



استفاده از سرباره فولاد مخلوط با خاکستر جهت تثبیت لایه زیراساس جاده

سعید هاشمی طباطبایی^۱، عطا آقایی آرای^{۲*}، بهاره کاتبی^۳، امیرسعید سلامت^۴

۱. دانشیار، زمین‌شناسی مهندسی، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران

۲. دانشیار، خاک و پی، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران

۳. کارشناس، خاک و پی، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران

۴. کارشناس، زمین‌شناسی، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران

* تهران، ۱۶۹۶-۱۳۱۴۵، aghaeiaraei@bhrc.ac.ir

چکیده

استفاده از سرباره‌های فولادی در پروژه‌های عمرانی همانند پروژه‌های پایدارسازی لایه‌های راه به علت به‌کارگیری حجم زیادی از این مصالح سودمند است. در این مقاله خصوصیات مهندسی سرباره فولاد کوره قوس الکتریک (EAF) و امکان‌سنجی استفاده از آن، به عنوان لایه زیراساس راه بررسی می‌شود. به منظور شناخت ویژگی‌های رفتاری نمونه‌های آزمایشی خاک و سرباره، برنامه مدون آزمایشی، شامل: آزمایش ارزش ماسه‌ای، سایش لوس آنجلس، CBR و درصد افت وزنی با سولفات سدیم، وزن مخصوص ویژه، دانسیته حداقل و حداکثر، برش مستقیم بزرگ مقیاس، مقاومت فشاری و تورم در نظر گرفته شد. همچنین، اثر افزودن ۲، ۷، ۱۲ و ۲۰ درصد خاکستر بادی به سرباره فولادی به عنوان جایگزین آهک مورد بررسی قرار گرفت. در ضمن، بررسی اثر زمان‌های عمل‌آوری با انجام دادن آزمایش‌های CBR، مقاومت فشاری و اندازه‌گیری تورم به منظور شناخت ویژگی‌های مقاومتی نمونه‌های خاک، سرباره فولاد و مخلوط با درصد‌های مختلف خاکستر بادی، انجام گرفته است. مقادیر CBR و زاویه اصطکاک داخلی سرباره بیشتر از خاک طبیعی و پتانسیل تورمی کمتر از خاک طبیعی است. همچنین، سرباره تنها حدود مجاز مشخصات تعیین شده برای مصالح زیراساس طبق نشریه ۲۳۴ را از نظر نشانه خمیری، حدروانی، ارزش ماسه‌ای، درصد سایش و درصد افت وزنی با سولفات سدیم داراست. مقاومت نمونه‌های اشباع افت ۵۰ درصدی را نسبت به نمونه‌های خشک نشان می‌دهد. بررسی و تحلیل نتایج، برتری خصوصیات مهندسی سرباره خالص نسبت به خاک و نیز، مخلوط سرباره با درصد‌های مختلف خاکستر را تأیید می‌نماید.

کلید واژگان

سرباره فولادی، EAF، خاکستر بادی، لایه زیراساس

Use of Steel Slag Mixed by Fly Ash as Stabilization of Road Subgrade

S. Hashemi Tabatabaei¹, A. Aghaei Araei^{2*}, B. Katebi³, A.S. Salamat⁴

1. Associate Professor, Applied Geology, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran

*2. Associate Professor, Soil and Foundation, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran

3. Expert, Soil and Foundation, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran

4. Expert, Geology, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran

* P.O. Box: 13145-1696, Tehran, Iran, E-mail: aghaeiaraei@bhrc.ac.ir

Abstract

The use of steel slag in civil projects, such as road layers stabilization projects, is beneficial for the use of large volumes of these materials. This paper presents the geotechnical engineering properties of steel slag generated from Electrical-Arc-Furnaces (EAF) and its potential usage in subgrade layer of roads is assessed as well. Samples of soil and EAF slag were characterized through a series of laboratory tests, including: sand equivalent value, Los Angeles abrasion, soundness of aggregates using sodium sulphate, specific gravity, compaction, maximum and minimum density, large-scale direct shear, CBR and swelling tests. Various mixtures of EAF steel slag and fly ash, 2, 7, 12 and 20% (by weight), as alternative for lime, were also investigated. CBR and unconfined compression tests were performed after various curing times to evaluate the strength gain characteristics of the mixtures. Long-term swelling tests were also performed on the soil, EAF and mixture of EAF slag with fly ash samples. The values of CBR and internal friction angle of slag are higher than that of the natural soil, but the swelling potential of natural soil is higher than that of the slag. Moreover, the slag has the permissible limit according to the Iranian highway asphalt paving (Code 234) for PI, LL, sand value, Los Angeles abrasion and soundness. About 50% decrease in strength is observed for saturated sample compared to dry ones. The results indicate that the EAF slag had better engineering properties compared to the soil and the mixtures of EAF slag with different percentages of fly ash.

Keywords

Steel Slag, Electrical-Arc-Furnaces (EAF), Fly Ash, Subgrade Layer

۱- مقدمه

فولاد پرمصرف‌ترین آلیاژ صنعتی است و مصرف آن پیوسته در حال افزایش است. سرباره فولادی از محصولات فرعی فرآیند متالورژیکی ساخت فولاد می‌باشد. در حال حاضر، سرباره‌های فولادی تولید شده در کارخانه‌های فولادسازی ابتدا ذخیره و سپس در محل مخصوص دفن سرباره، انباشت می‌شوند. نظر به این که روش‌های متداول انباشت و دفن این مصالح مناسب نیست، وجود سرباره‌های فولادی در دهه‌های اخیر یک معضل جدی برای کارخانه‌های تولید فولاد و نیز سازمان‌های فعال در زمینه محیط زیست بوده است.

استفاده از سرباره‌های فولادی در پروژه‌های عمرانی، مانند: احداث خاکریز بزرگراه‌ها و یا در پروژه‌های پایدارسازی لایه‌های راه به علت به‌کارگیری حجم زیادی از این مصالح بسیار سودمند است. به‌کارگیری مستمر سرباره‌های فولادی در پروژه‌های عمرانی علاوه بر این که باعث کاهش دورریزی آن‌ها می‌شود، با کاهش هزینه‌ها و حذف مشکلات زیست محیطی شامل تخریب منابع طبیعی می‌تواند جایگزین مناسبی برای مصالح سنتی باشد. روسازی به‌طور معمول شامل لایه‌های زیراساس، اساس و روکش آسفالتی یا بتنی و یا ترکیبی از آنهاست. هر یک از لایه‌ها دارای مشخصات فنی و ضخامت معینی است. ضخامت و کیفیت مصالح لایه‌های روسازی، به نوع و درجه‌بندی راه، مقاومت خاک بستر، میزان ترافیک، شرایط جوی، نوع مصالح قابل دسترسی و عوامل اقتصادی بستگی دارد.

Tuncan و Pamukcu [۱] خواص دانه‌های سرباره فولادی مخلوط شده با سیمان را به منظور کاربرد در لایه‌های زیراساس و اساس مورد بررسی قرار دادند. نتایج به‌دست آمده حاکی از مقاومت قابل ملاحظه مخلوط سرباره فولاد با سیمان نسبت به دانه‌های طبیعی سیمانی شده می‌باشد.

Ahmedzade و Sengoz [۲] کاربرد سرباره فولادی به عنوان مصالح سنگدانه‌ای در مخلوط آسفالتی را بررسی نمودند. نتایج مطالعات حاکی از ویژگی‌های مهندسی قابل قبول سرباره‌ها (پایداری مارشال، ساییدگی کم و ...) در راهسازی است.

Ebrahim و Behiry [۳] مطالعات عددی را به منظور ارزیابی امکان استفاده از مخلوط سرباره فولاد و آهک در لایه زیراساس انجام دادند. بر اساس نتایج به‌دست آمده درصد بهینه مخلوط سرباره فولاد با آهک به ترتیب ۷۰ و ۳۰ است. همچنین، مطالعات اخیر نشان‌دهنده کاهش کرنش قائم بر اثر افزودن سرباره به دانه‌های آهک است.

Akinwumi [۴] اثر افزودن سرباره را به خاک با درصد‌های مختلف ۵، ۸ و ۱۰، به منظور احداث لایه اساس راه مورد مطالعه قرار داد. در این مطالعه، آزمایش CBR در دو حالت خشک و اشباع، مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، مقادیر CBR در حالت اشباع نه تنها کمتر از حالت خشک است، بلکه درصد کاهش مقادیر CBR غرقاب نسبت به حالت خشک برای درصد‌های مختلف ۵، ۸ و ۱۰ سرباره به ترتیب برابر با ۵۸، ۶۶ و ۵۶ درصد بوده است. همچنین، مطالعات مشابهی در خصوص بررسی اثر افزودن سرباره به خاک با مقادیر ۱۰ تا ۵۰ درصد بر مقادیر CBR در حالت خشک و اشباع توسط Biradar و همکاران [۵] انجام شد. بر اساس نتایج حاصل، مقادیر CBR در حالت اشباع کمتر از حالت خشک است. همچنین، درصد کاهش مقادیر CBR غرقاب نسبت به حالت خشک برای مخلوط ۱۰ و ۵۰ درصد سرباره با خاک به ترتیب برابر با ۲۸ و ۴۷ درصد است.

Rohde و همکاران [۶] سرباره فولادی EAF هوازده را به منظور استفاده در لایه اساس در جاده‌های با حجم ترافیک کم، مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاکی از ضریب ارتجاعی بالای سرباره EAF نسبت به مصالح درشت دانه طبیعی است، به‌طوری‌که هزینه استفاده از سرباره به عنوان مصالح اساس در جاده‌های کم ترافیک به‌طور قابل ملاحظه‌ای کمتر است.

تحقیقات Luckman و همکاران [۷] نشان‌دهنده عملکرد مناسب سرباره قوس الکتریک (EAF) به دلیل وجود اکسید آهن فراوان و تبلور کامل، در ساخت محل دفن زباله و راهسازی است.

بر اساس تحقیقات Kamon و همکاران [۸]، عمل‌آوری سرباره فولادی EAF با کائولینیت و نمک‌های آلومینیوم کربناته، منجر به افزایش مقاومت سرباره می‌شود. لذا استفاده از این سرباره، در لایه زیراساس توصیه می‌گردد. Rouabah و همکاران [۹] مزایای استفاده از مخلوط سرباره فولاد و خاکستر نوع C و مخلوط سرباره فولاد و سرباره کوره ذوب را به عنوان جایگزین مناسب به‌جای آهک مورد بررسی قرار دادند. در نهایت، مخلوط خاک با ۷٪ سرباره و ۳٪ خاکستر مناسب‌ترین و اقتصادی‌ترین مصالح برای لایه زیراساس معرفی شد و بر اساس معیارهای فنی، اقتصادی و بوم‌شناسی، استفاده از این مصالح در احداث راه توصیه گردید.

Prezzi و Yildirim [۱۰] به منظور پایدارسازی لایه زیراساس از سرباره‌های فولادی و ماده افزودنی خاکستر بادی نوع C استفاده نمودند. سرباره فولادی مورد استفاده در این تحقیق از نوع کوره قوس الکتریک (EAF) است. بدین منظور، ماده افزودنی خاکستر بادی نوع C با مقادیر ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد به این سرباره‌ها افزوده و به کمک آزمایش‌های آزمایشگاهی خواص ژئوتکنیکی آنها با توجه به اهداف پروژه، مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌های مورد نظر شامل وزن مخصوص ویژه (Gs)، تراکم، دانسیته حداقل و حداکثر، برش مستقیم بزرگ مقیاس و آزمایش تورم بوده است. بر اساس نتایج، درصد رطوبت بهینه و چگالی حداکثر سرباره نوع EAF به ترتیب در حدود ۱۰ تا ۱۳ درصد و ۱/۶۸ تا ۲ gr/cm³ است. زاویه اصطکاک داخلی سرباره مورد استفاده ۴۰/۶ درجه است. مخلوط‌های متراکم شده سرباره و خاکستر بادی نوع C با گذشت زمان مقاومت بالایی را نشان دادند. در ضمن، تورم نمونه‌ها ناچیز بود.

امروزه در جهان، سرباره‌ها به عنوان سنگدانه در عملیات خاکریزی روسازی و در لایه‌های اساس و زیراساس به‌کارگرفته می‌شوند. بررسی ادبیات فنی حاکی از عملکرد مناسب سرباره در این نوع پروژه‌های مختلف است. با توجه به وجود کارخانه‌های فولادسازی در کشور و مشکل انباشت سرباره، معرفی آنها جهت استفاده در صنعت ساخت و ساز کشور از طریق بررسی خصوصیت‌های مهندسی آن‌ها در کوتاه مدت و به‌خصوص، بلند مدت از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. در این تحقیق با بررسی دقیق مطالعات انجام شده قبلی، با انجام دادن آزمایش‌های آزمایشگاهی، امکان جایگزینی سرباره فولادی نوع قوس الکتریک، با مصالح طبیعی به عنوان زیراساس بررسی می‌شود.

۲- آزمایش‌های آزمایشگاهی

با توجه به اهداف تحقیق، خصوصیات شیمیایی خاکستر بادی و خصوصیات شاخص و مکانیکی نمونه‌های خاک، سرباره خالص از نوع کوره قوس الکتریک (EAF) و مخلوط شده با ۲٪، ۷٪، ۱۲٪ و ۲۰٪ خاکستر بادی در زمان‌های

عمل آوری ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه در حالت رطوبت بهینه مطابق با شکل ۱ تعیین شد.

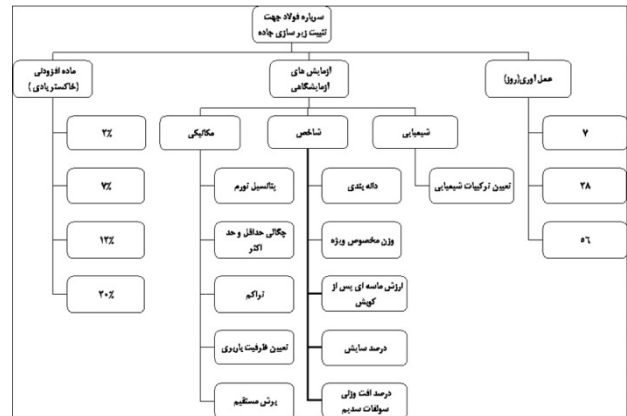


Fig. 1 Laboratory tests schedule on slag and slag with various fly ash percentage at different curing time

شکل ۱ آزمایش های آزمایشگاهی بر روی سرباره و مخلوط سرباره با درصدهای مختلف خاکستر در زمان های مختلف عمل آوری

همچنین، نتایج آزمایش ها تنها برای حالت غرقاب در زمان عمل آوری ۱۸۰ روز نیز در تعدادی از نمونه ها بررسی شده است. علت استفاده از خاک، مقایسه نتایج آن با مصالح سرباره و مخلوط آن با درصدهای مختلف خاکستر بادی است. مطالعات در آزمایشگاه بخش ژئوتکنیک و زیرساخت مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی انجام شد. آزمون های شیمیایی بر روی سرباره و خاکستر، به منظور شناخت عناصر تشکیل دهنده در آزمایشگاه بخش مصالح و فرآورده های راه و ساختمان مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی به انجام رسید. ترکیب شیمیایی سرباره کوره قوس الکتریک به طور قابل ملاحظه ای وابسته به خواص فولاد بازیافتی است. بنابراین، در مقایسه با سرباره های BOF، ترکیب شیمیایی سرباره های EAF از تنوع بیشتری برخوردارند. نتایج آزمایش های شیمیایی برای سرباره در جدول ۱ ارائه شده است. مطابق با جدول ۱، درصد عناصر تشکیل دهنده سرباره در محدوده گزارش شده در ادبیات فنی قرار می گیرد [۱۱].

جدول ۱ عناصر تشکیل دهنده سرباره

عناصر تشکیل دهنده	مقدار در سرباره فولاد مورد بررسی (%)	محدوده گزارش شده در ادبیات فنی [۱۱]
SiO ₂	۱۷/۶۳	۶-۳۴
Al ₂ O ₃	۸/۰۵	۳-۱۴
Fe ₂ O ₃	۲۹/۶۰	۳-۴۰
CaO	۲۵/۹۰	۲۲-۶۰
MgO	۵/۵۰	۳-۱۳
SO ₃	۲/۱۵	۰/۰۲-۰/۱۵
کلرید	۰/۰۱	۰/۱-۰/۵
کاهش وزن بر اثر سرخ شدن	۱۰/۷۳	۱

خاکستر بادی، پوزولان یک ماده سیلیسی و یا سیلیسی-آلومینیومی است. خاکستر بادی، اغلب از اکسیدهای سیلیسیم، آلومینیوم، آهن و کلسیم تشکیل شده است. در حال حاضر این ماده با توجه به ترکیب شیمیایی به سه نوع C، F، N و طبقه بندی می گردد. با وجود درصد بالای آهک (CaO) در سرباره، تنها بخش ناچیزی از آنها به صورت آزاد به منظور واکنش با سیلیس (SiO₂) جهت فرآیند سیمان شستگی وجود دارد. کمبود فاز سیلیسی در سرباره ها، علت اصلی نیاز به واکنش های پوزولانی است. یکی از اصلی ترین اجزای تشکیل دهنده خاکستر، سیلیس (SiO₂) است و نظر به اینکه خاکستر قابلیت واکنش مجدد با آهک آزاد را دارد، بنابراین می تواند به عنوان یک فعال کننده در سرباره های فولاد جهت ایجاد فرآیند سیمان شستگی عمل نماید.

جدول ۲ نوع آزمون، عناصر تشکیل دهنده خاکسترها و خاکستر استفاده شده در این تحقیق

Table 2 Test type, composing elements of fly ash and fly ash used in this study

نوع آزمون	نتایج آزمون های شیمیایی روی خاکستر مورد مطالعه			مطالعه	Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃ +SiO ₂ حداقل - درصد
	C	F	N		
بر اساس استاندارد ASTM C618[5]	۷۰	۷۰	۷۰	۹۰/۵۵	حد اکثر - درصد
میزان رطوبت در دمای 110 °C	۵	۵	۴	۰/۰۷	حد اکثر - درصد
کاهش وزن بر اثر سرخ شدن حد اکثر - درصد	۳	۳	۳	۲	حد اکثر - درصد
	۶	۶	۱۰	۶/۷۰	کاهش وزن بر اثر سرخ شدن حد اکثر - درصد

با توجه به مقادیر موجود در جدول ۲ و بر اساس استاندارد ASTM C-618[۱۲] مقدار کاهش وزن بر اثر سرخ شدن برای کلاس های C و F حد اکثر ۶ درصد و برای کلاس N حد اکثر ۱۰ درصد است.

جدول ۳ نتایج آزمایش های شاخص بر روی سرباره به عنوان مصالح لایه زیرساز و مقایسه آنها با مقادیر مجاز

Table 3 Index tests results on slag as subgrade material and their comparison with permitted values

شرح	روش های آزمایش BS/AASHTO	روش های آزمایش ASTM	حد مجاز مشخصات	نتایج آزمایش روی سرباره مورد بررسی
نشانه خمیری (%)	T90	D4318	حد اکثر ۶	۰
حد روانی (%)	T89	D4318	حد اکثر ۲۵	NIA ^۱
ارزش ماسه ای پس از کوبیدگی سایش	T1176	D2419	حد اقل ۳۰	۵۳/۶۶
لس آنجلس (%)	T96	C131	حد اکثر ۵۰	۱۲/۵
CBR (%)	--	D1183	حد اقل ۲۵	>۸۰
افت وزنی با سولفات سدیم (%)	T104	C 88	حد اکثر ۱۲	۷

^۱ اطلاعاتی در دسترس نیست.

به علت عدم دسترسی به خاکستر بادی نوع C (فقدان نیروگاه با سوخت ذغال سنگ در ایران)، از نوعی خاکستر بادی استفاده شده که شبیه به خاکستر

۲۰٪ خاکستر بادی، تعداد شش آزمایش تراکم به روش اصلاح شده ASTM D1557 [۱۴] انجام گردید. بر اساس نتایج به دست آمده، بیشترین میزان دانسیته خشک حداکثر مربوط به سرپاره است (شکل ۳). بررسی نمودار نشان می‌دهد که مقادیر دانسیته خشک حداکثر سرپاره خالص و نیز ترکیب شده با درصد‌های مختلف خاکستر نسبت به خاک طبیعی بیشتر می‌باشد. شایان ذکر است به‌طور کلی افزایش درصد خاکستر به سرپاره سبب کاهش مقادیر دانسیته خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه می‌شود. نتایج حاکی از آن است که ترکیب سرپاره با مقادیر موردنظر خاکستر بادی، تأثیر چندانی در رطوبت بهینه نمونه‌های آزمایشی ندارد. وزن مخصوص خشک حداکثر خاک، سرپاره و مخلوط سرپاره با درصد‌های مختلف ۲، ۷، ۱۲ و ۲۰ خاکستر به ترتیب برابر با ۲/۱، ۲/۶۲، ۲/۵۵، ۲/۵۴، ۲/۵۱ و ۲/۴۶ gr/cm³ است. همچنین، آزمایش دانسیته حداکثر و حداقل ASTM D4253 [۱۵] و ASTM D4254 [۱۶] بر روی نمونه‌های سرپاره خالص و خاک انجام شده است. مقادیر دانسیته خشک حداقل و حداکثر برای نمونه سرپاره به ترتیب برابر با ۲/۲۲ و ۲/۶۹ و خاک ۱/۶۶ و ۲/۰۸ gr/cm³ می‌باشد که مقادیر دانسیته حداکثر حاصل تقریباً برابر با مقادیر دانسیته خشک حداکثر تراکم اصلاح شده برای نمونه خاک و سرپاره است. علت اصلی اختلاف مقادیر دانسیته به دست آمده از نمونه‌ها، تفاوت در وزن مخصوص ویژه آنها می‌باشد. چگال‌تر بودن مصالح سرپاره در مقایسه با خاک، موجب افزایش دانسیته خشک حداکثر سرپاره نسبت به خاک است.

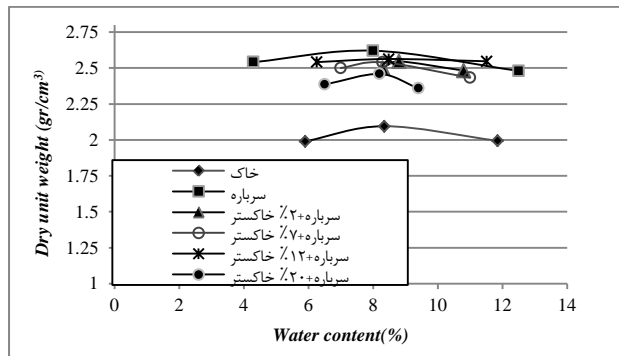


Fig. 3 Maximum dry density and optimum moisture for understudied different materials using modified compaction

شکل ۳ نمودار دانسیته خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه برای مصالح مختلف مورد بررسی به روش تراکم اصلاح شده

به منظور تعیین ظرفیت باربری لایه‌های روسازی راه، تعداد چهارده آزمایش CBR بر اساس استاندارد ASTM D1883 [۱۷] بر روی نمونه‌های خاک، سرپاره خالص و مخلوط شده با درصد‌های مختلف خاکستر و در زمان‌های عمل‌آوری مختلف، انجام و نتایج آزمایش‌ها در شکل ۴ ارائه گردید. نظر به اهمیت نتایج این آزمایش‌ها در انجام دادن پروژه‌های راه‌سازی و بررسی دقیق‌تر رفتار خاک در دراز مدت، مقدار CBR سرپاره خالص و مخلوط سرپاره با درصد‌های مختلف خاکستر در طولانی مدت (۱۸۰ روز) مورد بررسی قرار گرفت و در این نمونه تورم بر اساس استاندارد ASTM D1883 [۱۷] یا AASHTO T193-63 [۱۸] اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها در ابتدا با درصد رطوبت‌های بهینه به دست آمده از آزمایش تراکم اصلاح شده، در قالب‌های CBR کوبیده شده و سرپاره ۴/۵ کیلوگرمی به منظور لحاظ نمودن وزن لایه آسفالت و اساس بر روی لایه زیراساس قرار داده شد. سپس نمونه‌ها را

نوع N استاندارد است. در این مطالعه، آزمایش‌های آزمایشگاهی مطابق با جدول مشخصات مصالح لایه زیراساس راه در نشریه ۲۳۴ (آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران) [۱۳]، انجام شده است (جدول ۳).

این آزمایش‌ها شامل نشانه خمیری، حد روانی، ارزش ماسه‌ای، سایش لس‌آنجلس، CBR و درصد افت وزنی با سولفات سدیم (دوام) می‌باشد. آزمایش‌های سایش و دوام، شاخصی برای ارزیابی مقاومت دانه‌ها و دوام مصالح در برابر شرایط جوی و بهره‌برداری است. دانه‌بندی سرپاره و خاک طبیعی مورد استفاده در لایه زیراساس نیز در محدوده مقادیر ارائه شده در نشریه ۲۳۴ [۱۳]، انتخاب شده است. برای پنج نوع دانه‌بندی موجود در نشریه ۲۳۴ برای مصالح زیراساس با توجه به امکانات آزمایشگاهی موجود از نظر ابعاد دستگاه و حداکثر اندازه دانه مصالح و همچنین پراکنش محدوده دانه‌بندی شماره ۷، در این تحقیق حد وسط این محدوده جهت دانه‌بندی نمونه‌های خاک و سرپاره انتخاب شد (شکل ۲).

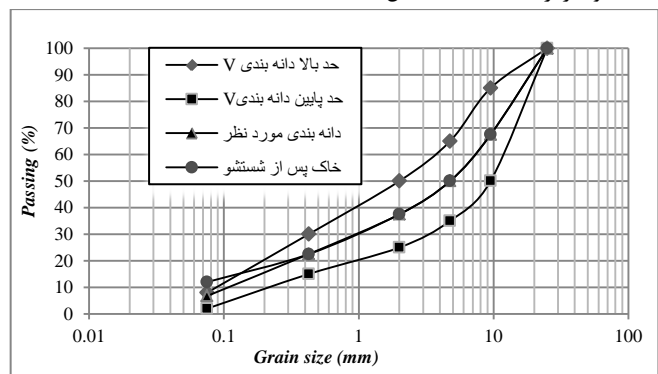


Fig. 2 Particle size distribution of No. V and its average

شکل ۲ نمودار دانه‌بندی نوع V و متوسط آن

بر اساس این آیین‌نامه نتایج حداکثر مجاز درصد ریزدانه حدود ۱۲ درصد می‌باشد که برای مناطق خشک تا ۲۰ درصد قابل افزایش است. با توجه به دانه‌بندی مصالح و همچنین بر اساس نشریه شماره ۲۳۴ [۱۳]، مقدار وزن مواد رد شده از الک ۲۰۰ نباید از ۱۵ درصد بیشتر شود. لذا افزودن خاکستر بادی در درصد‌های بیشتر از این مقدار به منزله بررسی تحقیقاتی موضوع می‌باشد. در این تحقیق درصد ریزدانه خاک طبیعی ۶٪ است مگر آنکه درصد دیگری ذکر شود.

بر اساس نتایج آزمایش‌ها، نشانه خمیری مصالح صفر است. مطابق با جدول ۳ نتایج آزمایش‌های شاخص شامل ارزش ماسه‌ای پس از کوبش، درصد افت وزنی با سولفات سدیم و درصد سایش لس‌آنجلس، CBR بر روی نمونه سرپاره موردنظر در محدوده مشخصات مصالح لایه زیراساس راه قرار می‌گیرد. به منظور تعیین ارتباط وزن به حجم نمونه‌های خاک و سرپاره مورد استفاده، دو سری آزمایش تعیین وزن مخصوص ویژه در بخش‌های ریزدانه و درشت‌دانه انجام گردید. بر اساس نتایج حاصل از این آزمایش، وزن مخصوص ویژه میانگین خاک و سرپاره به ترتیب برابر با ۲/۴۸ gr/cm³ و ۳/۲۳ gr/cm³ به دست آمده است. وزن مخصوص سرپاره‌های فولادی به ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی و ساختار دانه‌های آنها بستگی دارد. به علت حضور حجم زیاد اکسید آهن در سرپاره، مقدار وزن مخصوص آنها بزرگتر از خاک و دانه‌های طبیعی است. دامنه مقادیر وزن مخصوص سرپاره نوع EAF، بین ۳/۱ تا ۳/۸ گزارش شده است. به منظور تعیین وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه نمونه خاک طبیعی، سرپاره و سرپاره مخلوط شده با ۲٪، ۷٪، ۱۲٪ و

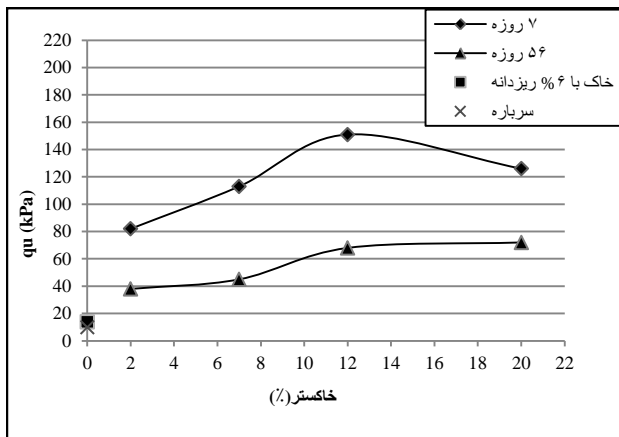


Fig. 5 Diagram of unconfined compression test results for soil, slag and slag mixed with various percentages of fly ash

شکل ۵ نمودار نتایج آزمایش مقاومت فشاری بر روی خاک، سرباره و مخلوط سرباره با درصدهای مختلف خاکستر

در ابتدا آزمایش‌هایی روی خاک طبیعی با درصد ریزدانه ۱۲ درصد انجام شده در آزمایش دانه‌بندی خاک بدون روش شستشویی تهیه و مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقاومت تک محوری حدود ۲۰۶/۳۶ kPa بوده است. در ادامه، آزمایش روی همان خاک با درصد ریزدانه نصف حالت قبل (۶٪) انجام شد. نتایج مقاومت فشاری به حدود ۱۱/۵۶ kPa تقلیل یافت. در هر دو حالت بالا در سطوح کلاهیک بالا و پایین نمونه دوایر متحدالمرکزی وجود داشت. چنانچه سطوح کلاهیک‌های نمونه صاف بود، مقدار مقاومت تک محوری خاک حدود ۱/۸۷۶ kPa است. این امر اهمیت سطوح کلاهیک در تماس با نمونه در آزمایش تک محوری و همچنین درصد ریزدانه را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، با افزایش درصد خاکستر به نمونه، افزایش اندک مقاومت تک محوری مشاهده می‌شود. همچنین افزایش زمان عمل‌آوری از ۷ روزه (نمونه خشک) به ۵۶ روزه (نمونه غرقاب) با توجه به افزایش رطوبت نمونه، کاهش حدود ۵۰ درصدی مقاومت نمونه‌های آزمایشی مشاهده شده است.

به منظور تعیین پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌های آزمایشی، آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس بر روی نمونه‌های خاک، سرباره خالص و مخلوط سرباره با ۱۲ درصد خاکستر، با سه تنش قائم ۲، ۱ و ۰/۱ kg/cm² مطابق با استاندارد ASTM D3080 [۲۰] انجام شد که نتایج آنها در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴. نتایج آزمایش برش مستقیم روی خاک طبیعی، سرباره خالص و مخلوط سرباره با ۱۲ درصد خاکستر

Table 4 Direct shear test results on natural soil, pure steel slag and mixed slag with 12% fly ash

C (kg/cm ²)	φ (°)	نمونه
۰/۴	۴۶/۵	خاک
۰/۵	۴۷	سرباره
۰/۱۱	۵۵	سرباره مخلوط با ۱۲ درصد خاکستر

در محفظه‌هایی به حالت اشباع قرار داده و تورم نمونه‌ها در بازه زمانی تا ۶ ماهه توسط کرنش‌سنجی که به طور قائم در تماس با سطح نمونه بود، مورد ارزیابی قرار گرفت. درصد تورم به صورت تغییر طول نمونه بر اثر جذب آب به ارتفاع اولیه نمونه خاک در قالب CBR، ضربدر ۱۰۰ می‌باشد. بررسی نتایج تورم در بازه زمانی شش ماهه نشان می‌دهد پتانسیل تورم سرباره مورد بررسی در مقایسه با خاک طبیعی اندک بوده و همچنین افزودن خاکستر بادی به سرباره تأثیر چندانی در افزایش پتانسیل تورمی نمونه‌ها ندارد. علاوه بر این، دانه‌های سرباره فولاد قدرت جذب آب ندارند [۶].

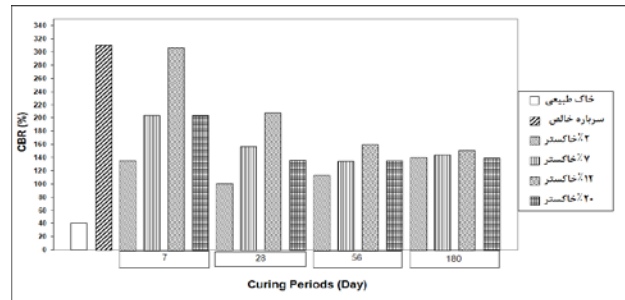


Fig. 4 Variations of CBR test results for soils, slag and slags with various percentages of fly ash samples with curing times of 7, 28, 56 and 180 days

شکل ۴ تغییرات CBR نمونه‌های خاک، سرباره خالص و سرباره با درصدهای مختلف خاکستر در زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۲۸، ۵۶، ۱۸۰ روزه

بر اساس نتایج، بیشترین مقدار CBR خشک، مربوط به سرباره خالص می‌باشد. شایان ذکر است مقادیر CBR مخلوط این سرباره با درصدهای مختلف خاکستر نیز به مراتب بیشتر از خاک طبیعی است. افزودن خاکستر تا دو درصد سبب کاهش مقادیر CBR در مقایسه با سرباره خالص می‌شود. با افزایش درصد خاکستر تا میزان ۱۲ درصد، باعث افزایش CBR مخلوط سرباره با خاکستر، در تمام زمان‌های عمل‌آوری می‌شود و سپس در درصد خاکستر ۲۰ درصد، مقادیر CBR کاهش می‌یابد. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق نشان می‌دهد نسبت مقادیر CBR سرباره نسبت به خاک در حدود ۸۰۰ درصد و برای مخلوط سرباره با ۱۲ درصد خاکستر در دوره زمانی ۶ ماهه بین ۳۰۰ تا ۴۰۰ درصد متغیر است. شایان ذکر است نسبت مقادیر CBR دانه‌های انواع مختلف سرباره فولاد به دانه‌های طبیعی از ۲۱۰ درصد تا بیش از ۴۰۰ درصد متغیر است [۱۲]. نتایج آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق نشان می‌دهد که سرباره و مخلوط‌های آن با خاکستر، حداقل مقدار مجاز CBR (حداقل ۲۵ درصد) نشریه ۲۳۴ [۱۳] را برآورده می‌نماید. لازم به ذکر است غرقاب کردن نمونه (عمل‌آوری ۵۶ روزه) سبب کاهش قابل توجه CBR در مقایسه با نمونه خشک (۷ روزه) شده است.

آزمایش مقاومت فشاری مطابق با استاندارد ASTM D2166 [۱۹] با حداکثر اندازه دانه ۱۹ میلی‌متر، بر روی نمونه‌های خاک با درصد ریزدانه ۶ درصد و سرباره و سرباره مخلوط با خاکستر بادی ۲، ۷، ۱۲ و ۲۰ درصد و در روزهای عمل‌آوری ۷ و ۵۶ روز انجام شده است. نتایج این آزمایش در شکل ۵ ارائه شده است.

۸. با افزایش رطوبت نمونه (نمونه‌های غرقاب ۵۶ روزه) افت حدود ۵۰ درصدی، مقاومت فشاری و CBR نسبت به نمونه‌های خشک (۷ روزه) مشاهده شده است.
۹. برای سرباره خالص مقادیر زاویه اصطکاک داخلی بیشتر از خاک است. بیشترین مقدار زاویه اصطکاک داخلی، مربوط به سرباره با ۱۲ درصد خاکستر می‌باشد.
۱۰. بررسی نتایج، برتری خصوصیات مهندسی سرباره خالص نسبت به خاک و مخلوط سرباره با درصدهای مختلف خاکستر بادی متناسب با اهداف این تحقیق را تأیید می‌کند.

۴- مراجع

- [1] S. Pamukcu, A. Tuncan, Laboratory characterization of cement-stabilized iron-rich slag for reuse in transportation facilities, *Transportation Research Record 1424, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.*, pp. 25-33, 1993.
- [2] P. Ahmmedzade, B. Sengoz, Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete, *Journal of Hazardous Materials*, No.1-3, pp. 300-305, 2009.
- [3] A. Ebrahim, A. Behiry, Evaluation of steel slag and crushed limestone mixtures as sub-base material in flexible pavement, *Ain Shams Engineering Journal*, No.4, pp. 43-53, 2013.
- [4] I. Akinwumi, Utilization of steel slag for stabilization of a lateritic soil, *Research Project Report*, Covenant University Ota, Ogun State, 2012.
- [5] B. Biradar, A. kumar, P. Satyanarayana, Influence of steel slag and fly ash on strength properties of clayey soil: A Comparative Study, *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, No.2, p. 16, 2014.
- [6] L. Rohde, W. P. Nunez, J. A. P. Ceratti, 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, 2003.
- [7] M. Luckman, S. Vitta, D. Venkateswaran, Cementitious and pozzolanic behavior of electric arc furnace steel slags, Department of Metallurgical Engineering and Materials Science, Indian Institute of Technology Bombay, Mumbai 400076, India, Indorama Cement Ltd, Navi Mumbai 400705, India, 2009.
- [8] M. Kamon, S. Nontananandh, T. Katsumi, Utilization of stainless-slag by cement hardening, *Soils and Foundations*, No.3, pp.118-129, 1993.
- [9] K. Rouabah, A. Zergua med Beroual, M. Guetteche, Recovery and use of blast furnace slag in the field of road construction in Algeria, Department of Civil Engineering, Consta, 2013.
- [10] I. Yildirim, M. Prezzi, Use of steel slag in subgrade applications, *JTRP Technical Reports*, Purdue University, Indiana, 2009.
- [11] S. H. Tabatabaei, A. A. Araei, A. S. Salamat, Use of Steel Slag for stabilization of road subgrade, Building and Housing Research Center, 2016. (In Persian)
- [12] ASTM C618, *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*, 2015.
- [13] *Iran Highway Asphalt Paving Code*, No. 234, 2002. (In Persian)
- [14] ASTM D1557, *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³))*, 2002.
- [15] ASTM D4253, *Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table*, 2000.
- [16] ASTM D4254, *Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density*, 2000.

بر اساس نتایج، بیشترین مقدار زاویه اصطکاک داخلی، مربوط به سرباره با ۱۲ درصد خاکستر است. مقدار زاویه اصطکاک به‌دست آمده سرباره فولاد مورد بررسی در محدوده آرایه شده ۴۰ تا ۵۰ درجه ادبیات فنی [۶] قرار می‌گیرد. شایان ذکر است در سرباره خالص نیز مقادیر زاویه اصطکاک داخلی بیشتر از خاک است. نکته جالب توجه کاهش قابل ملاحظه مقادیر چسبندگی در نمونه مخلوط سرباره با ۱۲ درصد خاکستر می‌باشد. پارامترهای مقاومت برشی جدول ۴ نشان می‌دهد خاک و سرباره عمدتاً درشت دانه، دارای چسبندگی حدود 0.5 kg/cm^2 است. وجود ریزدانه و ایجاد ترکیبات شبه سیمانی سرباره از دلایل این چسبندگی به‌شمار می‌رود [۲۱، ۲۲]. به نظر می‌رسد خاکستر مورد استفاده در این تحقیق، قابلیت‌های لازم برای ایجاد سیمان‌شدگی در مصالح را ندارد و بر اساس آزمایش‌ها، سرباره خالص نتایج مطلوبی را آرایه می‌نماید. از طرفی افزودن خاکستر ممکن است سبب مشکلات در کاهش نفوذپذیری مصالح زیراساس شود. لذا استفاده از مخلوط سرباره و خاکستر بادی مورد نظر توصیه نمی‌شود.

۳- جمع بندی

در این تحقیق رفتار سرباره فولاد EAF و مخلوط آن با درصدهای مختلف نوعی خاکستر بادی به منظور استفاده در زیراساس جاده‌ها از طریق آزمایش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاصل با هم و همچنین خاک طبیعی مقایسه شد. خلاصه نتایج به شرح ذیل است:

۱. نوع دانه‌بندی مصالح مورد آزمایش، در طبقه‌بندی آشتو، A-1-a قرار می‌گیرد. دانه‌بندی مورد استفاده در این تحقیق می‌تواند برای لایه زیراساس استفاده گردد.
۲. سرباره مورد بررسی، حدود مجاز مشخصات تعیین شده برای مصالح زیراساس طبق نشریه ۲۳۴ را از نظر نشانه خمیری، حدروانی، ارزش ماسه‌ای، درصد سایش و درصد افت وزنی با سولفات سدیم دارد.
۳. مقادیر دانسیته سرباره بیشتر از خاک است و با افزایش خاکستر به سرباره دانسیته خشک طبق تراکم اصلاح شده کاهش می‌یابد. مقادیر دانسیته خشک حداکثر نمونه سرباره خالص کمتر از دانسیته تراکم اصلاح شده است و هر دو مقدار بیشتر از مقادیر نظیر برای خاک می‌باشد.
۴. نمونه‌های سرباره خالص و ترکیب آن با درصدهای مختلف خاکستر، پتانسیل ترمی کمتری نسبت به خاک طبیعی دارند.
۵. سرباره خالص و مخلوط شده با خاکستر بادی، مقادیر CBR به مراتب بالاتری نسبت به خاک طبیعی و همچنین نسبت به حداقل مقادیر مجاز نشریه ۲۳۴ (۲۵٪) دارد.
۶. به‌طور کلی، با افزایش زمان عمل‌آوری نمونه‌ها، CBR نمونه‌های مخلوط سرباره با درصدهای مختلف خاکستر بادی، کاهش می‌یابد. به‌طوری‌که بیشترین مقادیر CBR مربوط به زمان عمل‌آوری ۷ روز و با افزایش زمان عمل‌آوری به ۵۶ روز کاهش و سپس روند تقریباً ثابت است.
۷. با افزایش درصد خاکستر تا ۱۲ درصد به نمونه مقاومت تک محوری نمونه‌ها افزایش می‌یابد. همچنین، افزایش زمان عمل‌آوری باعث کاهش مقاومت تک محوری نمونه‌های آزمایشی می‌شود.

- [17] ASTM D1883-05, *Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory- Compacted Soils*.
[18] AASHTO T193, *Standard method of the California Bearing Ratio*, 2003.
[19] ASTM D2166, *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive soil*, 2000.
[20] ASTM D3080, *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils under Consolidated Drained*, 2004.

[۲۱] رحمانی، ا.، آقایی آرایبی، ع.، عطارچیان، ن.، سلامت، ا. س.، حسنی، ح.، بررسی اثر غرقاب شدن، دانه‌بندی و جنس سرباره فولاد بر مشخصات فنی خاکریزهای مهندسی، پروژه تحقیقاتی، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۳۹۶.

[۲۲] هاشمی طباطبایی، س.، آقایی آرایبی، ع.، کاتبی، ب.، سلامت، ا. س.، استفاده از سرباره فولاد جهت تثبیت در زیرسازی جاده، گزارش پروژه تحقیقاتی، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، بخش ژئوتکنیک و زیرساخت، ۱۳۹۴.