

## مقایسه رفتار خاک مارن و لایروبی تثبیت شده با سرباره های فولادی کوره قوس الکتریکی (EAF) و کوره اکسیژن (BOF)

ایرج رحمانی\*<sup>۱</sup>، مسعود صادق پور منفرد<sup>۲</sup>، عطا آقایی آرایبی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار بخش ژئوتکنیک و زیرساخت، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران

<sup>۲</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد پژوهشگرده ساختمان و مسکن، تهران

<sup>۳</sup> دانشیار بخش ژئوتکنیک و زیرساخت، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران

دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲۶، بازنگری: ۱۴۰۰/۳/۸، پذیرش: ۱۴۰۰/۴/۵، نشر آنلاین: ۱۴۰۰/۴/۵

### چکیده

مارن سنگ‌هایی هستند که از ته‌نشینی هم‌زمان مصالح آهکی و رسی تشکیل شده‌اند. خاک مارنی نتیجه هوازگی فیزیکی و شیمیایی سنگ مادر است. ویژگی‌های مارن شامل رفتار پیچیده، حساسیت به رطوبت، مقاومت و باربری کم، قابلیت فشرده‌گی بالا و ویژگی خمیری زیاد؛ می‌باشند. در سراسر جهان؛ سالانه حجم زیادی خاک لایروبی تولید می‌گردد. این خاک اغلب ویژگی‌های فنی مناسب برای استفاده در کارهای عمرانی ندارد؛ و به‌ناچار انباشته می‌شود. سرباره فولاد، یکی از محصولات جانبی صنعت فولاد است. با توجه به گرانی و مشکلات زیست‌محیطی تولید تثبیت‌کننده‌های سنتی مانند آهک و سیمان و همچنین حجم زیاد، جاگیر بودن و ویژگی‌های مناسب؛ سرباره فولاد می‌تواند در تثبیت خاک به‌کار رود. در این مقاله تثبیت خاک مارن تبریز و خاک لایروبی خلیج فارس با ریزدانه سرباره‌های BOF (Basic Oxygen Furnace Slag) و EAF (Electric Arc Furnace Slag) مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور نمونه‌های ۷ روزه خاک تثبیت شده با ۴ درصد مختلف ریزدانه سرباره‌های فولاد BOF و EAF تهیه شدند. این نمونه‌ها تحت آزمایش فشاری تک‌محوری محدود نشده بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۵ سانتی‌متری قرار گرفتند. ضعیف‌ترین ترکیبات به‌ترتیب خاک لایروبی و مارن دارای سرباره فولاد EAF هستند. در کل، سرباره فولاد BOF بیش‌ترین مقاومت فشاری تک‌محوری و ضریب ارتجاعی E<sub>50</sub> را در خاک مارن ایجاد کرد. مقاومت خاک لایروبی تثبیت شده از ۰/۲ تا ۲/۸ kg/cm<sup>2</sup> افزایش یافته است. سرباره EAF توانسته مقاومت تک‌محوری مارن را اندکی بهبود داده از ۱/۶ به ۱/۸ kg/cm<sup>2</sup> برساند. تثبیت با ۱۲٪ سرباره BOF موجب بیش‌ترین مقاومت تک‌محوری مارن ۳/۸ kg/cm<sup>2</sup> می‌شود.

**کلیدواژه‌ها:** مارن، خاک لایروبی، سرباره EAF، سرباره BOF، تثبیت، مقاومت تک‌محوری.

### ۱- دیباچه

ویژگی‌های مهندسی؛ از نقطه‌ای به نقطه دیگر تفاوت دارند (Fookes و Higginbotrom، ۱۹۷۵) و (Aiban و همکاران، ۱۹۹۸). از ویژگی‌های مارن می‌توان به رفتار پیچیده، مقاومت و باربری کم (به خاطر حضور ماتریس خاک رس)، قابلیت فشرده‌گی بالا و ویژگی خمیری زیاد اشاره نمود (Seco و همکاران، ۲۰۱۱) و (Bensaifi و همکاران، ۲۰۱۹). خاک مارنی دارای نسبت‌های زیادی از انواع گوناگون مصالح کربناتی است؛ و نسبت به آب حساسیت شدید دارد. نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) مارن در هنگام غرقاب شدن کاهش قابل‌ملاحظه می‌یابد (Aiban و همکاران، ۱۹۹۸). خاک‌های مارنی بخش وسیعی از ایران را در بر

مارن ماهیت آهکی دارد و به‌دلیل ناهمگن بودن ترکیب و ویژگی‌ها، بسیار مشهور است. مارن به‌عنوان سنگ رسوبی حاوی ۳۵ تا ۶۵ درصد کربنات کلسیم و همچنین مقادیر متغیری از رس تعریف می‌شود (Al-Amoudi و همکاران، ۲۰۱۰). سنگ مارن از ته‌نشینی هم‌زمان مصالح آهکی و رسی تشکیل شده است. تشکیل خاک مارنی نتیجه هوازگی فیزیکی و شیمیایی سنگ‌های کربناتی مادر (برای نمونه: سنگ‌آهک، دولومیت<sup>۱</sup>، ماسه‌سنگ کربناتی و...) است. مارن‌ها از لحاظ رنگ، خمیری بودن (بسته به نوع رس معدنی و مقدار آن)، ترکیبات فیزیکی، شیمیایی و

1. Dolomite

\* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۲۱-۸۸۲۵۵۹۴۲

آدرس ایمیل: i.rahmani@bhrc.ac.ir، (رحمانی)، m.sadeghpour@bhrc.ac.ir، (م. صادق پور منفرد)، aghaeiarai@bhrc.ac.ir، (ع. آقایی آرایبی).

سرباره فولاد، محصول جانبی صنایع فولاد است؛ که حاوی ترکیبات پیچیده‌ای از سیلیکات‌ها و اکسیدها، مقدار زیادی آهن، منیزیم، منگنز، فسفر و سایر عناصر فلزی یا غیرفلزی می‌باشد (Aldeeky و Al Hattemleh، ۲۰۱۷) و (Teng و همکاران، ۲۰۲۰). سرباره انواع گوناگونی دارد؛ مانند سرباره کوره قوس الکتریکی<sup>۵</sup> (EAF)، سرباره فولادی کوره اکسیژن<sup>۶</sup> (BOF)، سرباره کوره آهن‌گدازی و سرباره کوره بلند<sup>۷</sup> سرباره BOF حاصل تبدیل چدن (آهن خام)<sup>۸</sup> به فولاد؛ و ویژگی‌های شیمیایی و کانی‌شناسی آن نزدیک به سیمان پرتلند است. سرباره EAF محصول ذوب آهن قراضه<sup>۹</sup> و آهن اسفنجی برای تولید فولاد است. سرباره فولاد دانه‌بندی شده از ویژگی‌های مهندسی برتر مانند زاویه اصطکاک بالا، جذب آب کم، سختی زیاد، مقاومت در برابر سایش و قابلیت تراکم بالا برخوردار است. بنابراین، استفاده از آن، منجر به افزایش ویژگی‌های مقاومت برشی خاک اصلاح شده می‌شود (Tasalloti و همکاران، ۲۰۱۵)، (Qiang و همکاران، ۲۰۱۶) و (Deng و همکاران، ۲۰۱۷). سرباره BOF حاوی C<sub>3</sub>S (سیلیکات تری کلسیم)، C<sub>2</sub>S (سیلیکات دی کلسیم) و محلول جامد وستیت<sup>۱۰</sup> (FeO) می‌باشد؛ اما به دلیل کم بودن مقدار این ترکیبات در سرباره BOF، خواص سیمانی آن محدود است و از آن به‌عنوان سیمان پرتلند ضعیف یاد می‌شود (Shi و Qian، ۲۰۰۰؛ Wilkinson و همکاران، ۲۰۱۰؛ Poh و همکاران، ۲۰۰۶؛ Belhadj و همکاران، ۲۰۱۲؛ Deng و همکاران، ۲۰۱۷). تفاوت اصلی میان سرباره BOF و سیمان پرتلند، در این نکته است که کانی غالب سرباره (C<sub>2</sub>S) همراه با کمی (C<sub>3</sub>S) دارای هیدراسیون و گسترش مقاومت کند است؛ اما این روند برای سیمان پرتلند، سریع است (Poh و همکاران، ۲۰۰۶).

به اصلاح و بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مهندسی خاک برای تأمین یک رشته اهداف از پیش تعیین‌شده، تثبیت گفته می‌شود (نشریه ۲۶۸، ۱۳۸۲). با توجه به ویژگی‌های رفتاری ویژه خاک‌های مارنی به‌ویژه در برابر آب، لازم است که نخست این خاک‌ها بهسازی و تثبیت شوند و سپس در خاک‌ریزی‌ها مورد استفاده قرار گیرند (اصغری کلجاهی و همکاران، ۱۳۹۳).

سازوکار تثبیت می‌تواند از تشکیل ترکیب‌های تازه (پیوسته شدن ذرات ریزتر خاک) تا ایجاد پوشش بر روی سطح ذرات توسط تثبیت‌کننده (برای محدود کردن حساسیت رطوبتی)؛ تغییر کند (Stoltz و همکاران، ۲۰۱۲).

در طرح‌های اختلاط مارن با سیمان یا آهک، مدت زمان و کیفیت عمل‌آوری؛ تأثیر بسزایی بر مقاومت پایانی خاک تثبیت‌شده

می‌گیرند (اصغری کلجاهی و همکاران، ۱۳۹۳). مارن‌های تبریز رسوبات کربناته دریاچه‌ای هستند. درصد مواد آلی این خاک کم‌تر از ۶٪ است و در طبقه‌بندی خاک‌های آلی جای نمی‌گیرد. مقدار کربنات این خاک از ۱۰ تا ۳۵ درصد است. طبقه‌بندی این خاک، بیشتر CH و در برخی موارد MH است (ماهوتی و کاتبی، ۱۳۹۷). مصالح لایروبی<sup>۱</sup> موادی هستند که لایروبی شده‌اند یا می‌توانند لایروبی شوند (Druijf، ۲۰۱۶). بسته به اندازه دانه‌ها و نوع یا جنس مواد لایروبی شده می‌توان آن‌ها را در یکی از فعالیت‌های راه‌سازی (به‌عنوان پرکننده، لایه زیراساس یا اساس)، ساختمانی، کشاورزی و یا زیست‌محیطی به‌کار برد (Dubois و همکاران، ۲۰۰۹) و (پاک و همکاران، ۱۳۹۰). نتایج پژوهش Limeira و همکاران (۲۰۱۲) نشان می‌دهد که ماسه ریز دریایی لایروبی شده<sup>۲</sup> می‌تواند به‌عنوان ریزدانه برای تولید بتن استفاده شود.

Siham و همکاران (۲۰۱۳) بیان کرده‌اند که رسوب‌ها و ماسه لایروبی دریایی می‌تواند به‌صورت موفق به‌عنوان مصالحی تازه برای لایه‌های راه به کار رود. Chan و Shahri (۲۰۱۶) نتیجه گرفته‌اند که خاک لایروبی شده تفاوت زیادی با خاک ریزدانه معمولی ندارد و می‌تواند همراه با تثبیت در کاربردهای گوناگون به‌کار رود. به علت ویژگی‌های ژئوتکنیکی ضعیف؛ برای استفاده از مصالح لایروبی در کاربردهای مهندسی، آن‌ها را تثبیت می‌کنند.

در نیمه نخست سال ۲۰۲۰، در جهان ۸۷۳ میلیون تن فولاد تولید شده است. در سال ۲۰۱۸ تولید فولاد در چین (بزرگ‌ترین تولیدکننده فولاد در جهان) ماهانه به بیش از ۱۰۰ میلیون تن رسیده است (Guo و همکاران، ۲۰۱۸) و (World Steel in Figures، ۲۰۲۰). ایران به‌عنوان دهمین تولیدکننده فولاد جهان، در سال ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ به ترتیب ۲۴/۵ و ۲۵/۶ میلیون تن فولاد خام تولید کرده است. این رقم برای کل جهان به ترتیب ۱۸۱۴ و ۱۸۶۹ میلیون تن می‌باشد (World Steel in Figures، ۲۰۲۰). به‌طور متوسط برای تولید یک تن فولاد از آهن قراضه، ۲۰۰ کیلوگرم و تولید فولاد از چدن، ۴۰۰ کیلوگرم محصولات جانبی تولید می‌شود (World Steel Association، ۲۰۲۰).

بنابراین، سالانه بیش از ۴۰۰ میلیون تن سرباره در سراسر جهان تولید می‌گردد (EUROSLAG، ۲۰۲۰). حجم زیاد سرباره فولاد<sup>۳</sup> نه تنها فضای زیادی اشغال می‌کند، بلکه باعث آلودگی زیست‌محیطی نیز می‌شود (Huo و همکاران، ۲۰۲۰). هم‌اکنون، فقط ۳۵٪ از سرباره‌های فولادی تولید شده، به‌ویژه در راه‌سازی، استفاده و بقیه در فضای باز انباشته می‌شوند (Brazilian Steel Industry Annual Statistics، ۱۹۹۸).

7. GGBS: Ground Granulated Blast Furnace

8. Pig iron or crude iron

9. Scrap iron

10. Wustite

2. DM: Dredged Material

3. DMS: Dredged Marine Sand

4. SS: Steel Slag

5. EAF: Electric Arc Furnace

6. BOF: Basic Oxygen Furnace

دارای ۷٪ آب و ۵۵٪ اکسید کلسیم) برای تثبیت رس با ویژگی خمیری بالا (GH)، موجب افزایش بیشتر مقاومت می‌گردد. به‌ویژه نسبت ریزدانه‌های سرباره به‌کار رفته، تأثیر قابل‌توجهی بر اثر تثبیت دارد (Chan و همکاران، ۲۰۱۱). سرباره در تثبیت رس‌های دریایی نیز موفق عمل کرده است؛ و موجب کاهش حد روانی (LL)، نشانه خمیری (PI) و مقدار رطوبت بهینه و افزایش چگالی خشک بیشینه و CBR شده است (Kotsewara Rao و همکاران، ۲۰۱۴).

برخی پژوهش‌ها با هدف کاهش مصرف آهک یا سیمان، به استفاده هم‌زمان از آن‌ها با دیگر افزودنی‌ها پرداخته‌اند. مانند: تثبیت خاک مارن توسط آهک و نانوسیلیس<sup>۱۳</sup> (عساکره و همکاران، ۱۳۹۸) تثبیت خاک مارنی با سیمان و نانو سیلیس (امیری و همکاران، ۱۳۹۹)، بهسازی خاک‌های مارنی غرب بندرعباس با مصالح درشت‌دانه، آهک و سیمان (اصغری کلجاهی و همکاران، ۱۳۹۳) و استفاده از آهک و دورریزهای صنعتی برای تثبیت مارن (Seco و همکاران، ۲۰۱۱). برای نمونه Tasalloti و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی استفاده از مخلوط سرباره و یک افزودنی دیگر پرداخته‌اند. و موفق به افزایش مقاومت و کاهش نشست شده‌اند. افزودن ۱۵٪ چسباننده (۹۰٪ سرباره شکسته و ۱۰٪ کلسینه تخم‌مرغ<sup>۱۴</sup> (CES)) به مارن متراکم موجب افزایش مقاومت فشاری، برشی؛ رشد ۲۲ برابری عدد CBR، افزایش ۱/۴ برابری چسبندگی و رسیدن زاویه اصطکاک از ۱۵ به ۳۵ درجه می‌گردد. اثر چسباننده با افزایش سن افزایش می‌یابد (Bensaifi و همکاران، ۲۰۱۹). در فرآیند تثبیت رس با سرباره BOF، یک دوره خاموشی وجود دارد، که در طی آن مقاومت خاک رس بهسازی شده با سرباره BOF طی ۰/۵ تا ۲ ساعت از آغاز عمل‌آوری افزایش نمی‌یابد (Kang و همکاران، ۲۰۱۹).

Dubios و همکاران (۲۰۰۹) کاربرد رسوب‌های دریایی تثبیت‌شده را به‌عنوان مصالح لایه اساس روسازی تأیید کرده‌اند. برای تثبیت رس لایروبی، Kang و همکاران (۲۰۱۹) از سرباره فولادی BOF بهره برده‌اند.

Zhang و همکاران (۲۰۲۰) برای تثبیت خاک لایروبی از سیمان و سرباره کوره بلند (GGBS)<sup>۱۵</sup> و He و همکاران (۲۰۲۰) از سه محصول جانبی صنعت استفاده کرده‌اند. MolaAbasi و همکاران (۲۰۲۰) برای تثبیت خاک SP<sup>۱۶</sup>، نتایج موفق جایگزینی بخشی از سیمان مصرفی با زئولیت<sup>۱۷</sup> را گزارش کرده‌اند. Thomas و Rangaswamy (۲۰۲۰) در تثبیت خاک از ترکیب افزودنی‌های نوین (نانوسیلیس و بیوانزیم<sup>۱۸</sup>)، Liu و همکاران (۲۰۲۰) از لیگنین بدون گوگرد<sup>۱۹</sup>، Zeng و همکاران (۲۰۲۱) از فسفوژنپس<sup>۲۰</sup> و

دارد. با افزودن سیمان یا آهک؛ رطوبت بهینه، افزایش و ویژگی مقاومتی و باربری خاک به‌نحو چشمگیری افزایش می‌یابند؛ همچنین موجب کاهش میزان چگالی خشک بیشینه و ویژگی خمیری خاک می‌شوند (اصغری کلجاهی و همکاران، ۱۳۹۳). برای افزایش کارایی مارن، تثبیت با افزودنی‌های آهک و سیمان پرتلند یک روش متداول است. بسیاری از مطالعات، اثرات مثبت افزودن آهک و سیمان را نشان داده‌اند (Elsawy و Schanz، ۲۰۱۷؛ Ojuri و همکاران، ۲۰۱۷؛ Ranaivomanana و همکاران، ۲۰۱۸؛ Benyahia و همکاران، ۲۰۲۰). برای تثبیت مارن، از نظر مقاومت، دوام و عملکرد؛ سیمان نسبت به آهک برتر است (Al-Amoudi و همکاران، ۲۰۱۰). اما Elert و همکاران (۲۰۱۸) اثربخشی تثبیت مارن (به‌ویژه مارن دارای دولومیت) با آهک سرشار از منیزیم را زیر سؤال برده‌اند.

پرکاربردترین تثبیت‌کننده‌ها شیمیایی؛ آهک، سیمان پرتلند و خاکستر بادی هستند (Stoltz و همکاران، ۲۰۱۲). با این حال، تولید آهک و سیمان مصرف انرژی زیاد و زیان قابل‌توجه زیست-محیطی دارد. تولید سیمان موجب انتشار ۵٪ از CO<sub>2</sub> ایجادشده توسط بشر شده است (Worrell و همکاران، ۲۰۰۱) و (Kirkpatrick و Scrivener، ۲۰۰۸). تولید هر تن کلینکر<sup>۱۱</sup> بیش از ۰/۸ تن CO<sub>2</sub> تولید می‌کند (Yang و همکاران، ۲۰۱۷). بنابراین، برای تثبیت خاک؛ تثبیت‌کننده‌های پایدار (مانند سرباره فولاد و دورریزهای صنعتی) جایگزین سیمان پیشنهاد شده‌اند. در این میان، سازگاری زیست‌محیطی (ایمنی از نظر مقدار pH و مواد زیان‌آور، مانند فلزات سنگین و مواد سمی) سرباره BOF (به‌عنوان تثبیت‌کننده خاک و پرکننده)، تأیید شده است. بنابراین، به‌کارگیری سرباره فولاد؛ افزون بر کاهش هزینه پروژه‌ها و مشکلات زیست‌محیطی ناشی از تولید آهک و سیمان (کاهش انتشار CO<sub>2</sub> و مصرف انرژی)، موجب آلودگی محیط‌زیست نشده و معضل انباشت محصولات جانبی صنعت را نیز از میان می‌برد (Proctor و همکاران، ۲۰۰۰؛ Motz و Geiseler، ۲۰۰۱؛ Kang و همکاران، ۲۰۱۹).

برای تثبیت با سرباره، چند عامل کلیدی بر بهبود مقاومت تأثیر دارند؛ مانند مقدار مصرف سرباره، مقدار رطوبت مخلوط، پیش‌بهسازی سرباره و تفاوت کانی‌های رسی (Motz و Geiseler، ۲۰۰۱) و (Chan و همکاران، ۲۰۱۱). تثبیت با سرباره BOF موجب بهبود مقاومت فشاری تک‌محوری محدود نشده<sup>۱۲</sup>، پایداری حجمی (انبساط خطی تک‌بعدی) و دوام می‌گردد (Poh و همکاران، ۲۰۰۶). استفاده از مقدار بیشتر سرباره عبوری از الک ۲ میلی‌متر

16. Poorly graded sand  
17. Zeolite  
18. Nano silica and Bioenzyme  
19. Sulfur-Free Lignin  
20. Phosphogypsum

11. Clinker  
12. UCS: Unconfined Compressive Strength  
13. Nano Silica  
14. CES: Calcined Eggshell Waste  
15. Ground Granulated Blast-furnace Slag

چگالی ویژه سرباره EAF بیش از سرباره BOF می‌باشد. (رحمانی و همکاران، ۱۳۹۶؛ رحمانی و همکاران، ۱۳۹۹). همچنین، بررسی ترکیبات شیمیایی سرباره‌های به کار رفته (جدول ۱)) نشانگر وجود بیش از ۳۰٪ اکسید کلسیم در آن‌ها می‌باشد. بنابراین در صورت فعال شدن این مقدار آهک در سرباره‌های به کار رفته، تثبیت خاک رخ خواهد داد.

جدول ۱- نتایج آزمون‌های شیمیایی خاک لایروبی، مارن و دو نمونه سرباره EAF و BOF

نتایج آزمون‌های شیمیایی (درصد)				عناصر سازنده
سرباره EAF	سرباره BOF	خاک لایروبی	خاک مارن	
۱۶/۴۲	۴/۹۵	۱۹/۹۵	۲۸/۵۵	کاهش وزن بر اثر سرخ شدن
۱۸/۰۸	۲۰/۰۴	۳۸/۷۶	۱۹/۱۰	اکسید سیلیسیم (SiO <sub>2</sub> )
۶/۶۵	۴/۹۰	۷/۷۰	۴/۷۰	اکسید آلومینیم (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
۲۰/۶۰	۳۳/۶۰	۵/۴۰	۴/۷۰	اکسید آهن (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
۳۱/۰۸	۳۴/۶۸	۲۲/۹۶	۳۷/۸۰	اکسید کلسیم (CaO)
۴/۸۰	۱/۲۰	۲/۴۰	۳/۱۰	اکسید منیزیم (MgO)
۲/۰۸	۰/۱۷	۰/۲۶	۰	سولفات (SO <sub>3</sub> )

خاک مارن به کار رفته در این پژوهش، از بستر بزرگراهی در حال ساخت در شهر تبریز در شمال غرب ایران به دست آمده است. بخشی از خاک مارن که کوچک‌تر از الک نمره ۴ (۴/۷۵ میلی‌متر) بوده است؛ انتخاب شده و مورد آزمایش قرار گرفت. جنس این خاک مارنی است؛ و طبقه‌بندی آن بر اساس روش آشتو<sup>۲۴</sup> A-۳ و بر اساس روش متحد SP می‌باشد. این خاک مارنی دارای حدود ۵٪ درصد ریزدانه (کوچک‌تر از ۷۵ میکرون) و شاخص خمیری (PI) آن برابر با ۱۲ درصد است. خاک لایروبی، حاصل لایروبی بندر شهید رجایی در شمال خلیج فارس است (PGD)<sup>۲۵</sup>؛ طبقه‌بندی این خاک بر اساس روش متحد SP و بر اساس آشتو A-۳ می‌باشد. بر اساس استانداردهای ASTM D۴۹۴۳-۰۸ و ASTM D۴۳۱۸-۱۰ شاخص خمیری این خاک برابر صفر است. نمودار دانه‌بندی هر دو خاک در شکل (۲) آمده است. آشکار است تفاوت عمده این دو خاک وجود ریزدانه و شاخص خمیری ۱۲٪ در خاک مارن است. با انجام تثبیت توسط سرباره‌های ریزدانه، می‌توان اثر وجود ریزدانه خمیری در خاک‌ها را با یکدیگر مقایسه کرد.

در بسیاری از مطالعات تثبیت، مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری محدود نشده (UCS) به عنوان یک عامل کنترلی اصلی برای ارزیابی اثربخشی تثبیت‌کننده‌های خاک به کار رفته است (Goodarzi و Salimi، ۲۰۱۵).

سیمان و Pooni و همکاران (۲۰۲۱) از سولفوآلومینات کلسیم<sup>۲۱</sup> بهره گرفته‌اند. Zhang و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی اثر دما و زمان عمل‌آوری بر رفتار مکانیکی خاک لایروبی تثبیت‌شده با سیمان و GGBS پرداخته‌اند.

Yaghoubi و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی اثر تغییر دمای رس نرم دریایی تثبیت‌شده با خاکستر بادی و سرباره پرداخته‌اند. نتایج حاکی از افزایش UCS<sup>۲۲</sup> با افزایش دماست. بر اساس پژوهش Wang و همکاران (۲۰۲۰) با افزایش زمان (۷ و ۲۸ روزه) و دمای (۵، ۲۱ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد) عمل‌آوری، مقدار UCS خاک تثبیت‌شده با ترکیب GGBS، اکسید منیزیم و اکسید کلسیم افزایش می‌یابد. Salimi و Ghorbani (۲۰۲۰) به بررسی رس نرم تثبیت‌شده با GGBS و BOF در دو دمای عمل‌آوری (۲۰ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد) پرداخته‌اند.

هدف این مقاله بررسی تثبیت خاک لایروبی بندر شهید رجایی و خاک مارن تبریز با سرباره ریزدانه و مقایسه اثربخشی سرباره EAF کارخانه فولاد مبارکه اصفهان و سرباره BOF کارخانه ذوب‌آهن اصفهان، در بهسازی آن‌هاست.

## ۲- مصالح به کار رفته

در این پژوهش، برای تثبیت خاک مارن و لایروبی، از سرباره BOF و EAF گذرنده از الک نمره ۴۰ استفاده گردیده است. خاک مارن، لایروبی و ریزدانه سرباره‌های EAF و BOF در شکل (۱) نشان داده شده است. سرباره‌های EAF و BOF به کار رفته، کهنه هستند؛ بدین معنا که بیش از یک سال از تولید آن‌ها گذشته است. علت استفاده از سرباره کهنه، کاهش احتمال تورم ناشی از وجود آهک آزاد در مخلوط خاک و سرباره است (رحمانی و همکاران، ۱۳۹۹).



شکل ۱- الف) خاک مارن (Marl)، ب) خاک لایروبی (PGD)، ج) ریزدانه سرباره BOF، د) ریزدانه سرباره EAF

بر اساس آزمایش اندازه‌گیری حدود اتربرگ<sup>۲۳</sup> (D۴۳۱۸-ASTM)، سرباره به کار رفته ویژگی خمیری ندارد. بر اساس استاندارد ASTM D۸۵۴-ASTM چگالی ویژه (Gs) سرباره BOF برابر ۲/۹۱ و چگالی ویژه (Gs) سرباره EAF برابر ۳/۱۸ است. بنابراین،

24. AASHTO  
25. Persian Gulf Dredged soil

21. Calcium sulfoaluminate  
22. Unconfined Compressive Strength  
23. Atterberg limits

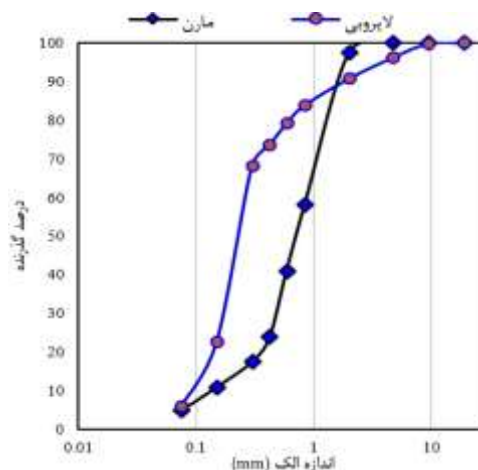
- خاک مارن (Marl) بکر؛
- ترکیب مارن (Marl) همراه با ۹٪، ۱۲٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ ریزدانه سرباره BOF؛
- ترکیب مارن (Marl) همراه با ۹٪، ۱۲٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ ریزدانه سرباره EAF؛
- ترکیب خاک لایروبی (PGD) همراه با ۹٪، ۱۲٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ ریزدانه سرباره BOF؛
- ترکیب خاک لایروبی (PGD) همراه با ۹٪، ۱۲٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ ریزدانه سرباره EAF.

پس از تهیه نمونه‌ها، عمل‌آوری آن‌ها در اتاق رطوبت و به مدت ۷ روز انجام شد. در این مقاله، هدف بررسی اثربخشی سرباره ریزدانه در تثبیت بوده است. عمر عمل‌آوری مدنظر نبوده است. بنابراین، نمونه‌های ۱۴ و ۲۸ روزه بررسی نشده‌اند. همچنین، اگر شرایط خشک و دما طبیعی باشد؛ ممکن است بر نتایج مؤثر باشد؛ که در این مقاله بررسی نشده است.

#### ۴- نتایج

##### ۴-۱- تثبیت خاک مارن

نتیجه آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری محدود نشده نمونه‌های خاک مارن بکر در برابر مارن تثبیت‌شده با سرباره ریزدانه‌ی سرباره BOF در شکل (۳) آمده است. مقاومت نهایی مارن بکر برابر ۱/۶ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است؛ که در کرنش ۱۰٪ رخ می‌دهد. بیشینه مقاومت تک‌محوری مارن تثبیت‌شده با ۹٪ ریزدانه سرباره BOF به ۳/۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع رسیده است؛ با افزایش مقدار ریزدانه سرباره BOF تا ۱۲٪ مقاومت تک‌محوی به ۳/۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌رسد؛ و پس از آن با افزایش مقدار سرباره تا ۱۵٪ و ۲۰٪، مقاومت نمونه تثبیت‌شده به ترتیب تا ۳ و ۲/۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع کاهش می‌یابد. بنابراین، بیشترین مقاومت در نمونه دارای ۱۲٪ سرباره BOF رخ می‌دهد. مقدار ضریب ارتجاعی E<sub>50</sub> خاک مارن بکر برابر با ۳۶/۹۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و برای نمونه تثبیت‌شده با ۹٪ سرباره BOF برابر ۱۰۶/۶۷ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع به دست می‌آید. این ضریب در نمونه دارای ۱۲٪ سرباره به ۲۵۳/۳۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌رسد (مقدار بیشینه). سپس، با توجه به کاهش مقاومت نهایی در نمونه‌های ۱۵٪ و ۲۰٪، مقدار E<sub>50</sub> در آن‌ها به ترتیب به ۲۳۰/۷۷ و ۱۴۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌رسد. افزودن ۹٪ سرباره BOF به مارن، کرنش نظیر بیشینه مقاومت را به ۶ درصد کاهش داده است. این روند کاهشی در نمونه‌های تثبیت‌شده با ۱۲٪ و ۱۵٪ افزودنی نیز دیده می‌شود؛ مقادیر کرنش این دو نمونه به ترتیب ۳/۶ و ۲/۸ درصد است. اما با افزایش سرباره BOF به ۲۰٪، مقدار کرنش اندکی افزایش یافته و به ۴/۸ درصد می‌رسد.



شکل ۲- دانه‌بندی خاک مارن (Marl) و لایروبی (PGD) به‌کاررفته در پژوهش

در بسیاری از پژوهش‌های انجام‌شده در مورد تثبیت (Stoltz و همکاران، ۲۰۱۲؛ Al-Mukhtar و همکاران، ۲۰۱۲؛ Aldaood و همکاران، ۲۰۱۴)، نیز مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۵۰ میلی‌متر، به‌عنوان معیار اصلی برای ارزیابی اثربخشی تثبیت‌کننده‌های خاک به‌کار رفته است. بنابراین، در این مقاله، آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری بر روی نمونه‌های دارای مقادیر مختلف سرباره ریزدانه انجام شد. به این منظور، مخلوط خاک و افزودنی موردنیاز برای حداکثر تراکم خشک توزین و یک روش اختلاط دستی برای افزایش همگنی نمونه استفاده گردید. آب موردنیاز نیز به‌عنوان رطوبت بهینه به نمونه افزوده شد. سپس مخلوط همگن مرطوب درون قالب‌های فلزی مکعبی با ابعاد ۵۰ میلی‌متر قرار گرفت.

##### ۳- آزمایش‌های انجام‌شده

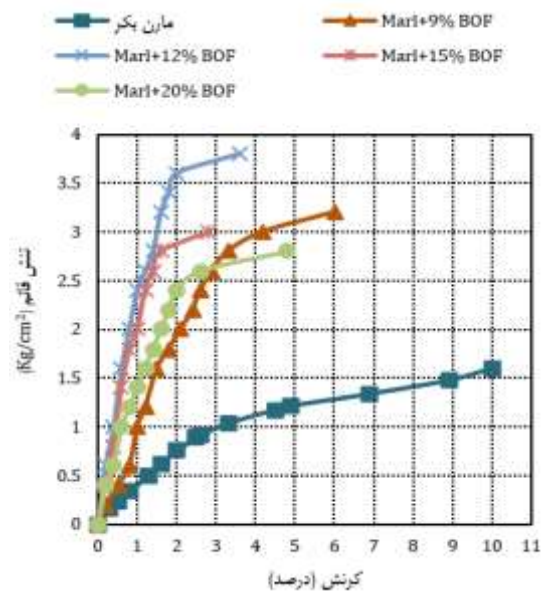
##### ۳-۱- مقدار افزودنی و روش عمل‌آوری

بر اساس نشریه ۲۶۸ (نشریه ۲۶۸، ۱۳۸۲) و دستنامه PCA (Portland Cement Association، ۱۹۹۲)، مقدار سیمان توصیه‌شده برای تثبیت خاک A-۳ برابر ۹ درصد و حدود آن ۷ تا ۱۱ درصد توصیه شده است. بنابراین؛ با توجه به هدف پژوهش برای استفاده از سرباره ریزدانه به‌جای سیمان و ضعیف‌تر بودن ویژگی چسبانندگی سرباره نسبت به سیمان، برای تثبیت خاک مقادیر ۹، ۱۲، ۱۵ و ۲۰ درصد سرباره ریزدانه در نظر گرفته شد. برای سنجش رشد مقاومت تک‌محوری مارن در اثر تثبیت با سرباره، نمونه‌های مارن بکر نیز ساخته شد. شایان‌ذکر است به دلیل عدم وجود ویژگی خمیری در خاک لایروبی، ساختن نمونه بکر از آن امکان‌پذیر نبود. بنابراین، ترکیب‌های برگزیده عبارت‌اند از:

افزودن ۹٪ سرباره EAF موجب کاهش مقاومت مارن تثبیت شده تا ۱/۰۲ کیلوگرم بر سانتی متر مربع می‌گردد. اما با افزایش مقدار افزودنی سرباره تا ۱۲٪، مقاومت مارن تثبیت شده افزایش می‌یابد و به ۱/۷ کیلوگرم بر سانتی متر مربع می‌رسد. مقاومت تک‌محوری نمونه مارن تثبیت شده با ۱۵٪ سرباره EAF، اندکی کاهش یافته و ۱/۶۱ کیلوگرم بر سانتی متر مربع می‌شود. سپس، در نمونه خاک مارن دارای ۲۰٪ سرباره EAF، مقاومت تا ۱/۸ کیلوگرم بر سانتی متر مربع افزایش می‌یابد. مقادیر ضریب ارتجاعی E50 نمونه‌های خاک مارن تثبیت شده با ۹٪ و ۱۲٪ ریزدانه سرباره EAF به ترتیب برابر ۱۶/۴۹ و ۴۷/۲۲ کیلوگرم بر سانتی متر مربع است. مقدار ضریب E50 در نمونه تثبیت شده با ۱۵٪ سرباره EAF به ۳۶/۳۴ کیلوگرم بر سانتی متر مربع می‌رسد؛ و در نمونه دارای ۲۰٪ سرباره EAF برابر با ۴۰/۹۱ کیلوگرم بر سانتی متر مربع می‌شود. کرنش نظیر بیشینه مقاومت نمونه‌های مارن تثبیت شده با ۹٪ و ۱۲٪ سرباره EAF به ترتیب برابر ۱۱/۶ و ۱۲ درصد است؛ کرنش نمونه تثبیت شده با ۱۵٪ سرباره EAF به ۱۱/۳ درصد است؛ این مقدار نشانگر آغاز روند کاهشی می‌باشد؛ اما همچنان مقدار آن بیش از کرنش مارن بکر است. در نمونه دارای ۲۰٪ افزودنی، مقدار کرنش به ۹/۱ درصد می‌رسد. مقدار تخلخل سطح نمونه‌های مارن تثبیت شده با سرباره EAF نسبت به نمونه‌های دارای ریزدانه سرباره BOF کم‌تر و ترک‌های رخ داده در نمونه‌ها کم تعداد بودند. در این مورد نیز برخی از ترک‌های رخ داده مورب بودند.

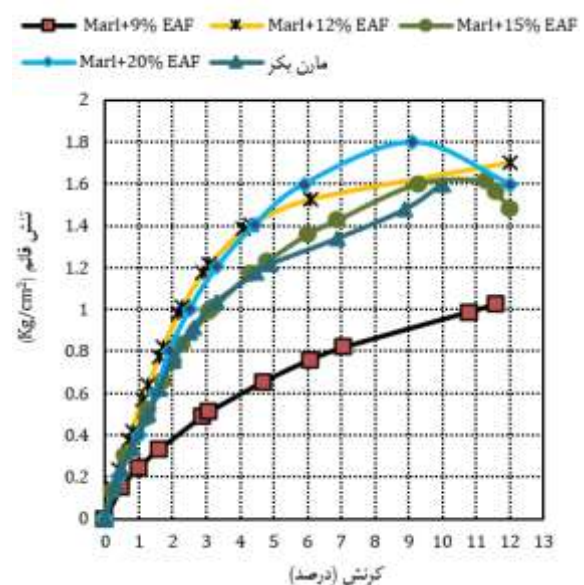
#### ۴-۲- تثبیت خاک لایروبی

نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری خاک لایروبی تثبیت شده با سرباره EAF در شکل (۵) آمده است. مقاومت نمونه خاک لایروبی تثبیت شده با ۹٪ سرباره EAF برابر ۰/۶ کیلوگرم بر سانتی متر مربع می‌باشد. پس از آن، با افزایش مقدار افزودنی سرباره به ۱۲٪ و ۱۵٪، مقاومت خاک تثبیت شده کاهش یافته و به ۰/۴ کیلوگرم بر سانتی متر مربع می‌رسد. با افزودن ۲۰٪ سرباره EAF به خاک لایروبی، بیشینه مقاومت تک‌محوری برابر با ۱/۲ کیلوگرم بر سانتی متر مربع به دست می‌آید. در میان نمونه‌های خاک لایروبی تثبیت شده با سرباره EAF بیش‌ترین مقدار E50 به نمونه دارای ۹٪ سرباره تعلق دارد؛ مقدار ضریب ارتجاعی این نمونه ۱۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع است. مقدار E50 نمونه دارای ۱۲٪ سرباره EAF برابر ۲۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع است؛ این ضریب با افزایش مقدار سرباره به ۱۵٪ و ۲۰٪ افزایش یافته و به ترتیب به ۴۰ و ۵۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع می‌رسد. با افزایش مقدار سرباره EAF از ۹٪ تا ۱۲٪، کرنش نظیر بیشینه مقاومت نمونه از ۱/۳ درصد تا ۲/۶ درصد افزایش می‌یابد و پس از آن تقریباً ثابت می‌ماند (۲/۵ و ۲/۷ درصد). نمونه‌های خاک لایروبی تثبیت شده با

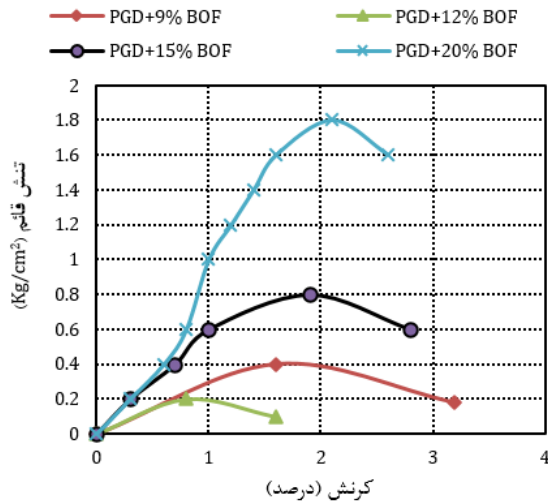


شکل ۳- نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های مارن (Marl) اصلاح شده با ریزدانه سرباره BOF و خاک مارن بکر

پس از انجام آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری، در نمونه مارن بکر چند ترک و حفره‌های سطحی پدید آمد؛ نمونه‌های مارن بهسازی شده با سرباره BOF نسبت به نمونه‌های مارن بکر، خلل و فرج کمتری داشتند و سطح آن‌ها تنها چند حفره داشت. بیشتر ترک‌های رخ داده قایم و برخی از آن‌ها حالت مورب داشتند. نتیجه آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های خاک مارن بکر در برابر مارن تثبیت شده با سرباره ریزدانه سرباره EAF در شکل (۴) آمده است.



شکل ۴- نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های مارن (Marl) اصلاح شده با ریزدانه سرباره EAF و خاک مارن بکر



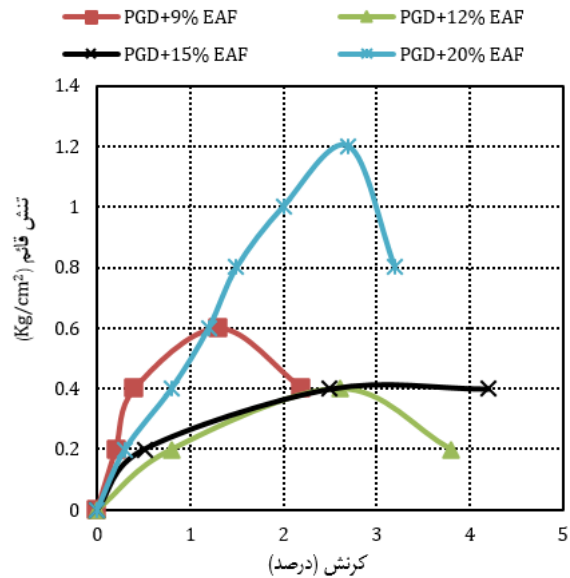
شکل ۶- نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های خاک لایروبی (PGD) اصلاح شده با ریزدانه سرباره BOF

#### ۵- نتیجه‌گیری و بحث

شکل (۷) به مقایسه مقادیر مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های خاک لایروبی و مارن تثبیت شده با سرباره و نمونه مارن بکر پرداخته است. برخی نمونه‌ها پس از رسیدن به مقاومت نهایی، به طور کلی پیوستگی خود را از دست داده‌اند و دچار فروپاشی شده‌اند (رفتار ترد). با توجه به اینکه پس از رخ دادن ترک در نمونه و شکست آن، نمونه فرو می‌ریزد؛ مشخص می‌شود که اصطکاک وجود ندارد و چسبندگی ناشی از سیمانه شدن<sup>۲۶</sup> موجب استحکام نمونه تثبیت شده گردیده است. این نمونه‌ها اصطکاک ندارند.

برخی دیگر نیز پس از رسیدن به مقاومت اوج و آغاز ترک خوردگی، همچنان مقاومت دارند؛ و رفتارشان ترد نیست. مقاومت فشاری تک محوری خاک مارن تثبیت شده با سرباره EAF، ۰/۶۴ تا ۱/۱۳ برابر مارن بکر می‌باشد. همچنین، مقدار ضریب ارتجاعی E<sub>50</sub> آن‌ها از ۰/۴۵ تا ۱/۲۸ برابر و مقدار کرنش نظیر بیشینه مقاومت آن‌ها نیز از ۰/۹۱ تا ۱/۲ برابر خاک مارن بکر است. بنابراین این نمونه‌های تثبیت شده افزایش مقاومت چندانی نداشته و مانند خاک مارن بکر رفتار کرده‌اند. اما تثبیت با سرباره BOF موجب رشد مقاومت خاک مارن و همچنین تغییر رفتار آن شده است. سرباره BOF مقاومت تک محوری خاک مارن را تا بیش از ۲ برابر افزایش داده است؛ و ضریب ارتجاعی E<sub>50</sub> و مقاومت تک محوری آن را به ترتیب نزدیک به ۷ و ۲/۵ برابر کرده است. همچنین، سرباره BOF کرنش نظیر بیشینه مقاومت خاک مارن را تا ۳/۵۷ برابر کاهش و ضریب ارتجاعی E<sub>50</sub> را تا ۶/۸۶ برابر افزایش داده است، بنابراین رفتار خاک تردتر شده است.

سرباره EAF تخلخل زیاد داشتند؛ و پس از آزمایش مقاومت فشاری در آن‌ها ناپایداری کلی رخ داد. این نمونه‌ها نتوانستند شکل خود را حفظ کنند و دچار فروپاشی شدند. وضعیت رفتار مقاومت تک محوری نمونه‌های خاک لایروبی تثبیت شده با سرباره BOF در شکل (۶) دیده می‌شود.



شکل ۵- نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های خاک لایروبی (PGD) اصلاح شده با ریزدانه سرباره EAF

مقاومت تک محوری نمونه خاک لایروبی دارای ۹٪ سرباره BOF برابر با ۰/۴ کیلوگرم بر سانتی متر مربع می‌باشد. با افزایش مقدار افزودنی سرباره تا ۱۲٪، مقاومت تک محوری تا ۰/۲ کیلوگرم بر سانتی متر مربع کاهش می‌یابد. پس از آن با افزایش مقدار سرباره BOF به ۱۵٪ و ۲۰٪ مقاومت تک محوری به ترتیب تا ۰/۸ و ۱/۸ کیلوگرم بر سانتی متر مربع افزایش می‌یابد. مقدار ضریب ارتجاعی E<sub>50</sub> خاک لایروبی تثبیت شده با سرباره BOF در نمونه‌های دارای ۹٪ و ۱۲٪ سرباره برابر ۲۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع است.

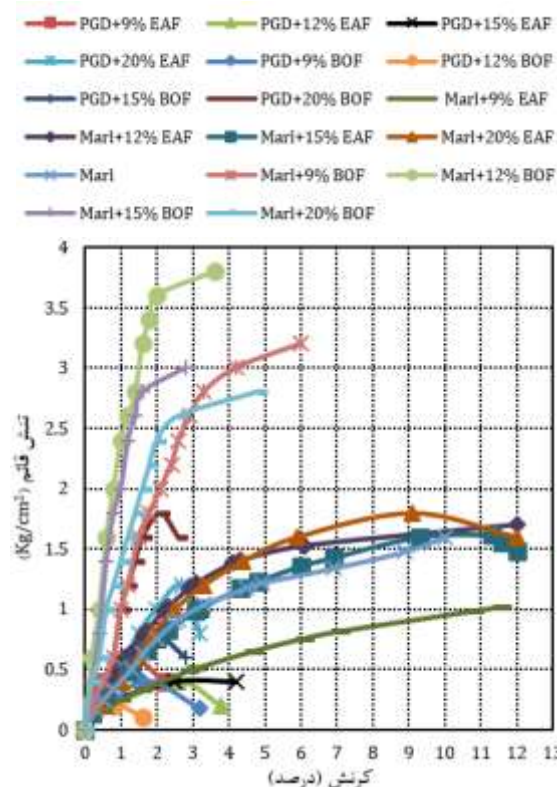
با افزایش مقدار افزودنی به ۱۵٪ و ۲۰٪، مقدار E<sub>50</sub> نمونه‌های تثبیت شده با سرباره BOF افزایش یافته و به ترتیب به ۵۷/۱۴ و ۹۴/۷۴ کیلوگرم بر سانتی متر مربع می‌رسد. مقادیر کرنش نظیر بیشینه مقاومت مانند مقاومت بیشینه است، کرنش نمونه دارای ۹٪ سرباره BOF برابر ۱/۶ درصد است، با افزایش مقدار سرباره تا ۱۲٪، کرنش به ۰/۸ درصد کاهش می‌یابد. سپس با افزایش مقدار سرباره تا ۱۵٪ و ۲۰٪، به ترتیب کرنش برابر ۱/۹ و ۲/۱ درصد می‌شود.

نمونه‌های خاک لایروبی تثبیت شده می‌باشد. به جز نمونه تثبیت شده با ۹٪ سرباره EAF، کرنش نظیر بیشینه مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با سرباره BOF کم‌تر از نمونه‌های خاک لایروبی تثبیت شده با سرباره EAF می‌باشد؛ به گونه‌ای که کم‌ترین مقدار کرنش به خاک لایروبی تثبیت شده با ۱۲٪ سرباره BOF تعلق دارد.

بنابراین اغلب نمونه‌ها دارای مقادیر مقاومت اوج و E50 کم و کرنش زیاد هستند. رفتار نمونه‌های خاک مارن تثبیت شده با سرباره BOF و نمونه خاک لایروبی تثبیت شده با ۲۰٪ سرباره BOF با دیگر نمونه‌ها تفاوت دارند. این نمونه‌ها مقاومت‌های فشاری تک‌محوری و E50 بیشتری دارند؛ بنابراین تردتر رفتار کرده‌اند. جداً از تفاوت در مقدار سولفات سرباره‌ها، علی‌رغم یکسان بودن طبقه‌بندی خاک مارن و لایروبی؛ تفاوت مقدار ریزدانه‌ی خمیری (مقدار PI) خاک‌ها، منشأ دریایی و وجود سولفات در خاک لایروبی موجب این تفاوت رفتار شده است. ریزدانه خمیری موجود در خاک مارن باعث رخ دادن واکنش شیمیایی بهتر با آهک موجود در سرباره BOF شده است؛ و بدین ترتیب مشخصات خاک مارن تا حد قابل‌ملاحظه‌ای بهبود یافته است. در مورد خاک لایروبی تثبیت شده با سرباره BOF نیز به نظر می‌رسد آهک موجود در سرباره توانسته تا حدی بر یون‌های زیان‌آور خاک لایروبی چیره شده و افزایش مقاومت و تغییر رفتار پدید آورد.

شکل (۸) به مقایسه مقاومت نهایی نمونه‌های بررسی شده پرداخته است. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، سرباره EAF تأثیر قابل‌توجهی بر رشد مقاومت خاک مارن ندارد. این تأثیر در مورد خاک لایروبی کم‌تر است. در مورد تثبیت خاک، سرباره BOF، مقاومت بالاتری ایجاد کرده است. در مورد مارن، رشد محسوس مقاومت نهایی تا ۳/۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، این مطلب را تأیید می‌کند. همچنین، به روشنی می‌توان دریافت که افزایش مقدار سرباره BOF پس از ۱۲٪ موجب کاهش مقاومت نهایی خاک مارن تثبیت شده می‌گردد. بنابراین مقدار ۱۲٪ سرباره BOF را می‌توان به‌عنوان مقدار بهینه در نظر گرفت. در مورد خاک لایروبی، مقدار بهینه وجود ندارد؛ با افزایش مقدار افزودنی، مقاومت تک‌محوری خاک لایروبی تثبیت شده افزایش می‌یابد. بنابراین، برای خاک لایروبی به کار گرفتن ۲۰٪ سرباره BOF موجب رشد مقاومت تا ۱/۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌گردد.

مقاومت این نمونه نزدیک به ۰/۶۴ مقاومت نمونه خاک مارن تثبیت شده با ۲۰٪ سرباره BOF است و ۰/۴۷ بیشینه مقاومت خاک مارن تثبیت شده می‌باشد. با توجه به یکسان بودن طبقه‌بندی هر دو خاک به کاررفته در پژوهش، تفاوت این دو نوع خاک از لحاظ شیمیایی و مقادیر ریزدانه خمیری (عدد PI) است.



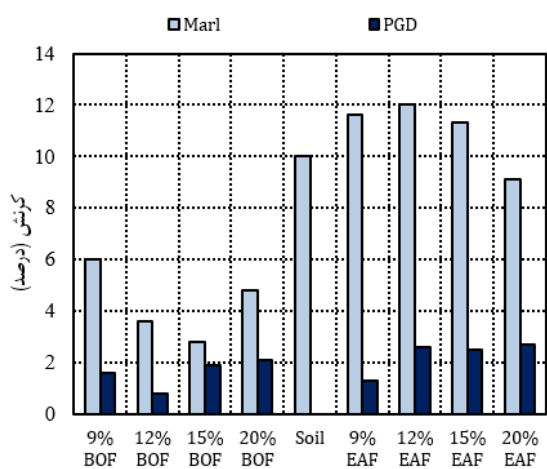
شکل ۷- مقایسه نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های خاک مارن (Marl) و لایروبی (PGD) اصلاح شده توسط ریزدانه سرباره BOF و EAF

به نظر می‌رسد عمده‌ترین دلیل این تفاوت، مقدار زیاد سولفات موجود در سرباره EAF باشد. سولفات موجود در این سرباره بیش از ۱۲ برابر سرباره BOF است. با توجه به نزدیک بودن مقدار اکسید کلسیم موجود در هر دو سرباره؛ سولفات مانع فعال شدن آهک موجود در سرباره EAF و ایجاد پیوند شیمیایی با ریزدانه رسی موجود در خاک مارنی شده است.

اثر سرباره‌های به کار رفته در تثبیت خاک لایروبی تقریباً یکسان است؛ اما تأثیر سرباره BOF بیشتر می‌باشد. این سرباره توانسته بیشینه مقاومت اوج برابر با ۱/۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع ایجاد کند؛ که نسبت به سرباره EAF رشد ۵۰٪ مقاومت بیشینه را نشان می‌دهد. در این مورد نیز، به نظر می‌رسد سولفات بیشتر موجود در سرباره EAF، موجب ضعیف‌تر شدن خاک لایروبی تثبیت شده با این افزودنی باشد. مقدار ضریب ارتجاعی E50 نمونه‌های خاک لایروبی تثبیت شده با BOF بیش از نمونه‌های دارای سرباره EAF است؛ به گونه‌ای که در مورد نمونه دارای ۲۰٪ افزودنی، E50 نمونه تثبیت شده با سرباره BOF نزدیک به ۹۰٪ بیش از نمونه نظیر می‌باشد. استثنای موجود، نمونه دارای ۹٪ سرباره EAF است؛ ضریب ارتجاعی این نمونه به ۱۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع رسیده است، که بیش‌ترین مقدار در میان

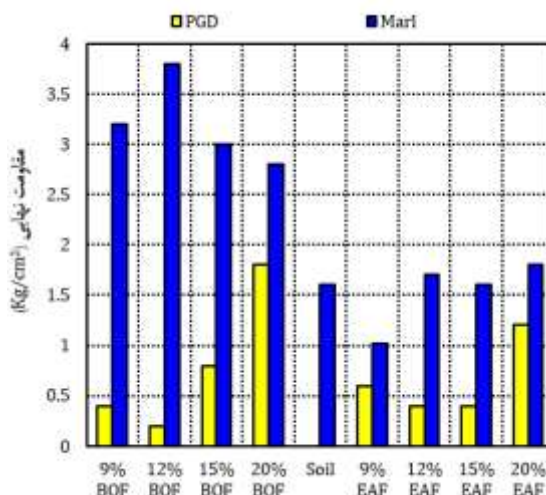


مارن تثبیت شده با EAF کم تر است؛ به گونه ای که بیشینه تفاوت آن ها به ۹/۲ درصد می رسد (۴/۲۹ برابر). این تفاوت در نمونه های خاک لایروبی تثبیت شده ۱/۹ درصد (۳/۳۸ برابر) می باشد. در کل، مقادیر کرنش نظیر بیشینه مقاومت در نمونه های خاک لایروبی تثبیت شده خیلی کم تر از نمونه های خاک مارن بکر و تثبیت شده است. به گونه ای که بیشینه کرنش در نمونه های خاک مارن تثبیت شده برابر ۱۲٪ و بیشینه کرنش نمونه های خاک لایروبی، ۲/۷٪ (۴/۴۴ برابر) است. با توجه به الگوی تغییر مقادیر کرنش، می توان نتیجه گرفت، مقادیر مقاومت نهایی با مقادیر کرنش بیشینه معکوس یکدیگر هستند؛ و درجایی که کرنش کم تر است، مقاومت نهایی بیشینه است.



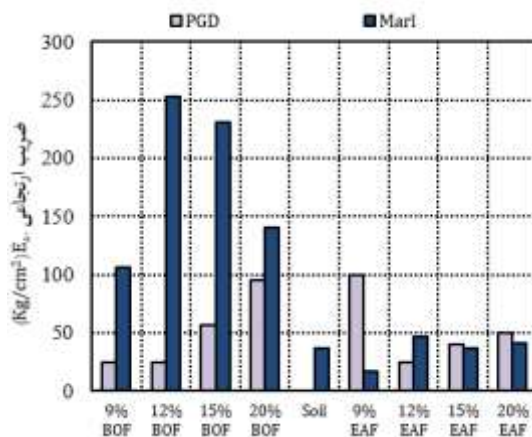
شکل ۱۰- مقایسه کرنش نظیر بیشینه مقاومت خاک مارن (Marl) و لایروبی (PGD) تثبیت شده با ریزدانه سربراره EAF و BOF با مارن بکر

شکل (۱۰) به بررسی مقادیر ضریب ارتجاعی E<sub>50</sub> نمونه های تثبیت شده پرداخته است. به جز نمونه خاک لایروبی تثبیت شده با ۹٪ سربراره EAF؛ با افزایش مقدار سربراره، مقدار ضریب ارتجاعی E<sub>50</sub> نمونه های خاک لایروبی تثبیت شده افزایش می یابد. رشد این ضریب در مورد نمونه های تثبیت شده با BOF بیشتر است. در مورد نمونه های خاک مارن تثبیت شده با EAF، نسبت به نمونه بکر رشد چندانی دیده نمی شود و ضریب ارتجاعی نمونه های دارای ۹٪ و ۱۵٪ سربراره EAF افت نیز کرده است. در میان تمام نمونه ها، نمونه های مارن تثبیت شده با BOF بهترین وضعیت را دارند. مقدار ضریب ارتجاعی نیز مانند مقاومت تک محوری در نمونه دارای ۱۲٪ سربراره BOF بیشینه است. با افزایش مقدار سربراره BOF به ۱۵٪ و ۲۰٪ مقدار E<sub>50</sub> کاهش می یابد.



شکل ۸- مقایسه بیشینه مقاومت خاک مارن (Marl) و لایروبی (PGD) تثبیت شده با ریزدانه سربراره EAF و BOF با مارن بکر

خاک لایروبی از محیط دریایی به دست آمده است؛ بنابراین این خاک دارای مقادیری سولفات می باشد. از سوی دیگر، خاک لایروبی ریزدانه خمیری ندارد. همین علل موجب تفاوت رفتار تثبیت این خاک ها با سربراره ریزدانه شده است. این نکته را به روشنی می توان در شکل (۹) مشاهده نمود. مقاومت نهایی خاک مارن تثبیت شده با سربراره ریزدانه در اغلب نمونه ها نسبت به خاک لایروبی تثبیت شده بیشتر است. در واقع، تنها مقاومت نهایی نمونه خاک لایروبی دارای ۲۰٪ سربراره BOF با نمونه های خاک مارن قابل مقایسه است.



شکل ۹- مقایسه مقادیر ضریب ارتجاعی E<sub>۵۰</sub> خاک مارن (Marl) و لایروبی (PGD) تثبیت شده با ریزدانه سربراره EAF و BOF با مارن بکر

شکل (۱۰) به مقایسه کرنش نمونه های گوناگون خاک تثبیت شده با سربراره و خاک مارن بکر پرداخته است. کرنش بیشینه نمونه های مارن تثبیت شده با سربراره BOF نسبت به خاک

## ۶- جمع بندی

بر اساس بررسی‌های انجام شده توسط آزمایش تک‌محوری بر روی خاک مارن و لایروبی تثبیت شده با ریزدانه سرباره EAF و BOF، نتایج زیر قابل استنباط است:

- میانگین مقاومت تک‌محوری مارن بکر  $1/6$  کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و میانگین کرنش نهایی آن  $10\%$  است. با افزایش ریزدانه سرباره BOF تا  $12\%$ ، مقاومت تک‌محوری مارن تثبیت شده افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. بنابراین،  $12\%$  ریزدانه سرباره BOF به‌عنوان مقدار بهینه به شمار می‌آید. افزایش مقاومت تک‌محوری خاک مارن تثبیت شده با ریزدانه سرباره BOF، نزدیک به  $140\%$  درصد است. در کل، ریزدانه سرباره BOF موجب ترد شدن رفتار خاک مارن مورد بررسی گردید.

- افزودن ریزدانه سرباره EAF، سبب تغییر چندانی در مقاومت تک‌محوری خاک مارن نمی‌گردد؛ حتی استفاده از  $9\%$  ریزدانه سرباره EAF موجب کاهش مقاومت تا نزدیک به  $40\%$  درصد می‌شود. بیشینه افزایش مقاومت تثبیت خاک مارن در این حالت، برابر  $13\%$  است که با افزودن  $20\%$  ریزدانه سرباره EAF حاصل می‌گردد. ریزدانه سرباره EAF موجب نرم شدن رفتار خاک مارن می‌شود.

- تثبیت خاک لایروبی با ریزدانه سرباره BOF موفق‌تر از تثبیت با سرباره EAF است. بیشینه مقاومت تک‌محوری خاک لایروبی تثبیت شده برای نمونه دارای  $20\%$  سرباره BOF است. اما مقاومت تک‌محوری این نمونه‌ها، نسبت به نمونه‌های خاک مارن تثبیت شده تفاوت قابل ملاحظه دارد؛ بیشینه مقاومت مارن تثبیت شده  $2/11$  برابر نمونه خاک لایروبی تثبیت شده می‌باشد.

- افزودن  $12\%$  سرباره EAF به خاک مارن موجب رسیدن ضریب ارتجاعی (E50) به  $47/22$  کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌شود. این مقدار، بیش‌ترین افزایش E50 در اثر تثبیت با سرباره EAF است. تثبیت خاک مارن با  $12\%$  سرباره BOF ریزدانه (مقدار بهینه) موجب افزایش ضریب ارتجاعی (E50) خاک مارن بکر از  $36/92$  تا  $253/33$  کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌شود. روشن است، افزودن  $12\%$  سرباره BOF بیش‌ترین تأثیر را در تثبیت خاک مارن دارد. در مورد خاک لایروبی، بیشترین مقدار ضریب ارتجاعی (E50) در نمونه دارای  $9\%$  سرباره EAF برابر  $100$  کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشد. در مورد دیگر نمونه‌های خاک لایروبی تثبیت شده؛ افزودن  $20\%$  سرباره BOF موجب رسیدن ضریب ارتجاعی (E50) از  $25$  به  $94/74$  کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع شده است. آشکار است، در مورد ضریب ارتجاعی نیز مانند مقاومت تک‌محوری، تثبیت خاک مارن اثر

قابل توجه‌تری نسبت به خاک لایروبی داشته است؛ به طوری که بیشینه ضریب ارتجاعی (E50) خاک مارن تثبیت شده بیش از  $2/5$  برابر خاک لایروبی تثبیت شده می‌باشد.

- با توجه به یکسان بودن سرباره‌های ریزدانه EAF و BOF و طبقه‌بندی خاک‌های به کار رفته در این پژوهش؛ علت اصلی تفاوت مقادیر اندازه‌گیری شده، به نبود ریزدانه خمیری و وجود یون سولفات در خاک لایروبی و تأثیر این مواد بر واکنش‌های شیمیایی میان خاک و سرباره ریزدانه در روند تثبیت ارتباط دارد.

## ۷- تقدیر و تشکر

این تحقیق با کمک مالی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، در قالب پروژه «تثبیت مصالح لایروبی شده توسط سیمان و سرباره فولاد جهت استفاده در خاک‌ریزهای مهندسی» با شماره ابلاغ  $18845-39-97$  انجام شد، که بدین وسیله از آن مرکز تشکر و قدردانی می‌کنیم. همچنین آزمایش‌های این پژوهش در آزمایشگاه بخش «ژئوتکنیک و زیرساخت» مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی؛ با همکاری تکنسین‌های محترم آزمایشگاه، جناب آقای حسنی و جناب آقای نیاکی انجام شده است. بدین وسیله از همکاری ایشان قدردانی می‌شود.

## ۸- مراجع

اصغری کلجاهی، ا. پسند س. ع، خیروری ذ، "بهبودی خاک‌های مارنی غرب بندرعباس برای استفاده در خاکریزی"، دومین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران، مهر ۱۳۹۳، کرمانشاه، ایران.

امیری م، عساکره ع، آتشپوش ح، "بررسی مقاومت و ساختار خاک‌های مارنی تثبیت شده با سیمان و نانوسیلیس"، نشریه زمین‌شناسی مهندسی،  $1399$ ،  $14$  (۱)،  $29-52$ .

پاک ع، رحمانی ا، مقدم م، درخشان نیک، پ، "لایروبی (جلد دوم) راهنمای ارزیابی آثار زیست‌محیطی"، پژوهشکده حمل و نقل، بخش پژوهشی حمل و نقل و تکنولوژی دریایی، تهران،  $1390$ .

دستورالعمل تثبیت لایه‌های خاکریز و روسازی راه‌ها، نشریه شماره  $268$ ، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور،  $1382$ .

رحمانی ا، آقای آرایبی ع، عطارچیان ن، سلامت اس، "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،  $1396$ .

رحمانی ا، افشاری م، آقای آرایبی ع، عطارچیان ن، "بررسی اثر انرژی تراکم، دانه‌بندی و نوع سرباره فولادی بر مشخصات

- Druif B, "The use of additives to stabilise dredged material", M.Sc. Thesis, Delft University of Technology, the Wroclaw University of Science and Technology, and the University of Miskolc, 2016.
- Dubois V, Dubois NE, Zentar Z, Ballivy G, "The use of marine sediments as a pavement base material", Waste Management, 2009, 29, 774-782.
- Elert K, Azañón JM, Nieto F, "Smectite formation upon lime stabilization of expansive marls", Applied Clay Science, 2018, 158, 29-36.
- EUROSLAG-The European Association Representing Metallurgical Slag Producers and Processors. Available online: <https://www.euroslag.com/products/statistics/ststatistics-2016/> (accessed on 20 January 2020).
- Fookes PG 8, Higginbottom IE, "The classification and description of near-shore carbonate sediments for engineering purposes", Geotechnique, 1975, 25 (2), 406-411.
- Goodarzi AR, Salimi M, "Stabilization treatment of a dispersive clayey soil using granulated blast furnace slag and basic oxygen furnace slag", Applied Clay Science, 2015, 108, 61-69.
- Guo JL, Bao YP, Wang M, "Steel slag in China: treatment, recycling, and management", Waste Management, 2018, 78, 318-330.
- He J, Shi XK, Li ZX, Zhang L, Feng XY, Zhou LR, "Strength properties of dredged soil at high water content treated with soda residue, carbide slag, and ground granulated blast furnace slag", Construction and Building Materials, 2020, 242, 118126, 1-9.
- Huo B, Li B, Huang S, Chen C, Zhang Y, Banthia N, "Hydration and soundness properties of phosphoric acid modified steel slag powder", Construction and Building Materials, 2020, 119319.
- Kang G, Cikmit AA, Tsuchida T, Honda H, Kim YS, "Strength development and microstructural characteristics of soft dredged clay stabilized with basic oxygen furnace steel slag", Construction and Building Materials, 2019, 203, 501-513.
- Kotsewara Rao D, Sravani G, Bharath N, "A laboratory study on the effect of steel slag for improving the properties of marine clay for foundation beds", International Journal of Scientific & Engineering Research, 2014, 5 (7), 253-259.
- Limeira J, Agulló L, Etxebarria M, "Dredged marine sand as construction material", European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2012, 16 (8), 906-918.
- Liu Y, Chang M, Wang Q, Wang Y, Liu J, Cao C, Zheng W, Bao Y, Rocchi I, "Use of sulfur-free lignin as a novel soil additive: a multi-scale experimental investigation", Engineering Geology, 2020, 269, 105551, 1-10.
- MolaAbasi H, Naderi Semsani S, Saberian M, Khajeh A, Li J, Harandi M, "Evaluation of the long-term performance of stabilized sandy soil using binary mixtures: A micro- and macro-level approach", Journal of Cleaner Production, 2020, 267, 122209, 1-18.
- Motz H, Geiseler J, "Products of steel slags an opportunity to save natural resources", Waste Management, 2001, 21 (3), 285-293.
- تراکمی و نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)، فصلنامه علمی پژوهش‌نامه حمل و نقل، ۱۳۹۹، ۶۳ (۲)، ۱۳۷-۱۵۰.
- عساکره ع، امیری م، زارعی ح، "مطالعه ریزساختاری تثبیت خاک مارن جنوب با استفاده از آهک و نانوسیلیس"، مجله علمی-پژوهشی مهندسی عمران مدرس، ۱۳۹۸، ۱۹ (۳)، ۱۱۱-۱۲۲.
- ماهوتی اع، کاتبی ه، "طبقه‌بندی خاک‌های کربناته از دیدگاه مهندسی ژئوتکنیک (مطالعه موردی: خاک مارن‌دار شهر تبریز)"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۱۳۹۷، ۴۸ (۳)، ۶۱-۷۳.
- Aiban SA, Al-Abdul Wahhab HI, Al-Amoudi OSB, "Performance of a stabilized marl base: a case study", Construction and Building Materials, 1998, 12, 329-340.
- Al-Amoudi OSB, Khan K, Al-Kahtani NS, "Stabilization of a Saudi calcareous marl soil", Construction and Building Materials, 2010, 24, 1848-1854.
- Aldaood A, Bouasker M, Al-Mukhtar M, "Geotechnical properties of lime-treated gypseous soils", Applied Clay Science, 2014, 88-89, 39-48.
- Aldeeky H, Al Hattemleh O, "Experimental Study on the Utilization of Fine Steel Slag on Stabilizing High Plastic Subgrade Soil", Advances in Civil Engineering, 2017, 2017, 1-11.
- Al-Mukhtar M, Khatib S, Alcover JF, "Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil", Engineering Geology, 2012, 139, 17-27.
- Belhadj E, Diliberto C, Lecomte A, "Characterization and activation of Basic Oxygen Furnace slag", Cement and Concrete Composites, 2012, 34, 34-40.
- Bensaifi E, Bouteldja F, Nouaouria MS, Breul P, "Influence of crushed granulated blast furnace slag and calcined eggshell waste on mechanical properties of a compacted marl", Transportation Geotechnics, 2019, 20, 100244.
- Benyahia S, Boumezbeur A, Lamouri B, Fagel N, "Swelling properties and lime stabilization of N'Gaous expansive marls, NE Algeria", Journal of African Earth Sciences, 2020, 170, 103895.
- Brazilian Steel Industry Annual Statistics (in Portuguese), Brazilian Steel Industry Institute, Rio de Janeiro, 1998.
- Chan C, Mizutani T, Kikuchi Y, "Reusing dredged marine clay by solidification with steel slag: A study of Compressive strength", International Journal of Civil and Structural Engineering, 2011, 2 (1), 270-279.
- Chan CM, Shahri Z, "Geo-characterisation of dredged marine soils for potential reuse assessment in civil engineering applications", ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2016, 11 (11), 7193-7197.
- Deng YF, Zhang TW, Zhao Y, Liu QW, Wang Q, "Mechanical behavior and microstructure of steel slag-based composite and its application for soft clay stabilization", Eur. J. Environ. Civil Eng., 2017, 21, 1-16.

- Strength Performance of Two Coal Wash-BOS Slag Mixtures., 2359-2368.
- Teng X, Li J, Wang Z, Liu W, Song D, Chun Z, Deng X, "Treatment of methyl blue wastewater by steel slag particle three-dimensional electrode system", *Science of Advanced Materials*, 2020, 12 (3), 344-349.
- Thomas G, Rangaswamy K, "Dynamic soil properties of nanoparticles and bioenzyme treated soft clay", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 137, 106324, 1-10.
- Wang F, Shen Z, Liu R, Zhang Y, Xu J, Al-Tabbaa A, "GMCs stabilized/solidified Pb/Zn contaminated soil under different curing temperature: Physical and microstructural properties", *Chemosphere*, 2020, 239, 124738, 1-8.
- Wilkinson A, Haque A, Kodikara J, "Stabilisation of clayey soils with industrial by-products: part A", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Ground Improvement*, 2010, 163 (G13), 149-163.
- World Steel in Figures, World Steel Association, 2020, <https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/World-Steel-in-Figures.html>
- Worldsteel Association. Steel Industry Co-Products. Available online: [https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:1b916a6d-06fd-4e84-b35d-c1d911d18df4/Fact\\_By-products\\_2018.pdf](https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:1b916a6d-06fd-4e84-b35d-c1d911d18df4/Fact_By-products_2018.pdf) (accessed on 20 January 2020).
- Worrell E, Price LK, Martin N, Hendriks C, Ozawa Meida L, "Carbon dioxide emissions from the global cement industry", *Annual Review of Energy and the Environment*, 2001, 26, 303-329.
- Yaghoubi M, Arulrajah A, Miri Disfani M, Horpibulsuk S, Darmawan and Wang J, "Impact of field conditions on the strength development of a geopolymer stabilized marine clay", *Applied Clay Science*, 2019, 167, 33-42.
- Yang Y, Wang L, Cao Z, Mou C, Shen L, Zhao J, Fang Y, "CO2 emissions from cement industry in China: A bottom-up estimation from factory to regional and national levels", *Journal of Geographical Sciences*, 2017, 27, 711-30.
- Zeng LL, Bian X, Zhao L, Wang YJ, Hong ZS, "Effect of phosphogypsum on physiochemical and mechanical behaviour of cement stabilized dredged soil from Fuzhou, China", *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2021, 25, 100195, 1-11.
- Zhang WL, Zhao LY, McCabe BA, Chen YH, Morrison L, "Dredged marine sediments stabilized/solidified with cement and GGBS: Factors affecting mechanical behaviour and leachability", *Science of The Total Environment*, 2020, 733, 138551, 1-16.
- Ojuri OO, Adavi AA, Oluwatuyi OE, "Geotechnical and environmental evaluation of lime-cement stabilized soil-mine tailing mixtures for highway construction", *Transportation Geotechnics*, 2017, 10, 1-12.
- Poh HY, Ghataora GS, Chazireh N, "Soil stabilization using basic oxygen steel slag fines", *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 2006, 18 (2), 229-240.
- Pooni J, Robert D, Giustozzi F, Setunge S, Xie YM, Xia J, "Performance evaluation of calcium sulfoaluminate as an alternative stabilizer for treatment of weaker subgrades", *Transportation Geotechnics*, 2021, 27, 100462.
- Portland Cement Association, "Soil-Cement Laboratory Handbook", Portland Cement Association, Illinois, 1992.
- Proctor DM, Fehling KA, Shay EC, Wittenborn JL, Green JJ, Avent C, Bigham RD, Connolly M, Lee B, Shepker TO, Zak MA, "Physical and chemical characteristics of blast furnace, basic oxygen furnace, and electric arc furnace steel industry slags", *Environmental Science & Technology*, 2000, 34, 1576-1582.
- Qiang W, Mengxiao S, Jun Y, "Influence of classified steel slag with particle sizes smaller than 20 µm on the properties of cement and concrete", *Construction and Building Materials*, 2016, 123, 601-610.
- Ranaivomanana H, Razakamanantsoa A, Amiri AO, "Effects of cement treatment on microstructural, hydraulic, and mechanical properties of compacted soils: characterization and modeling", *International Journal of Geomechanics*, 2018, 18 (9), 04018106.
- Salimi M, Ghorbani A, "Mechanical and compressibility characteristics of a soft clay stabilized by slag-based mixtures and geopolymers", *Applied Clay Science*, 2020, 184, 105390, 1-15.
- Schanz T, Elsayy MB, "Stabilisation of highly swelling clay using lime-sand mixtures", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Ground Improvement*, 2017, 170 (4), 218-230.
- Scrivener KL, Kirkpatrick RJ, "Innovation in use and research on cementitious material", *Cement and Concrete Research*, 2008, 38, 128-136.
- Seco A, Ramírez F, Miqueleiz L, García B, Prieto E, "The use of non-conventional additives in Marls stabilization", *Applied Clay Science*, 2011, 51 (4), 419-423.
- Shi CJ, Qian JS, "High performance cementing materials from industrial slags-a review", *Resources, Conservation and Recycling*, 2000, 29, 195-207.
- Siham K, Fabrice B, Vincent D, Nor Edine A, "Beneficial use of marine dredged sand and sediments in road construction", *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2013, 1-8.
- Stoltz G, Cuisinier O, Masroufi F, "Multi-scale analysis of the swelling and shrinkage of a lime-treated expansive clayey soil", *Applied Clay Science*, 2012, 61, 44-51.
- Tasaloti SMA, Indraratna B, Chiaro G, Heitor A, "Field investigation on compaction and strength performance of two coal wash-BOS slag mixtures", [American Society of Civil Engineers IFCEE 2015 - San Antonio, Texas (March 17-21, 2015)] IFCEE 2015 - Field Investigation on Compaction and

## EXTENDED ABSTRACT

# Behavior Comparison of Marl and Dredged Soil Stabilized with Electric Arc Furnace (EAF) and Basic Oxygen Furnace (BOF) Steel Slags

Iraj Rahmani <sup>a,\*</sup>, Masoud Sadeghpour-Monfared <sup>b</sup>, Ata Aghaei Araei <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Soil and Foundation, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran

<sup>b</sup> Roads and Transportation, Building and Housing Research Center, Tehran, Iran

**Received:** 16 March 2021; **Review:** 29 May 2021; **Accepted:** 26 June 2021

### Keywords:

Marl, Persian Gulf dredged (pgd) soil, Electric arc furnace (eaf) steel slag, Basic oxygen furnace (bof) steel slag, stabilization, Unconfined Compressive Strength (UCS).

## 1. Introduction

Tabriz marl soil are Lake Carbonated sediments. The percentage of organic matter in this soil is less than 6%; and does not fit into the classification of organic soils. The carbonate content of this soil is from 10 to 35%. The classification of this soil is mostly CH and in some cases MH (Mahouti and Katabi, 1397). Dredged soil is not much different from conventional fine-grained soil and can be used in a variety of applications with stabilization. Due to poor geotechnical properties; they are stabilized for use in dredging materials in engineering applications (Chan and Shahri, 2016). To stabilize the soil; Stable stabilizers (such as steel slag and industrial waste) have been proposed to replace cement. In the meantime, the environmental compatibility (safety in terms of pH and harmful substances, such as heavy metals and toxic substances) of BOF slag (as soil stabilizer and filler) has been confirmed. Therefore, the use of steel slag; In addition to reducing project costs and environmental problems caused by lime and cement production (reducing CO<sub>2</sub> emissions and energy consumption), it does not pollute the environment and eliminates the problem of accumulation of by-products of the industry (Proctor et al., 2000; Motz and Geiseler, 2001; Kang et al., 2019).

## 2. Methodology

### 2.1. Experimental study

In this Study, Tabriz Marl and Persian Gulf Dredged (PGD) Soil are stabilized with Electric Arc Furnace (EAF) and Basic Oxygen Furnace (BOF) Steel Slags. Based on AASHTO, Classification of both soils are A-3. According to Iranian Manual no. 268 (268, 2003) and PCA Handbook (Portland Cement Association, 1992), the recommended amount of cement for A-3 soil stabilization is 9% and about 7 to 11%. Therefore; According to the purpose of the study to use fine-grained slag instead of cement and the weaker adhesive properties of slag than cement; 9, 12, 15 and 20 percent of fine-grained slag were considered for soil stabilization. To compare the effect of stabilization, Unconfined Compressive Strength (UCS) tests were done.

### 2.2. Specimens

Due to the lack of adhesion properties in the PGD soil, it was not possible to make a sample of it. Therefore, the selected specimens were:

- Marl soil;
- Marl soil stabilized with 9%, 12%, 15% and 20% of BOF slag fine grains (passing no. 40 sieve);

\* Corresponding Author

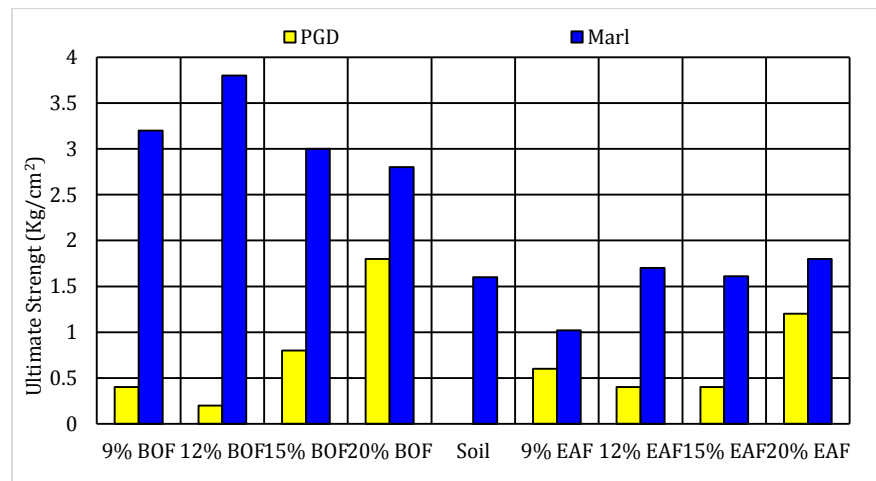
E-mail addresses: i.rahmani@bhrc.ac.ir (Iraj Rahmani), m.sadeghpour@bhrc.ac.ir (Masoud Sadeghpour-Monfared), aghaeiaraei@bhrc.ac.ir (Ata Aghaei Araei).

- Marl soil stabilized with 9%, 12%, 15% and 20% of EAF slag fine grains (passing no. 40 sieve);
  - PGD soil stabilized with 9%, 12%, 15% and 20% of BOF slag fine grains (passing no. 40 sieve);
  - PGD soil stabilized with 9%, 12%, 15% and 20% EAF slag fine grains (passing no. 40 sieve);
- After preparing the samples, they were cured in a humidity room for 7 days.

### 3. Results and discussion

#### 3.1. UCS Test Results

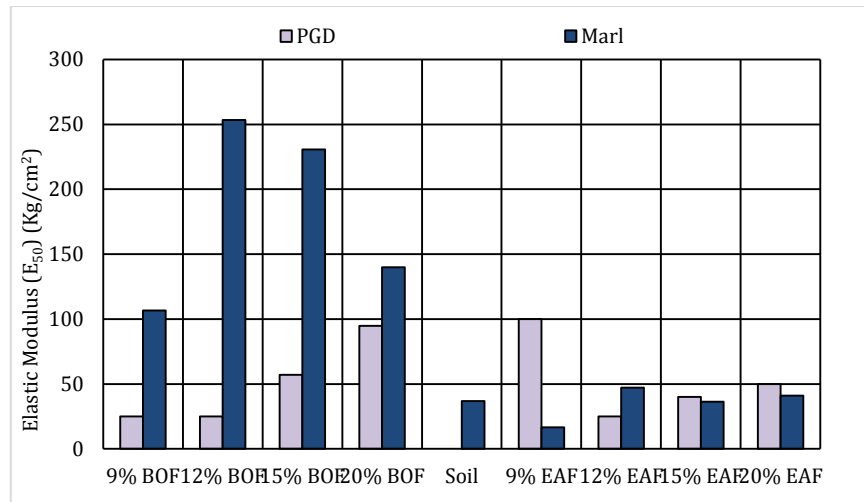
Fig. 1 compares the Ultimate UCS strengths of the tested samples. As can be seen in this figure, EAF slag has no significant effect on the growth of marl soil strength. This effect is less in the case of PGD soil. In the case of soil stabilization, BOF slag has developed a higher strength. In the case of marl, the noticeable increase in ultimate strength of up to 3.8 kg/cm<sup>2</sup> confirms this. Also, it can be clearly seen that increasing the amount of BOF slag after 12% reduces the final strength of the stabilized marl soil. Therefore, 12% of BOF slag can be considered as the optimal value. In the case of PGD soil, there is no optimal amount; as the amount of additive increases, the UCS strength of the stabilized PGD soil increases. Therefore, for PGD soil, applying 20% BOF slag increases the strength up to 1.8 kg/cm<sup>2</sup>. The strength of this sample is close to 0.64 the strength of the marl soil sample stabilized with 20% BOF slag; and 0.47 of the maximum UCS strength of marl soil. Due to the similar classification of both soils used in the study, the difference between these two types of soils is chemically and the amount of fine grains (clay minerals) (PI number). PGD soil is obtained from the marine environment; therefore, this soil contains some sulfate. On the other hand, PGD soil does not have fine grains. These reasons have caused the difference between the stabilization behavior of these soils and fine-grained steel slag. This can be clearly seen in Figure 1. The ultimate strength of fine-grained marl soils stabilized in most samples is higher than that of stabilized dredged soils. In fact, only the final strength of the PGD soil with 20% BOF sample is comparable to marl soil samples.



**Fig. 1.** Comparison of ultimate strength of Marl and PGD soils stabilized with EAF and BOF fine-grained steel slag and marl soil

#### 3.2. Elastic Modulus ( $E_{50}$ ) Comparison

Figure 2 shows the values of the Elastic Modulus ( $E_{50}$ ) of the stabilized specimens. Except for soil sample stabilized with 9% EAF slag; as the amount of slag increases, the amount of Elastic Modulus ( $E_{50}$ ) of the stabilized PGD soil samples increases. The growth of this coefficient is higher in the case of BOF-stabilized samples. In the case of marl soil samples stabilized with EAF, there is not much growth compared to the virgin sample and the elasticity of samples contain 9% and 15% of EAF slag has also decreased. Of all the specimens, BOF-stabilized marl specimens are in the best condition. The value of the Elastic Modulus ( $E_{50}$ ), like the UCS strength, is maximum in a sample with 12% BOF slag. By increasing the amount of BOF slag to 15% and 20%, the value of Elastic Modulus ( $E_{50}$ ) decreases.



**Fig. 2.** Comparison of Elastic Modulus ( $E_{50}$ ) of Marl and PGD soils stabilized with EAF and BOF fine-grained steel slag and marl soil

#### 4. Conclusions

Based on studies performed by UCS Tests on marl and PGD soils stabilized with EAF and BOF steel slags, the following results can be inferred:

- The average UCS Strength of PGD soil is 1.6 kg/cm<sup>2</sup> and its average final strain is 10%. As the BOF slag content increases to 12%, the UCS Strength of the stabilized marl increases and then decreases. Therefore, 12% of BOF steel slag is considered as the optimum value. The increase in UCS Strength of marl soil stabilized with BOF steel slag is about 140%. In general, BOF slag caused the brittle behavior of the studied marl soil.

- The addition of EAF steel slag does not cause much change in the UCS Strength of marl soil; Even the use of 9% EAF slag reduces the strength by up to 40%. The maximum increase in the stabilization resistance of marl soil in this case is 13%, which is obtained by adding 20% of EAF slag. EAF slag fines soften marl soil behavior.

- Stabilization of PGD soil with BOF slag is more successful than stabilization with EAF slag. The maximum UCS Strength of stabilized PGD soil is achieved for 20% BOF slag. However, the UCS Strength of these samples is significantly different from that of stabilized marl soil samples; the maximum strength of the stabilized marl is 2.11 times that of the stabilized PGD soil sample.

- Adding 12% of EAF slag to the marl soil increases the Elastic Modulus ( $E_{50}$ ) to 47.22 kg/cm<sup>2</sup>. This value is the largest increase of Elastic Modulus ( $E_{50}$ ) due to stabilization with EAF slag. Stabilization of marl soil with 12% BOF slag (optimum value) increases the Elastic Modulus ( $E_{50}$ ) of marl soil from 36.92 to 253.33 kg/cm<sup>2</sup>. Clearly, the addition of 12% BOF slag has the greatest effect on stabilizing marl soils. In the case of PGD soil, the maximum Elastic Modulus ( $E_{50}$ ) in a sample with 9% EAF slag is 100 kg/cm<sup>2</sup>. In the case of other stabilized PGD soil samples; Addition of 20% BOF slag resulted in an increase in the Elastic Modulus ( $E_{50}$ ) from 25 to 94.74 kg/cm<sup>2</sup>. Obviously, in the case of Elastic Modulus ( $E_{50}$ ), like UCS strength, the stabilization of marl soil had a more significant effect than PGD soil; So that the maximum Elastic Modulus ( $E_{50}$ ) of stabilized marl soil is more than 2.5 times that of stabilized PGD soil.

- Due to the similarity of EAF and BOF Steel slags and the classification of soils used in this study; The main reason for the difference in the measured values is the lack of fine grains (clay minerals) and the presence of sulfate ions in the PGD soil and the effect of these substances on the chemical reactions between the soil and the fine-grained steel slag in the stabilization process.

#### 5. References

- Chan CM, Shahri Z, "Geo-characterisation of dredged marine soils for potential reuse assessment in civil engineering applications", *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2016, 11 (11), 7193-7197. Code no 268, "Instruction Manual for stabilization and construction of Embankment, Subgrade and pavement Layers with stabilized mixture", Management and Planning Organization of Islamic Republic of Iran; 1382 2003. (In persian)
- Kang G, Cikmit AA, Tsuchida T, Honda H, Kim YS, "Strength development and microstructural characteristics of soft dredged clay stabilized with basic oxygen furnace steel slag", *Construction and Building Materials*, 2019, 203, 501-513.

- Mahouti A, Kateb, H, "Classification of Carbonated Soils from Geotechnical Point of View (Case study: Marly Soils of Tabriz)", *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 1397 (2018), 48.3 (92), 61-73. ((In persian))
- Motz H, Geiseler J, "Products of steel slags an opportunity to save natural resources", *Waste Management*, 2001, 21 (3), 285-293.
- Proctor DM, Fehling KA, Shay EC, Wittenborn JL, Green JJ, Avent C, Bigham RD, Connolly M, Lee B, Shepker TO, Zak MA, "Physical and chemical characteristics of blast furnace, basic oxygen furnace, and electric arc furnace steel industry slags", *Environ. Sci. Technol.*, 2000, 34, 1576-1582.
- Portland cement Association, "Soil-Cement Laboratory Handbook", Portland Cement Association, Illinois, 1992.