دار) در نظر گفته شده است. درهر حال صرفنظر از اینکه خاک مورد مطالعه در طبقه‌بندی AASHTO در گروه A-7 یا A-2-7 قرار داشته باشد؛ با اضافه شدن سرباره‌های فولادی، این

خاک جزء خاک‌های گروه A-2 قرار گرفته و برای استفاده در پروژه‌های مهندسی بهبود یافته است. همچنین با توجه به اینکه کیفیت خاک به عنوان مصالح بستر، نسبت معکوس با GI دارد؛ کاهش شاخص گروه در نمونه‌های مخلوط مورد آزمایش مطابق با جدول٦، بیانگر مناسب بودن آنها جهت استفاده در راه‌سازی است.

جدول ٦. نتایج ژئوتکنیک مربوط به نمونهٔ اولیه خاک و چهار مخلوط خاک و سرباره بهینه شده

مشخصه ژئوتکنیک	واحد	نمونه				
		S	A	B	C	D
LL	%	44.5	35.1	31.8	30.5	25
PL	%	24.94	24.71	23.54	22.61	19.9
PI	%	19.56	10.39	8.26	7.89	5.1
Passing (No.10)	%	66.26	41.20	40.91	39.05	35.76
Passing (No.40)	%	48.64	22.1	20.47	18.27	15.85
Passing (No.200)	%	31.74	13.57	12.12	10.54	9.03
GI	-	2	0	0	0	0
AASHTO Classification	-	A-2-7(2)	A-2-6(0)	A-2-4(0)	A-2-4(0)	A-1-a(0)
UCSC Classification	-	SC	GC	GC	GP - GC	GC - GM
γ_{dmax}	g/cm^3	1.97	2.42	2.44	2.49	2.51
OMC	%	11.44	6.09	5.30	5.16	4.77
Specific Gravity (Gs)	-	2.65	3.04	3.07	3.11	3.14
Void ratio (e)	-	0.35	0.26	0.26	0.25	0.25
Porosity (n)	%	25.66	20.39	20.59	19.81	20.00
CBR Soaked -10 (0.1 inch)	%	12.68	23.05	26.89	38.20	16.67
CBR Soaked -10 (0.2 inch)	%	13.09	22.70	25.12	35.26	18.74
CBR Soaked -30 (0.1 inch)	%	17.90	99.66	94.23	107.42	72.34
CBR Soaked -30 (0.2 inch)	%	17.92	101.43	88.87	103.26	67.04
CBR Soaked -60 (0.1 inch)	%	20.95	187.01	194.98	188.46	194.96
Expansion (65 impact)	%	0.558	0.043	0.034	0.026	0.026
Cohesion (C)	Kg/cm^2	0.85	0.8	0.75	0.77	0.9
Friction ($\emptyset$)	degree	39	47	49	51	53



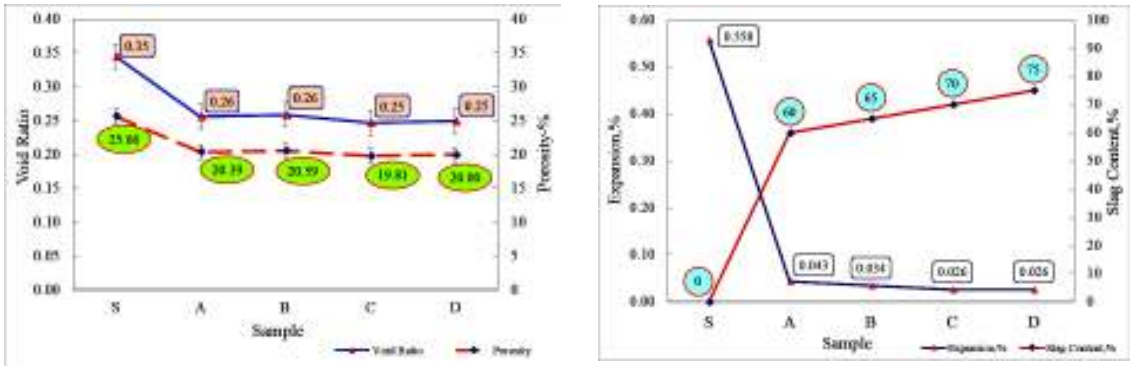
شکل ۱۳. مقایسهٔ طبقه‌بندی AASHTO نمونهٔ خاک و مخلوط‌های خاک – سرباره

٤-۲- ویژگی فضای خالی خاک و مخلوط خاک و سرباره

با تعیین حداکثر وزن واحد حجم خشک خاک و مخلوط سرباره و ویژگی‌های دیگر خاک همچون وزن مخصوص خاک و مخلوط خاک و سرباره، نسبت منافذ و میزان تخلخل نیز تعیین گردید که نتایج مربوطه در جدول ٦، نشان داده شده است. همانطوری که در جدول ٦ و شکل١٤(شکل چپ) نشان داده شده است، افزایش درصد سرباره در نمونه‌های مخلوط خاک و سرباره، باعث کاهش مقدار نسبت منافذ و تخلخل شده است که تغییرات آن در همهٔ نمونه‌های مخلوط ناچیز است.

٤-۳- درصد تورم در آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)

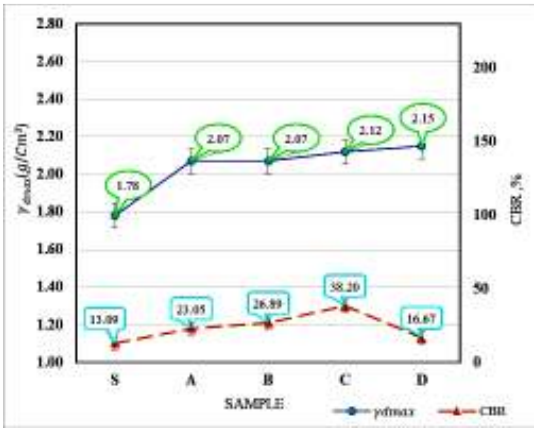
کاهش درصد تورم ناشی از جذب آب بعد از ۹٦ ساعت در آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا(CBR) در حالت اشباع، برای نمونه اولیه خاک (S) و مخلوط خاک – سرباره (A، B، C، D) مطابق با جدول ٦ و نمودار شکل ١٤ مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است که در این نمودار، کاهش قابل ملاحظهٔ تورم، با افزایش درصد سرباره در خاک مورد مطالعه، نشان داده شده است که می‌توان آن را به افزایش مقدار مصالح سرباره با خاصیت غیر تورمی در خاک مربوط دانست.



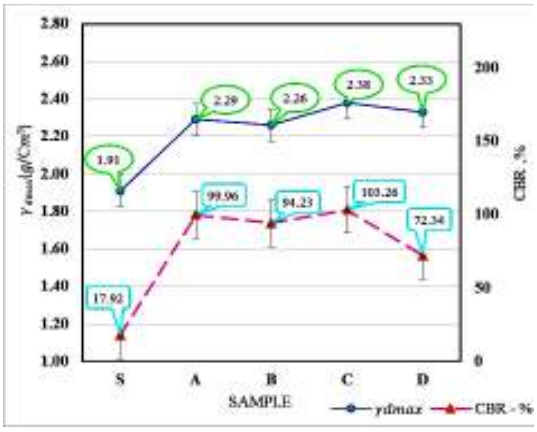
شکل١٤. تأثیر افزایش سرباره بر کاهش مقدار نسبت منافذ و تخلخل خاک (شکل چپ) و کاهش درصد تورم در آزمایش CBR (شکل راست)

٤-٤- بررسی حداکثر وزن واحد حجم خشک و CBR

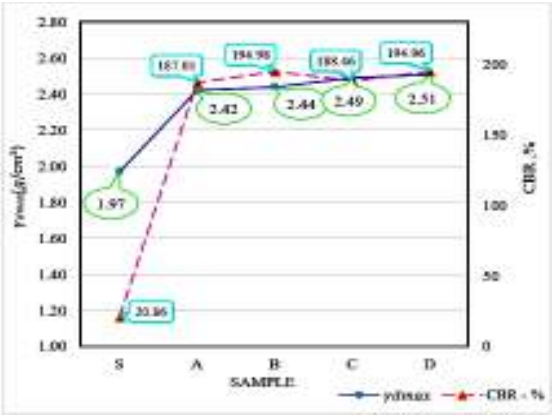
تغییرات عدد CBR اشباع در برابر وزن واحد حجم خشک در ۱۰، ۳۰ و ٦٥ ضربهٔ تراکم چکش پروکتور برای نمونه‌های خاک و مخلوط خاک – سرباره (طرح A، B، C، D)، در جدول ٦ و در شکل‌های ١٥، ١٦ و ١٧نشان داده شده است. همانطور که در این شکل‌ها دیده می‌شود به طور کلی با افزایش درصد سرباره در مخلوط‌های مختلف، عدد CBR و همچنین وزن واحد حجم خشک افزایش می‌یابد. منحنی این دو ویژگی یعنی عدد CBR و حداکثر وزن واحد حجم خشک در ۱۰ ضربه تراکم با چکش پروکتور با یکدیگر فاصله داشته، ولی در ۳۰ ضربه تراکم به یکدیگر نزدیک شده و در ٦٥ ضربه تراکم، تقریباً با یکدیگر منطبق می‌شوند که نشان می‌دهد افزایش انرژی تراکم برای مخلوط‌های خاک و سرباره، حداکثر وزن واحد حجم خشک و حداکثر ظرفیت باربری در همهٔ مخلوط‌های خاک و سرباره را ایجاد کرده است.



شکل ۱۵. رابطهٔ درصد CBR اشباع و حداکثر وزن واحد حجم خشک در ۱۰ ضربه تراکم



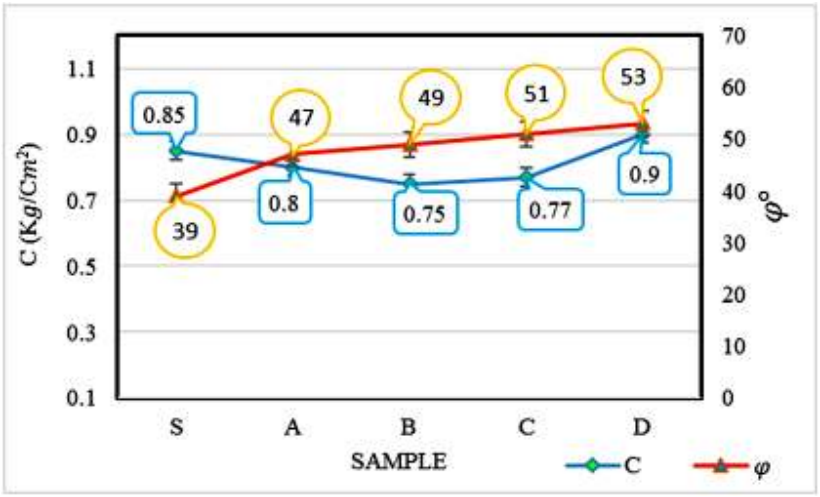
شکل ۱٦. رابطهٔ درصد CBR اشباع و حداکثر وزن واحد حجم خشک در ۳۰ ضربه تراکم



شکل ۱۷. رابطهٔ درصد CBR اشباع و حداکثر وزن واحد حجم خشک در ٦۵ ضربه تراکم

٤-۵-اصلاح و بهبود خصوصیات مقاومت برشی خاک

نتایج آزمایش برش مستقیم اشباع بر روی نمونه‌های ریمولدشده در قالب ۱۲×۳۰×۳۰ سانتیمتر از خاک (S) و مخلوط خاک و سرباره‌های فولادی، در جدول ٦ و نمودار شکل ۱۸ نشان داده شده است. با توجه به این نمودار، می‌توان تأثیر سرباره‌های فولادی را بر افزایش مقاومت اصطکاکی به وضوح مشاهده کرد که پس از یک افزایش قابل توجه در نمونهٔ خاک (S) و نمونهٔ مخلوط A، این تغییرات به صورت تدریجی و با شیب یکنواخت و تغییرات جزئی، تا نمونهٔ مخلوط D افزایش یافته است. در مجموع، تغییرات عددی مربوط به مقاومت اصطکاکی (φ) بین مخلوط D و A، ٦ درجه و نسبت به نمونهٔ خاک مورد مطالعه(S)، ١٤ درجه می‌باشد. این در حالی است که مقاومت چسبندگی (C)، ابتدا در مخلوط‌های A و B نسبت به نمونهٔ خاک(S)، کاهش یافته و سپس در نمونه‌های مخلوط C و D افزایش یافته؛ به گونه‌ای که در نمونهٔ D، مقدار مقاومت چسبندگی (C) ایجاد شده به مقدار مقاومت چسبندگی نمونهٔ اولیه خاک (S) نزدیک شده است. کاهش میزان چسبندگی از نمونهٔ مخلوط A تا D را می‌توان به ماهیت ذرات ریزدانه سرباره مربوط دانست؛ ولی افزایش آن در نمونهٔ D نسبت به نمونه اولیه خاک را شاید بتوان به تأثیر افزایش نسبت سرباره به خاک مرتبط دانست که برروی مقاومت چسبندگی تأثیر گذاشته است. همچنین افزایش مقاومت اصطکاکی در خاک با افزایش درصد سرباره را می‌توان ناشی از افزایش درصد سرباره‌های درشت‌دانه و ویژگی‌های فیزیکی و شکل زاویه‌دار آنها دانست.



شکل ۱۸. تغییرات مقاومت برشی خاک در نمونه خاک و مخلوط خاک و سرباره

۵- نتیجه‌گیری

۱. بررسی‌های محلی منبع قرضهٔ خاک و مطالعات ژئوتکنیک در شرکت فولاد مبارکه (محدودهٔ فولاد سبا)، بیانگر تنوع آبرفت در منطقه بوده که با توجه به موقعیت محدودهٔ فولاد سبا، اغلب آبرفت موجود در این محدوده، از نوع نهشته‌های ریزدانهٔ زاینده‌رود می‌باشد و باعث انباشت حجم گسترده‌ای از خاک (طی خاکبرداری و توسعهٔ شرکت فولاد) با ویژگی‌های متفاوت در سطح وسیع از زمین‌های بخش سبا شده است.

۲. بررسی‌های آزمایشگاهی اولیه خاک نشان می‌دهد دانه‌بندی، حدود آتربرگ، ظرفیت باربری کالیفرنیا (CBR) خاک مورد پژوهش با مشخصات مصالح روسازی راه (اساس و زیراساس) مطابقت ندارد. همچنین منحنی دانه‌بندی خاک مورد مطالعه نشان دهنده این است که این خاک از یکنواختی دانه‌بندی و توزیع مناسب ذرات نیز برخوردار نیست.

۳. شاخص خمیری و حدروانی خاک، با افزودن ماسهٔ سرباره به خاک کاهش می‌یابد و بیشترین تأثیر افزودن ماسهٔ سرباره، بر حدروانی خاک است؛ درحالی که حد خمیری خاک، کمتر تحت تأثیر قرار گرفته است و علت آن را شاید بتوان به مقدار کم درصد ذرات عبوری از الک شمارهٔ ٤۰ و ۲۰۰ در ماسهٔ سرباره نسبت به خاک، مربوط دانست.

٤. طبقه‌بندی خاک مورد تحقیق، با افزودن سرباره مطابق با مخلوط‌های A، B، C و D بهبود چشمگیری یافت؛ به گونه‌ای که این خاک در طبقه‌بندی AASHTO که در گروه A-2-7 قرار داشت، با افزودن سرباره‌های فولادی، در گروه A-2-4 قرار گرفت. همچنین نمونه اولیه خاک که در طبقه‌بندی متحده در گروه SC قرار داشت که با افزودن سرباره مطابق با طرح‌های مذکور، در گروه GC قرار گرفت.

۵. مقدار وزن واحد حجم خشک خاک با افزایش مقدار سرباره در چهار طرح مخلوط خاک و سرباره، به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد؛ در حالیکه مقدار رطوبت بهینه با افزایش مقدار سرباره در چهار طرح مخلوط ذکر شده، کاهش زیادی را نشان می‌دهد که ناشی از چگالی زیاد و همچنین جذب آب کم ذرات سربارهٔ جایگزین شده با ذرات خاک است. از طرفی با توجه به اهمیت صرفه‌جویی در مصرف آب، کاهش رطوبت بهینه، مقدار آب را جهت کسب حداکثر تراکم در محل پروژه، تاحد زیادی کاهش می‌دهد.

٦. نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) در حالت اشباع، با افزایش درصد سرباره مطابق با چهار مخلوط به دست آمده، افزایش یافت و این افزایش به گونه‌ای است که در ۱۰ و ۳۰ ضربهٔ تراکم با چکش پروکتور، عدد CBR تا طرح C افزایش و سپس در طرح D کاهش می‌یابد؛ این در حالی که در ٦۵ ضربهٔ تراکم، روند افزایش عدد CBR برای چهار طرح مخلوط با افزایش زیاد و تقریباً یکسان همراه است. این نتایج بیانگر این است که طرح D به دلیل داشتن بیشترین درصد سرباره و متراکم نشدن آنها در انرژی تراکم کم (۱۰ و ۳۰ ضربه)، نیازمند

انرژی تراکم زیاد است تا حداکثر ظرفیت باربری در آن ایجاد شود و از طرفی در ٦٥ ضربه تراکم، برای همه نمونه‌های مخلوط، حداکثر تراکم ایجاد شده است که این امر باعث شده که عدد CBR در هر چهار مخلوط، بسیار زیاد و نزدیک به یکدیگر به دست آید و الزامات مربوط به مصالح روسازی راه را برآورده کند. لازم به ذکر است مطابق با نشریه‌های راه‌سازی، فقط برای نمونهٔ C در ۱۰ ضربه و برای همهٔ مخلوط‌ها غیر از مخلوط D، در ۳۰ ضربه، عدد CBR به دست آمده در محدودهٔ مجاز مصالح زیراساس (بیشتر از ۳۰ درصد) قرار می‌گیرد و این عدد برای همهٔ نمونه‌های مخلوط غیر از مخلوط D، در ۳۰ ضربه تراکم، در محدودهٔ مجاز مصالح اساس (بیشتر از ۸۰ درصد) قرار می‌گیرد.

۷. مقدار نسبت منافذ، تخلخل و میزان تورم به دست آمده در آزمایش CBR، نسبت به نمونه اولیهٔ خاک کاهش می‌یابد ولی مقدار آن در چهار مخلوط به دست آمده با توجه به افزایش مقدار سرباره، دارای اختلاف زیادی نیست که شاید علت آن را می‌توان به اختلاف کم حداکثر وزن واحد حجم خشک بین چهار مخلوط و همچنین نزدیک بودن عدد CBR در ٦٥ ضربه، برای همهٔ نمونه‌های مخلوط مربوط دانست.

۸. مقاومت اصطکاکی خاک با افزایش درصد سرباره فولادی به خاک مورد تحقیق، همواره روند صعودی داشته؛ در حالی که مقاومت چسبندگی ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد و در مجموع میزان تأثیر این پارامتر، چشمگیرنبوده است. علت افزایش مقاومت اصطکاکی را می‌توان به مقاومت زیاد و تیزگوشه بودن ذرات سربارهٔ فولادی مربوط دانست و تغییرات کاهش مقاومت چسبندگی در سه مخلوط A، B و C نسبت به نمونه اولیه خاک مربوط به ماهیت مصالح ریزدانه سرباره است، ولی افزایش آن را شاید بتوان گفت ناشی از افزایش نسبت سرباره به خاک است.

۹. نتایج آزمون بیانگر این است که از میان چهار طرح آمیختهٔ خاک و سرباره می‌توان طرح C و D و بویژه طرح C را چنانچه ذرات عبوری از الک‌های شمارهٔ ٤۰ و ۲۰۰ مصالح ٥-۱۲ و ۱۲-۱۹ میلی‌مترسرباره نیز در محاسبات و آزمایشات در نظر گرفته شود، به عنوان مصالح روسازی راه بخصوص زیراساس انتخاب کرد. چراکه ارزیابی ما از نتایج این پژوهش نشان داد مخلوط C نسبت به سه مخلوط دیگر، از کیفیت ژئوتکنیکی بالاتری برخوردار است.

٦- مراجع

-چرخیاری، ف.، عبدی، م.، (۱۳۸۸)، "بررسی استفاده از سرباره فولادسازی جهت افزایش مقاومت خاک‌های ریزدانه" هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز.

-رحمانی، ا.، افشاری، م.، آقایی آرایی، ع.، عطارچیان، ن.، (۱۳۹۹)، "بررسی اثر انرژی تراکم، دانه‌بندی و نوع سربارهٔ فولادی بر مشخصات تراکمی و نسبت باربری کالیفرنیا CBR"، فصلنامه علمی پژوهشنامه حمل و نقل، سال هفدهم، دوره دوم، شماره ٦۳.

-شرکت مهندسین مشاور میهن خاک، (۱۳۹۱)، "مطالعات ژئوتکنیک محل احداث دریاچهٔ سایت فولاد سبا".

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

-مرکز تحقیقات و آموزش وزارت راه و ترابری، (۱۳۹۰)، "آیین‌نامهٔ روسازی آسفالتی راه‌های ایران"، نشریه ۲۳٤، تجدیدنظر اول، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.

-معاونت امور فنی، دفتر تدوین ضوابط معیارهای فنی، (۱۳۹۲)، "مشخصات فنی عمومی راه"، نشریه ۱۰۱، تجدید نظر دوم، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور.

-AASHTO, M. 145-91, (2021), “Classification of Soil and soil–aggregate mixtures for highway construction purposes”.

-Akinwumi I., (2014), "Soil modification by the application of steel slag", Periodica Polytechnica Civil Engineering, 58(4), pp.371-377.

-ASTM D1557-12, (2021), “Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort”, (56,000 ft-lbf/ft3 (2,700 kN-m/m3)).

-Gonawala R. J., Kumar R., Chauhan K. A., (2019), "Stabilization of expensive soil with corex slag and ime for road subgrade", Springer Nature Switzerland AG, pp.1-14.
-Kandhal PS, Hoffman GL., (1997), "Evaluation of steel slag fine aggregate in hot-mix asphalt mixtures", TranspResRec1997,1583, pp.28–36.
-Liu Chunlin, Zha Kunpeng, Chen Depeng. Possibility of concrete prepared with M. Jelcic steel slag as fine and coarse aggregates, A Preliminary Study - International Conference on Advances in Engineering (ICAE 2011).
-Maghool, F., Arulrajah, A., Suksiripattanapong, C., Horpibulsuk, S., Mohajerani, A., (2019), "Geotechnical properties of steel slag aggregates: Shear strength and stiffness".
used as aggregate in asphalt mixture. Journal of Hazardous Materials. 138(2), pp.261-268.
-Wang George, Wang Yuhong, Gao Zhili, (2010), "Use of steel slag as a expansion prediction and usability criteria", J Hazard Mater, 184, pp.555–60.
-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.
-ASTM D1883-16, (2016), "Standard test method for CBR of laboratory-compacted soils".
-ASTM D2487-17e, (2017), "Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)".
-ASTM D3080/D3080M- 11, 2011, "Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions".
-ASTM D422- 63(2007)e2, "Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils".
-ASTM D4318-17e1, (2017), "Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity".
-ASTM D854-14, (2014), "Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer".
-Bilgen G., Kavak A., (2016), "Reuse of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) in lime stabilized embankment materials", IACSIT Internat, IACSIT International Journal of Engineering and Technology, Vol. 8, No. 1, February.

Remediation of Fine Soils with Steel Slag for Road Construction in Mobarekeh Steel Complex

Ruhollah Salehi, M.Sc., Grad., Department of Geology, University of Isfahan, Isfahan, Iran.

Rassoul Ajalloeian, Professor, Department of Geology, University of Isfahan, Isfahan, Iran.

E-mail: ro.salehi@msc.ir

Received: September 2022- Accepted: February 2023

ABSTRACT

Improvement the physical properties of soil using industrial waste has always been of interest to researchers and Its importance increases when that the accumulation of a huge volume of borrowed soil resulting from the development of construction projects due to inappropriate engineering properties for reuse in construction projects; be risky. On the other hand, due to the fact that Iran is one of the hubs of steel production and every year, a huge amount of slag from steel production furnaces is being produced and accumulated It is necessary for optimal recycling of these wastes conduct comprehensive research in various fields of science and industry. One of the goals for the optimal use of these wastes their use in soil improvement is for use in road construction. The current research is based on the improvement of the fine-grained soil accumulated in Steel Mobarakeh region using processed steel slag in the size of 0 to 25 mm, for use in road construction. The characteristics of soil engineering available in Mobarakeh Steel Factory (Saba region), including liquid limit and plasticity index, granulation and classification, after sampling from different parts and preparing and conducting tests in the laboratory, were initially investigated that according to the requirements of road construction publications, the soil was found to be unsuitable. Finally, by conducting tests step by step, modifying the soil engineering characteristics by using different percentages of steel slag to arrive at a suitable mixture for use in road construction and comparing geotechnical characteristics including the California bearing ratio (CBR) and shear strength of the researched soil and slag mixture samples.

Keywords: Soil Improvement, Steel Slag, Road Construction, California Bearing Ratio (CBR), Shear Strength