

تأثیر سرباره‌های صنعت فولادسازی بر خصوصیات ژئوتکنیکی و مشخصات کانی ساخت رس متورم‌شونده اسمکتیت

امیررضا گودرزی^{۱*}، مهدی سلیمی^۲

۱- استادیار، دانشکده مهندسی، گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد همدان

۲- کارشناسی ارشد عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد همدان،

Amir_r_goodarzi@yahoo.co.uk

تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۷/۱۶

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۳/۲۴

چکیده- هدف از پژوهش حاضر بررسی قابلیت کاربرد ترکیبات زائد صنعت فولادسازی از جمله سرباره کوره بلند (GBFS) و سرباره ساخت فولاد (BOS)، در اصلاح رفتار خاک‌های متورم‌شونده است. بدین منظور در شرایط آزمایشگاهی مقادیر صفر تا ۳۰ درصد وزنی، GBFS و BOS به رس تورمی اسمکتیت اضافه و پس از عمل‌آوری در چندین بازه زمانی مختلف (۲ ساعت تا ۹۰ روز)، مجموعه‌ای از آزمایش‌های ژئوتکنیکی و ریزساختار شامل حدود اتربرگ، تعیین هدایت الکتریکی و ϕH اندازه‌گیری تورم، مقاومت فشاری محدود نشده و تهیه طیف پراش اشعه ایکس، در راستای تجزیه و تحلیل اندرکنش خاک با سرباره‌ها انجام شد. آهک نیز به عنوان یک ماده افزودنی متداول و با هدف ارزیابی عملکرد GBFS و BOS، به صورت مجزا مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد در زمان‌های کم عمل‌آوری و با افزودن حدود ۲۰٪ سرباره، بیشتر ناشی از انجام واکنش‌های کوتاه‌مدت شامل تبادل کاتیونی و افزایش فشار اسمز، تورم خاک کنترل می‌شود. از طرفی بر اساس طیف‌های اشعه ایکس مشخص شد با عمل‌آوری مناسب (بیش از ۷ روز) و به دلیل رشد ترکیبات سیمانی به ویژه در نمونه‌های حاوی BOS، مصرف سرباره لازم برای کنترل تورم تا ۴ برابر کاهش خواهد یافت. اضافه کردن سرباره و افزایش زمان نگهداری، مانند حضور آهک باعث بهبود خصوصیات مقاومتی خاک نیز می‌شود. به گونه‌ای که مقاومت فشاری نمونه اسمکتیت همراه ۳۰ درصد BOS پس از ۹۰ روز نگهداری، تقریباً ۱۲ برابر نسبت به نمونه اولیه افزایش می‌یابد. اگر چه در حضور GBFS به دلیل قابلیت انحلال کمتر و در نتیجه محدودیت فعالیت پوزولانی، تغییرات کمتری مشاهده شد. در مجموع نتایج به دست آمده از این مطالعه بیانگر آن است که استفاده از زیاله‌های صنعت فولادسازی به‌ویژه BOS، جایگزین مناسبی برای آهک در تثبیت خاک‌های رسی مسئله‌دار بوده که علاوه بر کاهش هزینه‌های اجرایی، کمک موثری در مدیریت پسمانداری این ترکیبات و حفظ محیط‌زیست خواهد کرد.

واژگان کلیدی: اسمکتیت، GBFS، BOS، تثبیت، پتانسیل تورم، مقاومت فشاری، طیف اشعه ایکس.

۱- مقدمه

(از جمله کشور ایران) پراکنده شده‌اند [۱، ۲]. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد سازوکار تورم خاک تابعی از عوامل مختلف مانند ترکیب کانی ساخت و مشخصات شیمیایی

رس‌های متورم‌شونده جزء خاک‌های مسئله‌داری است که در بسیاری از نقاط دنیا به‌ویژه نواحی خشک و نیمه‌خشک

سیلیکا و آلومینای ذرات رسی افزایش یافته که در صورت ترکیب با یون کلسیم (Ca^{+2}) آزاد موجود در سیستم می تواند سبب تشکیل زل‌های کلسیم سیلیکات هیدراته (CSH)^۱ و کلسیم آلومینات هیدراته (CAH)^۲، سیمان شدگی ذرات و در نتیجه کاهش قابلیت جذب آب آن‌ها شود [۶]، [۱۳]. در این رابطه کوکا و همکارانش^۳ (۲۰۰۹) نشان دادند که استفاده از ترکیب سرباره و سیمان، سبب کاهش تورم خاک و بهبود کارپذیری آن می‌شود [۹]. از طرفی علاوه بر محدودیت مطالعات در مورد کاربرد سرباره‌ها برای بهسازی خاک، بسیاری از نتایج موجود [۹، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷ و ۱۸]، بر روی مصالح با قابلیت تورم کم بوده و به اندرکنش شیمیایی سرباره و خاک‌های با قابلیت تورم زیاد، کمتر توجه شده است. بنابراین در این پژوهش با انجام مجموعه-ای از آزمایش‌های مختلف با استفاده از دو نوع سرباره سعی شده است ضمن مطالعه عوامل موثر در اندرکنش خاک و سرباره، قابلیت کاربرد این ترکیبات در بهبود مشخصات مهندسی خاک‌های بسیار متورم‌شونده و همچنین امکان استفاده از آنها به جای آهک، تجزیه و تحلیل شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مشخصات مصالح مورد استفاده

مطالعات پیشین نشان می‌دهند خاک‌های متورم‌شونده بیشتر دارای کانی‌های رسی گروه اسمکتیت به ویژه مونت-موریلونیت است [۴]. بر این اساس در این پژوهش از اسمکتیت تقریباً خالص (تهیه شده از معدن انارک نائین) و با قابلیت تورم زیاد (تورم حدود ۱۴۰٪) استفاده شد. آزمایش‌های اولیه شناسایی فیزیکی مطابق آئین‌نامه ASTM

مابع منفذی اطراف ذرات رسی است [۳، ۴]. در شرایط کلی، تغییرات حجم بر اثر حضور این گونه از خاک‌ها در بستر و یا مصالح ساخت سازه‌های مهندسی می‌تواند باعث آسیب و حتی تخریب کامل طرح شود. به گونه‌ای که در کشورهای مانند آمریکا و چین سالانه میلیون‌ها دلار صرف تعمیر خسارات ناشی از تورم خاک می‌شود [۵]. بر این اساس تاکنون روش‌های متنوعی مانند تعویض مصالح، اصلاح شیمیایی، بهبود فیزیکی، اجرای پی‌های خاص و بهسازی حرارتی برای مواجهه با مشکلات ناشی از تورم و انقباض خاک‌ها ارائه شده است [۶، ۷]. به گونه‌ای که تثبیت شیمیایی با استفاده از مواد افزودنی متداولی مانند آهک جزء راهکارهای رایج برای کنترل تورم خاک است [۱، ۸]. اگرچه هزینه روزافزون این مواد و همچنین برخی از محدودیت‌های اجرایی در زمینه کاربرد آنها باعث شده که پژوهشگران به دنبال مواد جایگزین با هزینه کمتر و تاثیرگذاری بیشتر باشند. از سوی دیگر، امروزه هم راستا با رشد صنایع، مدیریت پسماندهای صنعتی با هدف جلوگیری از آلودگی محیط‌زیست از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده است. در این رابطه نظر به گسترش صنعت فولاد و حجم زیاد ترکیبات زائد (مانند انواع مختلف سرباره) تولید شده در این فرآیند، امکان به کارگیری این مواد در بخش‌های مختلف از جمله پروژه‌های عمرانی به شکل خاص مورد توجه است [۹، ۱۰]. به گونه‌ای که با وجود انجام مطالعات گسترده در زمینه کاربرد سرباره‌ها در تکنولوژی بتن [۱۱، ۱۲]، ولی پژوهش‌های زیادی در رابطه با استفاده از آنها برای اصلاح خاک صورت نگرفته است. بر پایه نتایج پژوهش‌های قبلی، سازوکار اندرکنش خاک با افزودنی‌ها به مشخصات ترکیبات تشکیل‌دهنده، پتانسیل انحلال مواد افزودنی و میزان قلیایی شدن محیط بستگی دارد [۲، ۴]. معمولاً با رشد pH، انحلال واحدهای

1- Calcium Silicate Hydrates
2- Calcium Aluminate Hydrates
3- Cokca et al.

۲-۲- آزمایش‌های شیمیایی و ریزساختاری

نمونه‌های لازم برای تعیین pH و اندازه‌گیری هدایت الکتریکی (EC) به صورت سوسپانسیون با نسبت ۱ به ۲۰ (خاک-آب) در تیوپ‌های سانتریفیوژ ساخته شدند. بعد از ایجاد تعادل (قرارگیری به مدت ۲ ساعت روی دستگاه لرزاننده)، مقادیر pH و EC هر نمونه پس از گذشت زمان عمل‌آوری موردنظر اندازه‌گیری شد. علاوه بر آزمایش‌های شیمیایی، طیف اشعه ایکس نمونه‌ها بر اساس روش اوحدی و همکاران^۳ (۲۰۱۰) [۲۱] و با استفاده از دستگاه اشعه ایکس مدل بروکر D4 تهیه و مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲-۳- آزمایش‌های ژئوتکنیکی

تعیین حد روانی و خمیری هر نمونه طبق استاندارد ASTM-D4318 انجام شد. بدین منظور ابتدا افزودنی‌ها با درصد وزنی مشخص به خاک اضافه و پس از یکنواخت کردن، رطوبتی نزدیک به حد روانی به آنها افزوده و درون ظروف پلاستیکی در بسته نگهداری می‌شدند. پس از چندین مرحله همگن‌سازی و گذشت زمان عمل‌آوری موردنظر، نمونه‌ها مورد آزمایش قرار گرفتند.

خصوصیات تورمی مصالح مورد مطالعه بر اساس روش A استاندارد ASTM-D4546 تعیین شد. در این سری از آزمایش‌ها، پس از تهیه نمونه‌های همگن خاک و افزودنی، هر نمونه با وزن مخصوص بیشینه و رطوبت بهینه درون رینگ دستگاه ادنومتر متراکم می‌شد. بعد از عمل‌آوری در مدت زمان مورد نیاز مشخصات تورمی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. تغییر مقاومت خاک رس نیز قبل و بعد از اندرکنش با مواد افزودنی مطابق روش ASTM-D2166 بررسی شد.

[۱۹] و آزمایش‌های شیمیایی طبق دستورالعمل EPA [۲۰]، روی خاک مورد مطالعه انجام و نتایج به دست آمده در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول (۱) نتایج آزمایش‌های شناسایی خاک اسمکتیت مورد مطالعه

مقدار اندازه‌گیری شده	مشخصه
مونت‌موریلونیت ۰/۷۷٪، سیلیس ۰/۱۱٪ سایر مواد ۰/۱۲٪	ترکیبات کانی ساخت (بر اساس آنالیز طیف اشعه ایکس)
۷۵	ظرفیت تبادل کاتیونی (emol/kg)
بیشتر سدیم، تا حدودی کلسیم، منیزیم و پتاسیم	کاتیون‌های تبدلی (بر اساس آزمایش تبادل کاتیونی)
۳۱۱	نشانه خمیری (%)
۱۲/۷	بیشینه دانسیته خشک (kN/m ³)
۵۰	رطوبت بهینه (%)

دو نوع سرباره شامل سرباره کوره بلند (GBFS)^۱ و سرباره فولادسازی (BOS)^۲ برای بهسازی خاک استفاده شد. ترکیبات عمده تشکیل‌دهنده سرباره‌ها بر اساس نتایج آزمایش طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس (XRF)، مطابق جدول ۲ به دست آمد.

جدول (۲) نتایج آنالیز XRF سرباره‌های مصرفی

ترکیبات	مقدار اندازه‌گیری شده (%)	
	سرباره فولادسازی	سرباره کوره‌بلند
SiO ₂	۱۲/۶	۴۲/۱
Al ₂ O ₃	۷/۲	۱۶
Fe ₂ O ₃	۱۵/۹	۳/۴
CaO	۴۸	۲۰/۱
MgO	۳/۴	۸/۸

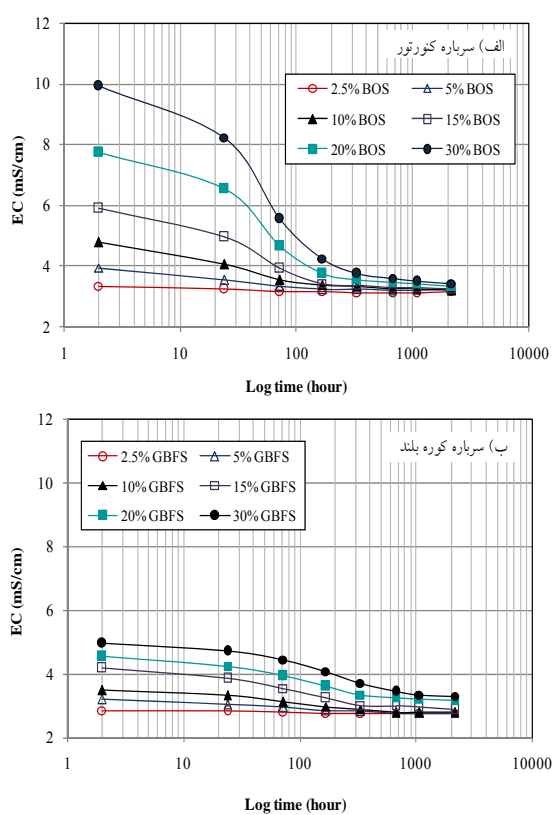
با توجه به اهداف پژوهش، آهک هیدراته خالص نیز برای کنترل تورم استفاده شد. کلیه افزودنی‌ها در یک بازه گسترده صفر تا ۳۰ درصد وزنی (شامل ۲/۵، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ درصد) به رس اسمکتیت اضافه شدند.

1- Granulated blast furnace slag
2- Basic oxygen furnace slag

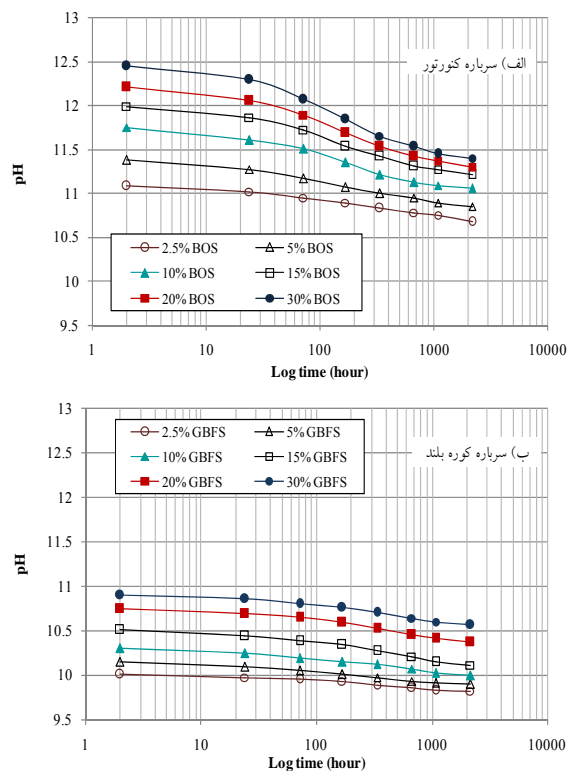
۳- بحث و بررسی

۳-۱- نتایج آزمایش‌های pH و EC

شکل ۱ تغییرات pH رس متورم‌شونده اسمکتیت حاوی درصد‌های مختلف GBFS و BOS در زمان‌های عمل‌آوری ۲ ساعت تا ۹۰ روز را نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده در شکل ۱-الف موید آن است که در حضور سرباره فولادسازی، pH خاک به شدت افزایش و از ۹/۸۴ به حدود ۱۲/۵ در نمونه حاوی ۳۰٪ کنورتور رسیده است. از طرفی، با افزایش زمان، مقدار pH روند نزولی داشته که علت آنرا می‌توان به مصرف املاح و کاهش غلظت یون هیدروکسید ارتباط داد [۶، ۱۳].



شکل (۲) تغییرات EC نمونه رس اسمکتیت در حضور سرباره‌های مورد استفاده و زمان‌های مختلف عمل‌آوری

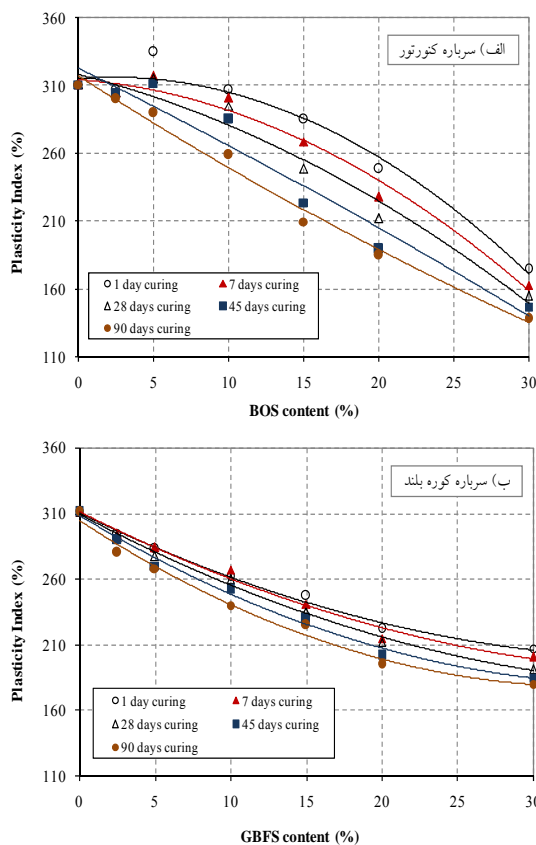


شکل (۱) تغییرات pH نمونه رس اسمکتیت در حضور سرباره‌های مورد استفاده و زمان‌های مختلف عمل‌آوری

مطابق شکل‌های ۲-الف و ۲-ب در اثر اندرکنش خاک با BOS، هدایت الکتریکی نسبت به نمونه‌های حاوی سرباره کوره بلند افزایش بیشتری نشان می‌دهد. روند تغییرات EC با افزایش بیشتر مقدار pH نمونه‌های حاوی کنورتور،

از طرفی بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۱-ب مشاهده می‌شود میزان افزایش pH نمونه‌ها در حضور GBFS و روند

عبارت دیگر صحت کم شدن قابلیت نگهداری آب به وسیله‌ی سطوح رسی در حضور سرباره است. نتایج آزمایش‌های حدود اتربرگ نشان دهنده آن است که علاوه بر مقدار افزودنی، زمان عمل‌آوری نیز بر فرآیند واکنش خاک و سرباره موثر بوده که علت آن تکمیل فعالیت‌های پوزولانی ارزیابی می‌شود [۲].



شکل (۳) تغییرات نشانه خمیری رس اسمکتیت در حضور سرباره‌های مورد استفاده و زمان‌های مختلف عمل‌آوری

۳-۳- نتایج آزمایش‌های تورم

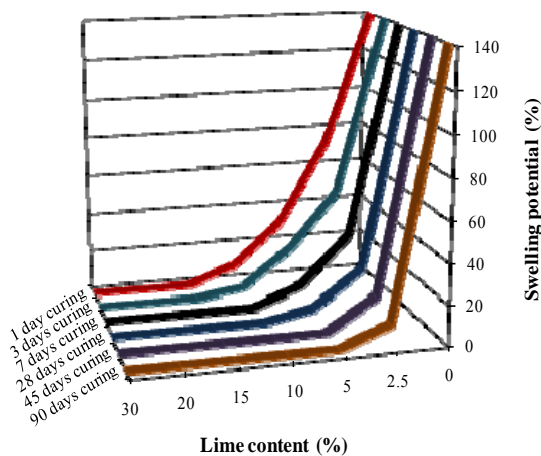
نتایج آزمایش‌های تورم در شکل ۴، نشان می‌دهد در اثر اندرکنش رس متورم‌شونده اسمکتیت با افزودنی‌های مورد مطالعه و با افزایش زمان نگهداری، پتانسیل تورم خاک به شدت کاهش یافته است.

همخوانی داشته که با توجه به نتایج مطالعات قبلی [۶]، عامل آن افزایش غلظت یون‌ها ناشی از از بین رفتن مناسب ترکیبات موجود در این نوع سرباره است. شکل ۲ نشان می‌دهد افزایش زمان عمل‌آوری سبب کاهش EC شده به گونه‌ای که در مقادیر بیشتر کنورتور، روند کاهش EC شدیدتر است. مانند نتایج آزمایش pH، علت این تغییرات بر اثر تکمیل واکنش‌های پوزولانی ارزیابی می‌شود. زیرا با توجه به انحلال مناسب BOS و پس از افزودن آن به خاک، ابتدا غلظت املاح در مایع منفذی بیشتر شده که سبب افزایش EC می‌شود. با گذشت زمان ترکیبات سرباره به تدریج مصرف و در نتیجه مقدار EC کاهش یافته است. این نتیجه مویید به کمینه رسیدن امکان ایجاد آلودگی زیست‌محیطی در اثر بهسازی خاک با سرباره نیز است. در واقع با مصرف تدریجی سرباره در اثر اندرکنش با خاک، مقدار سرباره آزاد در سیستم به کمترین اندازه ممکن رسیده و در نتیجه آثار زیانباری برای طبیعت نخواهد داشت.

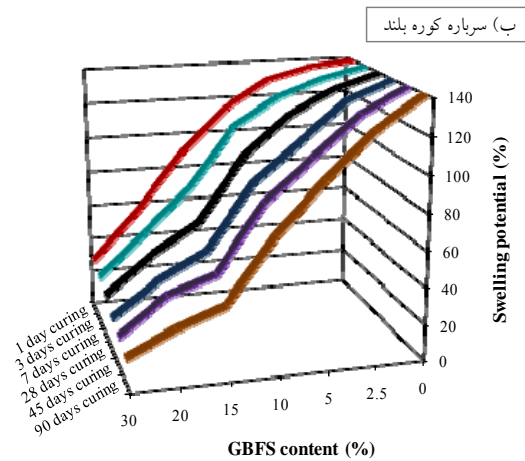
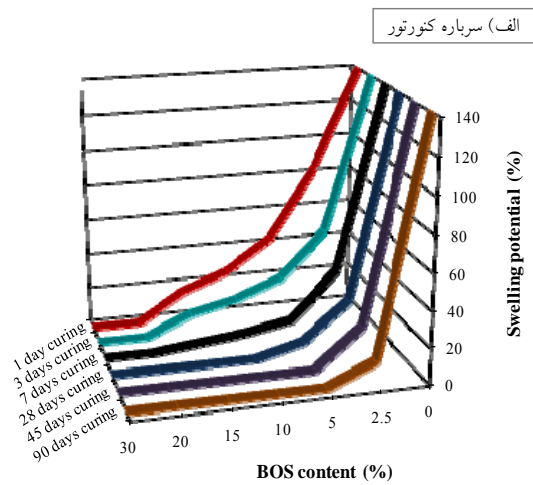
۲-۳- نتایج آزمایش‌های حدود اتربرگ

مطابق جدول ۲، ترکیبات موجود در سرباره‌های مورد مطالعه بیشتر حاوی کاتیون‌های دو و سه ظرفیتی است. بنابراین پیش‌بینی می‌شود با افزودن سرباره‌ها به نمونه رس اسمکتیت که کاتیون تبادلی غالب آن سدیم است (جدول ۱)، ضخامت لایه دوگانه اطراف سطوح رسی کاهش و قابلیت جذب آب به وسیله‌ی آن‌ها کاهش یابد. همچنین با توجه به روند تغییرات EC نمونه‌ها، افزایش غلظت در اثر اندرکنش خاک و سرباره نیز باعث افزایش فشار اسمز و تشدید فشردگی ضخامت لایه دوگانه و در نتیجه کاهش دوچندان پتانسیل جذب آب خواهد شد [۲۱]. در این راستا، نتایج آزمایش‌های حدود اتربرگ در شکل ۳ به شکل قابل توجهی نشان‌دهنده کاهش نشانه خمیری خاک و به

صورتی که برای همین سری از نمونه‌ها با عمل‌آوری کافی، مقدار سرباره لازم، حدود ۴ برابر کاهش نشان می‌دهد. بر اساس نتایج به دست آمده می‌توان گفت پس از افزودن سرباره به خاک و در زمان کم نگهداری، فرآیند کاهش قابلیت تورم ناشی از افزایش فشار اسمز و همچنین جایگزینی کاتیون‌ها است. از طرفی، همان گونه که مطرح شد در حضور مواد افزودنی با خاصیت پوزولانی گذشت زمان باعث تشکیل موادی با خاصیت سیمانی شده که در پایان امکان تغییر حجم خاک را محدود خواهد کرد. بنابراین بخشی از فرآیند کاهش تورم نمونه‌ها را می‌توان به فعالیت‌های پوزولانی نسبت داد. با توجه به اهداف پژوهش حاضر و به منظور امکان جایگزینی سرباره‌ها به جای مواد افزودنی متداول، آهک نیز به صورت مجزا به نمونه‌ها اضافه و آزمایش‌ها تکرار شده‌اند. نتایج شکل ۵ نشان می‌دهد در حضور آهک، قابلیت تورم به شدت کاهش یافته است. مشاهده می‌شود روند کاهش تورم تابعی از مقدار افزودنی و زمان عمل‌آوری بوده که علت آنرا می‌توان ناشی از ترکیب توأم واکنش‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت عنوان کرد [۱، ۹، ۱۸].



شکل (۵) تغییرات پتانسیل تورم نمونه رس اسمکتیت در حضور آهک و زمان‌های مختلف عمل‌آوری

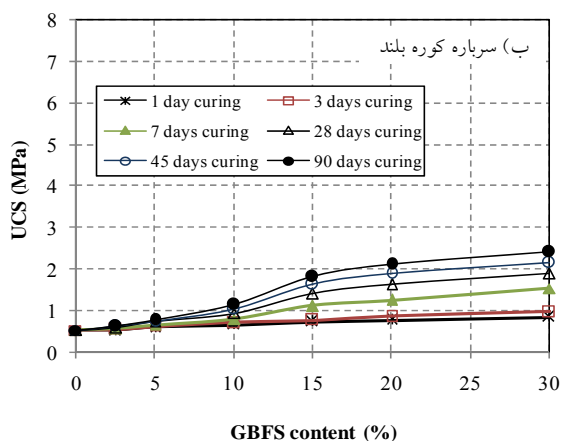
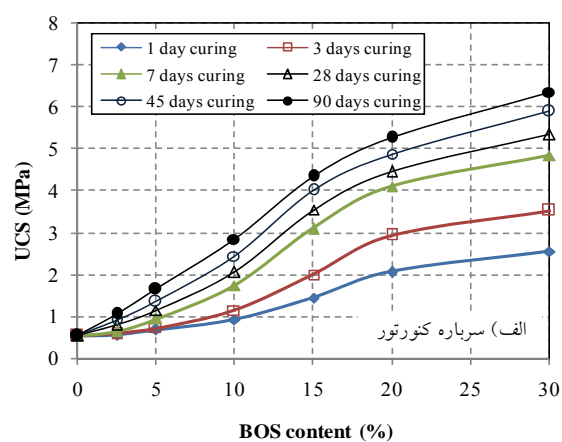


شکل (۴) تغییرات پتانسیل تورم نمونه رس اسمکتیت در حضور سرباره‌های مورد استفاده و زمان‌های مختلف عمل‌آوری

ملاحظه می‌شود روند تغییرات تورم، تابعی از نوع و مقدار سرباره بوده به شکلی که در مقادیر یکسان ماده افزودنی و به ویژه در زمان‌های کم عمل‌آوری، میزان کاهش تورم در حضور سرباره کوره بلند به مراتب کمتر از نمونه‌های حاوی کنورتور است. مقایسه نتایج شکل‌های ۳ و ۴ بیانگر آن است که تأثیر زمان عمل‌آوری بر نتایج آزمایش تورم بسیار مشهودتر از روند تغییرات حدود اتربرگ خاک است. مشاهده می‌شود در زمان‌های کم نگهداری، افزودن حدود ۲۰٪ کنورتور، تورم اسمکتیت را کنترل خواهد کرد. در

۳-۴- نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری

علاوه بر تغییرات شدید حجم، یکی دیگر از مشکلات خاک‌های توری کاهش قابل ملاحظه مقاومت آن‌ها در مجاورت با آب است [۱۵، ۴]. بر این اساس و به منظور بررسی عملکرد سرباره‌های مورد استفاده بر مشخصات مکانیکی اسمکتیت، مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌ها در شرایط قبل و بعد از اندرکنش با مواد افزودنی تعیین و نتایج آن در شکل ۶ ارائه شده است.



شکل (۶) تغییرات مقاومت فشاری نمونه رس اسمکتیت در حضور سرباره‌های مورد استفاده و زمان‌های مختلف عمل‌آوری

در شکل ۶ مشاهده می‌شود روند تغییرات مقاومت در حضور GBFS و BOS تابعی از مقدار سرباره و زمان عمل-

آوری بوده و در حضور مقادیر بیشتر سرباره و به خصوص افزایش زمان نگهداری، مقاومت نمونه‌ها به گونه قابل ملاحظه‌ای رشد می‌کند. نتایج شکل ۸ همچنین مویده آن است که در حضور مقادیر یکسان افزودنی، میزان افزایش مقاومت در نمونه‌های حاوی کنورتور به مراتب بیشتر از نمونه‌های حاوی سرباره کوره بلند می‌باشد. این یافته با نتایج آزمایش‌های حدود اتربرگ و تورم کاملاً همخوانی داشته و علت آن از بین رفتن و به عبارتی فعالیت کمتر GBFS و در نتیجه محدودیت واکنش‌های پوزولانی در این سری از نمونه‌ها پیش‌بینی می‌شود که در ادامه صحت آن از طریق انجام آزمایش ریزساختاری بررسی خواهد شد.

از سوی دیگر، با هدف مقایسه عملکرد سرباره‌ها با آهک، تغییرات مشخصات مقاومتی نمونه‌ها با استفاده از پارامتر "فاکتور بهبود مقاومت" بر اساس رابطه پیشنهادی سارید و همکاران^۲ (۲۰۱۳) [۲] به صورت زیر محاسبه و نتایج آن در شکل ۷ ارائه شده است.

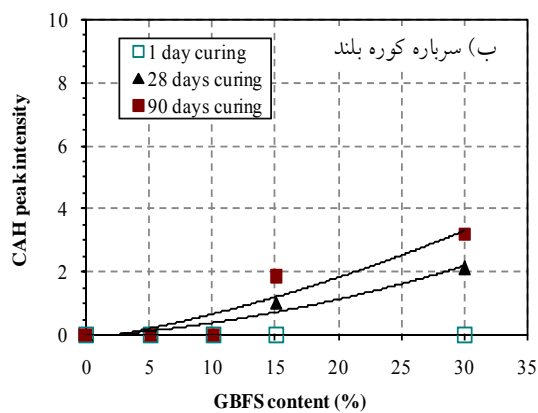
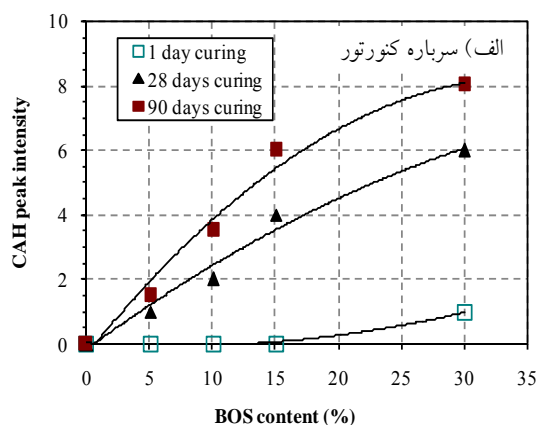
$$SIF = \frac{UCS \text{ نمونه تثبیت شده بعد از } n \text{ روز عمل‌آوری}}{UCS \text{ نمونه تثبیت نشده بعد از } n \text{ روز عمل‌آوری}}$$

بر پایه تغییرات SIF برای زمان‌های عمل‌آوری ۱، ۲۸ و ۹۰ روز در شکل ۷، ملاحظه می‌شود با افزایش میزان سرباره به ویژه کنورتور، مقاومت نمونه اسمکتیت به شکل صعودی افزایش می‌یابد. از طرفی، رگرسیون نتایج مربوط به نمونه‌های حاوی آهک، نشان می‌دهد که شاخص SIF و به عبارتی مقاومت این نمونه‌ها ابتدا روند صعودی داشته ولی با افزایش بیشتر آهک، کاهش یافته است. با استناد به نتایج مطالعات قبلی، علت آن بر اثر عدم وجود سیلیکا و آلومینای کافی در سیستم خاک-افزودنی، برای انجام واکنش‌های پوزولانی است [۶، ۲۲]. به شکلی که در حضور سرباره‌ها و به دلیل وجود مقادیر کافی از ترکیبات حاوی

1- Strength Improvement Factor (SIF)

2- Saride et al.

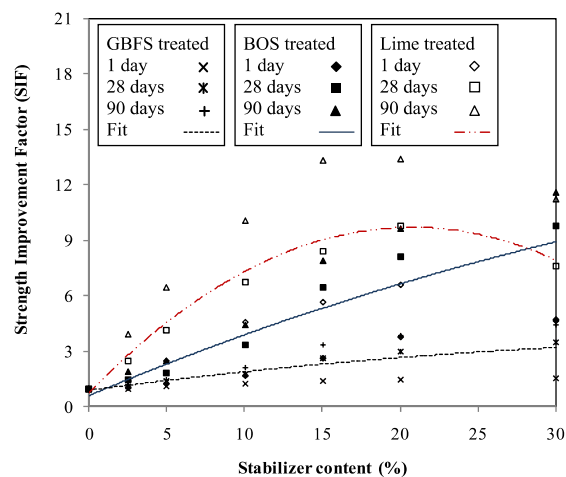
پوزولانی افزایش نشان می‌دهد. از طرفی، در نمونه‌های حاوی GBFS پس از افزودن حدود ۱۵ درصد سرباره، CAH تشکیل شده است. همچنین روند رشد این ماده نسبت به نمونه‌های حاوی BOS به مراتب کمتر است. به گونه‌ای که تاثیر مثبت رشد بیشتر این ترکیبات در نمونه‌های حاوی BOS، به راحتی در نتایج آزمایش‌های تورم و مقاومت مشاهده می‌شود.



شکل (۸) تغییرات مقدار بیشینه (پیک) آلومینات کلسیم هیدراته نمونه اصلاح شده اسمنیت در حضور سرباره کوره بلند و کنورتور

همپوشانی مناسب روند تغییرات کانی ساخت با نتایج آزمایش‌های ژئوتکنیکی، موید آنست که فرآیند تأثیر سرباره در بهبود مشخصات خاک ناشی از دو سازوکار مجزا شامل ایجاد ساختار مجتمع به دلیل واکنش‌های کوتاه‌مدت و

سیلیس و آلومینیوم در آنها (جدول ۲)، این محدودیت مشاهده نمی‌شود.



شکل (۷) مقایسه تغییرات فاکتور بهبود مقاومت خاک در حضور سرباره کوره بلند، کنورتور و آهک

۳-۵- نتایج آزمایش‌های ریزاختری

با تهیه طیف اشعه ایکس قبل و بعد از اندرکنش با افزودنی و بررسی تغییر مشخصات پیک‌های اصلی می‌توان تشکیل و رشد مواد سیمانی را بررسی کرد [۱]. بدین منظور و با هدف ارزیابی صحت مطالب ارائه شده در رابطه با وقوع واکنش‌های پوزولانی، طیف اشعه ایکس نمونه‌های اسمنیت حاوی درصد‌های مختلف GBFS و BOS تهیه و تغییرات مقدار بیشینه (پیک) $7/6$ آنگستروم (مربوط به آلومینات کلسیم هیدراته) آنها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج ارائه شده در شکل ۸ نشان می‌دهد فرآیند شروع واکنش‌های پوزولانی تابعی از نوع افزودنی، مقدار آن و شرایط عمل‌آوری است. در نمونه‌های حاوی BOS با افزودن ۵ درصد از این ماده، مقدار پیک آلومینات کلسیم هیدراته تشکیل و با بیشتر شدن مقدار افزودنی و افزایش زمان نگهداری، شدت آن و به عبارتی میزان واکنش‌های

سیمان‌شدگی ذرات بر اثر فعالیت پوزولانی است.

۴- نتیجه‌گیری

- مجموع نتایج آزمایش‌های ژئوتکنیکی و کانی ساخت این پژوهش نشان می‌دهد استفاده از ترکیبات زائد صنعت تولید فولاد مانند سرباره کوره بلند و کنورتور سبب اصلاح خصوصیات مهندسی اسمکتیت شامل کاهش نشانه خمیری، کنترل تورم و افزایش مقاومت آن می‌شود.

- مشخص شد میزان تاثیرگذاری سرباره‌های مورد مطالعه بر خصوصیات مهندسی خاک، تابعی از قابلیت انحلال آن‌ها و مقدار سرباره است. در تمامی نمونه‌ها، افزایش مقدار ماده اصلاح‌کننده سبب بهبود رفتار خاک شده اگرچه با وجود GBFS به دلیل قابلیت انحلال کمتر و در نتیجه محدودیت تبادل یونی و کاهش فعالیت پوزولانی، میزان تغییر رفتار خاک نسبت به BOS کمتر است.

- زمان عمل‌آوری نقش موثری در مقدار سرباره مورد نیاز برای اصلاح خاک دارد. در شرایط محدود عمل‌آوری، تقریباً ۲۰ درصد BOS برای حذف کامل پتانسیل تورم لازم است که با عمل‌آوری مناسب (بیش از ۷ روز) و ترکیب توأم اثر واکنش‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت، مقدار آن حدود ۴ برابر کاهش می‌یابد.

- در حضور آهک، مقاومت فشاری خاک با افزایش ماده افزودنی ابتدا روند صعودی و سپس کاهش خواهد یافت. علت این موضوع عدم وجود ترکیبات لازم برای ادامه واکنش‌های پوزولانی است. به گونه‌ای که این محدودیت در نمونه‌های حاوی سرباره مشاهده نشد.

- بر اساس نتایج این مطالعه، سرباره‌های تولید شده در فرآیند تهیه فولاد به‌ویژه BOS، جایگزین مناسبی برای آهک در تثبیت رس‌های توری بوده که علاوه بر هزینه کمتر و کاهش مشکلات اجرایی، کمک موثری در مدیریت

پسمانداری این ترکیبات می‌نماید. زیرا رها کردن آزادانه آن‌ها می‌تواند باعث بروز خطرهای بهداشتی نامطلوبی در طبیعت شود. از طرفی، نتایج این پژوهش موید آنست که با عمل‌آوری مناسب و تکمیل واکنش‌ها بین سطوح رسی و افزودنی، سرباره مورد استفاده برای تثبیت خاک به تدریج مصرف و مقدار سرباره آزاد در سیستم کاهش می‌یابد. در نتیجه آثار زیانبار زیست‌محیطی سرباره در صورت استفاده برای بهسازی خاک‌های رسی، مرتفع خواهد شد.

۵- سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان انجام شده که نویسندگان مراتب قدردانی خود را اعلام می‌دارند.

۶- منابع

- [1] گودرزی، ا.ر.، اکبری، ح.، گرکانی، گ.، تأثیر کانی ساخت مصالح رسی در بازده طرح تثبیت بستر روسازی. پژوهشنامه حمل و نقل، سال دهم، ۱۳۹۲، ۲۲۳-۲۳۳.
- [2] Saride, S., Puppala, A. J., and Chikyala, S. R.; "Swell-shrink and strength behaviors of lime and cement stabilized expansive organic clays"; *Applied Clay Science*; 85, 2013, 39-45.
- [3] Stoltz, G., Cuisinier, O., and Masroui, F.; "Multi scale analysis of the swelling and shrinkage of a lime-treated expansive clayey soil"; *Applied Clay Science*; 61, 2012, 44-51.
- [4] Seco, A., Ramírez, F., Miqueleiz, L., and García, B.; "Stabilization of expansive soils for use in construction"; *Applied Clay Science*; 51, 2011, 348-352.
- [5] Rao, M. R., Rao, A. S., and Babu, R. D.; "Efficacy of cement-stabilized fly Ash cushion in arresting heave of expansive soils"; *Geotech Geol Eng.*; 26, 2008, 189-197.
- [6] Al-Mukhtar, M., Khatlab, S., and Alcover, J. F.; "Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil"; *Engineering Geology*; 139, 2012, 17-27.

- [18] Wild, S., Kinuthia, J. M., Jones, G. I., and Higgins, D. D. "Effects of partial substitution of lime with ground granulated blast furnace slag (GGBS) on the strength properties of lime-stabilised sulphate-bearing clay soils"; *Engineering Geology*; 51, 1998, 37-53.
- [19] ASTM. "Annual Book of ASTM Standard. American Society for Testing and Materials"; Philadelphia, 2006, 4.08.
- [20] EPA, "Process design manual: land application of municipal sludge, Municipal Environ"; Res. Lab. EPA-625/1-83-016, 1983.
- [21] Ouhadi, V. R., Yong, R. N., Goodarzi, A. R., and Safari, M.; "Effect of temperature on the restructuring of the microstructure and geoenvironmental behavior of smectite"; *Applied Clay Science*; 47, 2010, 2-9.
- [22] Sahoo, J.P., and Pradhan, P.K.; "Effect of lime stabilized soil cushion on strength behaviour of expansive soil"; *Geotech Geol Eng.*; 28, 2010, 889-897.
- [7] Bozbey, I., and Garaisayev, S.; "Effects of soil pulverization quality on lime stabilization of an expansive clay"; *Environmental Earth Sciences*; 60, 2010, 1137-1151.
- [8] Al-Rawas, A. A.; "Microfabric and mineralogical studies on the stabilization of an expansive soil using cement by-pass dust and some types of slags"; *Canadian geotechnical journal*; 39, 2002, 1150-1167.
- [9] Cokca, E., Yazici, V., and Ozaydin, V.; "Stabilization of expansive clays using granulated blast furnace slag (GBFS) and GBFS-cement"; *Geotechnical and Geological Engineering*; 27, 2009, 489-499.
- [10] Liu, Z., Qian, G., Zhou, J., Li, C., Xu, Y. and Qin, Z.; "Improvement of Ground Granulated Blast Furnace Slag on Stabilization/Solidification of Simulated Mercury-Doped Wastes in Chemically Bonded Phosphate Ceramics"; *Journal of Hazardous Materials*; 157(1), 2008, 146-153.
- [11] Kim, H. K., and Lee, H. K.; "Effects of High Volumes of Fly Ash, Blast Furnace Slag, and Bottom Ash on Flow Characteristics, Density, and Compressive Strength of High-Strength Mortar"; *Journal of Materials in Civil Engineering*; 25, 2012, 662-665.
- [12] Zhang, T., Yu, Q., Wei, J., Li, J., and Zhang, P.; "Preparation of high performance blended cements and reclamation of iron concentrate from basic oxygen furnace steel slag"; *Resources, Conservation and Recycling*; 56, 2011, 48-55.
- [13] Consoli, N. C., Lopes Jr, L. D. S., Prietto, P. D. M., Festugato, L., and Cruz, R. C.; "Variables controlling stiffness and strength of lime-stabilized soils"; *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*; 137, 2010, 628-632.
- [14] Obuzor, G. N., Kinuthia, J. M., and Robinson, R. B.; "Enhancing the durability of flooded low-capacity soils by utilizing lime-activated ground granulated blastfurnace slag (GGBS)"; *Engineering Geology*; 123, 2011, 179-186.
- [15] Manso, J. M., Ortega-López, V., Polanco, J. A., and Setién, J.; "The use of ladle furnace slag in soil stabilization"; *Construction and Building Materials*; 40, 2013, 126-134.
- [16] Abdi, M. R.; "Effects of Basic Oxygen Steel (BOS) slag on Strength, Durability and plasticity of kaolinite"; *International Journal of Civil Engineering*; 9, 2011, 81-89.
- [17] Poh, H. Y., Ghataora, G. S., and Ghazireh, N.; "Soil stabilization using basic oxygen steel slag fines"; *Journal of materials in Civil Engineering*; 18, 2006, 229-240.

(Research Note)

Effect of iron industry slags on the geotechnical properties and mineralogy characteristics of expansive clayey soils

A.R. Goodarzi^{1*}, M. Salimi²

1- Assistant Prof., Faculty of Eng., Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran

2- M.Sc. of Civil Engineering, Faculty of Eng., Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran

amir_r_goodarzi@yahoo.co.uk

Abstract:

Expansive clayey soils, which are predominantly distributed in different countries such as Iran, have a complicated behavior depending on the soil mineralogy and the pore fluid chemistry. Heaving and settling in these type of soils may pose considerable problems and severe damage to geotechnical structures and geo-environmental projects that come into their contact or constructed out of them and consequent distress to people if not adequately taken care of. On the other hand, the proper disposal of by-product materials and industrial wastes that are produced in the large amount throughout the world is one of the major issues for environmentalists since leaving them to the environment directly may cause considerable health problems. Hence, the aim of this study is to evaluate and investigate the effects of two type of iron industry slags on the geotechnical properties and mineralogy characteristics of expansive clayey soils. To achieve the objectives, the admixtures were added to the soil samples in proportion of zero to 30 percent by weight and tests of the pH value, electrical conductivity (EC) measurement, consistency limits, swelling, unconfined compression strength (UCS) and micro level analysis were performed on those samples at different curing period (i.e. 1, 3, 7, 14, 28, 45 and 90 days). The obtained results revealed that under the limited curing condition (i.e. less than 3 days) and with the addition of appropriate amount of slag, the swelling potential of soil samples could be completely eliminated. This is mainly due to the short term reactions (i.e. cation exchange and osmotic pressure increasing) as confirmed by physico-chemicals experiments. Based on the micro level tests, it was found that with enough time of curing of soil samples (more than 7 days) and due to the growth of the cementation compounds such as calcium silicate hydrates (CSH) and calcium aluminate hydrates (CAH), especially in samples containing converter, the needed admixture to control heave potential of soil will be declined up to 4 times. The presented results indicate that highly expansive clayey soils can also be treated satisfactorily by calcium hydroxide and following adequate curing due to development of the pozzolanic reactions. However, with a further increase in the content of latter additive, the pozzolanic activity cannot continuously take place and the excessive addition of additive caused a reduction in the strength improvement factor (SIF), which negatively affect the geo-mechanical performance of modified soil. Such an undesirable effect was not observed in case of the slags. The samples containing slags show a continuously decrease in the swelling potential and a progressive increase in the compression strength with increasing the additive content and curing time that could overcome the difficulties associated with the expansive clays. For example, the compression strength of soil sample with 30% slag and after 90 days of curing was almost 12 times higher than the untreated sample. The macro and micro level test results of this study indicate that the utilization of iron slags, especially converter, is a good alternative for soil stabilization which reduces the cost of soil treatment and help the management of these by-products.

Keywords: Expansive clayey soils, additive, swelling, compression strength, pozzolanic reactions.